

UNDELE MILIMETRICE - METODA MODERNĂ DE DIAGNOSTICĂ ȘI TRATAMENT

Natalia GUBCEAC^{1,2}

¹Departamentul Fizica, Facultatea de Electronică și Telecomunicații,
Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Moldova

²Facultatea de Medicină, Catedra de Fiziologie a Omului și Biofizica,
Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie "Nicolae Testemițanu", Chișinău, Moldova

Autorul corespondent: Gubceac Natalia, natalia.gubceac@scee.utm.md

Rezumat. În această lucrare aducem o contribuție asupra dezvoltării metodelor de diagnostică și tratament bazate pe mecanismul de generare a undelor electromagnetice de frecvență înaltă (milimetrice și terahertz) în mediile biologice. Este discutat un model de interacțiune a undelor milimetrice cu fononii și fotonii generați de celulele materiei vii. Astfel se analizează evoluția dinamicii sistemului considerat pentru diferiți parametri.

Cuvinte cheie: unde milimetrice și terahertz, mediu biologic, fotoni și fononi Frohlich, stări stabile și haotice.

Introducere

Cercetările teoretice și experimentale recente declanșează un interes înalt pentru tehnologiile bazate pe radiațiile din regiunea frecvențelor înalte (0,1 – 20) Terahertz (THz), precum și undele de frecvență milimetrică, situate în domeniul 30-300 GHz corespunzător intervalului de lungime de undă 1-10 mm. La moment, această regiune a spectrului electromagnetic reprezintă zona de frontieră a multor cercetări multi – disciplinare [1]. Fotonii THz datorită naturii lor ne-ionizante, pot fi utilizați în diverse aplicații nedistructive ale biomedicinii moderne, metrologie și controlul calității, investigații spectroscopice, comunicațiile și securitate, detectare și imagistică [2–10] etc.

Tehnologia THz este un domeniu de cercetare promițător cu diverse aplicații științifice și tehnice. Spre exemplu, imagistica THz este un domeniu nou ce utilizează teorii, modele matematice și tehnici de descriere și evaluare a imaginilor THz, care încă nu s-au maturizat complet. Există multe întrebări deschise cu privire la modul de lucru, la frecvențele THz utilizate, cât și la interacțiunea acestor unde cu sistemele celulare și bio-moleculare. Întrucât tehnologiile THz reprezintă un domeniu relativ nou, teoriile și modelele matematice pentru evaluarea sistemelor de interacțiune dintre undele THz și țesutul biologic nu sunt încă complet explicate. Toate aceste incertitudini au condus la formularea mai multor ipoteze din punct de vedere teoretic referitor la mecanismul de interacțiune.

A fost demonstrat ca celulele biologice vii, produc unde MM și THz, datorită proprietăților, a proteinelor din componența membranei cât și a pompelelor Na-K. Unele studii presupun că permeabilitatea membranei celulare pentru ionii de potasiu este cauzată de radiația electromagnetică de intensitate joasă [11]. Permeabilitatea membranelor eritrocitelor contribuie la accelerarea procesului de oxidare a acizilor care fac parte din structura lipozomilor, iar aceștia participă la accelerarea conductivității ionice prin membrana celulară [12, 13].

Pentru prima dată a fost înaintată o ipoteză de către H. Fröhlich, în 1968, precum că țesuturile biologice vii generează unde milimetrice [14-16]. Conform acestei teorii sistemele biologice vii generează oscilații ale macromoleculilor în domeniul de frecvență caracteristic undelor milimetrice. Energia proceselor vitale în celulele vii se transmite oscilațiilor de dipol local excitate. Datorită fenomenelor neliniare, la interacțiunea oscilațiilor dipol și legăturii acestora cu undele elastice se produce tranziția sistemului într-o stare metastabilă cu un singur tip de oscilații, trecând în starea fundamentală. Are loc formarea unui dipol colectiv gigant, care reprezintă o stare coerentă a obiectului biologic. Această stare cooperativă condiționează crearea în sistemele biologice a fononilor bose-condensați în regiunea frecvențelor de ordinul 10^{11} Hz. Multe mode vibraționale în

biomoleculele complexe se încadrează în domeniul 1 GHz până la 100 GHz [17]. În acest domeniu de frecvențe, de asemenea, sunt situate un număr important de mode vibraționale ale apei, vibrațiile atomilor în moleculele organice și legăturile de hidrogen [18]. În acord cu ideea lui Fröhlich, dacă energia este furnizată peste o rată critică lanțului dipolar sau ramurilor modurilor electrice, apare condensarea Bose-Einstein, o stare cu energia cea mai scăzută. Odată cu apariția condensului, se stabilește o puternică oscilație electromagnetică coerentă în sistem, iar energia lanțului în modul cu cea mai mică energie poate stimula diferite procese de viață, cum ar fi diviziunea celulară și sinteza proteinelor.

Evoluția dinamicii neliniare a sistemului de celule ori macromolecule la iradierea acestora cu unde milimetrice

Modelul studiat și cercetat este reprezentat în Figura 1 și constă dintr-o sursă de unde MM. Radiația primită de la această sursă este folosită pentru iradierea mediului biologic studiat. Iradierea mediului biologic are loc sub formă de pompaj (P) din partea sursei. După iradierea mediului biologic cu undele milimetrice, acest mediu generează unde, câmpul electromagnetic emis de acest mediu este amplificat cu un amplificator ca mai apoi să fie iar iradiat acest mediu. Iradierea ulterioară a mediului biologic are loc în baza unui feedback optic.

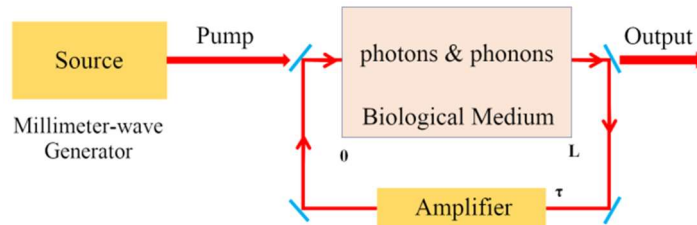


Figura 1. Modelul de iradiere a țesutului biologic cu unde electromagnetice MM sau THz

Astfel, evoluția mediului biologic în urma iradierii cu unde milimetrice sau terahertz poate fi descrisă de un sistem de patru ecuații diferențiale reprezentat mai jos:

$$\frac{dE_1}{dT} = -\sigma E_1 - (\tilde{\delta} - \tilde{\omega}_0) E_2 + 2\alpha\tilde{\gamma}Y_1 + \alpha \left\{ 2\tilde{\gamma} \left[\delta - (Y_1^2 + Y_2^2) \right] - 1 \right\} a_2 + \Gamma \left[\cos(\varphi) E_1(t - \tau) + \sin(\varphi) E_2(t - \tau) \right] + P, \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dT} = (\tilde{\delta} - \tilde{\omega}_0) E_1 - \sigma E_2 + 2\alpha\tilde{\gamma}Y_2 - \alpha \left\{ 2\tilde{\gamma} \left[\delta - (Y_1^2 + Y_2^2) \right] - 1 \right\} Y_1 + \Gamma \left[\cos(\varphi) E_2(t - \tau) + \sin(\varphi) E_1(t - \tau) \right], \quad (2)$$

$$\frac{dY_1}{dT} = -\alpha E_2 - Y_1 - \left[\delta - \nu(Y_1^2 + Y_2^2) \right] Y_2, \quad (3)$$

$$\frac{dY_2}{dT} = -\alpha E_1 + \left[\delta - \nu(Y_1^2 + Y_2^2) \right] Y_1 - Y_2, \quad (4)$$

unde E_1 și E_2 sunt fotoni Fröhlich emiși, iar Y_1 și Y_2 fononii generați de moleculele sau celule sistemului biologic. În sistemul de ecuații prezentat au fost utilizate următoarele mărimi adimensionale:

$$\delta = \frac{\Delta}{\gamma}, \quad \tilde{\delta} = \frac{\omega^2 - c^2 k^2}{2\omega\gamma}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega\Omega_0}{2\gamma^2}}, \quad \Omega_0 = \frac{4\pi d^2}{V_0 \hbar}, \quad \tilde{\omega}_0 = \frac{\Omega_0}{\gamma}, \quad \tilde{\gamma} = \frac{\gamma}{\omega}, \quad \sigma = \frac{\gamma_f}{\gamma}, \quad T = \gamma t.$$

În sistemul de ecuații diferențiale folosit (1-4) termenul $\gamma_f = \tilde{E} + \tilde{E}_0$, reprezintă atenuarea câmpului electromagnetic generat în mediul biologic. În sistemul de ecuații (1-4) prezentat mai sus este descris pe deplin evoluția concentrației fononilor condensați de tip Bose-Einstein cât și a undelor generate de mediul biologic conform schemei din Figura 1.

În continuare vom efectua o descriere asupra dinamicii sistemului descris de ecuațiile de mai sus pentru diferite valori ale parametrilor sistemului. În calculele numerice au fost fixați următorii parametri adimensionali: $\tilde{\omega}_0 = 0.1$, $\nu = 1$, $\tilde{\gamma} = 1.1$, $\tilde{\delta} = 0.1$, $\tau = 0.15$, $\varphi = 3\pi/2$.

Figura 2 descrie evoluția în timp a puterii fotonilor emiși pentru diverse valori ale parametrilor sistemului. După cum se observă pentru $\sigma = 2.1$, dependența în timp a puterii fotonilor emiși descrie un comportament de oscilații continue (vezi Fig. 2a), iar pentru valori mici $\sigma = 0.1$ (Fig. 2b) pot fi observate apariția pulsațiilor periodice.

Pentru unele valori moderate ale sistemului evoluția sistemului tinde către o stare haotică ce poate fi observată în Fig. 2c).

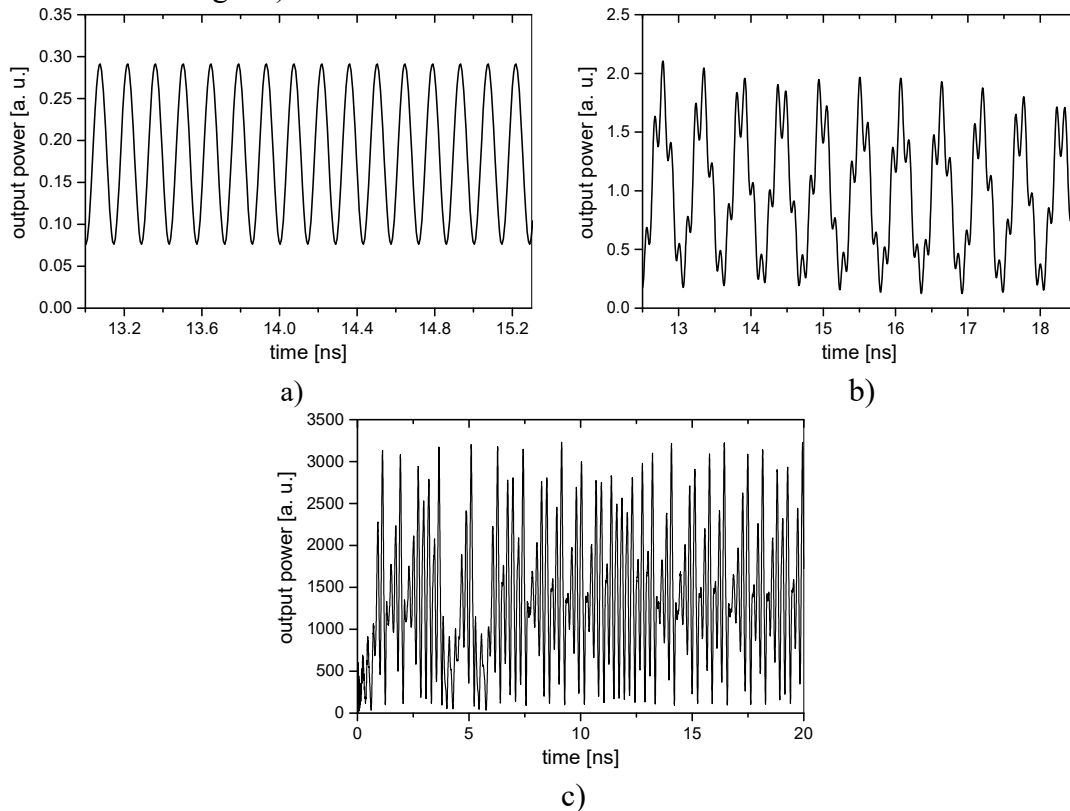


Figura 2. Dependența în timp a puterii fotonilor emiși pentru următoarele valori:
 a) $\alpha = 10$, $\delta = -5$, $\Gamma = 5$, $\sigma = 2.1$ b) $\alpha = 10$, $\delta = -5$, $\Gamma = 5$, $\sigma = 0.1$ c) $\alpha = 20$, $\delta = 25$, $\Gamma = 15$, $\sigma = 10$

Concluzii

Dinamica neliniară a interacțiunii undelor milimetrice și terahertz cu fononii generați de sistemul de molecule a fost cercetată pentru diferite valori ale sistemului: amplitudinea feedback-ului optic, abaterea de la rezonanță, numărului mediu de fononi, pompajul exterior, parametrul de atenuare a fononilor emiși. După cum a fost observat, pentru anumiți parametri, evoluția în timp a puterii fotonilor emiși este periodică, iar pentru valori moderate ale feedback-ului optic în sistem apar bifurcații cu dublarea perioadei de oscilație, iar pentru valori mari ale acestuia apar regimuri haotice.

Mulțumiri. Această lucrare a fost susținută financiar de Agenția Națională pentru Cercetare și Dezvoltarea Moldovei în cadrul proiectului 20.80009.5007.08 „Studiul structurilor optoelectronice și a dispozitivelor termoelectrice cu eficiență înaltă”.

Referințe

1. Akinori, I., Stefano, L. and Augusto, M. Terahertz as a frontier area for science and technology. *Condens. Matter* 2021, 6, 23. <https://doi.org/10.3390/condmat6030023>
2. D'Arco, A., Di Fabrizio, M.; Dolci, V.; Petrarca, M.; Lupi, S. THz pulsed imaging in biomedical applications. *Condens. Matt. Phys.* 2020, 5, 1–25. <https://doi.org/10.3390/condmat5020025>
3. Rothbart, N.; Holz, O.; Koczulla, R.; Schmalz, K.; Hübers, H.W. Analysis of human breath by millimeter-wave/terahertz spectroscopy. *J. Sens.* 2019, 19, 2719. <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/12/2719>
4. Ren, A.; Zahid, A.; Fan, D.; Yang, X.; Imran, M.A.; Alomainy, A.; Abasi, Q.H. State-of-the-art in terahertz sensing for food and water security-A comprehensive review. *Trends Food Sci. Tech.* 2019, 85, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.019>
5. Wang, K.; Sun, D.W.; Pu, H. Emerging non-destructive terahertz spectroscopic imaging technique: Principle and applications in the agri-food industry. *Trends Food Sci. Tech.* 2017, 67, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.001>
6. Neu, J.; Ostresh, S.; Regan, K.P.; Spies, J.A.; Schmuttenmaer, C.A. Influence of dye sensitizers on charge dynamics in SnO₂ nanoparticles probed with THz spectroscopy. *J. Phys. Chem. C* 2020, 124, 3482–3488. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.9b11024>
7. D'Arco, A.; Mussi, V.; Petrov, S.; et.al. D. Fabrication and spectroscopic characterization of graphene transparent electrodes on flexible cyclo-olefin substrates for terahertz electro-optic applications. *Nanotechnology* 2020, 31, 364006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6528/ab96e6>
8. Melinger, J.S.; Yang, Y.; Mandehgar, M.; Grischkowsky, D. THz detection of small molecule vapors in the atmospheric transmission windows. *Opt. Expr.* 2012, 20, 6788–6807. <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-20-6-6788&id=230223>
9. Cosentino, A. Terahertz and cultural heritage science: Examination of art and archeology. *Technologies* 2016, 4, 1–13. <https://www.mdpi.com/2227-7080/4/1/6>
10. Curcio, A.; Marocchino, A.; Dolci, V. et.al. Resonant plasma excitation by single-cycle THz pulses. *Sci. Rep.* 2018, 8, 1–8. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-18312-y>
11. Zhadoboy, M.; Nicolaz, C. N.; Sauleau, R. et al., Evaluation of the Potential Biological Effects of the 60-GHz Millimeter Waves Upon Human Cells. *IEEE Tans. on Antennas and Propagation* 57: 2009, pp. 2949-2956.
12. Bolterauer, H.; Tuszyński, J. A. and Satarić, M. V., Fröhlich and Davydov regimes in the dynamics of dipolar oscillations of biological membranes, *Phys. Rev. A* 44, 1991, p.1366.
13. T. Globus, D.L. Woolard, T. Khromova, T.W. Crowe, M. Bykhovskaya, B.L. Gelmont, et al., THz spectroscopy of biological molecules, *J. Biol. Phys.* 29, 2003, 89–100.
14. Frohlich, H. Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes. *Phys. Lett, A* 26, p. 402-403, 1968. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(68\)90242-9](https://doi.org/10.1016/0375-9601(68)90242-9)
15. Frohlich, H. Long-Range Coherence and Energy Storage in Biological Systems. *J. Quantum Chem.*, 2, p. 641-649, 1968.
16. Frohlich, H. Long Range Coherence and the Action of Enzymes. *Nature (London)* 228, 1093, 1970.
17. THzBRIDGE Report. 2004. <http://www.frascati.enea.it/THz-BRIDGE/reports/THz-BRIDGE%20Final%20Report.pdf>
18. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Disponibil in: *HEALTH PHYSICS* 74 (4):494-522; 1998. <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>