

Wybrane zagadnienia techniki antenowej i mikrofalowej: cz.6 komputerowe symulacje parametrów anten

Zadanie nr 14 – Studia podyplomowe „Bezprzewodny nadzór i monitorowanie



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna
współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
w projekcie

*„Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
– zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej –
zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna
i wzmacniania zdolności do zatrudniania
osób niepełnosprawnych”*



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

90-924 Łódź, ul. Żeromskiego 116,
tel. 042 631 28 83
www.kapitalludzki.p.lodz.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Treści

- Metody komputerowych symulacji zjawisk elektromagnetycznych
- Metoda momentów
- Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

Wybrane zagadnienia techniki antenowej i mikrofalowej - wykład 6



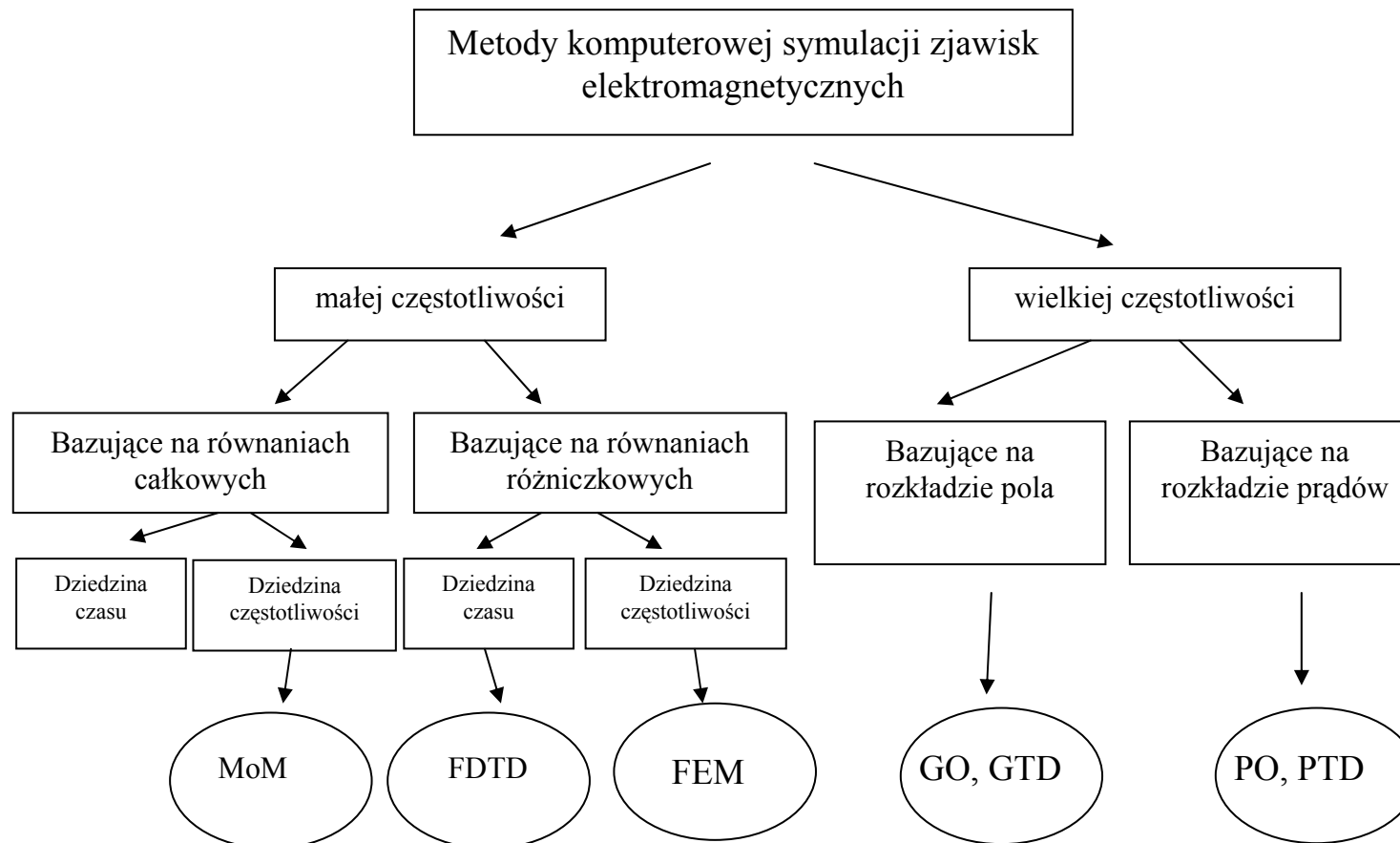
Metody komputerowych symulacji parametrów anten

- Istotnym etapem procesu projektowania anten są symulacje komputerowe
- Umożliwiają obliczanie parametrów anten bez konieczności budowania prototypów
- Ułatwiają projektowanie anten nietypowych oraz optymalizację ich konstrukcji.
- Złożoność problemu, jakim jest symulacja zjawisk elektromagnetycznych doprowadziła do powstania wielu metod komputerowych





Metody komputerowych symulacji zjawisk elektromagnetycznych



Metody komputerowych symulacji parametrów anten

- Najbardziej ogólnym sposobem matematycznego opisu zjawisk elektromagnetycznych są równania Maxwella, które dla jednorodnego ośrodka fizycznego mogą przyjąć postać równań różniczkowych

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_v, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{J}_m, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},\end{aligned}$$

D - wektor indukcji elektrycznej,
 ρ_v - gęstość ładunku elektrycznego,
 E - wektor natężenia pola elektrycznego,
 B - wektor indukcji magnetycznej,
 J_m - gęstość prądu magnetycznego,
 H - wektor natężenia pola magnetycznego,
 J_e - gęstość prądu elektrycznego.



Metody komputerowych symulacji parametrów anten

- Równania Maxwella można sformułować w postaci całkowej

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho_v dv,$$

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{J}_m \right) \cdot d\mathbf{S},$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0,$$

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J}_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}.$$





Metody komputerowych symulacji anten

- Równania Maxwella uzupełnione są opisem właściwości ośrodka, w którym rozchodzi się fala elektromagnetyczna

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E},$$

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H},$$

$$\mathbf{J}_e = \sigma \cdot \mathbf{E},$$

$$\mathbf{J}_m = \sigma^* \cdot \mathbf{H},$$

- ε - przenikalność elektryczną ośrodka,
- μ - przenikalność magnetyczna ośrodka,
- σ - konduktywność ośrodka,
- σ^* - rezystywność magnetyczna.





Metody komputerowych symulacji anten

- Do opisu zjawisk elektromagnetycznych formułuje się zwykle liniowe równania różniczkowe drugiego rzędu o następującej postaci:

$$a \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + d \frac{\partial \Phi}{\partial x} + e \frac{\partial \Phi}{\partial y} + f \Phi = g$$

- Współczynniki a , b , c są funkcjami współrzędnych x i y .





Metody komputerowych symulacji anten

- W wyniku zastosowania równań Maxwella do analizy zagadnień elektromagnetycznych otrzymywane mogą być równania całkowe.
- Często stosowane jest liniowe równanie całkowe Fredholma:

$$f(x) = a(x)\Phi(x) - \lambda \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt$$

- λ - parametr skalarny (lub zespolony),
- $K(x,t)$ i $f(x)$ - znane funkcje,
- a i b - znane granice całkowania,
- $\Phi(t)$ - szukana funkcja.





Metody komputerowych symulacji anten

- Drugą klasą równań całkowych są równania Volterry posiadające zmienną górną granicę całkowania:

$$f(x) = a(x)\Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt,$$

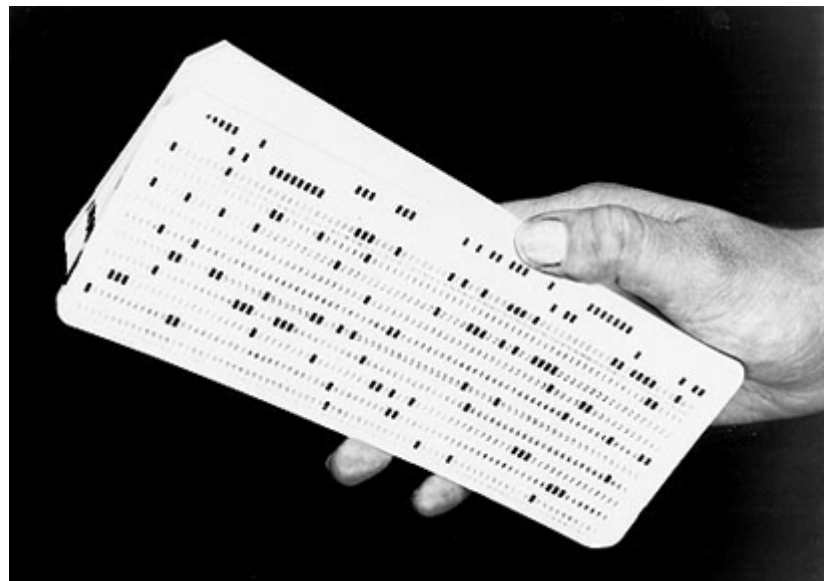
- Równania całkowe są najczęściej rozwiązywane numerycznie za pomocą metody momentów.





Metoda momentów

- Metoda momentów jest metodą numeryczną najwcześniej wykorzystaną do obliczania parametrów anten
- Początkowo opracowana do badania anten prętowych
- Obecnie stosowana m.in. do obliczania anten mikropaskowych

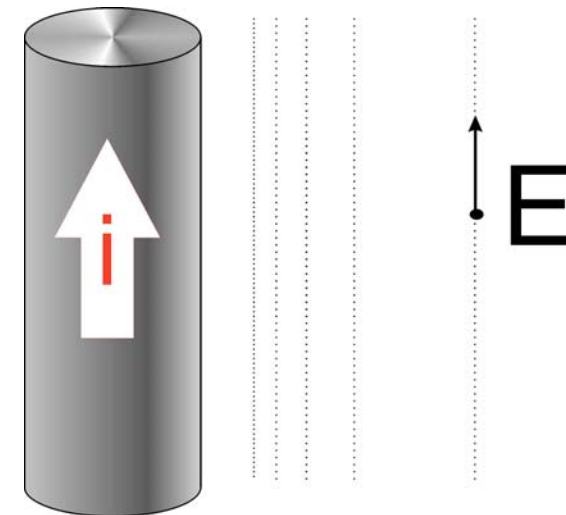


Metoda momentów

- W przypadku prostoliniowej anteny, leżącej wzdłuż osi Z można sformułować następujące równanie opisujące rozkład prądu wzdłuż jej osi:

$$-\int I(z')K(z, z')dz' = E^i(z)$$

- $I(z')$ - funkcja opisująca rozkład prądu w antenie leżącej równoległa do osi Z,
- $E_i(z)$ – składowa równoległa do osi Z wektora natężenia pola elektrycznego,
- $K(z, z')$ - jądro równania,
- z' - współrzędna punktu leżącego wzdłuż anteny.



Metoda momentów

- Anteny prętowe oraz obiekty modelowane za pomocą przewodów prostoliniowych - równania całkowe opisującego pole elektryczne wokół przewodu.
- Najczęściej stosowane są równania Pocklingtona, Harringtona i Hallena
- Do modelowania struktur złożonych z powierzchni możliwe jest również stosowanie całkowego równania opisującego pole magnetyczne.
- Równania całkowe rozwiązywane metodą momentów są sformułowane w dziedzinie częstotliwości.



Metoda momentów

- Równanie całkowe w metodzie momentów jest rozwiązywane poprzez jego przekształcenie do postaci równania macierzowego.
- Należy w tym celu dokonać przybliżenia funkcji $I(z')$ za pomocą sumy funkcji rozwinięć u_n

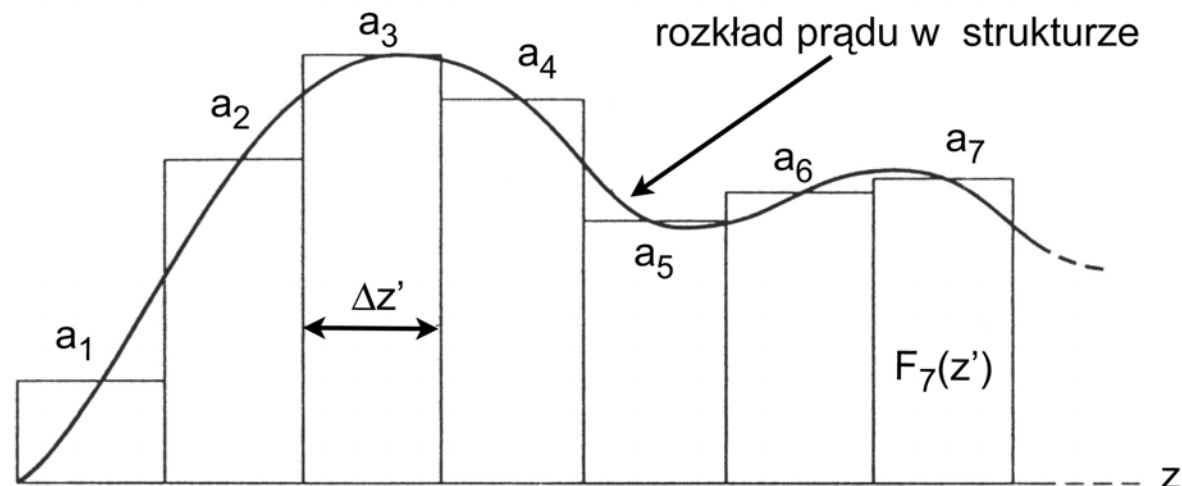
$$I(z') = \sum_{n=1}^N a_n u_n(z'),$$

- Zakłada się, że obszar, w którym określona jest funkcja $I(z')$ jest podzielony na N segmentów o długości Δz_n
- Parametry $\{a_n\}$ są szukanymi współczynnikami rozwinięcia.



Metoda momentów

- Funkcje rozwinięć mogą przybierać różne postaci zależnie od specyfiki zastosowania metody.
- Najprostszą postacią funkcji rozwinięć są funkcje impulsowe





Metoda momentów

- Natężenie pola elektrycznego wyrażone z pomocą funkcji jądra dla segmentów m :

$$-\sum_{n=1}^N a_n \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') dz' \approx E_z^i(z_m),$$

- Końcowa postać równań rozwiązywanych metodami numerycznymi:

$$[A_{mn}][X_n] = [V_m]$$

- V – natężenia pola elektrycznego
- X – pobudzenia



Metoda momentów

- Równania różniczkowe rozwiązywane numerycznie w metodzie momentów wyprowadzane są przy założeniu znacznych uproszczeń problemu z analizą złożonych obiektów
- Wrażliwa na dobór odpowiednich funkcji bazowych i wagowych dla danego problemu, co może wymagać wykorzystywania wielu funkcji w przypadku programów uniwersalnych.
- W przypadku analizy anten szerokopasmowych sformułowanie równań w metodzie momentów w dziedzinie częstotliwości prowadzi do konieczności powtarzania obliczeń dla każdej częstotliwości, dla której wymagane są wyniki, powodując wydłużenie czasu obliczeń.



Metoda różnic skończonych

- Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. Finite Difference Time Domain -FDTD).
- Metoda jest wariantem metody różnic skończonych (FEM), w którym rozważa się równania sformułowane w dziedzinie czasu.
- Metoda różnic skończonych pozwala na przybliżone rozwiązanie równania różniczkowego o postaci ogólnej poprzez jego zamianę na równanie różnicowe.
- Rozwiązywane są równania Maxwella w postaci różniczkowej, na podstawie których obliczany jest przebieg czasowy poszukiwanej wielkości.
- Transformata Fouriera pozwala uzyskać wynik również w dziedzinie częstotliwości





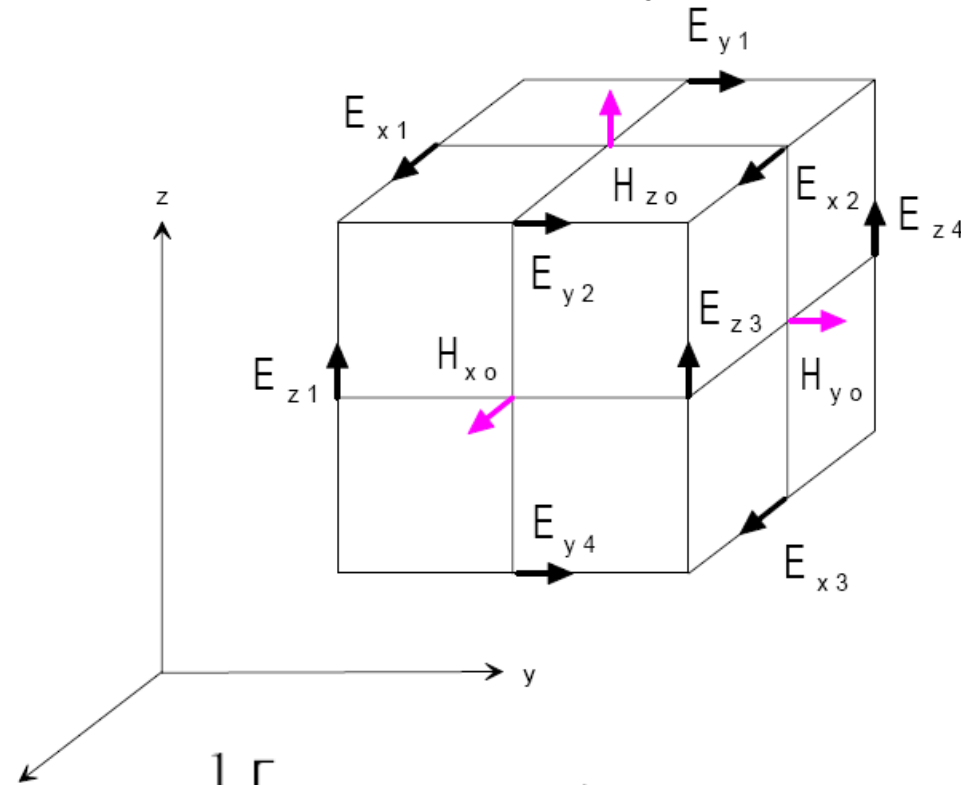
Metoda różnic skończonych

- Przekształcenie równań różniczkowych do postaci równań różnicowych wymaga dyskretyzacji przestrzeni
- Na analizowanym obszarze musi zostać rozpięta siatka, w której węzłach będzie określone rozwiązanie.
- Gęstość siatki określa przyrosty zmiennych przestrzennych i ma zatem duży wpływ na dokładność rozwiązania.
- Kształt oczek siatki decyduje o sposobie przybliżonego opisu geometrii badanego obiektu podczas tworzenia modelu zjawiska, a przez to również wpływa na dokładność obliczeń.



Metoda różnic skończonych

- Rozmieszczenie składowych pola w komórce Yee



$$\frac{1}{A} \left[E_{z1}(t) + E_{y2}(t) - E_{z3}(t) - E_{y4}(t) \right] = - \frac{\mu_0}{2\Delta t} \left[H_{x_o}(t+\Delta t) - H_{x_o}(t-\Delta t) \right]$$



Metoda różnic skończonych

- Równania rozwiązywane są iteracyjnie względem czasu i zmiennych przestrzennych.
- Składowe wektorów ***E*** i ***H*** są wyznaczone w odstępach równych połowie kroku czasowego, przy czym składowe pola elektrycznego są obliczane na podstawie składowych pola magnetycznego i vice versa.
- W metodzie różnic skończonych w dziedzinie czasu bardzo istotny jest prawidłowy dobór wielkości δ i Δt ponieważ ma on duży wpływ na dokładność otrzymywanych rozwiązań oraz stabilność numeryczną algorytmu.
- Typowe kryterium doboru określa rozmiar komórki elementarnej jako:

$$\delta \leq \lambda / 10$$





Metoda różnic skończonych

- Analiza obszarów nieograniczonych za pomocą metody FDTD wymaga zdefiniowania zewnętrznych warunków brzegowych odpowiadającym nieskończonej przestrzeni.
- Zewnętrzne warunki brzegowe dla takiego przypadku noszą nazwę warunków promieniowania.
- Często spotykanym podejściem jest wykorzystanie tzw. warstwy doskonale dopasowanej (metoda Berengera)
- Zakłada ono, że obszar rozwiązania jest otoczony warstwą całkowicie pochłaniającą fale emitowane na zewnątrz (pod dowolnym kątem).





Metoda różnic skończonych

- Metoda różnic skończonych jest bardzo uniwersalna i pozwala analizować wiele zagadnień elektromagnetyzmu.
- Często stosowana jest do symulacji anten, szczególnie w przypadku anten o złożonej geometrii.
- Bezpośrednie wykorzystanie równań Maxwella w metodzie FDTD pozwala na uwzględnienie wielu parametrów materiałowych złożonych modeli
- Czas obliczeń oraz wymagania pojemności pamięci komputera są większe niż w metodzie momentów.
- Ograniczeniem metody w pewnych zastosowaniach jest konieczność stosowania interpolacji w celu uzyskania wartości poszukiwanych wielkości fizycznych w punktach leżących poza siatką.
- Metoda jest wrażliwa na dobór kroku czasowego i rozmiarów siatki, co znacząco wpływa na zbieżność algorytmu.





KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

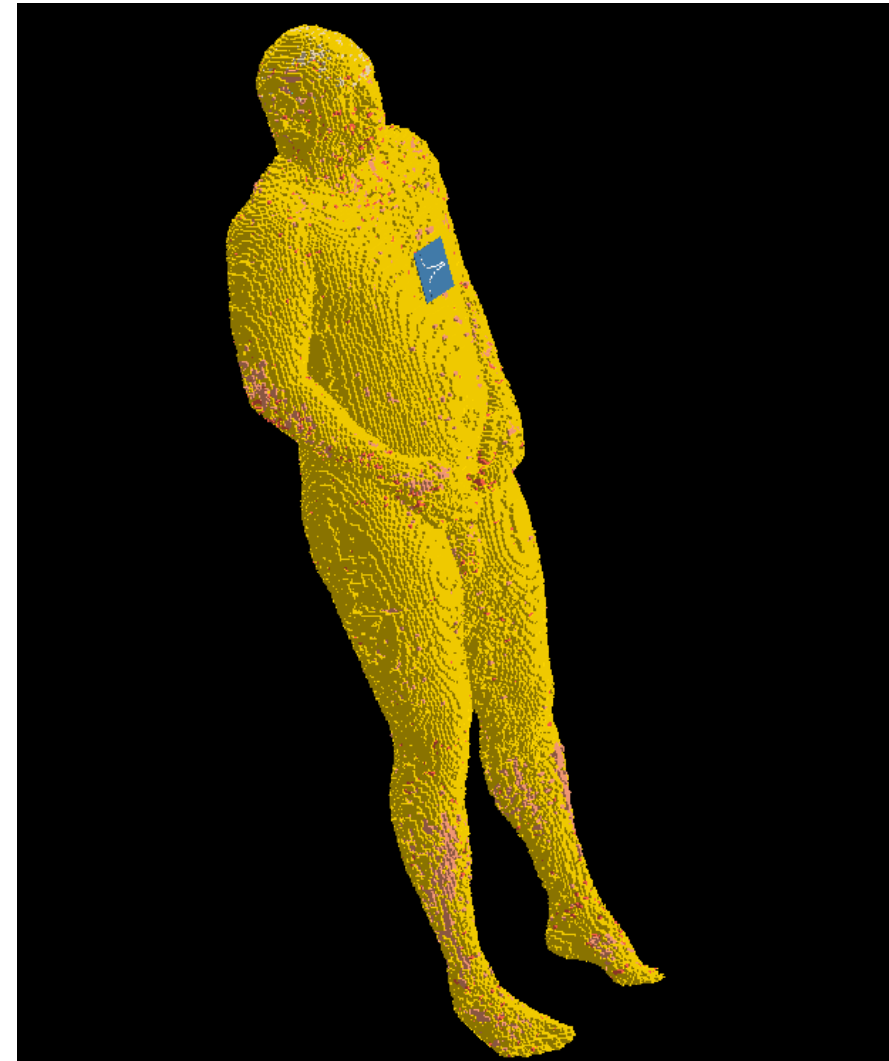
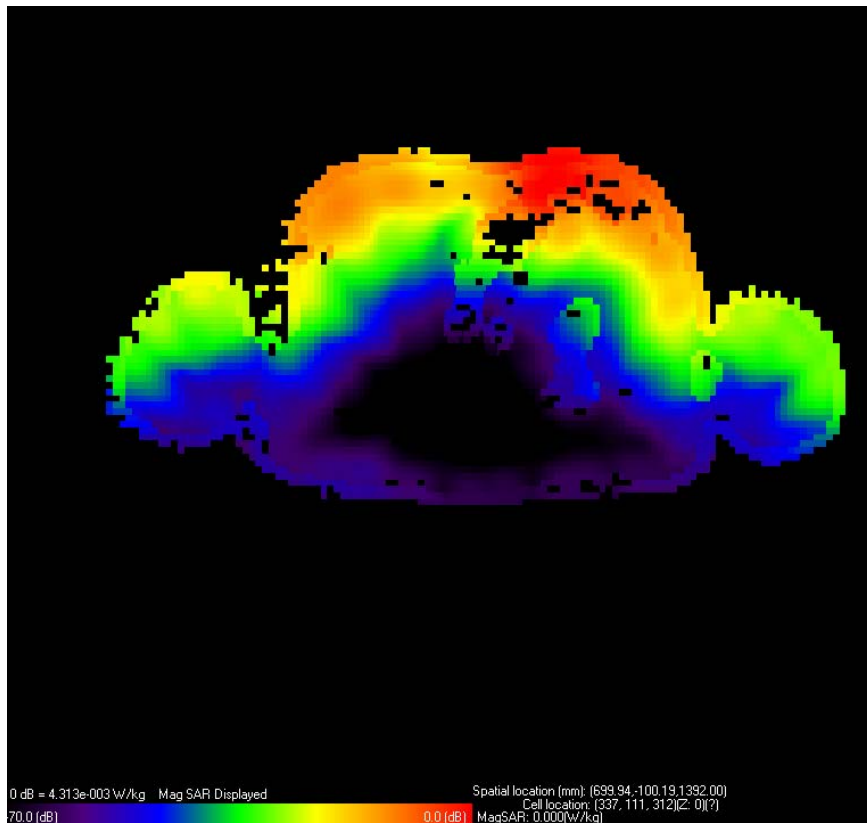
UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Metoda różnic skończonych

- Obliczanie SAR

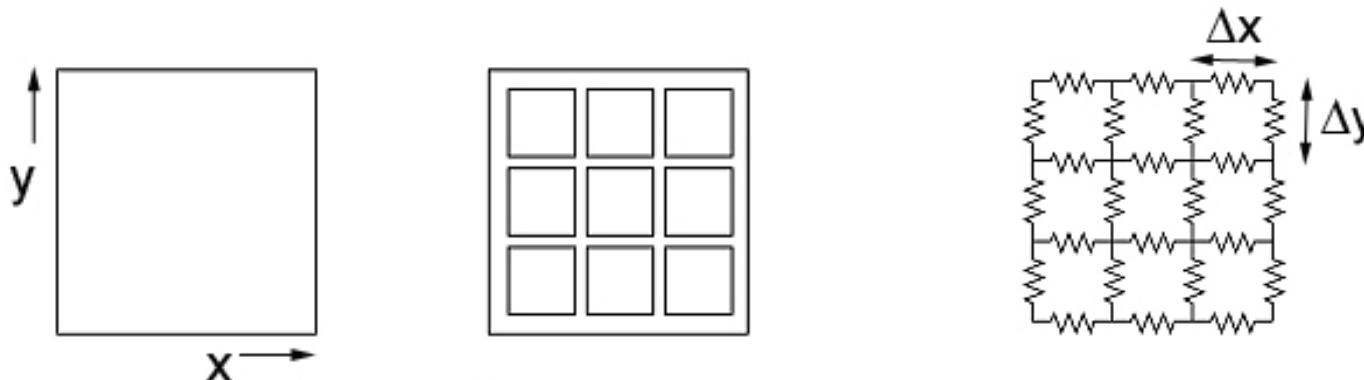


Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

Wybrane zagadnienia techniki antenowej i mikrofalowej - wykład 6

Inne metody

- Metoda linii transmisyjnej (ang. Transmission Line Matrix Method – TLM), pozwala rozwiązać zagadnienia elektromagnetyczne poprzez zastosowanie modelu obwodowego.
- Rozwiązywane równania opisują napięcie i prąd w linii transmisyjnej, które modelują natężenia pól elektrycznego i magnetycznego w dziedzinie czasu.
- Dyskretyzacja badanego zagadnienia polega w tej metodzie na zastąpieniu ciągłego układu przez zbiór elementów o parametrach skupionych.





Inne metody

- Metoda elementów skończonych (ang. Finite Element Method - FEM) jest bardzo skuteczną techniką analizy obiektów o złożonych kształtach oraz umieszczonych w ośrodkach niejednorodnych.
- Metoda elementów skończonych zastosowana do analizy zjawisk elektromagnetycznych wykorzystuje ich opis równaniami różniczkowymi, jednak wyniki obliczeń uzyskiwane są również w dziedzinie częstotliwości.
- Równania rozwiązywane metodą elementów skończonych wykorzystują potencjał (lub funkcjonal energii układu).
- Rozwiązanie wymaga podziału rozpatrywanego obszaru na elementy, na których uśredniany jest stan fizyczny ośrodka.





Inne metody

- Wartości wyznaczanej wielkości obliczane są dla wierzchołków elementów (poza węzłami dokonuje się przybliżenia obliczanego parametru) na podstawie wartości w najbliższych węzłach.
- Dyskretyzacja równania potencjału pozwala przybliżyć wartość rozkładu potencjału w węzłach każdego elementu oraz powiązać ze sobą rozkład potencjałów we wszystkich elementach z uwzględnieniem jego ciągłości na brzegach elementów.
- Dużym ograniczeniem metody elementów skończonych są duże wymagania sprzętowe, co do pojemności pamięci i liczby operacji, szczególnie w przypadku analizy złożonych geometrycznie obiektów.



Inne metody

- Ograniczenia metod komputerowej symulacji zagadnień elektromagnetycznych doprowadziły do powstania bardzo wielu tzw. metod hybrydowych
- Metody hybrydowe łączą w sobie elementy algorytmów typowych metod.
- Pozwalają one zredukować czas obliczeń oraz poprawić dokładność bądź rozszerzyć zakres zastosowania typowych metod.
- Popularnym rozwiązaniem stosowanym w technikach hybrydowych jest połączenie metody momentów oraz metody elementów skończonych.
- Pozwala ono wykorzystać dobrze opisującą złożone geometrie dyskretyzację metody elementów skończonych oraz ograniczyć czas obliczeń i rozmiar pamięci.
- Inne podejście pozwala rozszerzyć zakres stosowalności metod małej częstotliwości poprzez połączenie ich z metodami wielkiej częstotliwości.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Co należy zapamiętać

- Jakiek są najbardziej popularne metody symulacji anten
- Co to jest metoda momentów
- Co to jest metoda różnic skończonych



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

Wybrane zagadnienia techniki antenowej i mikrofalowej - wykład 6

Łukasz Januszkiewicz

Wybrane zagadnienia techniki antenowej i mikrofalowej

Zadanie nr 14 – Studia podyplomowe „Bezprzewodowe systemy nadzoru i monitorowania”

Dziękuję za uwagę



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna
współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
w projekcie

*„Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
– zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej –
zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna
i wzmacniania zdolności do zatrudniania
osób niepełnosprawnych”*



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

90-924 Łódź, ul. Żeromskiego 116,
tel. 042 631 28 83
www.kapitalludzki.p.lodz.pl