بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

تاثیر ضریب شکست بر مقطع نگاری نور همدوس در فضای فوریه اجسام چند لایه

پیمان رجایی، احمد امجدی*

مرکز تحقیقات فیزیک کاربردی شریف، دانشگاه صنعتی شریف

payman.rajai@sharif.edu, *amjadi@sharif.edu

چکیده – در مقطع نگاری نور همدوس در فضای فوریه (FD-OCT) تغییرات ضریب شکست درون جسم عامل تمیز دادن لایه های درونی جسم از یکدیگر هستند. تا هنگامیکه تغییرات ضریب شکست درون جسم کوچک باشد تصویر بازسازی شده توسط FD-OCT از لایه های جسم دقیق است. با افزایش تغییرات در ضریب شکست و افزایش بازتابهای داخلی، رویه های غیر واقعی در تصویر ظهور خواهند یافت که از رویه های واقعی قابل تمایز نیستند. در این مقاله یک سیستم دو لایه مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده که چنانچه ضریب شکست جسم از ۱,۴۵ فراتر رود، سیستم FD-OCT قادر به تشخیص صحیح لایه های جسم نخواهد بود.

کلید واژه-. مقطع نگاری نور همدوس، فضای فوریه، ضریب شکست، سیستمهای چندد لایه

The Impact of Refractive Index on the Fourier Domain Optical Coherence Tomography of Multi-layer Systems

Payman Rajai, Ahmad Amjadi*

Sharif Applied Physics Research Center, Sharif University of Technology

payman.rajai@sharif.edu, *amjadi@sharif.edu

Abstract- In a Fourier Domain Optical Coherence Tomography (FD-OCT) system, the refractive index profile is the contrast mechanism that allows one to determine the inner structure of the object. When the refractive index variations inside the object are small, FD-OCT can precisely reconstruct the object's internal structure. With increasing the object's refractive index and internal reflections, phantom interfaces are created in the final image that sometimes is hard to be differentiated with the real interfaces. In this article, we examine a two-layer object and show that when the refractive indices exceed 1.45, the FD-OCT imaging system is unable to interpret the real interfaces of the object.

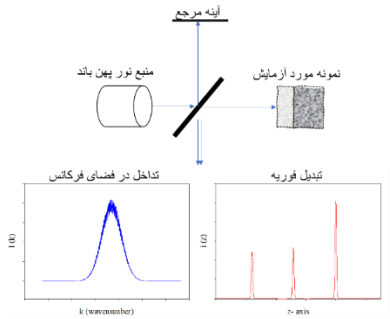
Keywords: Optical Coherence Tomography, Fourier Domain, refractive index, Multi-layer Systems.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]

مقدمه

مقطع نگاری نور همدوس(Optical Coherence Tomography; OCT) یکی از جدیدترین دستاوردها در زمینه بررسی ساختار درونی اجسام است. این یک روش غیر تهاجمی بر پایه تداخل سنجی است که اطلاعات سطح مقطع اجسام را با دقت بسیار بالا (از مرتبه میکرومتر) فراهم میکند. با اینکه OCT بیشترین کاربرد خود را در پزشکی، خصوصا چشم پزشکی یافته است، کاربردهای آن در شاخه های مختلف صنعتی در حال افزایش است. از جمله این صنایع میتوان به صنایع کاغذ سازی [۱] ، فیبر نوری و پولیمر [۲]، [۳]، انگشت نگاری [۴] ، و سنگهای قیمتی [۵] یاد کرد. مقطع نگاری نور همدوس در فضای فوریه (FD-OCT) در سال ۱۹۹۵ توسط فرچر معرفی شد [۷] . در این شیوه آینه مرجع ثابت است و اطلاعات ساختار داخلی جسم در طیف تداخلی حاصل از طیف بازتابی از درون جسم و آینه مرجع وجود دارد و از طریق تبدیل فوریه بدست میاید (شکل ۱). تصویر کلی سطح مقطع از بهم پیوستن تعداد زیادی اسکن عمقی (A-Scan) که در کنار هم تکرار میشوند (B-Scan) بدست میاید. هر اسکن عمقی شامل تعدادی قله (نقاطی با دامنه بزرگتر از زمینه) است که نشاندهنده وجود مراکز بازتابی در جسم است. این مراکز بازتابی در اصل مکانی هستند که ضریب شکست تغییر یافته و گذار از یک لایه به لایه دیگر اتفاق افتاده است. بنابراین تغییرات ضریب شکست درون جسم عامل تمیز دادن لایه های درونی جسم از یکدیگر هستند.



شکل ۱: نمایی از سیستم مقطع نگاری نور همدوس در فضای فوریه

FD-OCT بطور قابل ملاحظه ای حساسیت در ثبت سیگنال و سرعت تصویر برداری را نسبت به TD-OCT بهبود بخشید [۸] و اکنون در بازار بطور کامل جایگزین آن شده است. با اینحال تصویر حاصل FD-OCT دارای نویزهایی است که باید از تصویر خارج شوند. طیف تداخلی از سه قسمت تشکیل شده است که شامل جملات ثابت(Direct Current; DC)، جملات حاصل از تداخل لایه ها با یکدیگر (Auto-Correlation; AC) و جملات حاصل از تداخل لایه ها با آینه مرجع (Cross-Correlation; CC) است. اطلاعات مفید از درون جسم در جملات CC وجود دارند و بقیه جملات در تصویر نهایی باید حذف شوند. تصویر حاصل از FD-OCT همچنین دارای تصویر مزدوج است که با شیوه تداخلی تغییر فاز قابل حذف هستند [۹].

از آنجا که تغییرات ضریب شکست در بافتهای بیولوژی بسیار اندک است، قله های ثبت شده ناشی از جملات AC بسیار کوچکتر از قله های مربوط به لایه های اصلی (CC) است و براحتی قابل تمیز هستند. اما هنگامیکه تغییرات ضریب شکست افزایش میابد، تعداد و دامنه قله های AC افزایش میابد و مواردی پیش میاید که این قله ها از قله های CC بزرگتر میشوند. در این مقاله سعی بر آن است که شرایطی را که در آن در تصویر یک محیط چند لایه قله های AC از CC بزرگتر میشوند را شناسایی کنیم. این خطا در انتخاب قله ها منجر به تشخیص اشتباه لایه ها و یا حتی تشخیص لایه های اضافی (غیر واقعی) خواهد شد. نتایج تحقیق حاضر برای کاربرد های صنعتی FD-OCT مناسب است که در آن با اجسام غیر بیولوژی با تغییرات بزرگ در ضریب شکست مواجه هستیم.

طراحی محیط شبیه سازی

برای شبیه سازی FD-OCT ما فرض میکنیم منبع نور سیستم دارای گستره طیفی گاوسی شکل است با طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر و پهنای باند $\Delta\lambda_{FWHM}$=50 nm. این

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]

منبع نور میتواند پالس نوری با طول همدوسی l_c=5.6 µm تولید کند که از فرمول $l_c = (2ln(2)/\pi)\lambda_0^2 / \Delta\lambda_{FWHM}$ بدست میاید [۱۰]. همچنین فرض میکنیم سیستم ثبت سیگنال (اسپکترومتر) دارای آرایه با تعداد ۴۰۹۶ پیکسل است که کل طیف بازتابی از ۶۵۰ تا ۹۵۰ نانومتر را پوشش میدهد. در چنین شرایطی، قدرت تفکیک پذیری اسپکترومتر برابر 0.075 nm است . حداکثر طول قابل اندازه گیری سیستم از فرمول $\pm z_{\max} = \pm\pi / 2\delta k$ تعیین میشود که برابر 2.18 mm است. در این فرمول δk قدرت تفکیک پذیری اسپکترومتر برحسب عدد موج است. هر موجی که فراتر از فاصله z_{max} توسط سیستم ثبت شود دارای فرکانسی خواهد بود که بطور کامل توسط اسپکترومتر قابل نمونه برداری نیست.

همچنین در این مطالعه، فرض میکنیم که جسم مورد ارزیابی دارای لایه های بطور کامل تخت است و ضریب شکست لایه های آن همسانگرد، هموژن و بدون جذب هستند (ضریب شکست قسمت موهومی ندارد). طیف بازتابی چنین محیطی با استفاده از روش استاندارد Transfer Matrix Method (TMM) قابل محاسبه است که میتواند بعنوان طیف واقعی مورد استفاده قرار بگیرد [۱۱]. با توجه به فرضیات بالا، ما قادر هستیم طیف تداخلی یک سیستم FD-OCT را شبیه سازی میکنیم. پس از خارج کردن جملات AC و DC از سیگنال و اعمال تبدیل فوریه، پروفایل بازتابی جسم مورد ارزیابی آشکار خواهد شد. این پروفایل شامل قله هایی است که هر کدام نماینده یک رویه درون جسم هستند و فاصله هر دو رویه نماینده طول راه نوری (Optical Path Length; OPL) یک لایه خواهند بود. لازم به ذکر است که مکان بدست آمده برای هر رویه، مقداری تقریبی است و این محدودیتی است که در اثر استفاده از تبدیل فوریه گسسته ایجاد میشود. برای یافتن مکان رویه ها با دقت بیشتر، لازم است که شکل تابع طول همدوسی بر روی هر رویه نشانده شود. نوک تابع فیت شده در اینصورت مکان دقیقتر هر رویه را نشان خواهد داد.

با توجه به فرایند ذکر شده در بالا، در قسمت بعدی این مقاله طول راه نوری لایه های مختلف یک جسم را اندازه گیری میکنیم و میزان خطا در اندازه گیری هر لایه را از فرمول

$$Relative_Error = \frac{|OPL^{Measured} - OPL^{Actual}|}{OPL^{Actual}} \qquad (۳)$$

برای بازه وسیعی از ضریب شکست ها محاسبه میکنیم تا متوجه شویم میزان خطا در اندازه گیری نسبت به چه بازه از ضریب شکست افزایش میابد.

تاثیر ضریب شکست بر خطای اندازه گیری OPL

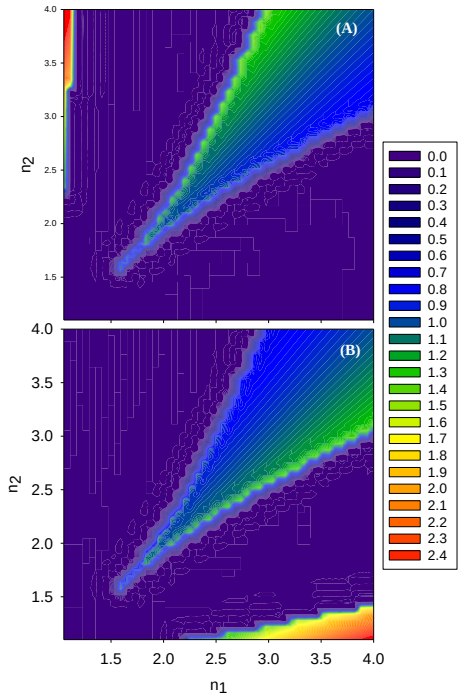
در این قسمت تاثیر افزایش ضریب شکست یک محیط چند لایه بر خطای اندازه گیری لایه های آن مورد بررسی قرار میگیرد. برای این کار، یک محیط دو لایه را در نظر میگیریم که ضریب شکست لایه اول و دوم آن بترتیب n_1 و n_2 است که در هوا قرار دارد. فرض میکنیم هر لایه ضخامت فیزیکی 100 µm دارد. میزان ضرایب شکست محیط اول و دوم را برای یک بازه وسیع از ۱ تا ۴ با پرشهای ۰٫۰۶ جاروب میکنیم. به این ترتیب تعداد ۲۶۰۰ مدل مختلف برای جسم بدست میاید و برای هر مورد OPL لایه اول و دوم و میزان خطا در اندازه گیری را محاسبه میکنیم. نتیجه اندازه گیری در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲-(A) مربوط به میزان خطای لایه اول و شکل ۲-(B) مربوط به میزان خطای لایه دوم است. در این شکل محور افقی بازه جاروب شده برای n_1 و محور عمودی بازه جاروب شده برای n_2 را نشان میدهد.

همانطور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۲ ملاحظه میشود، در یک محیط دو لایه تا هنگامیکه ضریب شکست لایه ها کمتر از ۱٫۴۵ است، طول راه نوری هر دو لایه با دقت بالا قابل اندازه گیری است. بتدریج با افزایش ضرایب شکست و افزایش میزان بازتاب درون لایه ها، جملات AC

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]

بیشتری در طیف بازتابی ظاهر میشوند که دامنه آنها از دامنه مربوط به رویه های اصلی (جملات CC) بزرگتر میشوند و احتمال تشخیص لایه های غیر حقیقی از لایه های اصلی افزایش میابد.



شکل۲: نقشه خطای نسبی اندازه گیری در OPL یک محیط دو لایه برای بازه وسیعی از ضریب شکست. (A) لایه اول و (B) لایه دوم

نتیجه‌گیری

در تصویر سازی از اجسام چند لایه، سیستم های FD-OCT قادر هستند لایه های اصلی جسم مورد ارزیابی را با دقت بالا اندازه گیری کنند اگر اختلاف ضریب شکست بین لایه ها اندک باشد. برای یک سیستم دو لایه هنگامیکه ضریب شکست لایه ها از ۱,۴۵ فراتر میرود، لایه های غیر واقعی در تصویر ظهور خواهند یافت که از لایه های واقعی قابل تمایز نیستند.

مرجع‌ها

[1] E. Alarousu, L. Krehut, T. Prykäri, and R. Myllylä, "Study on the use of optical coherence tomography in measurements of paper properties," Meas. Sci. Technol., vol. 16, no. 5, p. 1131, 2005, doi: 10.1088/0957-0233/16/5/012.

[2] P. H. Tomlins and R. K. Wang, "Simultaneous analysis of refractive index and physical thickness by Fourier domain optical coherence tomography," Optoelectron. IEE Proc., vol. 153, no. 5, pp. 222–228, Oct. 2006.

[3] P. H. Tomlins and R. K. Wang, "Matrix approach to quantitative refractive index analysis by Fourier domain optical coherence tomography," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 23, no. 8, p. 1897, 2006, doi: 10.1364/JOSAA.23.001897.

[4] S. Chang, Y. Cheng, K. V. Larin, Y. Mao, S. Sherif, and C. Flueraru, "Optical coherence tomography used for security and fingerprint-sensing applications," IET Image Process., vol. 2, no. 1, pp. 48–58, Feb. 2008, doi: 10.1049/iet-ipr:20070021.

[5] S. Chang, Y. Mao, G. Chang, and C. Flueraru, "Jade detection and analysis based on optical coherence tomography images," Opt. Eng., vol. 49, no. 6, pp. 063602-063602–8, 2010, doi: 10.1117/1.3449112.

[6] D. Huang et al., "Optical coherence tomography," Science, vol. 254, no. 5035, pp. 1178–1181, Nov. 1991, doi: 10.1126/science.1957169.

[7] A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, G. Kamp, and S. Y. El-Zaiat, "Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry," Opt. Commun., vol. 117, pp. 43–48, Feb. 1995, doi: 10.1016/0030-4018(95)00119-S.

[8] R. Leitgeb, C. Hitzenberger, and A. Fercher, "Performance of fourier domain vs time domain optical coherence tomography," Opt. Express, vol. 11, no. 8, p. 889, Apr. 2003, doi: 10.1364/OE.11.000889.

[9] R. A. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, A. F. Fercher, and T. Bajraszewski, "Phase-shifting algorithm to achieve high-speed long-depth-range probing by frequency-domain optical coherence tomography," Opt. Lett., vol. 28, no. 22, p. 2201, Nov. 2003, doi: 10.1364/OL.28.002201.

[10] J. Kalkman, "Fourier-Domain Optical Coherence Tomography Signal Analysis and Numerical Modeling," International Journal of Optics, 2017. [Online]. Available: https://www.hindawi.com/journals/ijo/2017/9586067/. [Accessed: 22-Dec-2019].

[11] K. Ohta and H. Ishida, "Matrix formalism for calculation of electric field intensity of light in stratified multilayered films," Appl. Opt., vol. 29, no. 13, p. 1952, May 1990, doi: 10.1364/AO.29.001952.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]