

Laborator 2

Utilizarea programului de simulare electromagnetă EmPro

Continuare

3. Structura de analizat

În lucrarea de laborator se va investiga o linie de transmisie microstrip pe substratul utilizat la curs: GaAs, $\epsilon_r = 12.9$, $\tan \delta = 0.28 \times 10^{-3}$, $\sigma \approx 0$, $h = 200\mu\text{m}$, o linie cu lățimea de $300\mu\text{m}$.

În acest scop se va analiza o astfel de linie cu lungimea $2400\mu\text{m}$, cu detectarea rezonanțelor care apar și prin calcularea impedanței caracteristice și a parametrului constantă dielectrică efectivă.

Se realizează un studiu de convergență și se estimează eroarea obținută.

Supliment teoretic

Se reamintește că impedanța de intrare într-o linie de lungime l cu impedanța caracteristică Z_0 închisă cu impedanța Z_L este dată cu relația:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)}$$

În structura simulată linia are o impedanță caracteristică diferită de cea a porturilor (care va fi $Z_0 = 50\Omega$), deci pentru linia cu impedanța caracteristică Z_L închisă cu impedanța porturilor $Z_0 = 50\Omega$ relația va fi:

$$Z_{in} = Z_L \frac{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)}{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}$$

În aceste condiții ne așteptăm să obținem coeficientul de reflexie la intrare când porturile (intrare și ieșire) sunt închise pe impedanța $Z_0 = 50\Omega$:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} = \frac{\frac{Z_{in}}{Z_0} - 1}{\frac{Z_{in}}{Z_0} + 1} = \frac{\frac{Z_L}{Z_0} \cdot \frac{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)}{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)} - 1}{\frac{Z_L}{Z_0} \cdot \frac{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)}{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)} + 1} = \frac{\frac{1 + j \frac{Z_L}{Z_0} \tan(\beta l)}{1 + j \frac{Z_0}{Z_L} \tan(\beta l)} - 1}{\frac{1 + j \frac{Z_L}{Z_0} \tan(\beta l)}{1 + j \frac{Z_0}{Z_L} \tan(\beta l)} + 1}$$

Cu notația $Z_L / Z_0 = \alpha$:

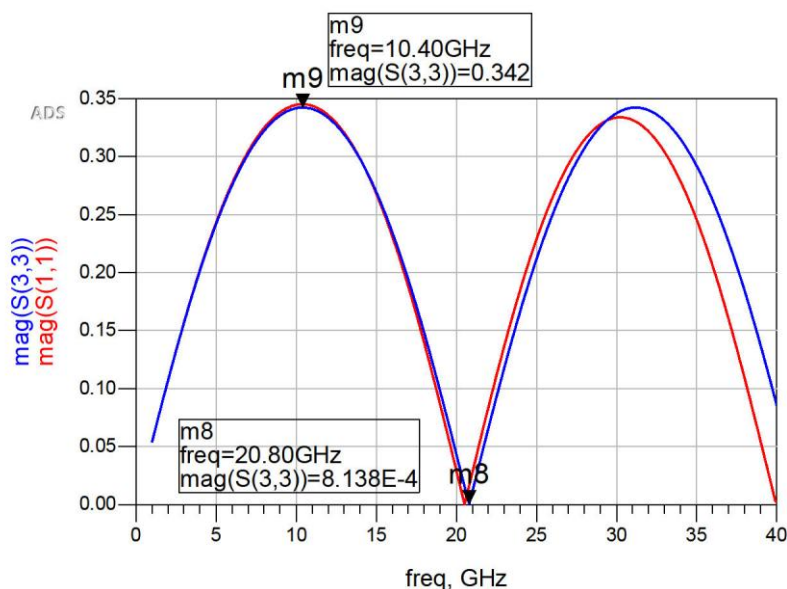
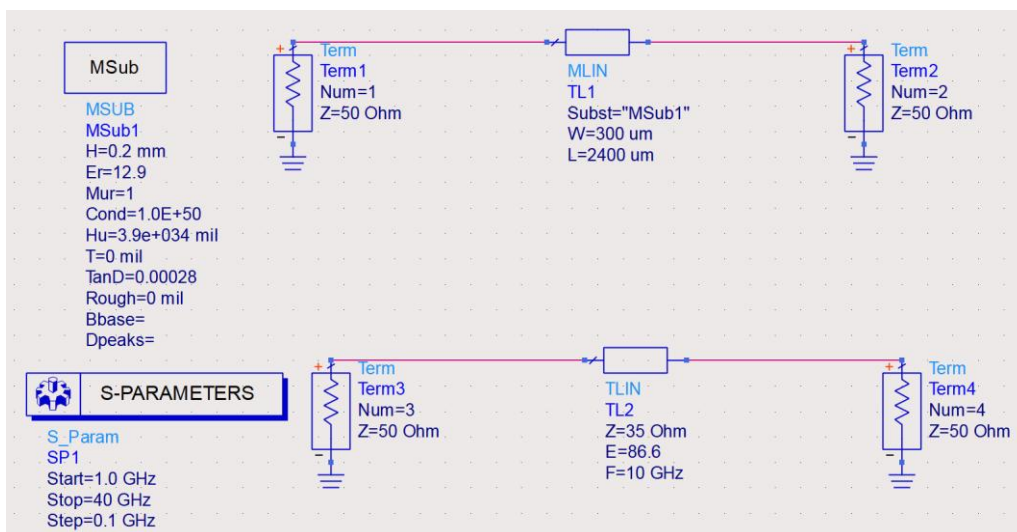
$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} = \frac{\frac{1 + j\alpha \tan(\beta l)}{\alpha} - 1}{\frac{1 + j\alpha \tan(\beta l)}{\alpha} + 1} = \frac{j \tan(\beta l) \cdot (\alpha^2 - 1)}{2 + j \tan(\beta l) \cdot (\alpha^2 + 1)}$$

Când lungimea variază de la 0 la λ valoarea tangentei va avea variații între $-\infty$ și $+\infty$ astfel: egală cu 0 pentru $\beta \cdot l = 0, \pi, 2\pi$ și tinzând spre $\pm\infty$ pentru $\beta \cdot l = \pi/2, 3\pi/2$. Ca urmare obținem:

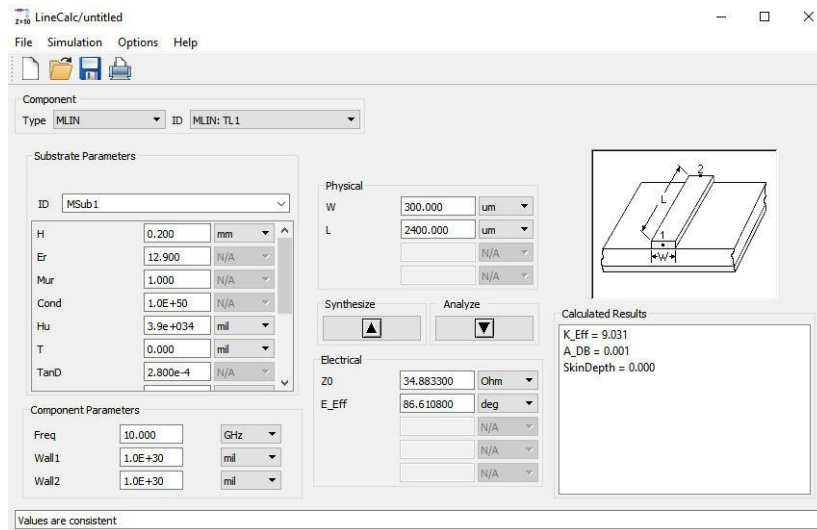
$$|S_{11}^{\max}| = \left| \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 + 1} \right| \quad \beta \cdot l = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$$

$$|S_{11}^{\min}| = 0 \quad \beta \cdot l = 0, \pi, 2\pi, 3\pi \dots$$

Această comportare poate fi vizualizată prin simulare în ADS cu modelul de linie ideală și cu modelul de linie microstrip.



Din tabelele de variație a parametrilor microstrip, pentru $\epsilon_r = 12.88$ și $W/h = 1.5$ se obține $Z_0 \approx 35\Omega$ și $\epsilon_{eff} = 8.91 \div 8.96$. Ca alternativă se poate folosi ADS LineCalc care oferă valorile $Z_0 = 34.88\Omega$ și $\epsilon_{eff} = 9.03$.



Pentru $\alpha = 0.698$, obținem maximul lui $|S_{11}|$ 0.345 apropiat de valoarea obținut în ADS.

Constanta de propagare β va depinde de constanta dielectrică efectivă:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{c} \cdot f = \frac{2\pi}{c_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot f = \frac{2\pi}{c_0} \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}$$

Presupunând că ϵ_{eff} nu depinde de frecvență (ceea ce nu este în general perfect adevărat) putem obține valoarea lui ϵ_{eff} căutând maximele și minimele coeficientului de reflexie la intrare:

$$\beta l|_{f_k} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l = k \cdot \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{2\pi}{c_0} \cdot f_k \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}} \cdot l = k \cdot \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sqrt{\epsilon_{eff}} = k \cdot \frac{c_0}{4 \cdot l \cdot f_k}$$

$$\epsilon_{eff} = k^2 \cdot \left(\frac{c_0}{4 \cdot l \cdot f_k} \right)^2$$

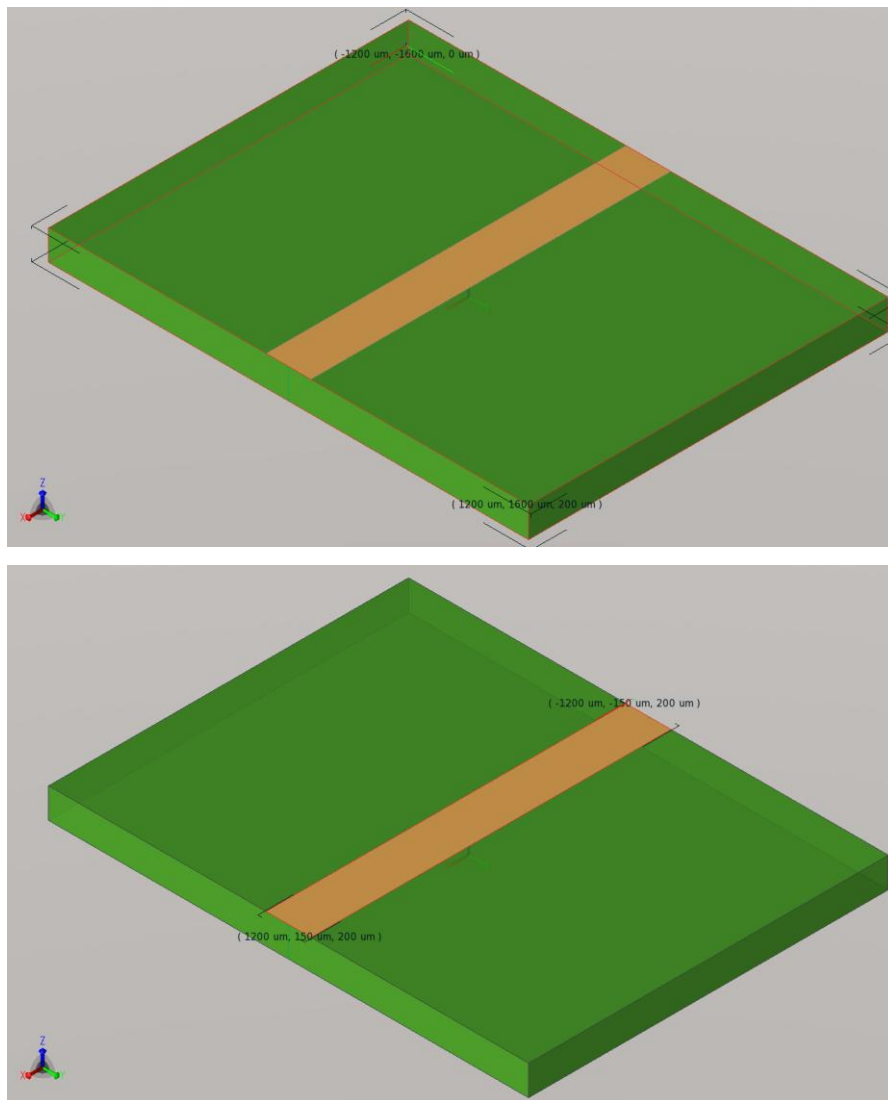
unde c_0 este viteza luminii în vid ($c_0 = 2.99790 \cdot 10^8$ m/s) iar k este indicele maximului sau minimului determinat (în cazul acesta, pentru $f_1 = 10.4$ GHz avem $k = 1$). Obținem $\epsilon_{eff} = 9.02$, foarte aproape de valoarea din LineCalc.

Mod de lucru

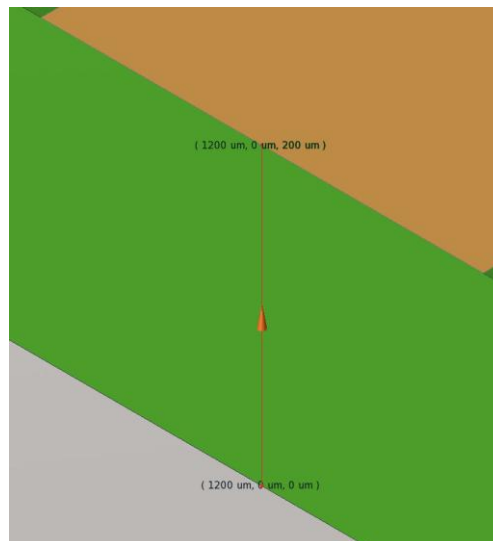
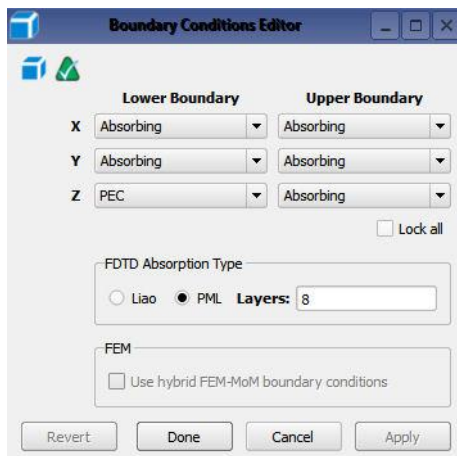
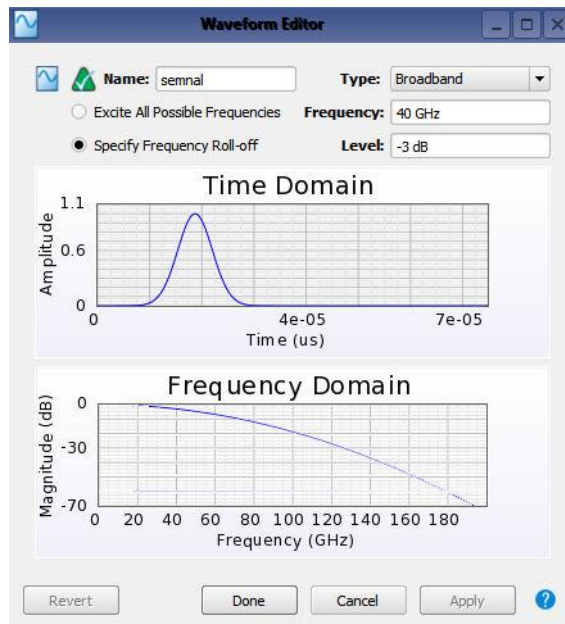
Mod de lucru

Se desenează linia microstrip lățime de $300\mu\text{m}$ și lungime $2400\mu\text{m}$ pe substrat GaAs cu parametrii materialului standard din biblioteca EmPro ($\epsilon_r = 12.9$, $\tan \delta = 0.28 \times 10^{-3}$) și cu

înălțimea $h = 200\mu\text{m}$. Se folosește modelul pentru linie de tip suprafață conductivă ideală (Sheet Body/PEC).

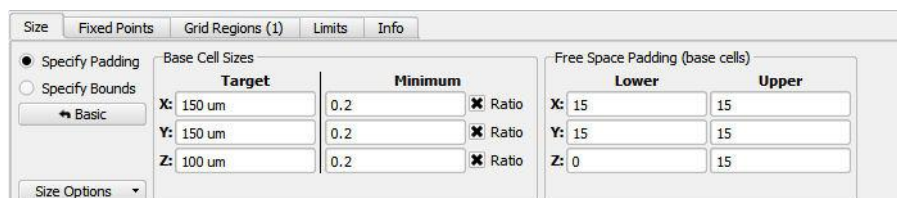


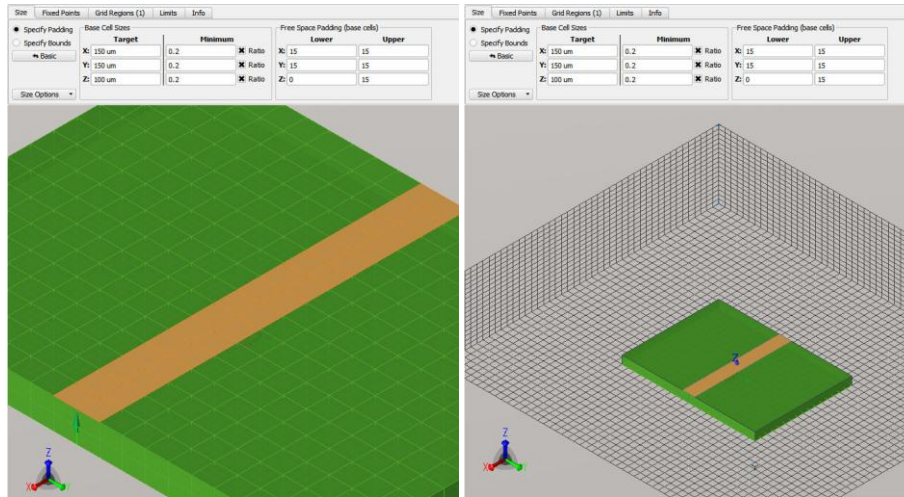
Pentru a asigura detecția suficient de precisă în banda $1 \div 40\text{GHz}$ se definesc sursele de semnal (FDTD) astfel încât să acopere această bandă de frecvențe (Broadband/Specify Frequency Roll-Off/40GHz). Cele două porturi vor fi aplicate între planul inferior (care va deveni plan de masă prin indicarea condițiilor la limită de tip PEC pentru $z = 0$) și linia microstrip.



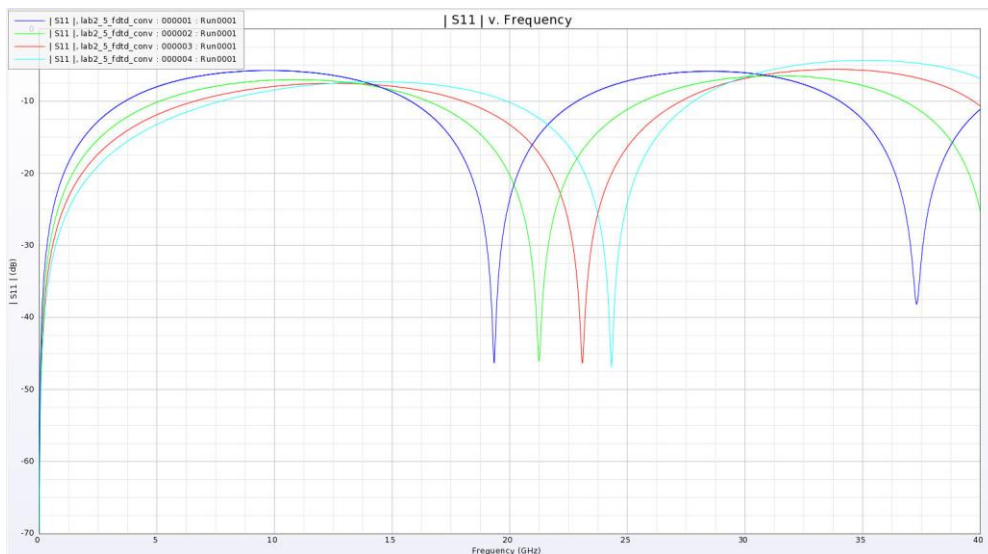
FDTD

Grila de calcul inițială (FDTD Grid) se va alege cu o celulă de dimensiune de $150\mu\text{m}$ (jumătate de linie) simetrică după direcțiile x și y și $100\mu\text{m}$ (jumătate din înălțimea substratului). Elementele tampon (Padding cells) reprezintă 15 celule a $150/100\mu\text{m}$, suficient pentru a îndepărta suficient limitele de calcul de marginile structurii.



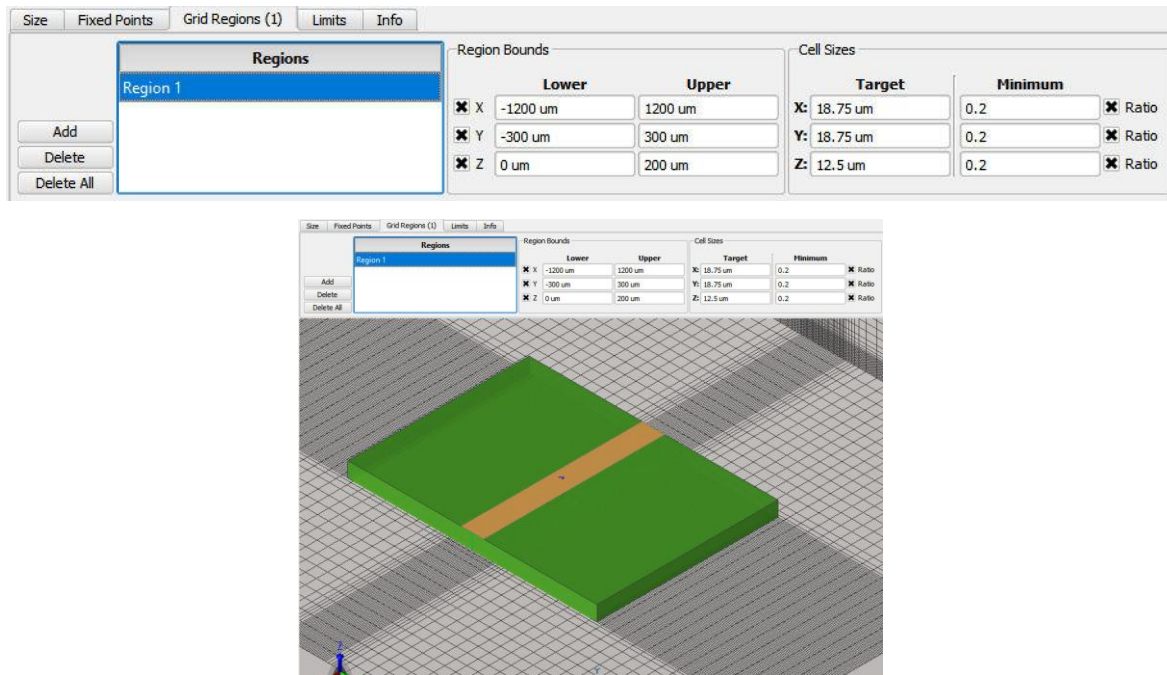


În continuare vom face o analiză de convergență, realizând simulări pentru număr de celule din ce în ce mai mare, urmărind evoluția frecvenței și a valorii constantă dielectrică efectivă, în scopul realizării unei caracteristici de convergență. Notăm la fiecare pas cantitatea de memorie RAM utilizată, timpul de calcul necesar, numărul total de celule (informațiile se găsesc în secțiunile Geometry -> FDTD Grid -> Info și Simulations -> "Selectie simulare" -> Diagnostics).



Se modifică spre valori din ce în ce mai mici dimensiunile celulelor, urmărind pe cât posibil dimensiunea celulei să fie un submultiplu al dimensiunilor importante din structură (lățime/lungime linie și înălțime substrat). O modalitate comodă de a realiza acest lucru constă în înjumătățirea permanentă a dimensiunilor după fiecare direcție x,y,z, cu precauția, dacă este posibil de a mări (dubla) numărul de celule tampon până la limitele volumului simulat (Boundary) pentru a păstra aceeași structură simulată. Deoarece înjumătățirea celulei duce la o variație exponențială a numărului de celule (2^N – o creștere foarte abruptă) e posibil ca la un moment dat să se atingă limita permisă de sistemul de calcul folosit (RAM și/sau

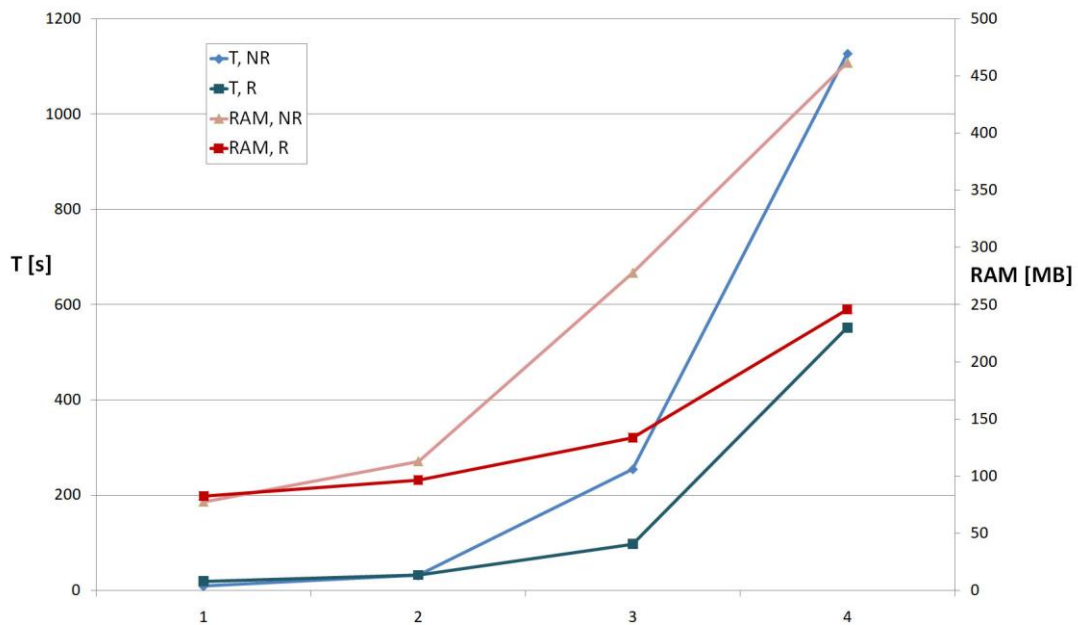
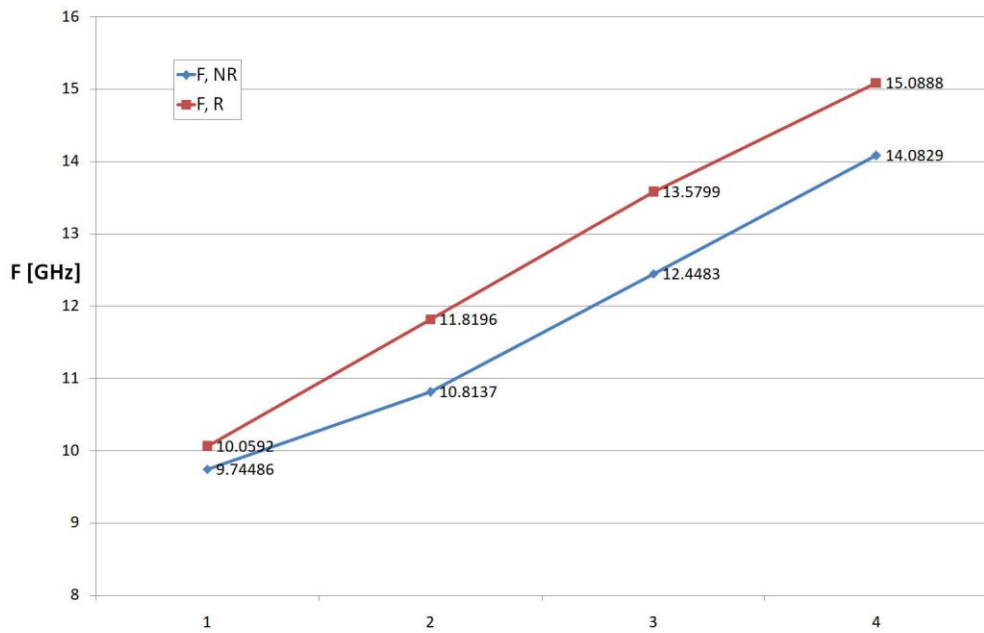
timp). În aceste condiții merită de observat că importanță mare pentru rezultat prezintă câmpul din apropierea imediată a liniei, și mai puțin cel apropiat de limita volumului de calcul. Ca urmare e mai eficient să micșorăm celulele doar în jurul liniei nu în restul volumului, lucru care poate fi obținut utilizând FDTD Grid -> Fixed Points sau FDTD Grid -> Grid Regions.



În acest mod putem concentra un număr mai mare de celule în zonele esențiale pentru a obține rezultate în timp mai scurt de calcul.

Se completează tabelul următor, unde x, y și z sunt direcțiile axelor. Exemplul este completat pentru x în lungul liniei, y direcția perpendiculară pe linie (lățime), z direcția verticală. $\Delta x, y, z$ reprezintă dimensiunea minimă a celulei, C_x, y, z numărul de celule după direcția respectivă, CT numărul total de celule utilizat

Nr	Timp	RAM [MB]	Δx	Δy	Δz	C_x	C_y	C_z	CT	F [GHz]	ϵ_{eff}	Obs
1	9s	77.5	150	150	100	46	52	17	40664	9.74486	10.269	fără "Region", padding 15
2	32s	112.9	75	75	50	92	104	34	325312	10.8137	8.340	fără "Region", padding 30
3	4m15s	278	37.5	37.5	25	184	208	68	2602496	12.4483	6.293	fără "Region", padding 60
4	18m48s	462	18.75	18.75	12.5	248	296	76	5579008	14.0829	4.917	fără "Region", padding 60
5		>1000	9.375	9.375	6.25	376	472	92	16327424			nerealizat, depășire RAM
6	19s	82.6	75	75	50	64	56	19	68096	10.0592	9.637	celule 150/150/100, padding 15, cu "Region" 75/75/50
7	32s	96.7	37.5	37.5	25	96	68	26	169728	11.8196	6.980	150/150/100, cu "Region" 37.5/37.5/25
8	1m37s	133.7	18.75	18.75	12.5	162	88	36	513216	13.5799	5.288	150/150/100, cu "Region" 18.75/18.75/12.5
9	9m12s	246.1	9.375	9.375	6.25	292	122	54	1923696	15.0888	4.283	150/150/100, cu "Region" 9.375/9.375/6.25



Lucru individual în laborator

Se va repeta demersul prezentat pentru a doua frecvență de rezonanță (frecvența la care coeficientul de reflexie se anulează: $\approx 20 \div 25 \text{GHz}$). Se reamintește că $-30 \div -40 \text{dB} \approx 0$. În exemplu a fost analizat punctul în care apare un maxim al coeficientului de reflexie, punct în care tangenta la graficul de variație are valoare mică (≈ 0) și rezultă implicit o eroare mare de determinare/calculare.

Se completează un tabel asemănător și se reprezintă graficul de convergență pentru frecvență/constantă dielectrică.