



UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTRONICĂ ȘI TELECOMUNICAȚII
DEPARTAMENTUL DE MĂSURĂRI ȘI ELECTRONICĂ OPTICĂ

**CONTRIBUȚII LA DOZIMETRIA DE RADIOFRECVENȚĂ
ÎN EXPUNERILE CONTROLATE ALE PROBELOR
BIOLOGICE**

-REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT-

Conducător de doctorat:

Prof.dr.ing. Alimpie IGNEA

Doctorand

Ing. Cora IFTODE

În decursul ultimelor decenii, aparatura generatoare de câmp electromagnetic a cunoscut o dezvoltare fără precedent, atât cea din domeniul militar cât și cea din domeniul medical, industrial sau al utilizatorilor obișnuți de echipamente electronice și electrocasnice. Un număr tot mai mare de studii sunt focalizate pe efectele interacțiunii între câmpurile electromagnetice și materia vie, pe termen scurt, mediu și lung. Sunt studiate atât efectele benefice ale interacțiunii câmp–materie vie, cum este cazul hipertermiei, în care energia de microunde este folosită pentru încălzirea locală a celulelor tumorale, ducând astfel la distrugerea lor dar și posibile efecte adverse–efecte biologice sau la nivelul stării de sănătate. Cantitatea de energie absorbită de materialele biologice este cuantificată cu ajutorul ratei specifice de absorbție (engl. *SAR*). Aceasta indică însă doar cantitatea de energie electromagnetică transformată în căldură, adică așa numitele efecte termice. Adesea este dificil sau imposibil de măsurat creșterea de temperatură în țesuturi și, în consecință, au fost dezvoltate programe de analiză numerică a propagării câmpului electromagnetic în materie. Acestea implementează ecuațiile lui Maxwell în formă diferențială sau integrală, calculând soluțiile ecuațiilor prin diverse metode (metoda elementului finit, metoda diferențelor finite etc).

Scopul prezentei teze este analiza dozimetrică numerică și experimentală într-un sistem de expunere de tip celulă TEM, pentru diverse probe dielectrice și biologice. Metoda numerică abordată, studiată și implementată este metoda diferențelor finite în domeniul timp (FDTD), în vederea utilizării ei în analize dozimetrice (de absorbție a câmpului în probe dielectrice/biologice). Rezultatele obținute prin simulare au fost validate de către măsurările experimentale.

Capitolul 1 este o scurtă introducere în domeniul abordat, privind standardele actuale de expunere a populației la câmpuri electromagnetice de radiofrecvențe și microunde, precum și metodele folosite în dozimetria experimentală și numerică.

Capitolul 2 prezintă noțiunile de interes pentru tema aleasă. Astfel, sunt prezentate ecuațiile lui Maxwell în formă integrală și diferențială și relațiile constitutive asociate lor.

Proprietățile dielectrice ale mediilor biologice, dar nu numai, sunt specificate cu ajutorul permitivității dielectrice complexe:

$$\epsilon^* = \epsilon_0(\epsilon' - j\epsilon'')$$

Partea reală a permitivității caracterizează răspunsul dielectricului la câmpul aplicat, adică gradul de polarizare indusă, iar partea imaginară caracterizează pierderile de putere activă, prin transformarea energiei câmpului electric în energie termică.

Conversia energiei dintr-o formă în alta este exprimată de teorema lui Poynting:

$$-\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot \hat{n} dS = \int_V (\sigma |\vec{E}|^2) dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2 \right) dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{1}{2} \epsilon |\vec{E}|^2 \right) dV$$

unde: S este o suprafață închisă, ce mărginește volumul V . Primul termen din partea dreaptă a ecuației reprezintă puterea disipată sub formă de căldură, al doilea termen reprezintă rata de variație a energiei stocate în câmp magnetic, iar al treilea termen reprezintă rata de variație a energiei stocate în câmpul electric. Prin urmare, primul termen al ecuației reprezintă puterea care pătrunde în volumul V , prin suprafața S .

Vectorul lui Poynting este definit astfel:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

și reprezintă densitatea de putere cedată/absorbită prin suprafața închisă S .

Trebuie avut în vedere faptul că teorema lui Poynting se aplică doar în cazul suprafețelor închise; în caz contrar se obțin interpretări eronate ale energiei absorbite.

Dozimetria de radiofrecvență urmărește cuantificarea energiei absorbite de un corp biologic când este expus la un câmp EM de radiofrecvență.

În forma cea mai simplă, dozimetria presupune:

1. determinarea câmpurilor incidente, prin măsurare sau prin calcul – cunoscându-se sursele lor.
2. determinarea câmpurilor în interiorul obiectului iradiat (numite câmpuri interne), de asemenea, prin măsurare, când este posibil, sau prin calcul.

Acest tip de dozimetrie poate fi folosit atunci când obiectul expus este situat în zona de câmp depărtat a antenei, astfel încât prezența sa să nu perturbe sursa de câmp. Acest lucru este în general valabil pentru sistemele de expunere (de exemplu, celula TEM). Practic, dozimetria stabilește legătura între câmpurile interne (cele care produc efecte biologice în cazul materiei vii) și câmpurile incidente, care pot fi măsurate cu ușurință.

Rata specifică de absorbție (engl. *SAR*: Specific Absorption Rate) este unul dintre parametrii principali folosiți în special în domeniul de radiofrecvență pentru a cuantifica energia absorbită de un material biologic de la un câmp electromagnetic. Ea reprezintă așadar un mod de a cuantifica efectele termice ale interacțiunii câmp-materie biologică. *SAR* se poate defini local/punctual sau global. Rata specifică de absorbție, într-un punct al obiectului iradiat, este definită ca viteza de variație în timp a energiei transferate purtătorilor de sarcină dintr-un volum infinitezimal definit în jurul aceluși punct, raportată la masa aceluși volum infinitezimal.

$$SAR = \frac{\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)}{\rho_m}$$

unde: W – reprezintă energia purtătorilor de sarcină din volumul infinitezimal considerat; ρ_m – reprezintă densitatea masică (masa volumului infinitezimal).

Pentru regim sinusoidal, puterea medie absorbită în unitatea de volum este dată de:

$$P_m = \sigma |E_{int}|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E_{int}|^2$$

unde σ și ϵ'' caracterizează proprietățile electrice ale volumului considerat, iar E_{int} reprezintă câmpul electric în interiorul aceluși volum.

Rata specifică de absorbție depinde de mai mulți factori, între care: proprietățile dielectrice ale țesutului, geometria și dimensiunile țesutului, polarizarea și frecvența câmpului incident, configurația câmpului (câmp apropiat, câmp depărtat), mediul de expunere, timpul și intensitatea expunerii etc.

Dozimetria experimentală presupune fie determinarea câmpului electric în interiorul probei expuse (lucru adesea imposibil, mai cu seamă în țesuturile vii) fie măsurarea creșterii de temperatură într-un interval de timp.

Există mai multe metode de măsurare a temperaturii:

1. Metode calorimetrice, folosite în special pentru măsurări in-vitro, în care se urmăresc variațiile de încălzire/răcire pentru a estima energia absorbită într-o anumită probă. Se folosesc pentru determinarea ratei specifice de absorbție medii (engl. whole-body *SAR*).

2. Măsurarea diferenței de putere într-un sistem închis. Această metodă presupune folosirea unor cuploare direcționale și wattmetre la fiecare dintre porturile dispozitivului de expunere. Pentru incintele închise, cum ar fi celula TEM, se determină în primă fază puterea absorbită în incintă, în absența probei, astfel:

$$P_E = P_I - P_O - P_R$$

unde: P_E – reprezintă puterea absorbită în dispozitivul de expunere; P_I – reprezintă puterea de intrare; P_O – reprezintă puterea de ieșire; P_R – reprezintă puterea reflectată.

Apoi se introduce proba și se măsoară în același mod puterea absorbită în incintă și în probă, P_S . Puterea disipată doar în interiorul probei este dată de diferența între P_S și P_E . Pentru determinarea *SAR*, se împarte puterea disipată în probă la masa probei.

3. Metode termometrice, cu sonde speciale, neperturbative.

4. Tehnici termografice. Acestea folosesc camere termografice pentru a determina distribuția *SAR* în animale într-un timp foarte scurt. Dezavantajul metodei îl constituie prețul ridicat.

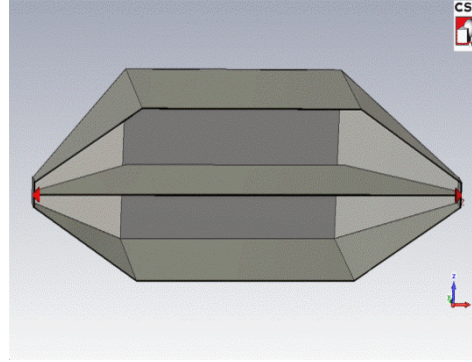
5. Folosirea unor sonde de câmp electric implantabile. Are avantajul măsurării câmpului electric cu acuratețe foarte bună și dezavantajul rigidității sondei și bandă de frecvențe limitată.

Rata specifică de absorbție se poate determina din variația de temperatură, astfel:

$$SAR = C \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

unde C : căldura specifică a materialului iradiat, ΔT – variația de temperatură care se produce în intervalul de timp Δt .

Unul dintre sistemele de expunere utilizate în dozimetria de radiofrecvență este celula transversal electromagnetică (prescurtat: celula TEM). Aceasta este o incintă formată dintr-o secțiune dreptunghiulară de linie de transmisie, terminată cu trunchiuri de piramidă care permit conectarea cablului coaxial la intrarea și ieșirea celulei și asigură, totodată, adaptarea de impedanță. Datorită existenței conductorului central (numit septum) celula asigură propagarea modului transversal electromagnetic (TEM) până la frecvența la care sunt excitate și moduri de propagare de ordin superior. În figura de mai jos se prezintă un model de celula TEM proiectat și construit de către autoare (realizarea practică și modelul numeric aferent)



Capitolul 3 tratează una dintre metodele numerice cele mai uzitate în analiza interacțiunii dintre câmpul electromagnetic și materie și anume metoda diferențelor finite în domeniul timp (FDTD). Este descris algoritmul inițial, dezvoltat de K. Yee, și efectul diferiților parametri de modelare numerică asupra rezultatelor. Fiind o metodă numerică de analiză, atât spațiul (domeniul analizat) cât și timpul trebuie discretizate. Ca atare, valoarea câmpului electric/magnetic se determină doar în puncte discrete din spațiu și la momente discrete de timp. De aici rezultă una dintre erorile inerente oricărui algoritm numeric: eroarea de discretizare. Cu cât eșantionarea spațială și temporală este mai fină, cu atât eroarea de discretizare este mai mică. În schimb, eșantionarea mai fină presupune creșterea timpului de calcul și a necesarului de memorie. În plus, eșantionarea spațială și cea temporală trebuie corelate pentru asigurarea stabilității numerice a algoritmului. Propagarea în aer liber este simulată prin utilizarea așa numitelor ABCs (Absorbing Boundary Conditions). În acest capitol am analizat, prin implementări în Matlab, propagarea câmpului electromagnetic în medii uni- și bi-dimensionale, pentru diverse forme de undă, parametri de material și condiții de frontieră. În acest capitol am urmărit aprofundarea unei metode numerice, înțelegerea avantajelor și limitărilor ei. Pentru analiza propagării câmpului în medii tri-dimensionale, cu geometrii și proprietăți complexe, complexitatea și timpul de elaborare al unui cod adecvat ar fi crescut foarte mult. Pe de altă parte, există în prezent soft-uri comerciale optimizate și performante pentru analiza propagării câmpului electromagnetic și interacțiunea sa cu materia. Un astfel de software este și CST Microwave Studio, care se bazează pe metoda integrării finite (FIT). Diferența între FIT și FDTD este că prima discretizează ecuațiile lui Maxwell în formă integrală, în timp ce FDTD folosește forma diferențială a ecuațiilor.

Capitolul 4 prezintă principalele determinări dozimetrice efectuate experimental și numeric de către autoare. Capitolul are două părți: în prima se prezintă o celulă TEM pe care am construit-o în laborator și se determină performanțele acesteia; în a doua parte se prezintă un model comercial de celulă TEM, utilizată pentru iradierea cu puteri mari a unor probe vegetale (semințe de porumb), având ca scop urmărirea unor posibile corelări între parametrii de expunere și efectele biologice observate.

Celula TEM proiectată a fost modelată numeric în CST Microwave Studio, iar modelul numeric a fost validat de către experiment prin urmărirea câtorva parametri de interes. Astfel, s-au determinat pe cale analitică, simulare și experiment, frecvențele de rezonanță ale celulei construite, obținându-se valori

foarte apropiate între cele trei. S-au determinat parametrii de împrăștiere ai celulei, cu ajutorul unui analizor de rețea și, respectiv, în CST Microwave Studio. Un alt demers important a fost determinarea distribuției de câmp electric în interiorul celulei, cunoscut fiind că, pentru studii dozimetrice, proba trebuie să fie expusă în câmp uniform. Unul dintre avantajele simulării este și faptul că se poate determina valoarea câmpului în orice punct din spațiu (valoarea sa între punctele de discretizare este obținută prin interpolare) și se poate vizualiza distribuția sa în plan sau chiar distribuția volumică a vectorilor de câmp. Măsurarea intensității câmpului electric, cu rezoluție spațială adecvată, este însă dificilă și perturbativă, dacă se folosesc sonde de câmp. Pentru determinarea distribuției de câmp am adoptat o metodă recent introdusă în literatura de specialitate, în care se folosește un fir metalic perturbator, introdus în celula TEM în punctele în care se dorește evaluarea câmpului. Se măsoară, pe rând (pentru fiecare punct), parametrii de reflexie cu și fără elementul perturbator introdus. Diferența celor două valori este direct proporțională cu intensitatea câmpului electric în punctele considerate. Incertitudinile de determinare asociate metodei folosite sunt evaluate și explicate. Ultimul parametru de interes a fost comportamentul celulei TEM operând cu „sarcină”, adică cu probă biologică inserată. S-au utilizat patru lichide dielectrice standard (apă distilată, etanol, etilen glicol și ser fiziologic), expuse într-un vas de tip Petri. Pentru acestea s-a determinat coeficientul de absorbție, prin măsurarea parametrilor de împrăștiere cu și fără probă inserată. Puterea totală absorbită este determinată în funcție de parametrii de împrăștiere astfel:

$$P_a = P_{in}(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$$

unde s_{11} reprezintă coeficientul de reflexie la portul de intrare al celulei, iar s_{21} reprezintă coeficientul de transmisie al celulei. Am determinat puterea absorbită în celula goală (fără probă) și puterea absorbită cu proba inserată. Diferența celor două reprezintă puterea absorbită doar în probă. Am numit coeficient de absorbție raportul între puterea absorbită și puterea incidentă. Am constatat o bună concordanță între valorile obținute din simulare și cele obținute din experiment, în gama de frecvențe 100 - 800 MHz. Am verificat apoi dependența coeficientului de absorbție de volumul probei expuse, de frecvență și de plasarea geometrică. Distribuția SAR, vizualizată în CST Microwave Studio, a confirmat concluziile trase cu privire la coeficientul de absorbție. Am evaluat apoi incertitudinea de determinare a parametrilor de împrăștiere și a coeficientului de absorbție. Am obținut o valoare de 34%, care, pentru experimentul considerat, este acceptabilă. În plus, pentru valorile obținute în simulare, am observat că acestea depind în foarte mare măsură de grila de discretizare folosită. Alegerea grilei de discretizare este, în general, rezultatul unui compromis între gradul de acuratețe dorit și timpul de simulare. Pentru celula TEM construită am utilizat puteri de expunere de aproximativ 10 mW. Pentru iradieri cu puteri mai mari, pentru care era necesar un amplificator, am utilizat o celulă TEM comercială, de la firma americană IFI (Instruments For Industry). Această celulă asigură un câmp electromagnetic de uniformitate mai ridicată, întrucât are plasate în interior plăcuțe de ferită și piramide radioabsorbante. Am modelat și analizat în CST Microwave Studio și această nouă celulă TEM, iar performanțele modelului numeric au fost comparate cu cele ale modelului real, obținând o bună concordanță între ele. S-au iradiat apoi 18 loturi de semințe de porumb, fiecare lot conținând 15 semințe. Parametrii de expunere sunt redați în tabelul următor:

Proba nr.	Masa (g)	Frecvența (GHz)	Timp (min.)	Putere (W)
1	3.3	1	60	10
2	3.2269	1	30	10
3	3.2388	1	180	10
4	3.1143	1	30	17
5	3.1845	1	60	17
6	3.1501	1	180	17
7	3.0724	2.5	60	10
8	3.2064	2.5	30	10
9	3.2951	2.5	180	10
10	3.2022	0.6	180	10
11	3.2507	0.6	60	10

12	3.2174	0.6	30	10
13	3.1739	0.6	180	2
14	3.2977	0.6	60	2
15	3.291	0.6	30	2
16	3.3277	2.5	180	2
17	3.1838	2.5	60	2
18	3.3535	2.5	30	2

Cele 18 loturi expuse și lotul martor au fost analizate de către un biolog pentru evaluarea indicelui de aberații cromozomiale și a indicelui mitotic (rata de diviziune celulară). Pentru cele 18 loturi s-a determinat numeric valoarea *SAR*. Coroborând parametrii de expunere cu valorile *SAR* obținute și cu efectele biologice observate, am constatat următoarele:

- la valori diferite ale *SAR*, pe măsura creșterii duratei de expunere, indicele mitotic scade. Rata diviziunii celulare este deci încetinită de expunerile mai lungi, indiferent de doză. S-a constatat și că valorile mai mari ale *SAR* determină adesea scăderea mai puternică a indicelui mitotic la o aceeași durată de expunere. Totuși influența *SAR* asupra *IM* este cu mult mai slabă față de influența duratei de expunere.

- la o aceeași putere incidentă în celula TEM, cea mai mare frecvență utilizată, cea de 2.5 GHz, conduce la scăderea cea mai puternică a *IM* cu durata expunerii, față de celelalte două frecvențe. Mitoza este, deci, cel mai puternic încetinită de frecvența cea mai mare. Raportul între lungimea de undă aferentă acestei frecvențe și dimensiunea seminței (absorbția de energie per sămânță/condiție de rezonanță geometrică) ar putea fi explicația acestei observații.

- indicele de aberații cromozomiale nu se poate corela nici cu durata expunerii și nici cu *SAR*. Procentul de aberații cromozomiale nu depinde de energia specifică absorbită în probe însă, față de proba martor, care are cel mai mic indice *IA*, toate cele 18 probe expuse prezintă aberații cromozomiale în număr mai mare. Dintre ele, există câteva pentru care *IA* depășește cu cca. 50% valorile indicelui la proba neiradiată. Aceste observații indică clar efectul citogenetic al iradierii neionizante, însă acesta nu se poate corela nici cu durata expunerii, nici cu rata dozei și nici cu energia totală absorbită.

- *SAR* mai mare nu este responsabil de un indice de aberații mai mare, însă efectul net de citogenicitate este legat mai degrabă de valoarea frecvenței. El nu se corelează deloc cu durata expunerii.

Teza se incheie cu prezentarea sintetică a concluziilor și contribuțiilor personale. Sunt, de asemenea, anexate două dintre programele Matlab pe care le-am scris : primul implementează propagarea câmpului electromagnetic în medii bidimensionale cu întindere finită, respectiv infinită, folosind metoda diferențelor finite în timp, iar al doilea redă o parte din codul scris pentru determinarea uniformității câmpului electric într-un volum dat, pe baza parametrilor de împrăștiere măsurați de către analizorul de rețea.