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

مقایسه اتلاف‌راه پراکندگی امواج تراهرتز در بافت بدن انسان در شرایط هوا-محصور و بافت-محصور

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 – استفاده از امواج تراهرتز برای ارتباطات بین نانوماشین‌ها در داخل بدن با چالش اتلاف حین انتشار همراه است که پدیده پراکندگی از مهم‌ترین عوامل آن است. در این مقاله اتلاف‌راه پراکندگی در بافت چربی با دو پیش‌فرض محیط محصور هوا و بافت، مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برای قطبش TM پیش‌فرض هوا-محصور منجر به پیش‌بینی اتلاف‌راهی کم‌تر و بیشتر به‌ازای فرکانس‌های زیر و بالای ۰٫۲۶ تراهرتز می‌شود. بیشترین تفاوت بین نتایج هوا-محصور و بافت-محصور در قطبش TE و به‌ازای فرکانس ۰٫۴تراهرتز مشاهده شده است.

کلید واژه- اتلاف‌راه پراکندگی، ارتباطات بی‌سیم داخل بدن، تراهرتز

Comparison on the Scattering Path Loss of Terahertz waves in Human Body Tissue under Air-Enclosed and Tissue-Enclosed conditions

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- Using terahertz waves for intra-body communications between nanomachines is associated with dissipation during propagation, of which scattering is one of the most important effects. In this paper, scattering path loss with two different assumptions of air-enclosed and tissue-enclosed in subcutaneous fat is calculated and compared. The results show that for TM polarization, air-enclosed assumption gives smaller and greater scattering loss for frequencies less and bigger than 0.26 THz. The greatest difference between air-enclosed and tissue-enclosed results is observed for TE polarization at frequency of 0.4 THz.

Keywords: Scattering Path Loss, Intra-Body Wireless Communications, Terahertz

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

مقدمه

امواج تراهرتز در محدوده‌ای از طیف‌الکترومغناطیسی قرار دارند که شامل بازه فرکانسی ۱۰-۰,۱ تراهرتز می‌شود. باتوجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد این محدوده از جمله غیریونیزه بودن، قدرت نفوذ بالا، اثرانگشت شیمیایی، و رفتار متفاوت مواد در مقابل این بازه فرکانسی همانند بازتابنده بودن مواد با رسانندگی بالا، شفاف بودن مواد دی‌الکتریک و جاذب بودن مواد دوقطبی، تراهرتز کاربردهای متفاوتی در صنایع مختلف دارد. از جمله کاربردهای پیش‌بینی شده برای بازه تراهرتز، برقراری ارتباط بین نانوماشین‌های کشت‌شده در داخل بدن می‌باشد. این نانوماشین‌ها پس از جمع‌آوری اطلاعات در درون بدن، آن را به یک گیرنده خارجی (دستگاه هوشمند پوشیدنی) منتقل می‌کنند. این در حالیست که پرتو تراهرتز در حین انتقال در داخل بدن و دربین بافت‌ها، می‌تواند تحت تاثیر عوامل اتلافی مختلفی همانند جذب، گستردگی و پراکندگی واقع شود. علی‌رغم دو اتلاف‌راه اول، اتلاف‌راه پراکندگی کم‌تر مورد توجه واقع شده است، چرا که در بافت‌هایی همانند خون پراکندگی از اکثر سلول‌ها در محدوده پراکندگی ریلی قرار دارد و مقدار اتلاف آن در قیاس با اتلاف‌راه‌های جذب و گستردگی ناچیز می‌باشد. اما در بافت‌هایی همانند چربی که دارای سلول‌هایی با ابعاد ۵۰-۱۵۰ میلی‌متر است، این پراکندگی می‌تواند قابل توجه باشد. از جمله پارامترهای مهم در تعیین شدت پراکندگی، تضاد بین ضرایب‌شکست ذره پراکنده‌کننده و محیط اطراف آن می‌باشد. معمولا برای محاسبه پراکندگی، حتی در حالت درون‌جانداری صرفاً ضریب‌شکست بافت لحاظ می‌شود[۱] که به معنای تلقی هوا به عنوان محیط اطراف بافت است. حال آنکه این پیش‌فرض برای پراکندگی در داخل بدن می‌تواند منجر به محاسبه اتلاف‌راهی بیشتر یا کم‌تر از مقدار حقیقی شود.در این مقاله دو اتلاف‌راه پراکندگی برای بافت چربی با پیش‌فرض‌های ۱.پراکندگی در اثر برخورد با بافت چربی قرار گرفته در هوا(محصور در هوا) و ۲. پراکندگی در اثر برخورد با سلول‌های چربی قرارگرفته در آرایه‌ای از کلاژن‌ها(محصور در بافت)، مورد مقایسه واقع شده‌اند. برای محاسبه پراکندگی نیاز است تا ابتدا ضریب شکست وابسته به فرکانس از طریق ضریب گذردهی الکتریکی محاسبه شود. برای این منظور، در بافت کلاژن[۱] با توجه به درصد بالای آب موجود در آن از مدل دبای دوگانه[۲] و برای چربی که خاصیت غیرقطبی در آن غالب است، از مدل کول-کول دوگانه[۳] استفاده شده است. هم‌چنین برای محاسبه پراکندگی در حالت محصور در بافت از مدل ریلی-گانز-بورن(RGB[۴]) و برای حالت محصور درهوا از مدل پراکندگی می[۵] استفاده شده است.

تئوری مسئله

رابطه دبای دوگانه و بخش حقیقی و موهومی آن در روابط (۳)-(۱) آورده شده‌اند. در روابط مذکور، ε_∞ حدگذردهی در فرکانس بالا، ε_1 گذردهی در فرکانس شروع، ε_2 گذردهی درفرکانس میانی، τ_1 زمان واهلش کند، τ_2 زمان واهلش تند و $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای می‌باشند[۲].

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

$$\varepsilon'=\varepsilon_\infty+\frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{1+(\omega\tau_1)^2}+\frac{(\varepsilon_2-\varepsilon_\infty)}{1+(\omega\tau_2)^2} \qquad (۲)$$

$$\varepsilon''=\frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\omega\tau_1}{1+(\omega\tau_1)^2}+\frac{(\varepsilon_2-\varepsilon_\infty)\omega\tau_2}{1+(\omega\tau_2)^2} \qquad (۳)$$

رابطه کول-کول دوگانه و بخش حقیقی و موهومی آن نیز در روابط (۶)-(۴) آورده شده‌اند. این رابطه که مدوله شده‌ی رابطه دبای است، دارای یک پارامتر اضافی $0 \le \alpha \le 1$

---

[۱] Collagen
[۲] Double-Debye
[۳] Double Cole-Cole
[۴] Rayleigh-Gans-Born
[۵] Mie Scattering

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

می‌باشد. این پارامتر معیاری برای پهن‌شدگی پاشندگی است. به ازای $\alpha_1 = 0$ و α_2، مدل کول-کول دوگانه به دبای دوگانه تبدیل می‌شود[۲].

$$\varepsilon(\omega)= \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{1+(i\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{(\varepsilon_2-\varepsilon_\infty)}{1+(i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} \quad (۴)$$

$$\varepsilon'=\varepsilon_\infty+(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\frac{1+(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}\sin(\frac{\alpha_1\pi}{2})}{1+2(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}\sin(\frac{\alpha_1\pi}{2})+(\omega\tau_1)^{2(1-\alpha_1)}}+(\varepsilon_2-\varepsilon_\infty)\frac{1+(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}\sin(\frac{\alpha_2\pi}{2})}{1+2(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}\sin(\frac{\alpha_2\pi}{2})+(\omega\tau_2)^{2(1-\alpha_2)}} \quad (۵)$$

$$\varepsilon''=\frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}\cos(\frac{\alpha_1\pi}{2})}{1+2(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}\sin(\frac{\alpha_1\pi}{2})+(\omega\tau_1)^{2(1-\alpha_1)}}+\frac{(\varepsilon_2-\varepsilon_\infty)(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}\cos(\frac{\alpha_2\pi}{2})}{1+2(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}\sin(\frac{\alpha_2\pi}{2})+(\omega\tau_2)^{2(1-\alpha_2)}} \quad (۶)$$

با محاسبه $\varepsilon(\omega)$ می‌توان ضریب‌شکست و از طریق آن توسط روابط (۷)و(۸) ضریب پراکندگی و اتلاف‌راه پراکندگی را بدست آورد. جداول (۲-۱)، نشان‌دهنده ضرایب مورد نیاز برای محاسبه ضریب گذردهی الکتریکی کلاژن نوع اول و چربی می‌باشد که از تطبیق برنمودارهای تجربی به دست آمده‌اند.

$$\mu_{sca}=\rho_v Q_{sca}\sigma_g \quad (۷)$$

$$PL_{sca}=e^{-\mu_{sca}d} \quad (۸)$$

در روابط (۷) و (۸)، ρ_v غلظت ذره، Q_{sca} بهره پراکندگی، σ_g سطح مقطع هندسی، μ_{sca} ضریب پراکندگی، d مسافت طی شده توسط پرتو در داخل بافت و PL_{sca} اتلاف‌راه پراکندگی می‌باشد.

معادله مورد نیاز برای محاسبه Q_{sca} باتوجه به مدل متفاوت است. در حالت اول که انتشار پرتو تراهرتز در هوا و پراکندگی آن دراثر برخورد با بافت مدنظر است، از مدل پراکندگی می استفاده شده است. اما در حالت دوم که انتشار پرتو تراهرتز در داخل چربی زیرپوست و پراکندگی آن در اثر برخورد با سلول‌های چربی مدنظر است، باتوجه به شعاع(a) سلول‌های چربی($2\frac{2\pi a}{\lambda}\left|\frac{n_{particle}}{n_{medium}}-1\right| \ll 1$) و تضاد ضریب‌شکستی کم بین سلول‌های چربی و کلاژن اطراف آن ($\left|\frac{n_{particle}}{n_{medium}}-1\right| \ll 1$) از مدل ریلی-گانز-بورن استفاده شده است. معادله بهره پراکندگی در حوزه می و ریلی-گانز-بورن برای قطبش TE و TM در روابط (۱۱-۹) نشان داده شده‌اند[۳]. در معادله (۹)، $x=ka=\frac{2\pi a}{\lambda}$ پارامتر اندازه است که در آن a شعاع ذره پراکنده‌کننده می‌باشد.همچنین a_q و b_q ضرایب می و q مرتبه تابع بسلی می‌باشد که با کمک آن این ضرایب به دست می‌آیند. در روابط (۱۱-۱۰)، m نسبت ضریب‌شکست ذره پراکنده‌کننده به محیط اطراف،$U=4x$ و $\gamma = 0.577$ ثابت اویلر هستند.

$$(Q_{Sca})_{Mie}=\frac{2}{x^2}\sum_{q=1}^{\infty}(2q+1)(|a_q|^2+|b_q|^2) \quad (۹)$$

$$((Q_{Sca})_{RGB})_{TE} = (m-1)^2\{-\frac{1}{4}-\frac{\sin(4x)}{8x}-\frac{(1-\cos(4x))}{32x^2}+x^2\} \quad (۱۰)$$

$$((Q_{Sca})_{RGB})_{TM} = (m-1)^2\{\frac{11}{4}+2x^2-\frac{\sin(U)}{U}-\frac{7}{16x^2}(1-\cos(U)) + \left(\frac{1}{2x^2}-2\right)(\gamma+Ln(U)-Ci(U))\} \quad (۱۱)$$

جدول ۱:ضرایب دبای دوگانه برای کلاژن نوع I

مرجع	$\tau_2(ps)$	$\tau_1(ps)$	ε_2	ε_1	ε_∞
[۴]	۱,۱	۹,۱	۷,۱	۱۱,۴	۲,۰

جدول ۲: ضرایب کول-کول دوگانه برای چربی

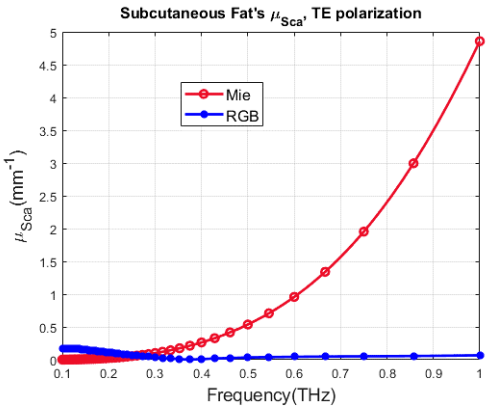
مرجع	α_2	α_1	τ_2 (ps)	τ_1 (ps)	ε_2	ε_1	ε_∞
[۵]	۰,۱	۰,۴۵	۴,۰۱	۰,۹	۵	۹	۱,۳

نتایج شبیه سازی و بحث

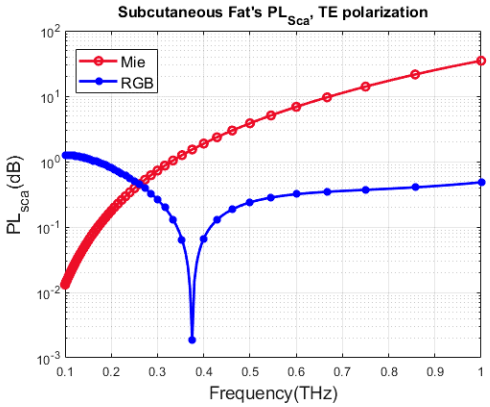
اتلاف‌راه پراکندگی برای ضخامت ۱,۶۵ میلی‌متر که ضخامت چربی در بازو می‌باشد، محاسبه شده و از آنجایی که مدل دبای دوگانه نتایج دقیقی را در بازه ۱-۰,۱ تراهرتز پیش‌بینی می‌کند، این بازه فرکانسی مورد بررسی واقع شده است. شکل ۱و۲ نشان‌دهنده ضریب پراکندگی و اتلاف‌راه

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

پراکندگی برای قطبش *TE* و شکل ۳و۴ بیانگر همین مولفه‌ها برای قطبش *TM* می‌باشد.

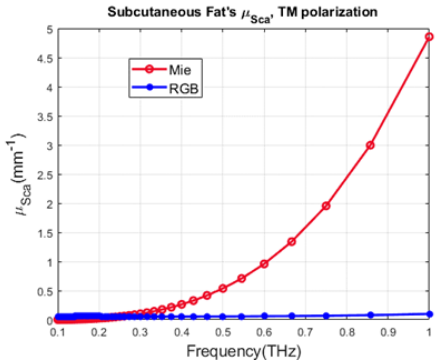


شکل ۱:ضریب پراکندگی بافت چربی در دوحالت هوا-محصور(Mie) و بافت-محصور(RGB) به ازای قطبش TE



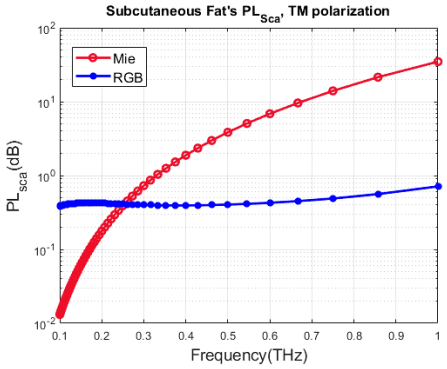
شکل ۲:اتلاف‌راه پراکندگی بافت چربی به ازای انتشار ۱,۶۵میلی‌متری و قطبش TE در دوحالت هوا-محصور(Mie) و بافت محصور(RGB)

از شکل‌های ۱و۲ مشخص است که پیش‌فرض هوا-محصور برای حالت درون‌جانداری منجر به درنظرگرفتن اتلاف‌راه



شکل ۳:ضریب پراکندگی بافت چربی در دوحالت هوا-محصور(Mie) و بافت-محصور(RGB) به ازای قطبش TM

کم‌تر و بیشتر در فرکانس‌های زیروبالای ۰۲۶تراهرتز می‌شود.



شکل ۴:اتلاف‌راه پراکندگی بافت چربی به ازای انتشار ۱,۶۵میلی‌متری و قطبش TM در دوحالت هوا-محصور(Mie) و بافت محصور(RGB)

برای قطبش *TM* نیز، استفاده از پیش‌فرض هوا-محصور منجر به محاسبه بیشتر اتلاف‌راه پراکندگی برای فرکانس‌های بالاتر از حدود ۰,۲۶تراهرتز می‌شود. اما به‌طور کلی در قطبش *TM* رفتار دوحالت مشابه‌تر است.

نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف بررسی پیش‌فرض محیط محصورهوا در محاسبه پراکندگی به مقایسه اتلاف‌راه و ضریب پراکندگی در دوحالت هوا-محصور و بافت-محصور در بازه فرکانسی ۰,۱-۱ تراهرتز برای بافت چربی پرداخته است. مشاهده شده که پیش‌فرض هوامحصور منجر به اتلاف‌راه پراکندگی کم‌تر و بیشتر در فرکانس‌های زیر و بالای ۰,۲۶تراهرتز می‌شود. در این فرکانس هردو مدل مقدار مشابهی را پیش‌بینی می‌کنند.تضاد اتلاف‌راه‌های به دست آمده برای قطبش *TE* نیز بیشتر از *TM* است.

مراجع

[1] H. Elayan, R. Shubair and J. Jornet, *IEEE transactions on nanobioscience*, 2017.

[2] T. Wu, T. Rappaport and C. Collins, "Safe for generations to come," *IEEE microwave magazine*, vol. 16, 2015.

[3] v. d. Hulst, Light Scattering by Small Particles.

[4] R. Zhang, K. Yang, Q. Abbasi and N. A. AbuAli, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 8, 2018.

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

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