بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

کنترل بازتاب امواج تراهرتز قطبیده خطی از یک بافت چندلایه زیستی

ضحی عامری[۱]، فاضل جهانگیری[۲]

۱ تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزرو پلاسما، *z.amerimahabadi@mail.sbu.ac.ir*

۲ *f_jahangiri@sbu.ac.ir*

چکیده – ارتباطات بی‌سیم در بازه فرکانسی تراهرتز بین یک نانوماشین و یک قطعه پوششی هوشمند می‌تواند به منظور بررسی علائم حیاتی بدن مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله، بازتاب کلی از قطعه هوشمند به نانوماشین و به عکس برای قطبش TE وTM در بازه فرکانسی ۰,۱ تا ۱ تراهرتز در حالتی محاسبه شده است که قطعه پوششی در هوا و نانوماشین درمجاورت سیستم گردش خون بالایی لایه درم قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین بازتاب از سمت قطعه هوشمند به نانوماشین برای قطبش TE می‌باشد. همچنین این مقدار در فرکانس‌های زیر ۰,۲تراهرتز و به ازای زوایای ۴۵ تا ۹۰ درجه بالای ۴۰٪ است. این درحالی است که این شرط برای بازتاب‌های TM و TE از سمت نانوماشین به قطعه هوشمند به ازای زوایای بالای °۶۷,۵ امکان‌پذیر است. علاوه بر این، تمامی بازتاب‌های چندلایه‌ای به‌ازای هردو قطبش در زاویه فرودی عمود به سمت ۱۰۰٪ میل می‌کنند.

کلید واژه- بازتاب چندلایه‌ای، تراهرتز، ماتریس انتقال

Control of linearly polarized Terahertz reflection from a multilayer biological tissue

Zoha Ameri[1], Fazel Jahangiri[2]

[1] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, z.amerimahabadi@mail.sbu.ac.ir

[2] f_jahangiri@sbu.ac.ir

Abstract- Wireless communication between a wearable device and a nanomachine can be considered in the frequency range of terahertz in order to monitor vital human signs. In this paper, by assuming the communication between a wearable device in air and a nanomachine in the vicinity of dermis superficial vascular plexus, total reflection from wearable device to nanomachine and vice versa is calculated for TE and TM polarization over the frequency range of 0.1-1 THz. The results show that the maximum reflection occurs for TE polarization from wearable device to nanomachine. Moreover, this reflection exceeds 40% for frequencies less than 0.2THz and for the incident degrees of 45°-90°. These results are observed for degrees larger than 67.5° for TM reflections and TE reflection from nanomachine to wearable device. It is also shown that all the multilayer reflections for both polarizations converge to 100% under normal incidence conditions.

Keywords: Multilayer Reflection, Terahertz, Transmission Matrix

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

نانوماشین قطعه‌ای مجتمع است که از طریق برقراری ارتباط با دیگر نانوماشین‌ها و یا یک عامل خارجی می‌تواند در بررسی علائم حیاتی بدن و انتقال دارو نقش داشته باشد. ارتباط بی‌سیم بین نانوماشین‌ها از طریق فرکانس رادیویی، اپتیکی و تراهرتز ممکن می‌باشد. اما استفاده از پرتوهای تراهرتز برای برقراری این ارتباط از سهولت بیشتر و توان مصرفی کم‌تری در مقایسه با امواج رادیویی برخوردار است. همچنین، اتلاف‌راه ناشی از گستردگی و پراکندگی باریکه در این ناحیه فرکانسی نسبت به اپتیکی کم‌تر است و امکان ساخت نانوآنتن‌های گرافنی متناسب با ابعاد نانوماشین را فراهم می‌آورد[۱]. در حین انتقال داده بین نانوماشین‌های موجود در بافت‌های مختلف و نهایتا با قطعه پوششی هوشمند که می‌تواند در غالب یک مچبند یا بازوبند باشد، پرتوی تراهرتز باید از بافت‌های متفاوتی عبور کند که در نتیجه در هر لایه دچار جذب، گستردگی و پراکندگی و در مرز دچار بازتاب می‌شود. پیشتر جذب، گستردگی و پراکندگی بافت‌های پوست و خون مورد محاسبه واقع شده‌اند[۲]. این مقاله به بررسی بازتاب کلی در مسیر رفت و برگشت از سمت قطعه هوشمند قرار گرفته در فضای آزاد به نانوماشینی که در مجاورت شبکه خون‌رسانی بالایی لایه درم قرار دارد، می‌پردازد. در این راستا پرتو در مسیر رفت باید از لایه‌های هوا-اپی‌درم[۱]-درم[۲]-خون بگذرد و بازتاب نهایی آن در مرز خون-درم رخ می‌دهد. تاکنون بازتاب تراهرتز از مجموعه چندلایه‌ای مورد محاسبه واقع شده است[۲]، اما این محاسبه باصرف‌نظر از بخش موهومی ضریب‌شکست و درنتیجه با چشم‌پوشی از اتلاف‌راه جذب صورت گرفته است. حال آنکه بیشتر بافت‌های بدن مقادیر قابل توجهی آب دارند که باتوجه به قرارگرفتن ترازچرخشی مولکول‌های آب در محدوده فرکانس تراهرتز، این بافت‌ها جاذب تراهرتز هستند. در این مقاله برای محاسبه بازتاب کلی از مجموعه‌ای از لایه‌های زیستی از ماتریس انتقال استفاده شده است و باتوجه به ماهیت جاذب بافت‌ها، ماتریس مذکور مورد ساده‌سازی واقع نشده است.

اصول تئوری

با در نظرگرفتن قرار داشتن مچبند هوشمند در فاصله ۲ میلی‌متری از پوست دست، پرتوتراهرتز پس از ورود به پوست دست، از بافت اپی‌درم گذشته و وارد درم می‌شود. بافت درم دارای دو سیستم خون‌رسانی، یکی در فاصله کمی از اپی‌درم و دیگری در مرز با بافت چربی می‌باشد. با فرض قرارگرفتن نانوماشین در مجاورت سیستم خون‌رسانی بالایی، پرتو تراهرتز باید از بافت‌های هوا-اپی‌درم-درم-خون بگذرد و نهایتا در مرز خون-درم بازتاب نهایی در مسیر رفت از را انجام می‌دهد. در این راستا نیاز است تا ماتریس معادل هرمحیط محاسبه شود تا از حاصل‌ضرب آنان، ماتریس انتقال نهایی به دست آید. شکل کلی ماتریس انتقال در معادله(۱) نشان داده شده است که در آن t_{12} دامنه عبور درمحیط۱، r_{12} دامنه بازتاب در مرز بین محیط ۱و۲ و t_{21} و r_{21} همین مولفه‌ها در جهت معکوس می‌باشند. برای محاسبه ماتریس انتقال از قطعه هوشمند به نانوماشین، پرتو چهارعبور از محیط همگن و بازتاب از مرز انجام می‌دهد.محیط‌های همگن به‌ترتیب هوا، اپی‌درم، درم و خون می‌باشند. در هر محیط باید حاصل‌ضرب ماتریس انتقال در ماتریس عبور از مرز را محاسبه کرد و ماتریس نهایی برای این چهارلایه از حاصل‌ضرب چهارماتریس محاسبه‌شده به دست می‌آید. باتوجه به وابستگی بازتاب به قطبش، ماتریس نهایی برای دوقطبش TE و TM متفاوت خواهد بود. بافرض انتشار در محیط ۱ و عبور از مرز بین محیط۱و۲، معادله

---

[۱] Epidermis

[۲] Dermis

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

(۲) ماتریس انتقال در محیط همگن و معادلات (۴-۳) انتقال از این مرز را برای دوقطبش نشان می‌دهند[۴].

$$M_{total}=\frac{1}{t_{2,1}}\begin{bmatrix} t_{1,2}t_{2,1}-r_{1,2}r_{2,1} & r_{2,1} \\ -r_{1,2} & 1 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$M_{Propagation}=\begin{bmatrix} e^{j\varphi} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi} \end{bmatrix}, \varphi=\frac{2n_1\pi d}{\lambda_0} \quad (۲)$$

$$M_{b_{TE}}=\frac{1}{2n_2\cos\theta_2}\begin{bmatrix} n_1\cos\theta_1+n_2\cos\theta_2 & n_2\cos\theta_2-n_1\cos\theta_1 \\ n_2\cos\theta_2-n_1\cos\theta_1 & n_1\cos\theta_1+n_2\cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$M_{b_{TM}}=\frac{1}{2n_2\sec\theta_2}\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}\begin{bmatrix} n_1\sec\theta_1+n_2\sec\theta_2 & n_2\sec\theta_2-n_1\sec\theta_1 \\ n_2\sec\theta_2-n_1\sec\theta_1 & n_1\sec\theta_1+n_2\sec\theta_2 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

درمعادلات(۴-۲)،n_1 و n_2 ضریب‌شکست محیط اول و دوم،θ_1 زاویه فرودی در مرز بین دو محیط، θ_2 زاویه شکست در محیط دوم، d مسافت طی شده در محیط اول و λ_0 طول‌موج پرتو درفضای آزاد می‌باشد. هم‌چنین برای محاسبه ماتریس در هر بافت، نیاز است تا ضریب‌شکست آن بافت و بافت بعدی محاسبه شود. برای محاسبه ضریب‌شکست باتوجه به این نکته که تمامی بافت‌های اپی‌درم،درم و خون بالای ۵۰٪ آب دارند، از مدل دبای‌دوگانه برای محاسبه گذردهی الکتریکی و درنتیجه ضریب‌شکست در بازه فرکانسی تراهرتز استفاده شده است. این مدل بیشترین تطابق با نتایج تجربی را برای مایعات دوقطبی دربازه فرکانسی تراهرتز و تا فرکانس یک تراهرتز دارد. مدل دبای‌دوگانه در رابطه (۱) آورده شده است که در آن ε_∞ حد گذردهی در فرکانس بالا، ε_1 گذردهی در فرکانس شروع، ε_2 گذردهی در فرکانس میانی، τ_1 زمان واهلش کند (شکسته شدن پیوند مولکول‌ها) و τ_2 زمان واهلش سریع (تشکیل پیوندها) می‌باشد:

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_\infty+\frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{1+i\omega\tau_1}+\frac{(\varepsilon_2-\varepsilon_\infty)}{1+i\omega\tau_2} \quad (۱)$$

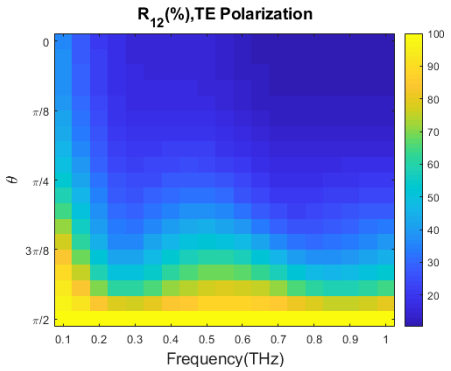
ضرایب دبای مورد نیاز، برای محاسبه گذردهی الکتریکی در جدول(۱) آورده شده است. داده‌های خون و اپی‌درم در مراجع موجود می‌باشد اما داده‌های مربوط به لایه درم از تطابق برنمودارهای تجربی به دست آمده‌اند.

جدول ۱:ضرایب دبای‌دوگانه برای بافت‌های زیستی

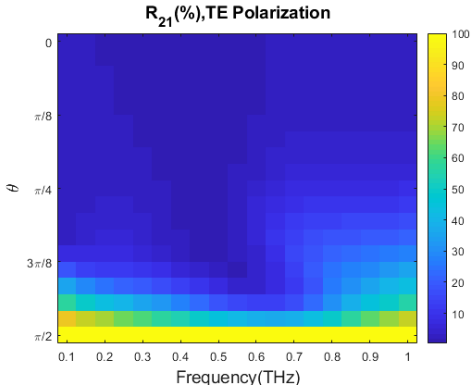
بافت	ε_∞	ε_1	ε_2	τ_1 (ps)	τ_2 (ps)	مراجع
اپی‌درم	۳	۵۸	۳۰۶	۹۰۴	۰۰۱۸	[۴]
درم	۵۰۵	۵۸	۵۰۶	۹۰۴	۰۰۱۸	[۶]
خون	۲۰۱	۱۳۰	۳۰۸	۱۴۰۴	۰۰۱	[۶]

نتایج شبیه سازی

شکل(۱)و(۲) بازتاب کلی را در قطبش *TE* نشان می‌دهد. شکل(۱) بازتاب از سمت قطعه هوشمند پوششی به سمت نانوماشین(هوا-اپی‌درم-درم-خون-درم)، و شکل(۲) این بازتاب را درمسیرمعکوس نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل‌های(۳-۴) به‌ترتیب بازتاب کلی در مسیر رفت و برگشت به‌ازای قطبش*TM* می‌باشند. باتوجه به قرار گرفتن قطعه هوشمند برروی مچ‌دست،ضخامت لایه‌های هوا،اپی‌درم،درم و خون به ترتیب ۰،۰۵،۰،۰۰۲،۰،۱۴،۲ میلی‌متر لحاظ شده است.



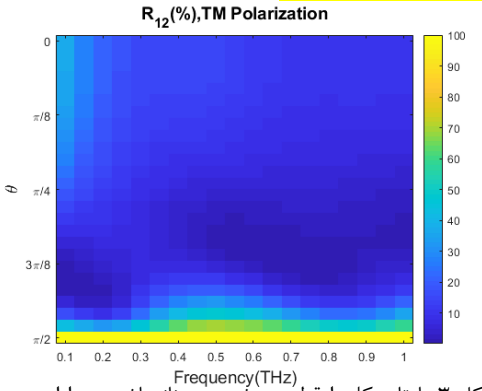
شکل1 :بازتاب کلی ازقطعه هوشمند به نانوماشین به ازای قطبشTE



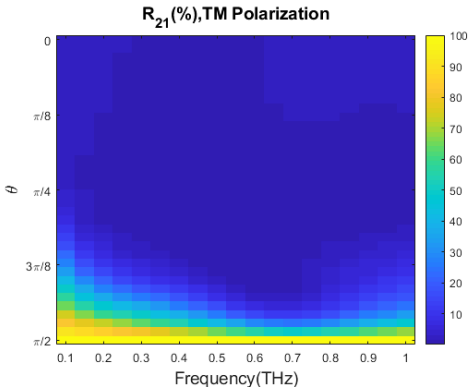
شکل ۲:بازتاب کلی ازنانوماشین به قطعه هوشمند به ازای قطبش TE

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

درهردومسیر رفت و بازگشت مرز خون-درم و بالعکس داریم که ضریب‌شکست درم به‌ازای فرکانس‌های بالای ۰٫۱۵ غالب است. لذا تفاوت رفتاری را می‌توان به مرز لایه‌های هوا، اپی‌درم و درم نسبت داد. در مسیر رفت تاثیر افزایش شدت بازتاب‌ها وابسته به مرز دو لایه خون و درم بوده اما در مسیر بازگشت، شکست با زاویه بزرگ‌تر درمرزهای درم-اپی‌درم و اپی‌درم-هوا نیز داریم که منجر به تداخل ویرانگر بازتاب با شدت کم‌تر در زوایای زیر $\frac{۳\pi}{۸}$ می‌گردد. به‌طور کلی سهم بازتاب بیش از ۴۰٪ در مسیر رفت قطبش TE از مسیر برگشت آن بیشتر می‌باشد.



شکل ۳: بازتاب کلی ازقطعه هوشمند به نانوماشین به ازای قطبش TM



شکل ۴: بازتاب کلی ازنانوماشین به قطعه هوشمند به ازای قطبش TM

برای قطبش TM، درمسیر رفت فقط به‌ازای زاویه $\frac{\pi}{۲}$، و در مسیر برگشت، به ازای فرکانس‌های کم‌تر از ۰٫۵ تراهرتز و زوایای $\frac{۳\pi}{۸} - \frac{\pi}{۲}$ ، بازتاب بالای ۹۰٪ داریم. به‌طور کلی درمسیر بازگشت برای قطبش TM بیشتر بازتاب در محدوده کم‌تر از ۱۰٪ قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

از طریق ردوبدل داده بین یک قطعه هوشمند درخارج بدن و یک نانوماشین در داخل بدن، می‌توان درلحظه سطح سلامت بدن فرد را ارزیابی کرد. در این راستا بافرض قرار گرفتن نانوماشین در مجاورت سیستم گردش خون بالایی در لایه درم، برای انتقال داده در مسیر رفت از قطعه هوشمند به نانوماشین، پرتو باید از لایه‌های هوا، اپی‌درم، درم و خون عبور کند. بازتاب کلی در مسیر رفت و برگشت برای هردو قطبش TEوTM در $\frac{\pi}{۲}$ به سمت ۱۰۰٪ میل می‌کند. در این میان بیشترین سهم برای بازتاب‌های بیشتر از ۴۰٪ و کم‌تر از ۱۰٪ متعلق به مسیر رفت در قطبش TEو مسیر بازگشت برای قطبش TM می‌باشد. در بازه زاویه‌ای $\frac{۳\pi}{۸} \leq \theta < \frac{\pi}{۲}$ برای قطبش TE بیشترین بازتاب در مسیر رفت به ازای فرکانس‌های کم‌تر از ۰٫۲تراهرتز و ۰٫۴-۰٫۷ تراهرتز و برای مسیر بازگشت برای فرکانس‌های کم‌تر از ۰٫۲ و بیشتر از ۰٫۹ تراهرتز رخ می‌دهد. برای قطبش TM نیز، بیشترین بازتاب در این بازه زاویه‌ای و در مسیر رفت در ۰٫۴-۰٫۷ تراهرتز و درمسیر بازگشت به‌ازای فرکانس‌های کم‌تر از ۰٫۵تراهرتز و بیشتر از ۰٫۹تراهرتز اتفاق می‌افتد.

مراجع

[1] N. Saeed, M. Loukil, H. Sarieddeen and T. Al-Naffouri, "Body-Centric Terahertz Networks: Prospects and Challenges," 2020. [Online].

[2] "H Elayan; RM Shubair; JM Jornet;," *IEEE transactions on nanobioscience*, 2017.

[3] H. Elayan, R. Shubair, J. Jornet and R. Mittra, *Nano communication networks*, vol. 14, 2017.

[4] M. T. BEA Saleh, Fundamentals of photonics, 2019.

[5] E. Pickwell, B. E. Cole and A. J. Fitzgerald, *Physics in Medicine & Biology*, 2004.

[6] K. Sasaki, M. Mizuno and K. Wake, in *40th International Conference on IRMMW-THz*, 2015.

[7] C. B. Reid, G. Reese, A. P. Gibson and V. P. Wallace, *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 2013.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]