



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 اتلاف راه 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 اتلاف راه 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 ترهرتز می‌شود. بیشترین تفاوت بین نتایج هوا-محصور و بافت-محصور در قطبش TE و به‌ازای فرکانس ۰.۴ ترهرتز مشاهده شده است.

کلید واژه- اتلاف راه 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 Ameri¹, Fazel Jahangiri²

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

مقدمه

امواج تراهرتز در محدوده‌ای از طیف الکترومغناطیسی قرار دارند که شامل بازه فرکانسی ۰.۱-۱۰ 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 درحالیست که پرتو تراهرتز در حین انتقال در داخل بدن و دربین بافت‌ها، می‌تواند تحت تاثیر عوامل اتلافی مختلفی همانند جذب، گسترده‌گی 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 گسترده‌گی 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 ضرایب شکست ذره پراکنده‌کننده و محیط اطراف آن می‌باشد. معمولاً برای محاسبه پراکندگی، حتی در حالت درون‌جاندار صرفاً ضریب شکست 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 قرار گرفته 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 در هوا از مدل پراکندگی می^۵ استفاده شده است.

تئوری مسئله

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

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

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

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{\infty})\omega\tau_1}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_{\infty})\omega\tau_2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \quad (3)$$

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

^۱ Double Cole-Cole

^۲ Rayleigh-Gans-Born

^۳ Mie Scattering

^۴ Collagen

^۵ Double-Debye

ضریب شکستی کم بین سلول‌های چربی و کلاژن اطراف آن
است. $\left| \frac{n_{particle}}{n_{medium}} - 1 \right| \ll 1$ از مدل ریلی-گائز-بورن استفاده شده
است. معادله بهره پراکندگی در حوزه می و ریلی-گائز-بورن
برای قطبش TE و TM در روابط (۹-۱۱) نشان داده
شده‌اند [۳]. در معادله (۹)، $x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$ پارامتر اندازه است
که در آن a شعاع ذره پراکنده کننده 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 (۱۰-۱۱)، m نسبت
ضریب شکست ذره پراکنده کننده به محیط اطراف، $U = 4x$ و
 $\gamma = 0.577$ ثابت اوایلر هستند.

$$(Q_{Sca})_{Mie} = \frac{2}{x^2} \sum_{q=1}^{\infty} (2q+1) (|a_q|^2 + |b_q|^2) \quad (9)$$

$$((Q_{Sca})_{RGB})_{TE} = (m-1)^2 \left\{ -\frac{1}{4} \frac{\sin(4x)}{8x} - \frac{(1-\cos(4x))}{32x^2} + x^2 \right\} \quad (10)$$

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

جدول ۱: ضرایب دمای دوگانه برای کلاژن نوع ۱

مرجع	$\tau_1(ps)$	$\tau_2(ps)$	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	$\tau_2(ps)$	$\tau_1(ps)$	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_{∞}
[۵]	۰،۱	۰،۴۵	۴،۰۱	۰،۹	۵	۹	۱،۳

نتایج شبیه سازی و بحث

اتلاف راه پراکندگی برای ضخامت ۱،۶۵ میلی متر که
ضخامت چربی در بازو می‌باشد، محاسبه شده و از آنجایی
که مدل دمای دوگانه نتایج دقیقی را در بازه ۰،۱-۱ تراهرتز
پیش‌بینی می‌کند، این بازه فرکانسی مورد بررسی واقع شده
است. شکل ۱ و ۲ نشان‌دهنده ضریب پراکندگی و اتلاف راه

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

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{\infty})}{1 + (i\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_{\infty})}{1 + (i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} \quad (4)$$

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_1 - \epsilon_{\infty}) \frac{1 + (\omega\tau_1)^{1-\alpha_1} \sin(\frac{\alpha_1\pi}{2})}{1 + 2(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1} \sin(\frac{\alpha_1\pi}{2}) + (\omega\tau_1)^{2(1-\alpha_1)}} + (\epsilon_2 - \epsilon_{\infty}) \frac{1 + (\omega\tau_2)^{1-\alpha_2} \sin(\frac{\alpha_2\pi}{2})}{1 + 2(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2} \sin(\frac{\alpha_2\pi}{2}) + (\omega\tau_2)^{2(1-\alpha_2)}} \quad (5)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{\infty})(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1} \cos(\frac{\alpha_1\pi}{2})}{1 + 2(\omega\tau_1)^{1-\alpha_1} \sin(\frac{\alpha_1\pi}{2}) + (\omega\tau_1)^{2(1-\alpha_1)}} + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_{\infty})(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2} \cos(\frac{\alpha_2\pi}{2})}{1 + 2(\omega\tau_2)^{1-\alpha_2} \sin(\frac{\alpha_2\pi}{2}) + (\omega\tau_2)^{2(1-\alpha_2)}} \quad (6)$$

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

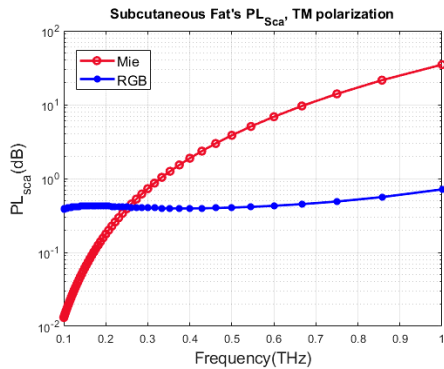
$$\mu_{sca} = \rho_v Q_{sca} \sigma_g \quad (7)$$

$$PL_{sca} = e^{-\mu_{sca} d} \quad (8)$$

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} اتلاف راه
پراکندگی می‌باشد.

معادله مورد نیاز برای محاسبه Q_{sca} با توجه به مدل
متفاوت است. در حالت اول که انتشار پرتو تراهرتز در هوا و
پراکندگی آن در اثر برخورد با بافت مدنظر است، از مدل
پراکندگی می‌استفاده 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، با توجه به
شعاع (a) سلول‌های چربی $\left| \frac{n_{particle}}{n_{medium}} - 1 \right| \ll 1$ و تضاد

پراکندگی برای قطبش TE و شکل ۴ و ۳ بیانگر همین مولفه‌ها برای قطبش TM می‌باشد.



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

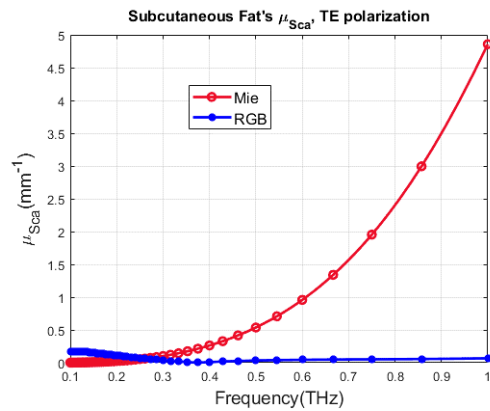
برای قطبش TM نیز، استفاده از پیش‌فرض هوا-محصور منجر به محاسبه بیشتر اتلاف‌راه پراکندگی برای فرکانس‌های بالاتر از حدود ۰٫۲۶ تراهرتز می‌شود. اما به‌طور کلی در قطبش TM رفتار دو حالت مشابه‌تر است.

نتیجه‌گیری

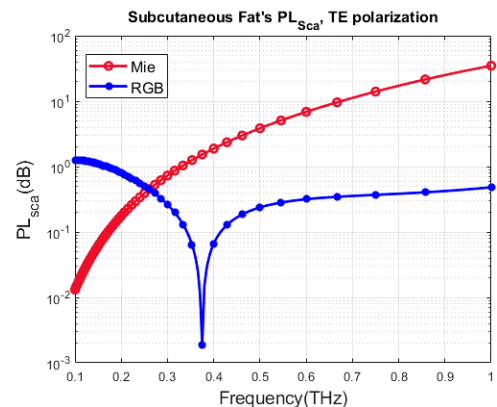
این مقاله با هدف بررسی پیش‌فرض محیط محصور هوا در محاسبه پراکندگی به مقایسه اتلاف‌راه و ضریب پراکندگی در دو حالت هوا-محصور و بافت-محصور در بازه فرکانسی ۰٫۱-۰٫۲ تراهرتز برای بافت چربی پرداخته است. مشاهده شده که پیش‌فرض هوا-محصور منجر به اتلاف‌راه پراکندگی کمتر و بیشتر در فرکانس‌های زیر و بالای ۰٫۲۶ تراهرتز می‌شود. در این فرکانس هر دو 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.

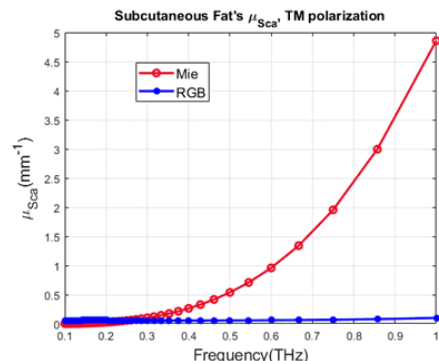


شکل ۳: ضریب پراکندگی بافت چربی در دو حالت هوا-محصور (Mie) و بافت-محصور (RGB) به ازای قطبش TE



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

از شکل‌های ۲ و ۱ مشخص است که پیش‌فرض هوا-محصور برای حالت درون‌جانداری منجر به در نظر گرفتن اتلاف‌راه



شکل ۱: ضریب پراکندگی بافت چربی در دو حالت هوا-محصور (Mie) و بافت-محصور (RGB) به ازای قطبش TM

کم‌تر و بیشتر در فرکانس‌های زیر و بالای ۰٫۲۶ تراهرتز