بررسی انتشار پالس گاوسی از یک سیستم تار نوری به روش ماتریسی

فاطمه نگهبان، علیرضا کشاورز، محسن حاتمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده – امروزه بررسی انتشار پالس در سیستم فیبر نوری موضوعی با اهمیت است. روش معمول حل معادله موج حاکم است که در بسیاری از سیستم‌های تار نوری پیچیده است. در این مقاله ضمن معرفی روش ماتریس ABCD، برای یک سیستم خاص شامل مدولاتور دامنه AM و فیلترهای اپتیکی و یک خط پاشنده ماتریس های زمانی معرفی شده و با استفاده از آن‌ها شبیه سازی خروجی مورد نظر با وارد کردن پالس گاوسی به این سیستم نوری انجام می‌گردد. نتایج حاصل به عنوان یک پالس مدوله شده در لیزر های تار نوری قفل شده مد قابل استفاده است.

کلید واژه- پالس گاوسی، ماتریس ABCD، مدولاتور دامنه، فیلتر گذردهی

Investigation of Gaussian Pulse Propagation in an Optical Fiber System with Matrix Method

Fateme Negahban, Alireza Keshavarz, Mohsen Hatami

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract-Todays, investigation of pulse propagation in an optical system is an important topic .The usual method is solving the wave equation which is complicated in many optical fiber systems. In this paper in addition to introduce the ABCD matrix method, a specific system including amplitude modulator, optical band pass filter and dispersive line is considered and the temporal matrices is introduced, then with considering a Gaussian pulse as input, the output is simulated. Results can be used as a modulated pulse in mode locking fiber lasers.

Keywords: Gaussian pulse, temporal matrix, ABCD matrix, AM modulator

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-13]

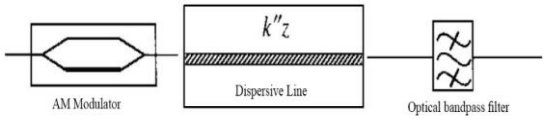
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

استفاده از ادوات نوری به ویژه تارهای نوری می تواند به انتقال سریع‌تر، بهتر و دقیق‌تر اطلاعات کمک کند[۱]. یک پالس می تواند در فضای آزاد، هوا و یا تار نوری منتشر شود[۲]. در این راستا شبیه سازی انتشار پالس این سیستم‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. روش معمول برای شبیه‌سازی و شناخت تحول زمانی پالس در این سیستم‌ها شناخت و حل معادلات حاکم است که به دلیل پیچیدگی حل تحلیلی برای دستیابی به جواب باید به حل عددی متوسل شد. با این وجود هنوز هم می‌توان با استفاده از روش ماتریسی ABCD در بعد زمان به حل تحلیلی پرداخت. هر چند این روش به دلیل عدم شناخت ماتریس حاکم همیشه امکان‌پذیر نیست و هم‌چنین از تقریب های لازم نمی‌توان چشم پوشی کرد با این وجود در بسیاری از موارد بسیار سودمند است. در این مقاله ضمن معرفی این روش به اعمال آن برای یک سیستم تار نوری خاص شامل مدولاتور دامنه، یک فیلتر و یک خط پاشنده که از مهم‌ترین المان‌های یک سیستم تار نوری هستند پرداخته می‌شود.

۲- مبانی نظری

در طراحی یک سیستم نوری پارامترهای متفاوتی مانند مدولاتور دامنه، مدولاتور فرکانس، فضای آزاد، فیلترهای گوناگون و غیره را می توان به کار برد. مطابق شکل ۱ فرض کنید یک سیستم تار نوری شامل مدولاتور دامنه AM، مسیر پاشنده و فیلتر گذردهی نور می باشد. پس از ورود پالس به فیبر نوری از یک مدولاتور دامنه عبور می کند و پس از آن یک مسیر پاشنده (که اصطلاحا آن را خط پاشنده می نامیم) و در نهایت یک فیلتر باند عبوری نوری در مسیر آن قرار خواهد گرفت. مدولاتور دامنه از دسته ی مدولاتورهای آنالوگ است و وظیفه ی کنترل دامنه‌ی پالس را به عهده دارد. بهره‌گیری از فیلترهای قابل تنظیم نیز در سیستم‌های مخابرات نوری به دلیل افزایش طول موج ارسالی و دریافتی کانال‌ها و هم‌چنین کاهش ابعاد قطعات رو به افزایش است[۳]. بنابراین می‌توان دلیل انتخاب سیستم نوری مورد نظر را دریافت.



شکل ۱ سیستم نوری طراحی شده شامل مدولاتور دامنه، فیلتر و محیط پاشنده

پالس ورودی سیستم بالا یک پالس گاوسی خواهد بود. برای یک پالس گاوسی به عنوان ورودی می‌توان رابطه‌ی زیر را در نظر گرفت[۴]

$$U(0,T) = exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right] \qquad (۱)$$

در این رابطه T_0 مقدار نصف عرض در $1/e$ نقطه‌ی شدت را نشان می‌دهد. اما مقدار دامنه ی عبارت $U(z,\mathrm{T})$ در فاصله‌ی z در طول سیستم تار نوری ساده با استفاده از رابطه ی زیر محاسبه می شود[۵]

$$U(z,T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} exp\left(\frac{-T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right) \qquad (۲)$$

بنابراین یک پالس گاوسی در طول انتشار شکل خود را حفظ می کند اما با تغییر مقدار z عرض پالس متغیر خواهد بود.

۲-۱ ماتریس ABCD در حوزه‌ی زمان

هنگام ورود پرتو به یک سیستم نوری و عبور آن از عناصر متفاوت نوری پارامتر q ورودی به پارامتر q خروجی تبدیل خواهد شد. در این شرایط می‌توان اثر هر کدام از عناصر نوری را به صورت یک ماتریس $ABCD$ نمایش داد. با دانستن پارامتر q_{in} پرتو گاوسی و عناصر ماتریس انتقال پرتو می‌توان مقدار q_{out} را از قانون

$$q_{out} = \frac{Aq_{in} + B}{Cq_{in} + D} \qquad (۳)$$

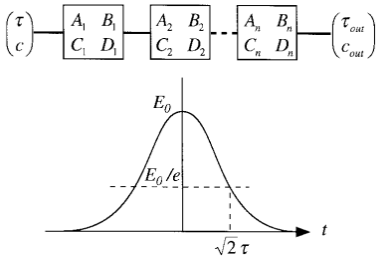
بدست آورد. در بعد زمانی پارامتر q با استفاده از رابطه‌ی زیر مشخص خواهد شد[۶]:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{\tau^2} - jC \qquad (۴)$$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-13]

که τ مقدار $1/e$ پهنای پالس و C چیرپ شدگی را نمایش می دهند.



شکل۲. نمودار ماتریس ABCD حوزه‌ی زمان بر اساس توزیع دامنه[۶]

۲-۲ مدولاتور دامنه

معادله‌ی اصلی برای یک مدولاتور دامنه به صورت تقریبی مانند زیر نوشته می‌شود

$$\exp[-M(1-\cos\omega t)] \cong \exp[-\frac{1}{2}M\omega t] \qquad (۵)$$

بنابراین پس از گذشت پالس ازین بخش عامل $1/q_{out}$ به شکل زیر خواهد بود

$$\frac{1}{q_{out}} = \frac{1}{\tau^2} - jC + \alpha_a \qquad (۶)$$
$$\alpha_a = M\omega_M^2$$

M دامنه‌ی مدولاسیون و ω_M فرکانس زاویه‌ای مدولاسیون هستند. بنابراین عناصر ماتریس $ABCD$ با ماتریس زیر بیان می‌شوند

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_a & 1 \end{pmatrix} \qquad (۷)$$

تمام عناصر ماتریس مقادیری حقیقی هستند و از رابطه‌ی $-1 \le (A+D)/2 \le 1$ تبعیت می‌کنند.

۲-۳ فیلتر گذردهی نوری

با کمک یک تقریب سهموی فیلتر گذردهی نوری برای فیبر معادله‌ی زیر را برآورده می‌کند

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\gamma}{\Delta\omega^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}u \qquad (۸)$$

پارامتر γ قابلیت انتقال فیلتر در طول واحد برای فرکانس مرکزی یعنی $\omega = \omega_0$ را اندازه‌گیری می‌کند و $\Delta\omega$ مقدار نصف پهنا را در میانه‌ی مقدار بیشینه نشان می‌دهد. بنابراین ماتریس مورد نظر برای فیلتر به صورت زیر خواهد بود

$$\begin{pmatrix} 1 & 2\gamma/\Delta\omega^2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۹)$$

بهره‌ی نوری از عنصر فعال به طور همزمان در این ماتریس بیان می‌گردد که در آن γ و $\Delta\omega$ به ترتیب ضریب بهره و پهنای پالس می‌باشند.

۲-۴ خط پاشنده

پارامترهای یک ماتریس $ABCD$ پس از گذشتن از یک محیط پاشنده در بعد زمان به صورت زیر نمایش داده می‌شوند[۶]

$$\begin{pmatrix} 1 & jk''z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۰)$$

این ماتریس نشان دهنده‌ی یک محیط پاشنده با فاصله‌ی z و با ضریب پاشندگی k'' است.

از قانون ضرب ماتریس‌ها جهت ردیابی پرتو در خروجی استفاده خواهد شد. برای این کار از ماتریس‌های معرفی شده برای هر عنصر نوری کمک می‌گیریم[۷].

$$F_{AM}F_{filter}F_{DL} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_a & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 2\gamma/\Delta\omega^2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & jk''z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & jk''z + 2\gamma/\Delta\omega^2 \\ \alpha_a & \alpha_a jk''z + 1 + 2\alpha_a\gamma/\Delta\omega^2 \end{pmatrix} \qquad (۱۱)$$

مقدار عبارت $2\alpha_a\gamma/\Delta\omega^2$ بسیار کوچک‌تر از واحد است. بنابراین در محاسبات و شبیه سازی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در نتیجه شکل کلی ماتریس انتقال به صورت زیر خواهد بود

$$F_{Total} = \begin{pmatrix} 1 & jk''z + 2\gamma/\Delta\omega^2 \\ \alpha_a & \alpha_a jk''z + 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۲)$$

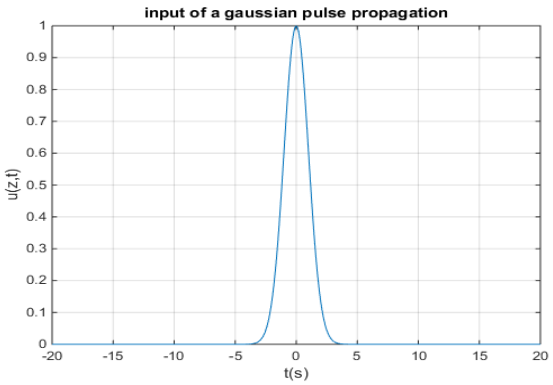
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-13]

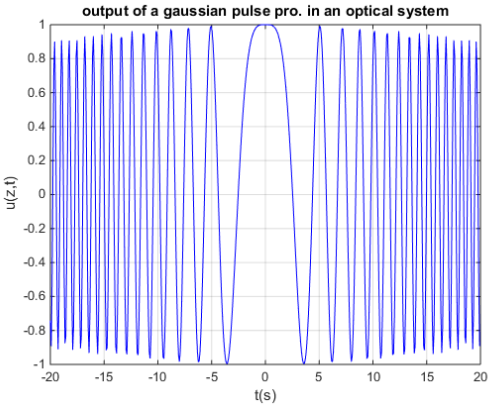
۳- شبیه سازی

در این مقاله شبیه سازی انتشار پالس ورودی پالس گاوسی بدون چیرپ شدگی مطابق شکل ۳ از سیستم تار نوری معرفی شده در شکل ۱ شامل مدولاتور دامنه و فیلتر گذردهی نوری و سپس خط پاشنده توسط نرم‌افزار متلب انجام شده است. در این‌جا سعی شده است از ماتریس‌ها در بعد زمان استفاده شود. از طرفی در طراحی سیستم‌ها معمولا از اثرات پاشندگی و غیرخطی فیبرها صرف نظر می‌شود که در این مقاله اثر پاشندگی در محاسبات در نظر گرفته شده است. همچنین در شبیه سازی‌ها $z=100(m)$ و $\gamma=0.02(W^{-1}m^{-1})$ می‌باشند.

شبیه سازی انشار پالس از سیستم مورد نظر با استفاده از ماتریس انتقال (۱۲) و قانون $ABCD$ معرفی شده با رابطه (۳) در حوزه زمان به سادگی امکان پذیر بوده و نتیجه در شکل ۴ گزارش شده است. همان طور که انتظار می‌رفت پس از ورود پالس گاوسی به سیستم مورد نظر شکل پالس دچار دگرگونی زمانی در طول انتشار ناشی از تاثیر سه المان طراحی شده گردیده است. همان گونه که مشاهده می‌شود استفاده از روش ماتریسی به شرط شناخت ماتریس $ABCD$ هر المان جایگزین مناسبی برای حل معادلات انتشار حاکم می‌باشد. نتایج حاصل از انتشار پالس در سیستم تار نوری معرفی شده در لیزرهای فیبری قفل شده مد قابل استفاده است.



شکل ۳ شبیه سازی یک پالس گاوسی بدون چیرپ شدگی به عنوان ورودی $t=T/T_0$.



شکل ۴ تغییرات پالس گاوسی پس از گذشتن از سیستم طراحی شده

نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی روش ماتریسی برای تحلیل انتشار پرتو گاوسی برای یک سیستم تار نوری بویژه شامل مدولاتور دامنه، یک فیلتر و یک خط پاشنده که از مهم‌ترین المان‌های یک سیستم تار نوری هستند با در نظر گرفتن اثر پاشندگی پرداخته شد. در صورت دانستن ماتریس‌های زمانی و پارامترهای آن‌ها استفاده از روش ماتریسی $ABCD$ جایگزین مناسبی برای حل معادلات انتشار پالس می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی انتشار پالس در لیزر های فیبری حلقوی قفل شده مد و در بسیاری از طراحی های سیستم های ارتباطی تار نوری روشی ساده و پرکاربرد می باشد.

مراجع

[1] Agrawal, Govind P. "*Optical receivers*." Fiber-Optic Communication Systems, Fourth Edition (2010): 128-181.

[2] A. Yariv, *Introduction to Optical Electronics.* New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1971

[۳] بهمه‌ء، زهرا. لطفی، حسین. جمشیدی‌قلعه، کاظم، *پایان‌نامه: طراحی فیلترهای تمام نوری با استفاده از بلورهای فوتونی یک بعدی*، ص ۴-۹، ۱۳۹۰

[4] Mookerjee, S., and A. Yariv. *Analysis of Optical Pulse Propagation with ABCD Matrices*. No. physics/0103011. 2001.

[5] Agrawal, Govind P. *Nonlinear fiber optics*. Academic press, 2007.

[6] Nakazawa M, Kubota H, Sahara A, Tamura K. *Time-domain ABCD matrix formalism for laser mode-locking and optical pulse transmission*. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1998 Jul; 34(7):1075-81.

[7] Verdeyen, J. T., *Laser electronics. Laser electronics/2nd edition*, 1989, 640 p.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-13]