

UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” IAȘI
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației
Specializarea Tehnologii și Sisteme de Telecomunicații

Lucrare de licență

“PROIECTARE ECRANE MICROUNDE”

Coordonator științific:

Conf. dr. ing. RADU FLORIN DAMIAN

Absolvent:

(Name removed)

Iași
Iulie 2018

Cuprins

Introducere.....	4
Capitolul 1 - Aplicabilitatea Ecranelor cu Microunde.....	7
Capitolul 2 - Electromagentism.....	9
2.1 - Generalități Electromagentism.....	9
2.2 - Ecuațiile lui Maxwell.....	10
2.3 - Ecuații de propagare.....	13
2.4 - Condiții la limita de separați între două medii.....	15
Capitolul 3 - Metode utilizate in soft-uri.....	17
3.1 - Metoda FDTD.....	18
3.2 - Metoda FEM.....	19
Capitolul 4 - Ecrane Microunde.....	20
4.1 - O scurtă istorie a materialelor absorbante.....	19
4.2 - Principiul de funcționare:minimizarea reflexiilor.....	22
4.3 - Tipuri de absorbanți în domeniul microundelor.....	24
4.3.1 - Interfețe gradate(adaptare de impedanță).....	24
4.3.2 - Absorbanți piramidali.....	24
4.3.3 - Absorbanți cu încărcare stratificată.....	25
4.3.4 - Absorbanți cu strat de adaptare.....	26
4.3.5 - Materiale rezonante.....	27
4.4 - Absorbanți în domeniul microundelor convenționali.....	28
4.4.1- Absorbant Dallenbach.....	28
4.4.2 - Ecranul Salisbury.....	30
4.4.3 – Absorbanți Jaumann cu straturi multiple.....	32
Capitolul 5 – Modelarea și simularea electromagnetică.....	34

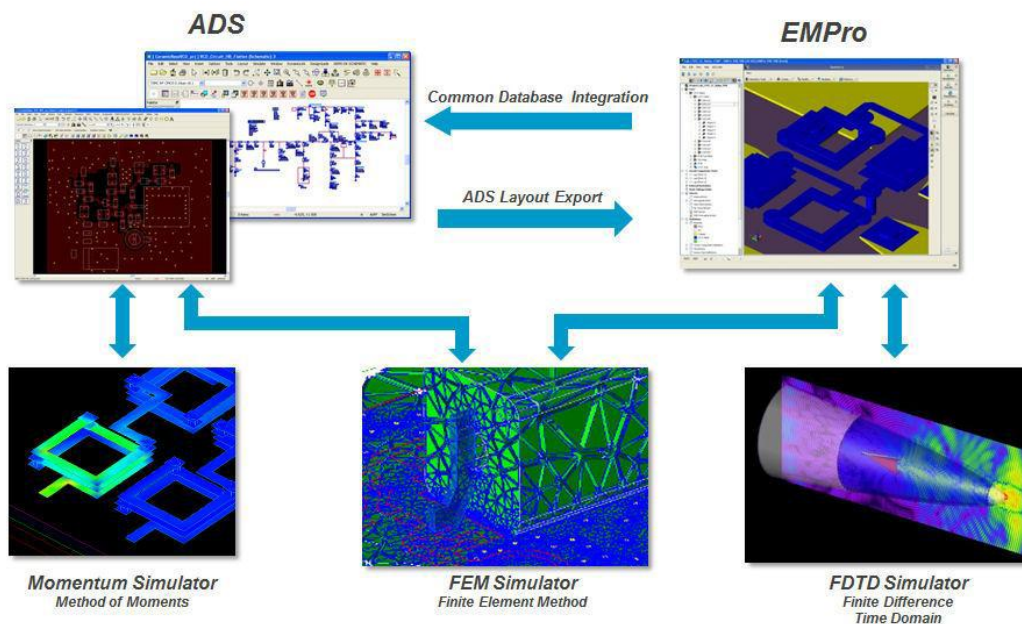
5.1 Prezentarea programului EMPro.....	34
5.2 Exemplu de modelare cu Ecran Jaumann.....	36
5.3 Simularea FDTD.....	43
5.4 Simularea FEM.....	46
5.5 Procesul de simulare și vizualizarea rezultatelor.....	48
Capitolul 6 –Rezultatele simulărilor.....	49
Concluzii.....	54
Bibliografie.....	55

Capitolul 5

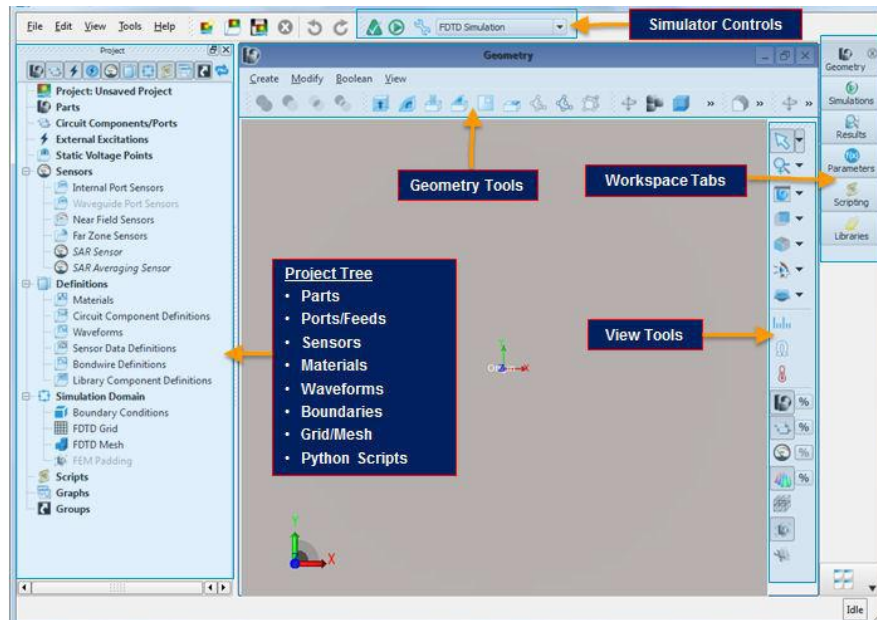
Modelarea și simularea electromagnetică

5.1 Prezentarea programului EmPro

EmPro este un program de simulare electromagnetică 3D creat de firma Keysight. Este conceput pentru a oferi programului Advanced Design System capacități de simulare electromagnetică (ADS ofera nativ simulare 2.5D prin metoda momentelor).



La crearea proiectului se poate alege simulatorul utilizat (FDTD, FEM sau Eigenmode: aflarea modurilor proprii), unitățile de măsură standard utilizate în proiect (mm sau mil) și de asemenea intervalul de frecvență în care se va face simularea. Intervalul de frecvență poate fi modificat mai târziu, dar deoarece un mare număr de elemente (fizice) depinde de acesta e important să fie cât mai corect estimat inițial pentru a evita corecții masive mai târziu.



În partea stângă a interfeței se regăsește Project Tree, o structură în care pot fi regăsite (aproape) toate elementele de interes din proiectul curent. Fereastra centrală oferă acces la desenarea/vizualizarea structurii analizate (vizualizarea diferitelor elemente putând fi controlată rapid din bara de butoane View Tools). În partea dreaptă (Workspace Tabs) se pot afișa, deasupra ferestrei de geometrie, ferestrele de urmărire control a simulărilor, vizualizare rezultate, vizualizare/modificare parametri, editare script-uri (Python), încărcare biblioteci. În partea de sus este prezentă zona de alegere/control a simulatorului.

Trebuie menționat că deși și FDTD și FEM sunt simulatoare de tip general, putând simula orice tip de structură (ca o consecință orice structură simulată va putea fi analizată cu oricare din cele două metode sau cu ambele, pentru a compara rezultatele), totuși schimbarea simulatorului activ nu se reduce numai la alegerea lui din interfață, ci are efecte secundare care conduc la operațiuni mai complexe (schimbare surse, schimbare grilă de calcul etc.).

5.2 Exemplu de modelare cu Ecran Jaumann

În general structura unui ecran Jaumann este asemănătoare cu cea a unui ecran Salisbury, care constă dintr-o folie rezistivă plasată la o distanță multiplu impar de $\lambda/4$ în fața unui perete metalic (conductor), de obicei separată printr-un spațiu ce conține aer. În plus un ecran Jaumann mai are cel puțin încă o folie rezistivă plasată la o aceeași distanță multiplu impar de $\lambda/4$ în fața primei folii rezistive separată printr-un același spațiu ce conține aer.

Ca exemplu am realizat structura unui ecran Jaumann format dintr-un perete metalic din cupru, și două folii rezistive dintr-un material particular definit, cele trei blocuri separate între ele printr-un spațiu ce conține aer.

Structura completă a ecranului:

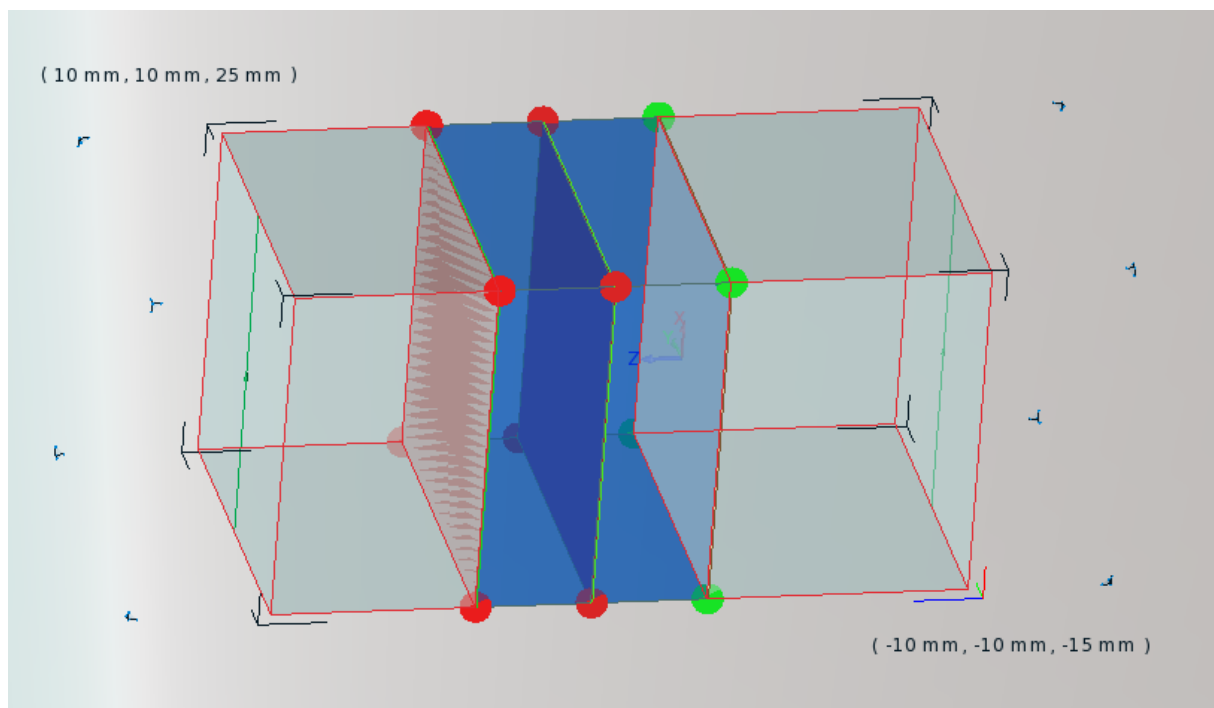


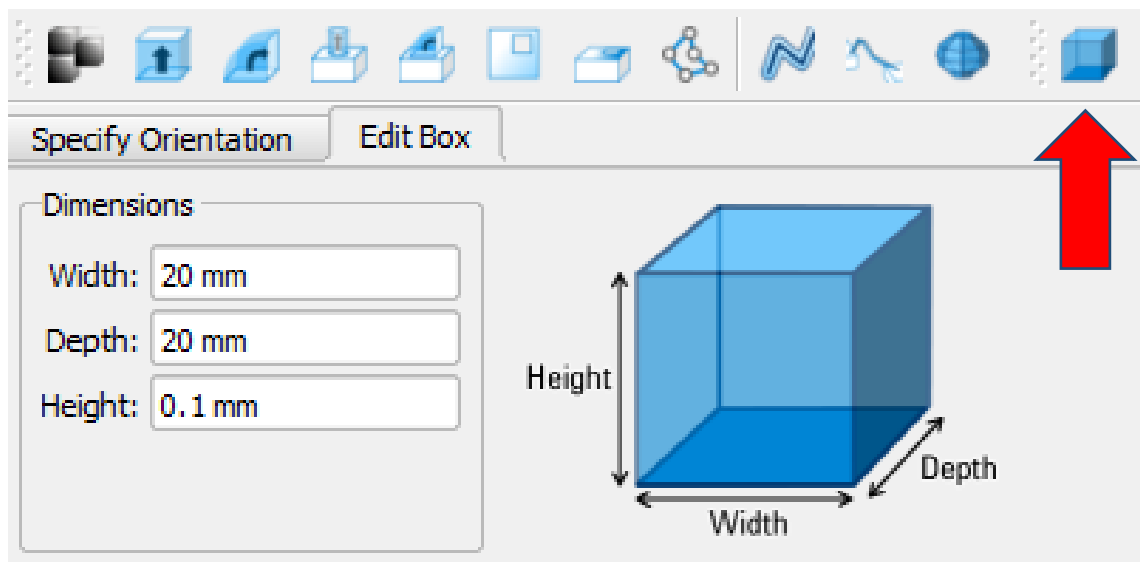
Figura 5.0 – Structura unui ecran Jaumann cu 2 straturi

Fiecare parte din această structură completă a fost creată și definită în mod particular, astfel:

Blocul din metal:

Blocul din metal este evidențiat în fig. 5.0 ca fiind acea folie din partea dreapta cu latura de culoare roșie și colțuri evidențiate cu puncte verzi. Dimensiunile acestuia sunt: înălțimea de 0.1 mm, lungimea și lățimea fiind egale 20x20 mm. Materialul atribuit acestui bloc este cupru.

- Modelare în spațiu:



Figur 5.1 Creearea blocului

Cu ajutorul butonul evidențiat mai sus denumit "Box" a fost creat blocul metal cu dimensiunile ca în imaginea de mai sus.

- Lățimea=20 mm
- Lungimea=20 mm
- Înălțimea=0,1 mm

- Atribuirea materialului unui bloc se poate realiza în doua moduri:

1. Prin selectarea materialul dorit dintr-o listă standard pe care EMPro o conține: adică prin adăugarea sa din bibliotecă în modul de lucru iar mai apoi acesta fiind atribuit unuia sau mai multor blocuri;

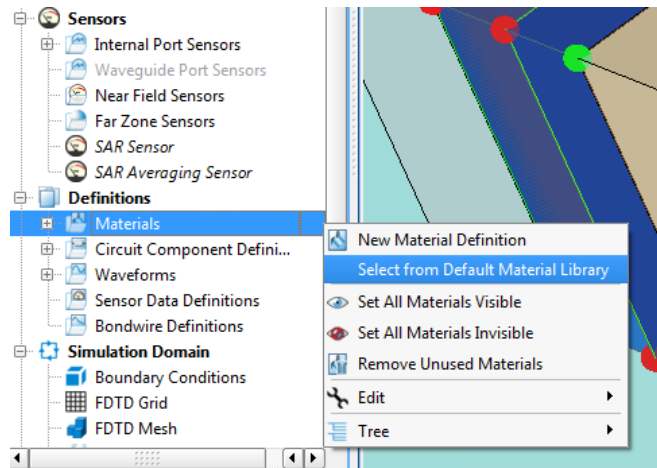


Figura 5.2 Selectarea materialului din biblioteca EMPro

Din lista următoare a fost ales pentru blocul dorit, metalul Cupru(Copper).

	Material Name	Relative Permittivity	Loss Tangent	Conductivity [S/m]	Nominal Temperature
36	CPS	2.54	0.0004		
37	CPS/Fiberglass	2.7	0.001		
38	CPS/Quartz	2.7	0.0005		
39	Coolzorb 500				
40	Coolzorb 600				
41	Coolzorb 700				
42	Copper			5.8e+07	293.15
43	Cu			5.8e+07	293.15
44	Cyanate Ester/Quartz	3.3	0.003		
45	ECCOSORB BSR-1				
46	ECCOSORB BSR-2				
47	ECCOSORB DSF-14				
48	ECCOSORB DSF-3				
49	ECCOSORB EGM-125				

Figura 5.3-Lista materialelor

2. Prin definirea unui nou material oarecare după caracteristicile și proprietățile de care avem nevoie, în mod similar urmând a fi atribuit blocului respectiv.

-se selectează opțiunea "New material definition" după cum se poate observa în fig. 5.2 și se va defini materialul cu proprietățile dorite

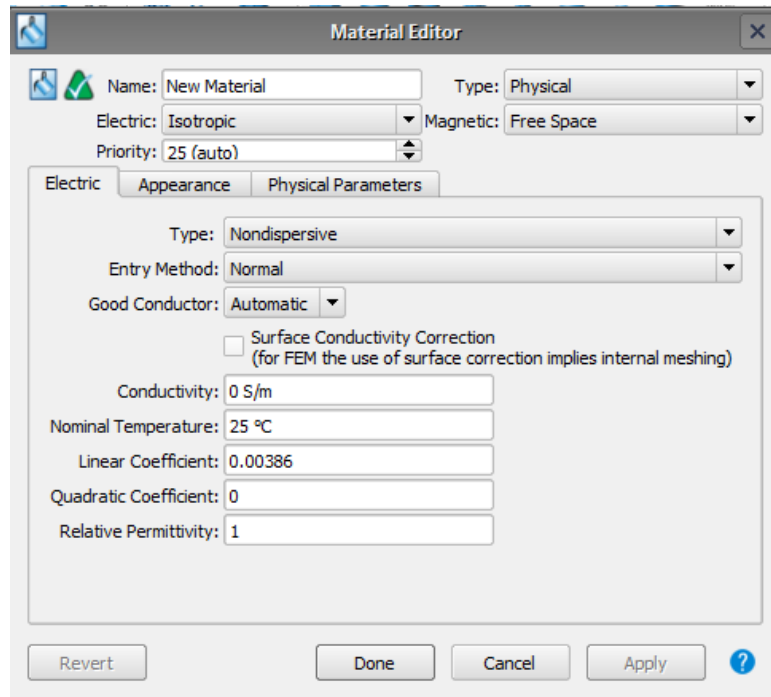


Figura 5.4 – Material editor

Pasul final, și anume atribuirea materialului definit sau preluat din bibliotecă este prezentat în figura de mai jos.

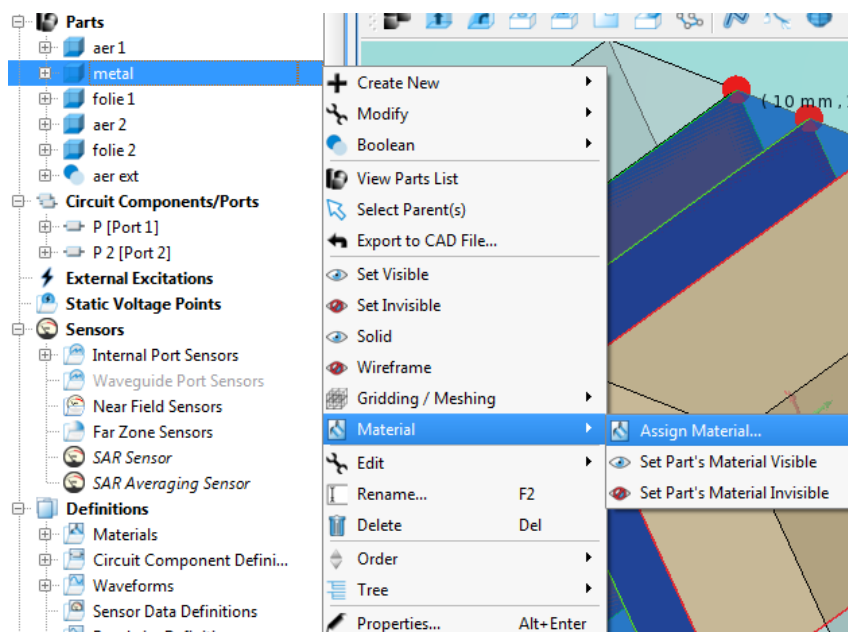


Figura 5.5 – Atribuirea materialului

Celelalte blocuri din structura ecranului sunt proiectate în mod similar precum blocul din metal, în mod similar fiind atribuit și materialul dorit pentru acestea. Structura celorlalte blocuri poate fi observată în figura 5.0, și au următoarele caracteristici:

Blocurile de aer denumite în ordinea așezării în fața plăcii de metal, "aer1" și "aer2" sunt reprezentate de blocurile cu fundal albastru de dimensiuni LxL (latura de 20 mm) și înălțimea de 6.55 mm.

Foliile rezistive denumite "folie1" și "folie 2" sunt reprezentate de acele blocuri subțiri cu colțurile verzi, de înălțime foarte mică de 0.1 mm și dimensiune LxL (latura de 20 mm).

Toate aceste blocuri sunt introduse în interiorul unui alt bloc de dimensiuni mai mari, astfel încât să poată cuprinde toate celelalte blocuri. Acest ultim bloc are rol de izolație, iar în interiorul acestuia va avea loc simularea propriu-zisă.

- **Stabilirea condițiilor la limită:**

Folosind metoda simulării FDTD (Time Domain), aceasta impune, pentru o simulare corectă, atribuirea simetrică suprafețelor blocului izolator un tip de perete astfel:

- pentru partea de sus și cea de jos perete electric "PEC" (X în soft)
- pentru partea din stânga și cea din dreapta perete magnetic "PMC" (Y în soft)

Realizarea acestora în EMPro este prezentată în figura de mai jos:

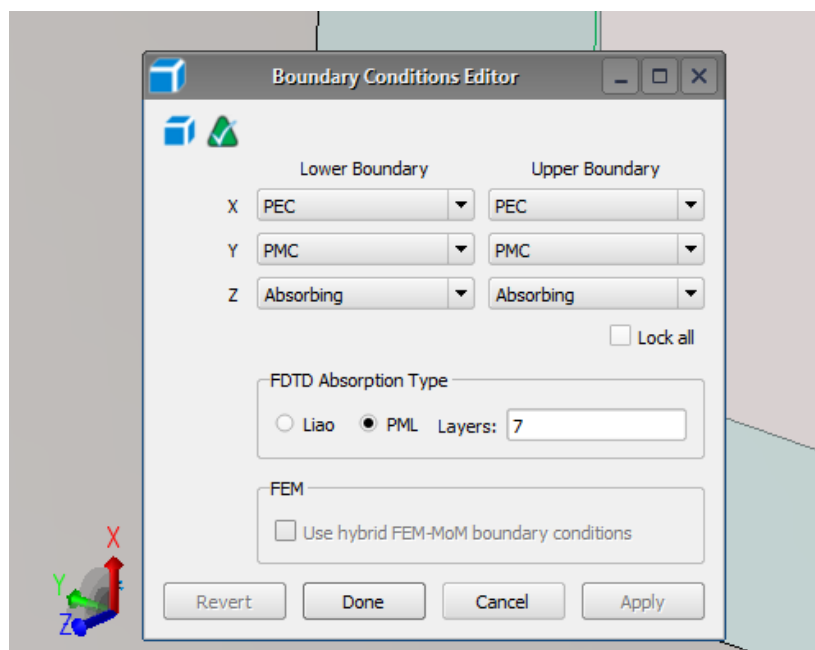


Figura 5.6 – Stabilirea condițiilor la limită

- **Introducerea porturilor**

Pe cele două baze ale blocului izolator se montează portul de intrare, respectiv cel de ieșire. În simulare, prin portul unu putem observa reflectivitatea ecranului, adică ce intră prin portul 1 și ce se întoarce prin portul 1.

Montarea porturilor in EMPro se realizează astfel:

-din meniul din stânga se pune cursorul pe textul ”*Circuit Components/Ports*”, se face click-dreapta pe acesta, din fereastra ”*New Circuit Component with*” se selectează opțiunea ”*New Feed Definition*” dupa care se va poziționa portul în funcție de coordonate.

Portul este reprezentat in fig. 5.7 , fiind acea dreaptă de culoare verde poziționată la mijlocul laturilor de sus și jos ale bazei blocului.

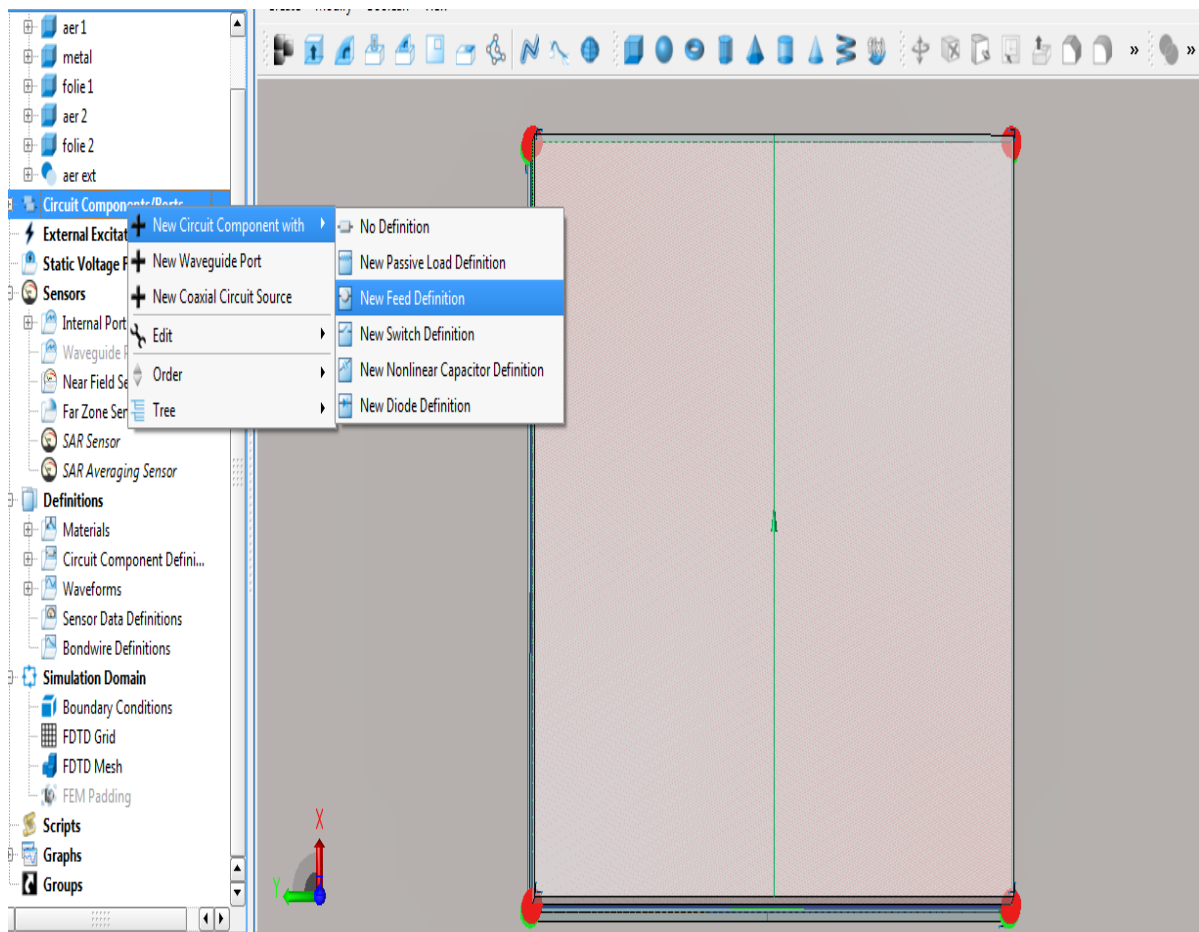


Figura 5.7 – Montarea porturilor

- **Suprapunerea blocurilor**

Datorită faptului ca blocul izolator este un bloc de aer și plăcile dintre metal și foliile rezistive sunt tot de aer, va apărea efectul de suprapunere a blocurilor de aer din exterior cu cele din interior. Orice soft are nevoie să știe pentru fiecare bloc din spațiu materialul respectiv și delimitarea formei blocului.

Așadar, în EMPro acest lucru se realizează cu ajutorul opțiunii *Boolean*, selectând pe rând câte un bloc din interiorul blocului izolator și blocul izolator, apăsând click dreapta pe cele două și din meniul Boolean selectând opțiunea *Subtract*. Astfel conținutul fiecărui bloc este substras din conținutul blocului izolator, dar în același timp forma, conținutul și poziția blocurilor respective este păstrată bifând căsuța *Keep original* din dreptul denumirii blocului respectiv.

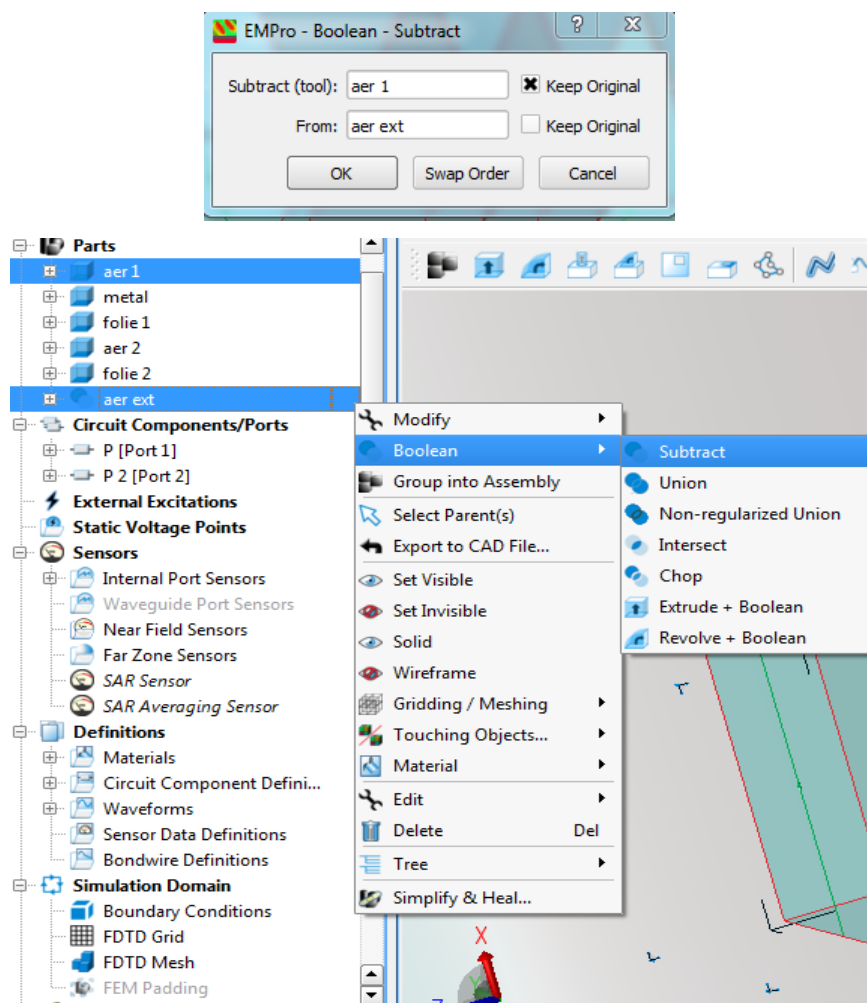


Figura 5.8 – Substragerea blocurilor

5.3 Simularea FDTD

Pentru alegerea numărului de celule pe fiecare placă și a dimensiunii fiecărei celule folosim opțiunea FDTD Grid din meniul Simulation Domain.

Pentru ca în urma simulării să poți obține un rezultat satisfăcător pereții laterali ai acestui grid trebuie să fie lipiți de pereții blocurilor, altfel programul va simula o structură infinită. Acest lucru se realizează prin setarea lui X și a lui Y din cadrul meniului "Free space padding" pe 0. În schimb pereții bazelor gridului trebuie poziționați la o oarecare distanță față de pereții bazelor blocului simulat, astfel se setează parametrul Z pe 10 în partea inferioară și tot pe 10 pe cea superioară.

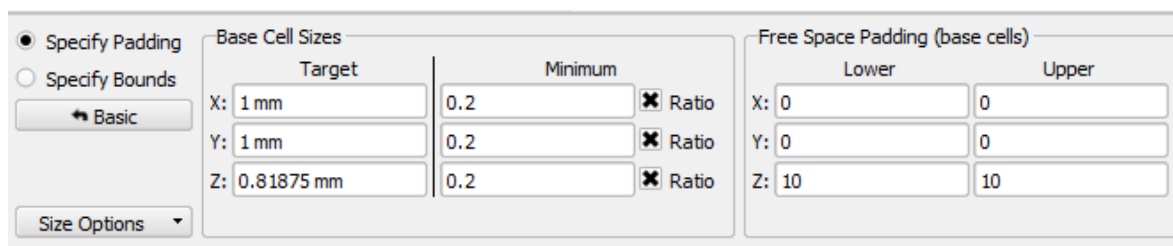
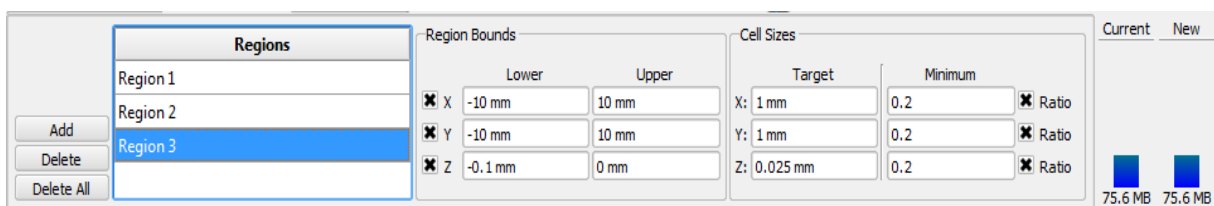


Figura 5.9 – Free space padding

De asemenea în meniul FDTD Grid putem selecta numărul de celule pe fiecare bloc în parte din meniul "Grid Regions". În acest meniu putem genera o regiune pentru fiecare bloc în parte cu ajutorul opțiunii "Add". Așadar se adaugă o nouă regiune unde în cadrul meniului "Region bounds" sunt trecute coordonatele blocului respectiv, iar în cadrul meniului "Cell sizes" sunt trecute specificațiile celulelor. Specificațiile celulelor depind de dimensiunile blocului din care acestea vor face parte, astfel pentru una din foliile rezistive de înălțime 0,1 mm, în funcție de numărul de celule pe care dorim să le folosim pentru simulare se introduc în casuțele X,Y,Z dimensiunile celulelor, în următorul caz folosind celule cu X și Y de 1 mm și



Z 0.025 mm (0.1/4).

Figura 5.91 – Definire celule pentru blocuri separate

Odată cu creșterea numărului de celule, simulatorul va avea nevoie de resurse mai multe, astfel poate crește și nivelul memoriei necesare simulării. De aceea EMPro pune la dispoziție calculul și afișarea memoriei necesare simulării, după cum se poate observa în fig.5.91 în partea dreapta. Acest lucru ajută foarte mult în estimarea timpului de efectuare a simulărilor și în optimizarea acestuia astfel încât durata simulărilor succesive necesare pentru a ajunge la un rezultat satisfăcător să fie una cât mai mică. Creșterea memoriei poate fi datorată și suprapunerii blocurilor, de aceea am substras fiecare bloc din blocul izolator folosind opțiunea "Boolean" după cum a fost prezentat anterior.

Creșterea numărului de celule nu este strict necesară pe fiecare bloc în parte. Acest lucru este important pentru acele folii subțiri, și anume foliile rezistive de înălțime 0,1 mm, unde este nevoie de o afinitate mai mare pe perioada simulării, dar totodată creșterea numărului de celule în blocul metalic poate ajuta la fel de mult.

În figura de mai jos se poate observa diferența straturilor de celule, blocul metalic (cel de culoare galbenă) având mai multe straturi, pe când în cadrul blocului de aer numărul de straturi este mult mai mic.

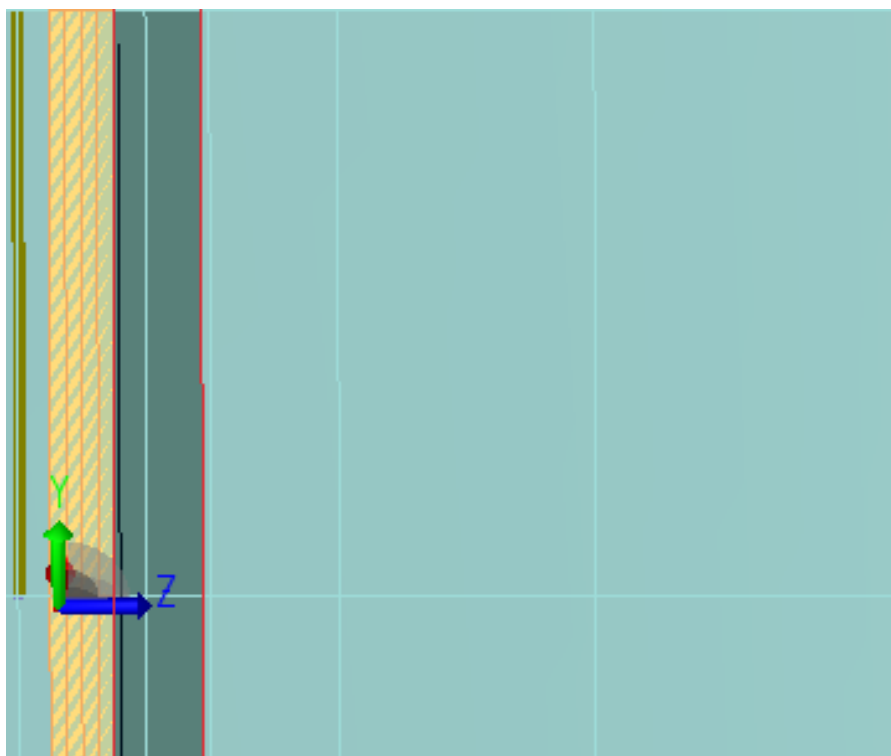


Figura 5.92 – Diferență număr celule între blocul metalic și blocul de aer

Dupa ce setările pentru FDTD Grid au fost finalizate, forma finală a grid-ului poate observată cu ajutorul opțiunii ”Toggle Mesh Viewing Controls” din panoul din dreapta, în partea de jos, bifând secțiunile planului pentru care se dorește vizionarea.

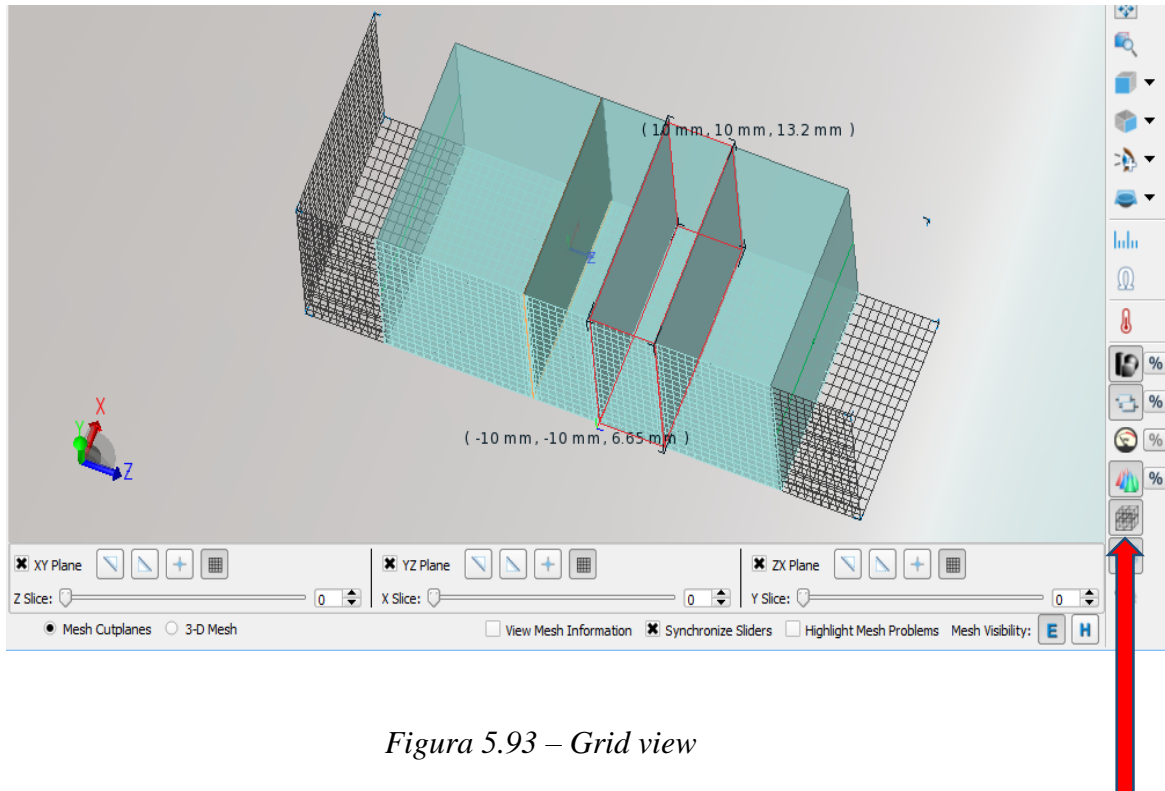


Figura 5.93 – Grid view

După cum se poate observa și în figura 5.93 butonul ”Toggle Mesh Viewing Controls” din dreapta săgeții roșii afișează structura grid-ului după setările dorite, acesta putând fi vizualizat bifând căsuțele pentru secțiunile de plan din care se dorește vizualizarea, în cazul nostru toate cele trei planuri, XY, YZ, ZX.

În cazul simulării FDTD, acestea sunt setările de bază pentru inițierea procesului de simulare. Obținerea unui rezultat satisfăcător, rareori reiese din prima simulare, în acest caz prin repetate simulări care țin cont de setările din cadrul meniului FDTD Grid aplicate astfel încât timpul de simulare să fie unul avantajos, se va ajunge la rezultatul dorit.

5.4 Simularea FEM

În cazul simulării FEM nu mai este nevoie să se separe fiecare bloc în parte, deoarece acest tip de simulare se ocupă singur de suprapunerea blocurilor. Așadar blocul izolator va trebui redefinit la dimensiunile originale, înainte de substragerea celorlalte blocuri din acesta.

Metoda elementului finit folosește un anumit număr de tetraedre mai mici sau mai mari așezate aleatoriu de către simulator astfel încât să ocupe toată structura.

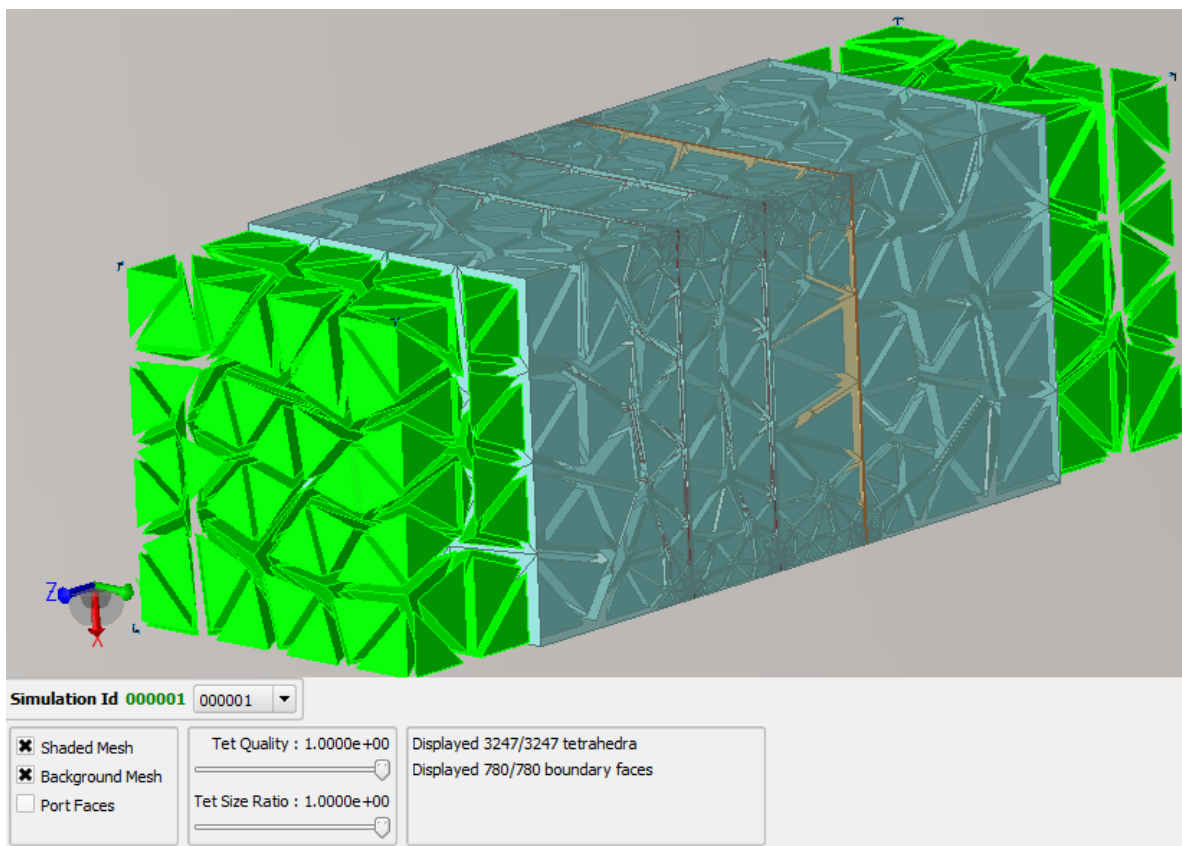


Figura 5.94 Simulare FEM cu tetraedre

Structura cu tetraedre poate fi vizualizată după o primă simulare, în urma căreia poate fi vizualizată așezarea tetraedrelor aleatoriu în structura simulată, cu ajutorul butonului "Toggle Mesh Viewing Controls", având și opțiunile de a vizualiza în modul "Shaded Mesh", dar și "Background Mesh", bifând căsuțele din dreptul opțiunilor dorite.

La metoda elementului finit, pentru fiecare punct în frecvență simulatorul va efectua un calcul separat, dupa care va afișa un grafic în funcție de calculul în acele puncte. Dar, dacă dorim să calculăm pentru un anumit punct în frecvență putem impune condiția simulatorului, de a calcula și în punctul dorit.

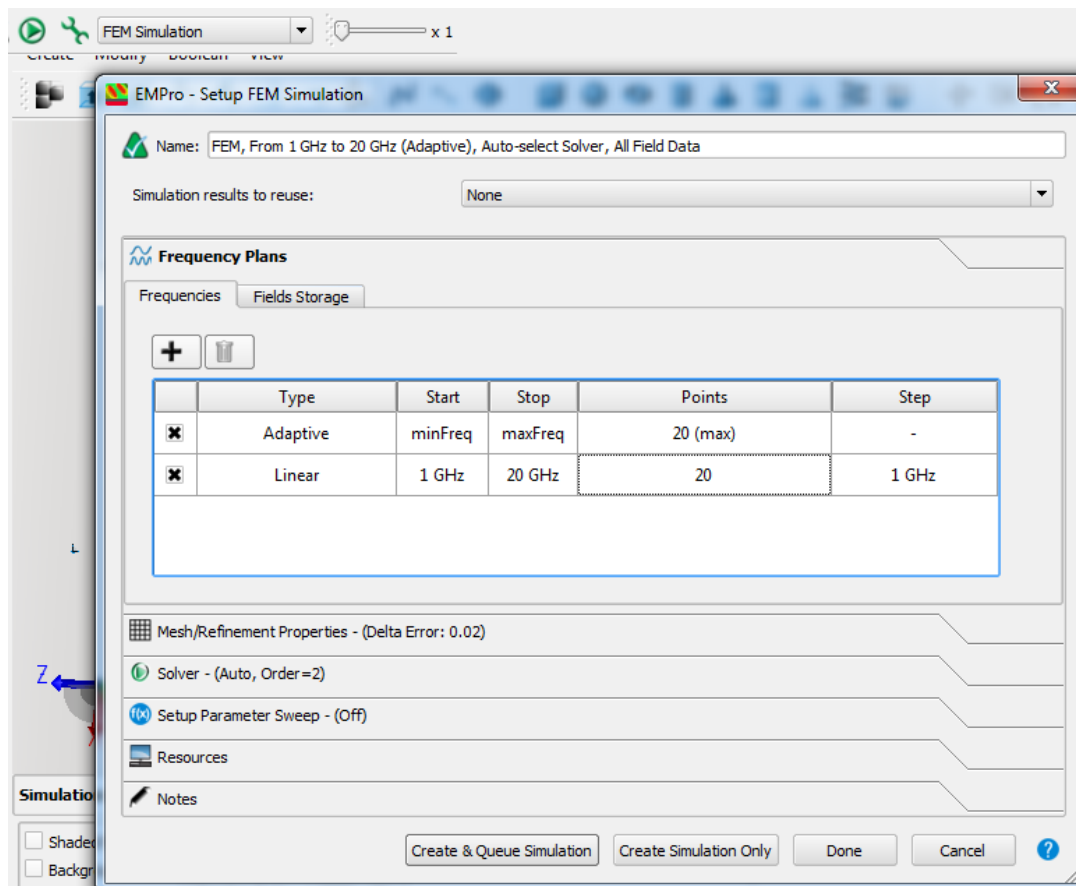


Figura 5.95 – Setarea parametrilor pentru FEM simulation

Dupa cum se poate observa în figura 5.94, simularea poate fi realizată în mod Adaptiv, simulatorul alegând maxim 20 de puncte de frecvență în care va efectua calcule, într-un interval de la 1 la 20 GHz. Sau putem alege un mod de simulare linear, apăsând butonul "+" și adăugând modul de simulare, la care vom stabili parametrii simulării prin setarea unei frecvențe minime (Start) și a uneia maxime (Stop), dar și a numărului de puncte pentru care se va efectua simularea, în cazul nostru pentru 20 de puncte, se va efectua o simulare de la 1 la 20 GHz cu pasul de 1 GHz, rezultatele din urma simulărilor putând fi memorate și refolosite în cazul altor simulări care vor avea de efectuat calcule în aceleași puncte.

5.5 Procesul de simulare și vizualizarea rezultatelor

În continuare va fi prezentat procesul propriu-zis de simulare și prezentare al rezultatelor. La simularea FDTD, pentru ca simulatorul să poată ajunge la o relație de convergență, se iau în calcul mai multe condiții. În funcție de setările pe care le stabilim înaintea simulării vom obține rezultatul dorit, și anume:

- estimarea și stabilirea unui număr potrivit de celule pe blocurile unde este necesar un reglaj mai fin;
- calculul corect al dimensiunilor celulelor utilizate;
- stabilirea unui număr suficient de pași pentru ca simulatorul să poată ajunge la convergența dorită;
- repetarea succesivă a simulărilor în concordanță cu modificarea parametrilor;

Pentru performanțe mai bune și timp redus de simulare se poate seta ca simulatorul să folosească placa video, dacă aceasta este una performantă.

Stabilirea numărului de pași se realizează după cum se poate observa în fig. 5.96 cu ajutorul meniului "Edit simulation setup" evidențiat cu săgeată roșie, din care se selectează opțiunea "Specify Termination Criteria" și se completează caseta "Maximum simulation time" cu valoarea dorită, în cazul nostru – $150000 \cdot \text{timestep}$.

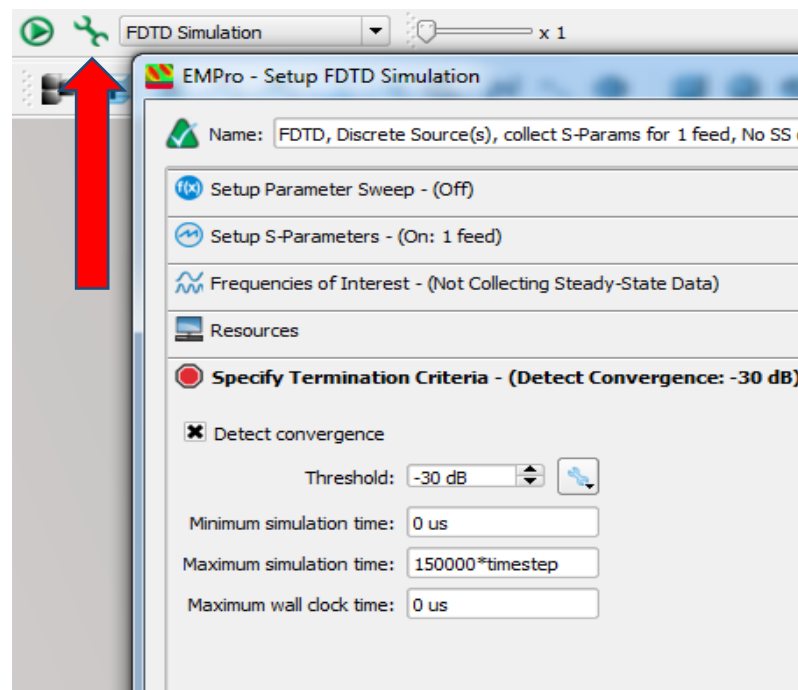


Figura 5.96 – Setarea parametrilor simulării

Capitolul 6

Rezultatele simulărilor

Pentru această simulare am folosit un ecran Jaumann cu 2 straturi.

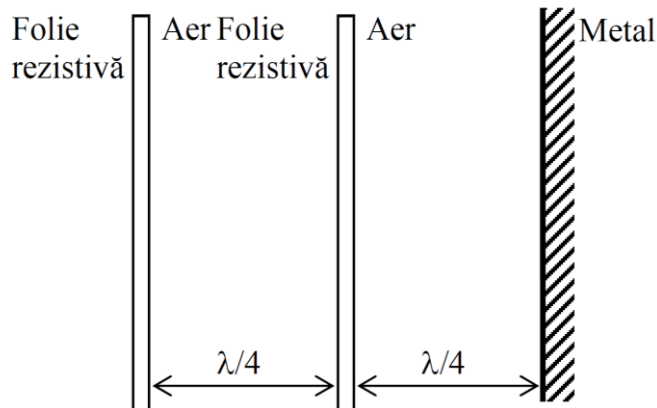


Figura 6.1 Ecran Jaumann cu 2 straturi

Pentru această structură au fost alese următoarele dimensiuni:

- Foliile rezistive:
 - pentru prima folie: 400x400 mm și înălțimea de 1mm
 - pentru a doua folie: 400x400 mm și înălțimea de 0,795 mm
- Pentru straturi:
 - dimensiune straturi: 400x400 mm și înălțimea de 116,755 mm
- Pentru metal:
 - dimensiuni metal: 400x400 mm și înălțimea de 1 mm

Pentru straturile dintre folii a fost ales materialul polistiren cu $\epsilon_r=2,5$.

- $\lambda=c \cdot T=c/f=C0/\sqrt{\epsilon_r} \cdot f$
- Pentru $f=2$ GHz, $\lambda=94,86$ mm $\Rightarrow \lambda/4=2,71$ mm
- Impedanța vidului sau a aerului $Z_0=376,73 \Omega$
- Impedanța de undă în polistiren: $Z_s=238,26 \Omega$

Metoda folosită este metoda elementului finit (FEM).

Condițiile la limită:

- pereții de sus și de jos: pereți electrici
- pereții laterali: pereți magnetici

Porturile folosite sunt porturi de tip Waveguide Port.

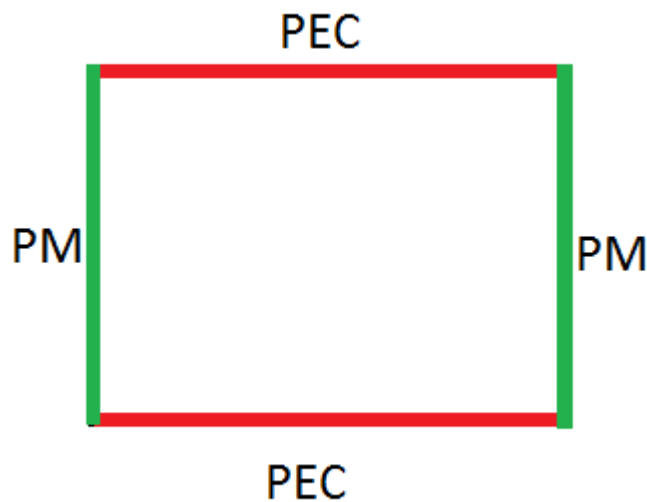


Figura 6.2 Tipul pereților

Datele simulării:

- frecvența cuprinsă între 0.1 GHz și 5 GHz
- o simulare adaptivă cu 20 de puncte pe care simulatorul le alege aleatoriu
- o simulare liniară cu 46 de puncte și cu un pas de 0,108889 GHz

Pentru această simulare FEM au fost folosite un număr total de tetraedre de 44116, timpul de simulare a fost 1h 04 min 49 sec, iar rezultatele simulării sunt prezentate mai jos, împreună cu structura simulată.

Setările principale:

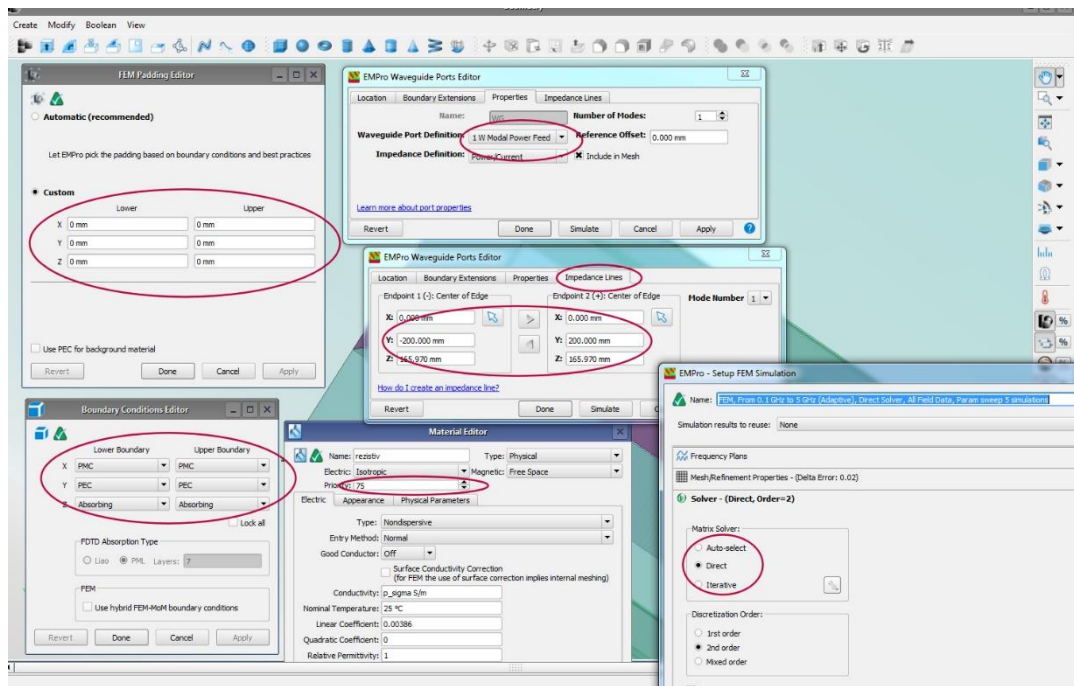


Figura 6.3 Ferestrele cu setările principale

Structura simulată:

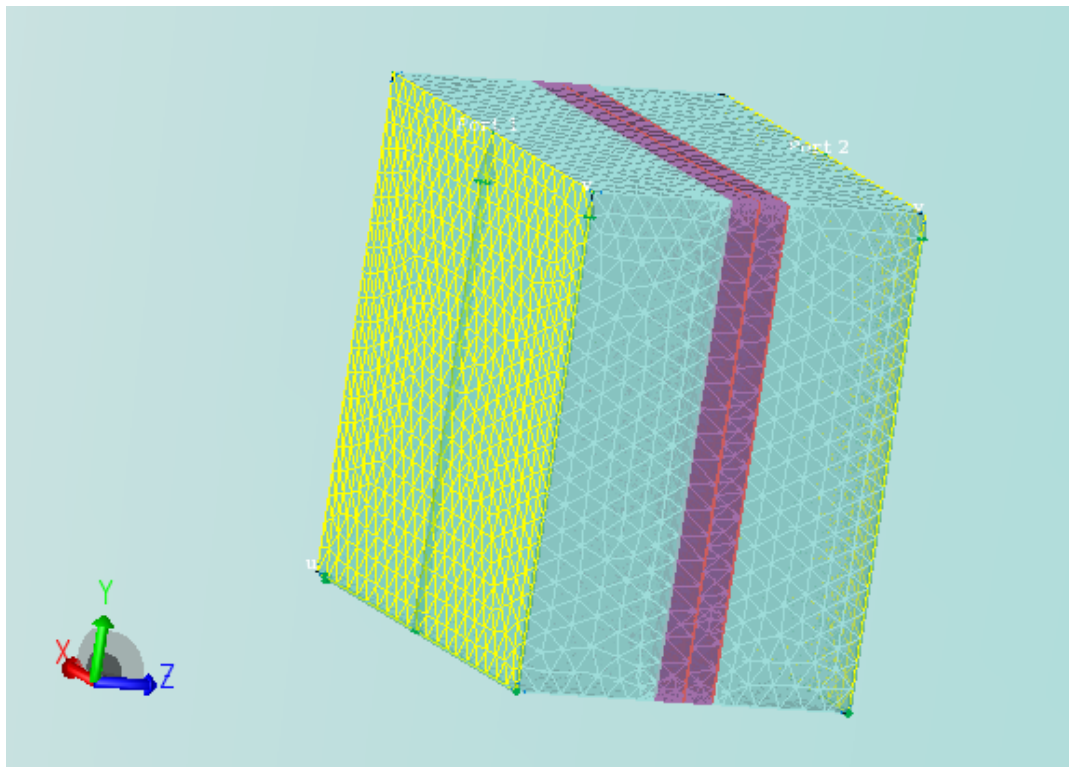


Figura 6.4 Structura simulată

Fereastra Log a simulării:

```

INITIAL MESH
-----
nbPoints      : 9099
nbTetrahedra  : 44116

REFINING
-----

```

level	frequency	MESHING			nbUnknowns	mem(GB)	SOLVING			Delta(S)
		nbTetr	Elapsed time	CPU time			Elapsed time	CPU time		
1	2.000 GHz	44116	00:00:20.2	00:00:19.5	279096	2.534	00:00:47.1	00:03:27.0	/	
2	2.000 GHz	48627	00:00:20.5	00:00:20.2	308196	2.828	00:00:46.4	00:03:35.8	3.11e-04 [->0	

```

COMPUTING SOLUTION
-----

```

sample	frequency	nbUnknowns	mem(GB)	Elapsed time	CPU time	solver	nbIter	normRes
1	100.000 MHz	308196	2.847	00:00:45.7	00:03:35.4	Dm64		
2	200.000 MHz	308196	2.857	00:00:34.5	00:03:18.4	Dm64		
3	300.000 MHz	308196	2.857	00:00:34.6	00:03:19.2	Dm64		
4	400.000 MHz	308196	2.859	00:00:35.3	00:03:22.3	Dm64		
5	500.000 MHz	308196	2.859	00:00:34.3	00:03:13.7	Dm64		

Parametrii-S (Rezultatele S11 și S22)

S11:

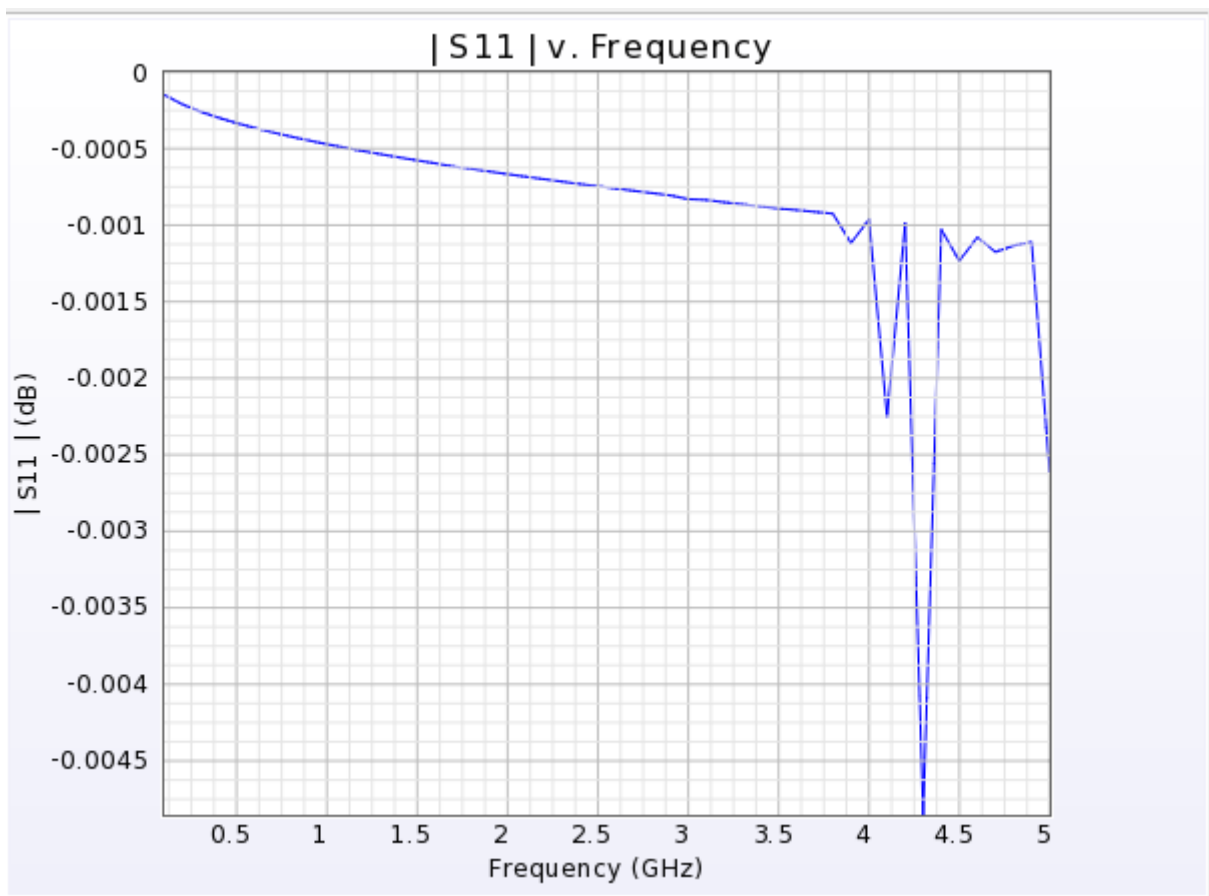
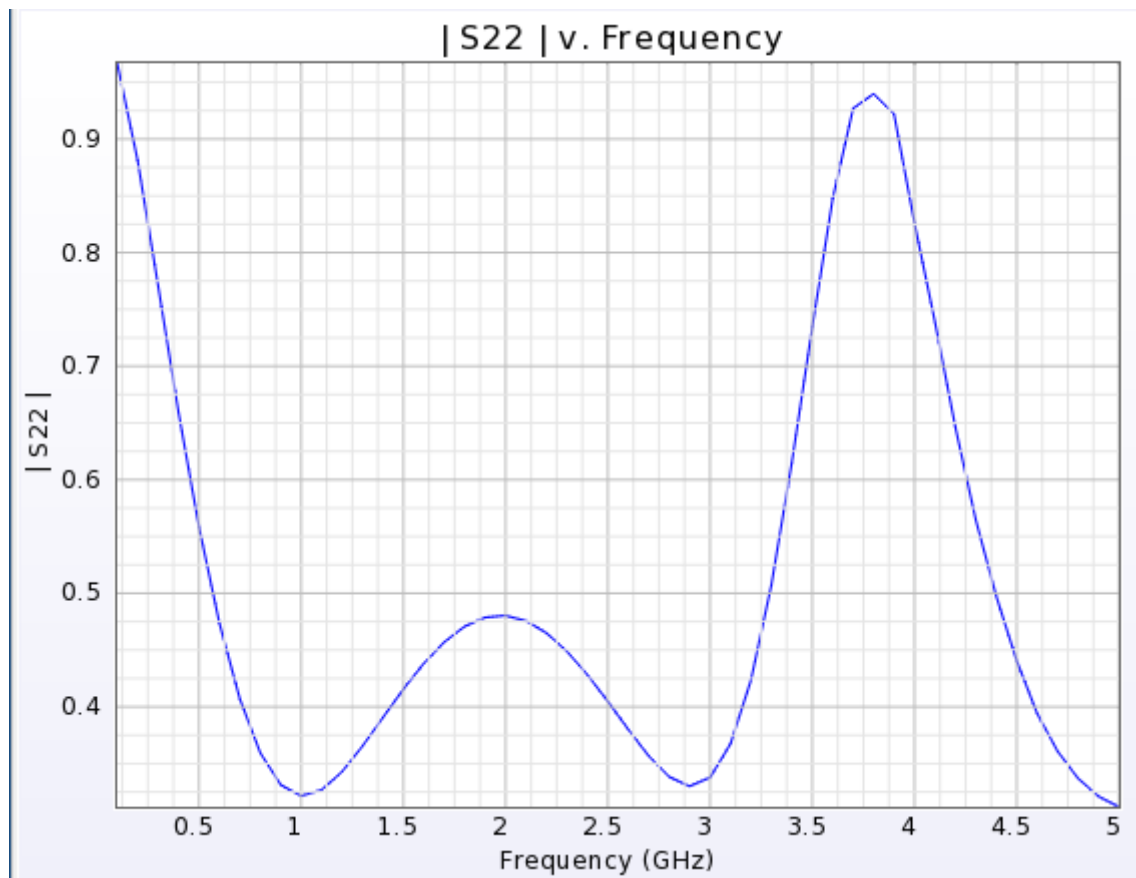


Figura 6.5 Parametrii S11

S22:

*Figura 6.5 Parametrii S22*

Cele două grafice reprezintă coeficientul de reflexivitate la porturile 1(S11) și 2 (S22) pentru un ecran Jaumann cu doua straturi de polistiren, doua folii rezistive și o folie de metal din aluminiu, rezultatele simulării putând fi reutilizate în posibile viitoare simulările.

Concluzii

Raspândirea continuă a aplicațiilor de comunicații în domeniul microundelor adus la apariția unei aglomerări a spectrului electromagnetic în acest domeniu. Pentru ocoexistență “pașnică” a multiplelor aparate ce operează în această gamă de frecvențe(uneori chiar pe aceeași frecvență – cum ar fi frecvența liberă de 2.4 GHz) au devenit necesare diferite tehnici de separare a undelor provenind de la diverse perechi emițător/receptor.

Dacă în anumite aplicații tehnicile de codare sunt suficiente pentru a permite folosirea simultană a spectrului de diverse dispozitive, în alte cazuri se impune separarea totală a unei anumite zone de lucru de orice influențe exterioare perturbatoare. Se constată de asemenea interesul crescut acordat protecției persoanelor, în condițiile în care doza de radiații electromagnetice la care sunt supuse acestea poate crește în condițiile apariției a din ce în ce mai mulți emițători în banda microundelor.

O consecință imediată a fost migrarea spre domeniul civil a unor aplicații, altădată de interes strict militar, cum ar fi dezvoltarea de materiale absorbante pentru undele radar. Metodele clasice (absorbanți Dallenbach, Salisbury, Jaumann) își ating limitele în ceea ce privește banda (relativ îngustă), grosime, greutate. O direcție nouă de cercetare este cea a materialelor artificiale, inteligente, care să permită atingerea performanțelor necesare de la o nouă generație de materiale absorbante.

Bibliografie

1. Paul Saville; Trisha Huber; Darren Makeiff – ”Fabrication of Organic Radar Absorbing Materials” Defence R&D Canada – Atlantic, Technical Report DRDC Atlantic TR 2005-124
2. [CST] CST Microwave Studio, “Getting Started” - www.cst.com
3. Radu-Florin Damian, ”SIMULAREA CIRCUITELOR DE MICROUND. Vol. 1”, Copyright Editura Lumen, 2018, ISBN 978-973-166-485-9
4. Paul Saville - Review of Radar Absorbing Materials Defence R&D Canada – Atlantic, Technical Memorandum DRDC Atlantic TM 2005-003
5. rf-opto.etc.tuiasi.ro/docs/files/Laborator_1_AP_2017.pdf
6. K. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 1
7. FEM_Simulation www.keysight.com
8. FDTD_Simulation www.keysight.com
9. <http://www.scientia.ro/fizica/electromagnetism/6598-maxwell-electromagnetism-lumina-unda-electromagnetica.html>