

CONTROLUL DINAMICII FOTONILOR EMIȘI ÎN MEDIILE BIOLOGICE

Natalia GUBCEAC^{1,2}

¹Departamentul Fizică, Doctorandă, Facultatea de Electronică și Telecomunicații, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, R. Moldova

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

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

Coordonatori științifici:

Nellu CIOBANU, dr., conf.univ., Catedra de Fiziologie a Omului și Biofizica, Facultatea de Medicină, Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie "Nicolae Testemițanu", Chișinău, R. Moldova.

Vasile TRONCIU, dr.hab., prof.univ., Departamentul Fizică, Facultatea de Electronică și Telecomunicații, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, R. Moldova

Rezumat. În această lucrare discutăm o posibilitate de control a dinamicii fotonilor Fröhlich emise de către un mediu biologic care este radiat cu o sursă externă de unde milimetrice. Pentru anumiți parametri ai sistemului considerat, dinamica fotonilor și fononilor emiși pot avea un comportament de unde continue periodice, aperiodice precum și haotice. Un rol aparte îl constituie influența pompajului modulat asupra evoluției sistemului.

Cuvinte cheie: unde milimetrice, fotoni Fröhlich, fononi, pompaj modulat, controlul dinamicii.

Introducere

În ultimele decenii, studierea influenței câmpurilor electromagnetice asupra materiei vii reprezintă un obiectiv destul de atractiv pentru biomedicina modernă [1, 2]. Organismul uman este expus zilnic iradierii diverselor tipuri de unde electromagne prin intermediul tehnologiilor moderne, care sunt extrem de răspândite în viața de zi cu zi. Totalitatea efectelor produse de aceste surse pot distruge sistemele de apărare și funcționare al organismului [3].

Un interes sporit în medicina modernă îl prezintă intervalul undelor milimetrice (MM) și teraherți (THZ) [4-6]. Astfel, o multitudine de companii din întreaga lume care produc dispozitive medicale încearcă să înlocuiască metodele clasice (lezarea tisulară în timpul intervenției chirurgicale) cu cele neinvazive bazate pe terapia undelor MM [7-9]. În timp ce rezultatele practice sunt destul de vizibile și impresionante, mecanismul fizic complet care poate explica procesul de interacțiune a undelor MM sau THZ cu țesutul viu, încă nu există. Experimental a fost demonstrat că la intensități mici frecvențele undelor de 42,7 GHz, 53,5 GHz și 60,7 GHz intră în rezonanță cu undele electromagnetice generate de țesuturile vii. În rezultat, aceste interacțiuni pot juca un rol important în starea funcțională la nivel de celulă, țesut, sau chiar întreg organismul. Din alt punct de vedere, tot experimental este demonstrat că undele MM au efect terapeutic benefic asupra organismelor vii [10,11].

Conform teoriei Fröhlich [12], celulele vii sunt capabile să genereze unde MM. Alte studii au arătat că undele coerente emise de către celulele vii reprezintă un proces sistematic care implică membranele celulare, canalul proteic, precum și pompele de transport celular [13, 14]. O altă teorie explică că în urma acestei interacțiuni are loc un mecanism de disipare neomogenă a energiei undelor MM [15]. Această disipare contribuie la apariția fononilor Bose care este importantă pentru mediile biologice, din punct de vedere al mecanismului de control privind interacțiunea undelor MM cu organismele vii [16].

În această lucrare, este raportată o metodă de control a dinamicii sistemului de fotoni Fröhlich și fononi cu ajutorul pompajului modulat al sursei de unde milimetrice. Pentru anumite valori ai parametrilor sistemului precum și a indicelui de modulare, dinamica fononilor dipol-activi Bose condensati și a fotonilor interni Fröhlich pot prezenta regimuri de oscilații continuee, dublări de perioadă precum și regimuri continue.

Modelul teoretic

Modelul teoretic ce descrie evoluția fotonilor și fononilor generați de către mediul biologic a fost discutat în lucrările anterioare [15,16]. În Figura 1 este reprezentată schema de iradiere a mediului biologic cu ajutorul unei surse de unde MM cu pompaj modulat de energie: $P = P_0(1 + m(\cos 2\pi\omega t))$, unde m – reprezintă parametrul de modulare. În urma acestei iradiere mediul biologic generează fotoni Frohlich și fononi, care ulterior sunt folosiți pentru iradierea aceluiași mediu biologic. Procesul de iradiere are loc în baza unui feedback optic exterior cu faza φ și amplitudinea Γ .

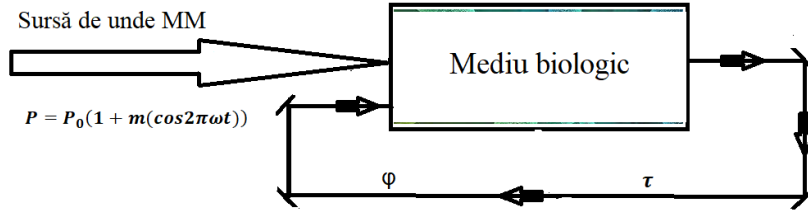


Figura 1. Schema de generare a fotonilor și fononilor mediului biologic

Pentru descrierea modelului dat vom considera același sistem de ecuații diferențiale [16]:

$$\frac{dE_1}{dT} = -\sigma E_1 - (\tilde{\delta} - \tilde{\omega}_0)E_2 + 2\alpha\tilde{\gamma}A_1 + \alpha\{2\tilde{\gamma}[\delta - (A_1^2 + A_2^2)] - 1\}A_2 + P + \Gamma[\cos(\varphi)E_1(t - \tau) + \sin(\varphi)E_2(t - \tau)], \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dT} = (\tilde{\delta} - \tilde{\omega}_0)E_1 - \sigma E_2 + 2\alpha\tilde{\gamma}A_2 - \alpha\{2\tilde{\gamma}[\delta - (A_1^2 + A_2^2)] - 1\}A_1 + \Gamma[\cos(\varphi)E_2(t - \tau) - \sin(\varphi)E_1(t - \tau)], \quad (2)$$

$$\frac{dA_1}{dT} = -\alpha E_2 - A_1 - [\delta - \nu(A_1^2 + A_2^2)]A_2, \quad (3)$$

$$\frac{dA_2}{dT} = -\alpha E_1 + [\delta - \nu(A_1^2 + A_2^2)]A_1 - A_2. \quad (4)$$

În acest sistem $\delta, \tilde{\delta} = \frac{\omega^2 - c^2 k^2}{2\omega\gamma}$, $\alpha, \Omega_0, \tilde{\omega}_0, \tilde{\gamma}, \sigma$, și T sunt parametrii adimensionali $\tilde{\delta} = \frac{\omega^2 - c^2 k^2}{2\omega\gamma}$.

Rezultate

În continuare vom discuta evoluția dinamică a sistemului descris de ecuațiile (1)-(4) pentru diferite valori ale parametrilor sistemului. Puterea fotonilor emiși precum și concentrația fononilor generați de mediul biologic pot fi definiți astfel: $P = E_1^2 + E_2^2$, $n = A_1^2 + A_2^2$. În calculele numerice au fost fixați următorii parametri adimensionali: $\tilde{\omega}_0 = 0.1$, $\nu = 1$, $\tilde{\gamma} = 1.1$, $\tilde{\delta} = 0.1$, $\tau = 0.15$, $\delta = 3$, $\sigma = 2$, $P_0 = 120$, $f = 2$.

Figura 2 descrie evoluția în timp a puterii fotonilor emiși și portretele de fază pentru anumite valori ale parametrilor sistemului. Influența pompajului modulat asupra dinamicii este studiată cu ajutorul parametrului de modulare m . Pentru valori nule ale indicelui de modulare ($m = 0$), evoluția sistemului tinde către o stare staționară, iar traiectoriile de fază descriu un ciclu limită. Pentru $m = 0.1$, dependența în timp a puterii fotonilor emiși descrie un comportament de oscilații continue, iar traiectoriile de fază bifurcații de tip Hopf. Cu creșterea parametrului de modulare, pentru $m=0.4$ în sistem pot apărea pulsații periodice, iar pentru $m=0.9$ se poate observa și apariția regimului haotic. Așadar pentru anumite valori fixe ale sistemului considerat, putem controla cu dinamica sistemului prin intermediul parametrului de modulare al pompajului.

În Fig. 3 este studiată dinamica sistemului pentru $\alpha = 8.5$. După cum se observă, pentru $m=0$, evoluția în timp a fotonilor emiși descrie un regim de oscilații continue, iar traiectoriile de fază

bifurcații de tip Hopf. Cu creșterea indicelui de modulare în sistem pot apărea bifurcații cu dublare de perioadă ($m = 0.4$) precum și multiplicare de perioadă ($m = 0.9$). Astfel, cu ajutorul parametru α este posibil de trecut doar de la regim continuu la regim cu dublare de perioadă.

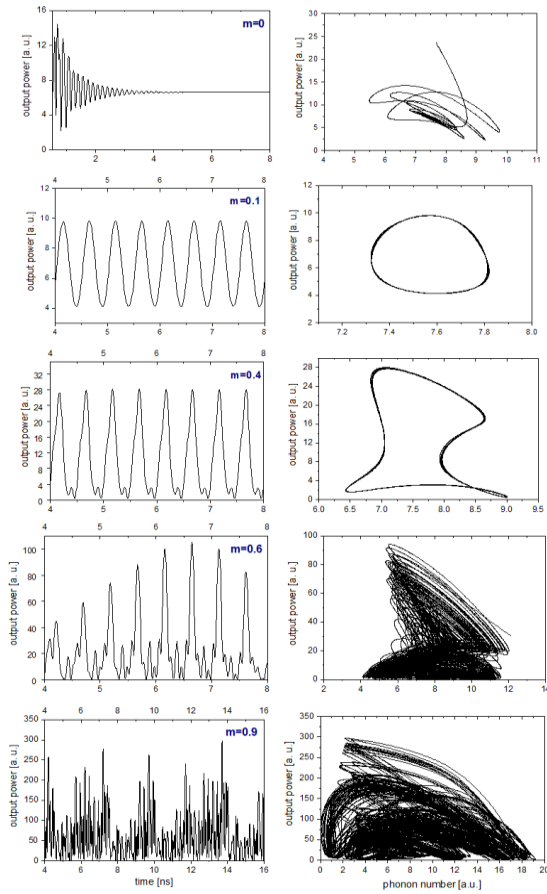


Figura 2. Evoluția în timp a intensității fotonilor emiși (stânga) și portretele de fază (dreapta) pentru $\alpha = 5$, $\Gamma = 10$, $\varphi = \pi/3$.

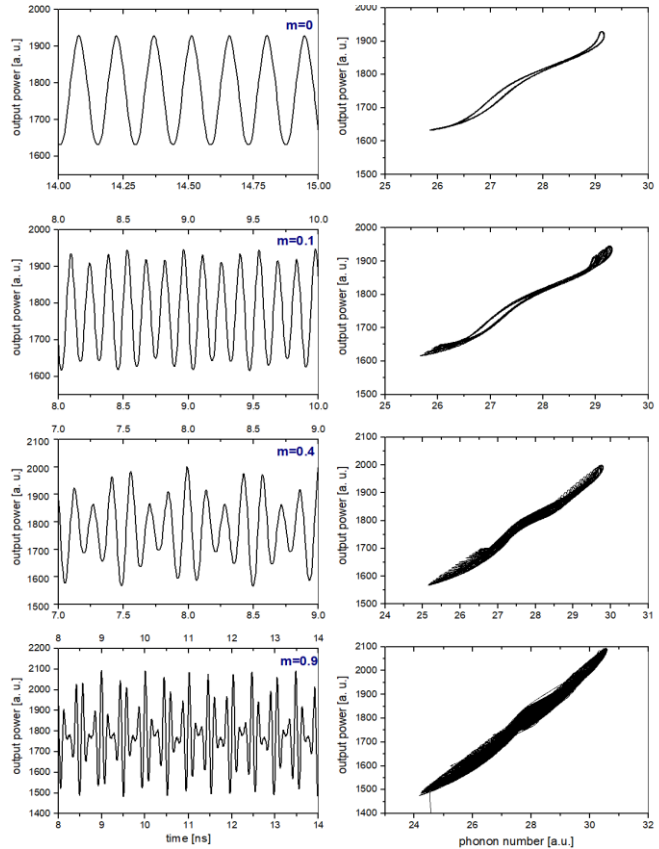


Figura 3. Evoluția în timp a intensității fotonilor emiși (stânga) și portretele de fază (dreapta) pentru $\alpha = 8.5$, $\Gamma = 10$, $\varphi = \pi/3$.

În Fig. 4 este studiată dinamica sistemului la schimbarea fazei feedback-ului optic ($\varphi = 3\pi/2$). Pentru $m = 0$, pot fi observate oscilații periodice în dinamica sistemului, iar cu creșterea acustua pot apărea și oscilații haotice. Pentru $m = 0.1$, traiectoriile de fază descriu un atractor straniu.

Influența amplitudinii feedback-ului optic este reprezentată în Figura 5. După cum se observă, indicele de modulare nu influențează drastic dinamica sistemului.

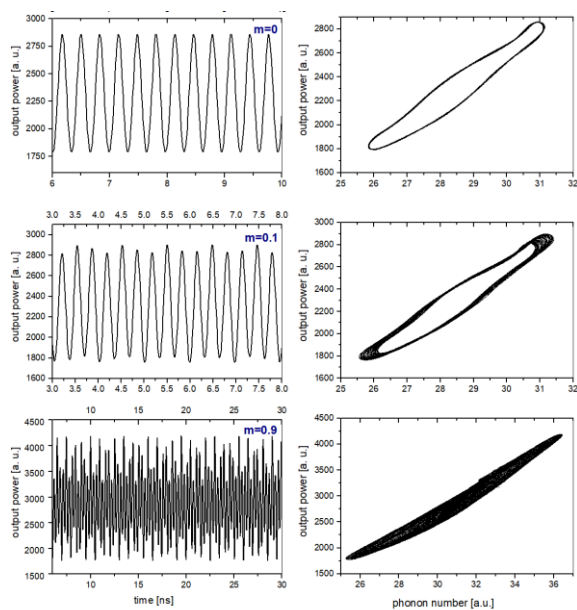


Figura 4. Evoluția în timp a intensității fotonilor emiși (stânga) și portretele de fază (dreapta) pentru $\alpha = 5$, $\Gamma = 10$, $\varphi = 3\pi/2$.

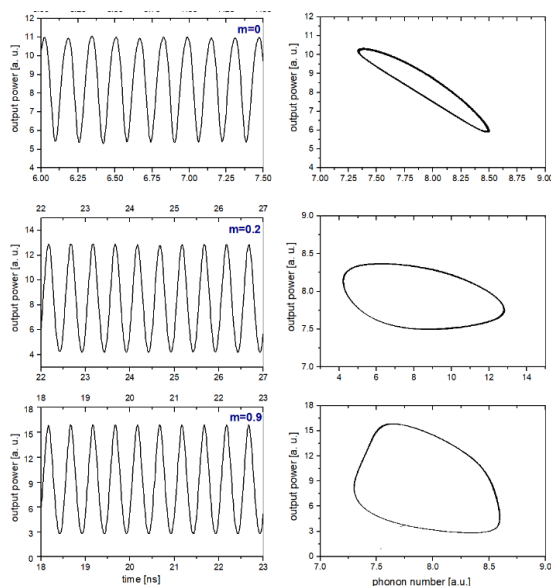


Figura 5. Evoluția în timp a intensității fotonilor (stânga) și portretele de fază (dreapta) pentru $\alpha = 5$, $\Gamma = 14$, $\varphi = \pi/3$.

Concluzii

În această lucrare este studiată o posibilitate de control a dinamicii sistemului de fotoni și fononi cu ajutorul pompajului modulată. După cum a fost demonstrat pentru anumite valori fixe ale sistemului, cu ajutorul parametrului de modulare se poate de trecut de la un regim de unde continue la regimuri cu dublare de perioadă, multiplicare precum și la regim haotic. Parametrii feedback-ului optic influențează drastic dinamica sistemului, la care sa observat și apariția atractoarelor stranii. Considerăm ca cu ajutorul acestor structuri putem prezice evoluția în timp a proceselor fiziologice la nivel de celule care decurg în sistemele biologice.

Mulțumiri. Această lucrare a fost realizată cu suportul ANCD în cadrul proiectului 20.80009.5007.08 „Studiul structurilor optoelectronice și a dispozitivelor termoelectrice cu eficiență înaltă”.

Referințe

1. A. D’Arco, M. Di Fabrizio, V. Dolci, M. Petrarca, S. Lupi, „THz pulsed imaging in biomedical applications”, *Condensed Matter* 5(2):25, 2020. <https://doi.org/10.3390/condmat5020025>
2. I. Akinori, L. Stefano, M. Augusto, „Terahertz as a frontier area for science and technology”, *Condensed Matter*, **6**, 23, 2021. <https://doi.org/10.3390/condmat6030023>
3. A. Ramundo-Orlando, “Effects of Millimeter Waves Radiation on Cell Membrane,” *J Infrared Milli Terahz Waves*, **31**, pp. 1400–1411, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10517-018-4243-2>
4. Sarika S., Neeru K..Health Implications of Electromagnetic Fields, Mechanisms of Action, and Research Needs, In: *Advances in Biology*, 2014, 24 pages.
5. M. Kojima, C.-Y. Tsai, Y. Suzuki, K. Sasaki, T. Tasaki, M. Taki, S. Watanabe, H. Sasaki „Ocular Response to Millimeter Wave Exposure Under Different Levels of Humidity”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. **40**, 2019, pp. 574–584. <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00586-0>
6. P. Le Pogam, Y. Le Page, D. Habauzit, M. Doué, M. Zhadobov, R. Sauleau, Y. Le Dréan, D. Rondeau, “Untargeted metabolomics unveil alterations of biomembranes permeability in human HaCaT keratinocytes upon 60 GHz millimeter-wave exposure”, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45662-6>

7. H. Torgomyan, A. Trchounian, “Bactericidal effects of low-intensity extremely high frequency electromagnetic field: An overview with phenomenon, mechanisms, targets and consequences”, *Critical Reviews in Microbiology* **39**(1), 2013, pp.102-111.
<http://dx.doi.org/10.3109/1040841X.2012.691461>
8. A.G. Davies, E.H. Linfield, M.B. Johnston, “The development of terahertz sources and their applications”, *Phys. Med. Biol.*, **47**, 2002, pp. 3679–3689.
9. 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, pp. 89–100.
10. X.-H. Li, J.-T. Tang, Y.-P. Liao, H.-K. Jin, J.-M. Zhou, G.-H. Wang, H. Wang, “Millimeter wave in the treatment of acute radiation-induced cervical skin ulcers,” *J. Clin. Rehab. Tissue Eng. Res.* **12**, 2008, pp. 663-666.
11. H. Fröhlich, „Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes”, *Phys. Lett, A* **26**, 1968, pp. 402-403. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(68\)90242-9](https://doi.org/10.1016/0375-9601(68)90242-9)
12. V.I. Geletyuk, V.N. Kazachenko et al., „Dual effects of microwaves on single Ca²⁺-activated K⁺ channels in cultured kidney cells”, *FEBS Letters*, **359**, 1995, pp. 85-88.
13. M. Zhadobov, R. Saileau, V. Viè, „Interactions between 60-GHz millimeter waves and artificial biological membranes: dependence on radiation parameters”, *IEEE Tras. MW Theory and Tec.*, **54**, 2006, pp. 2534-2542.
14. H. Bolterauer, J.A. Tuszyński, „Fröhlich and Davydov regimes in the dynamics of dipolar oscillations of biological membranes”, *Phys. Rev. A*, **44**, 1991, p. 1366.
15. N. Ciobanu, S. Rusu, V. Tronciu, „Dynamical behavior of Bose-condensed dipole-active phonons and internal Fröhlich photons in biological media”, *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering-EHB 2015*, Iasi, 19-21 November, 2015, pp 978. <http://dx.doi.org/10.1109/EHB.2015.7391369>
16. N. Gubccac, N. Ciobanu and V. Tronciu, "Control Dynamics of the Generated Fröhlich Photons by Biological System," *2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*, Iasi, Romania, 2022, pp. 01-04, [doi: 10.1109/EHB55594.2022.9991356](https://doi.org/10.1109/EHB55594.2022.9991356).