

Temporal aberration reduction using space-time duality in an imaging system consisting of a temporal double Gaussian lens

Fatemeh Eksiri, Zahra Kavehvash*

Department of electrical engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
E-mails: fatemeh.eksiri@ee.sharif.edu; kavehvash@sharif.edu

Short Abstract

Temporal aberration is an important challenge in pulse-shaping process based on temporal imaging system. Temporal imaging is based upon the duality between spatial and temporal Fourier optics which, in turn, emanates from the similarity of the differential equations governing the diffraction of paraxial beams and dispersion of narrow-band pulses. In this paper, the temporal implementation of spatial double-Gaussian lens is proposed based on space-time duality and the concept of time-lens. Inspired from other spatial optical systems which have been implemented in time, a temporal implementation of double-Gaussian lens with reduced aberration is proposed. The obtained image is improved in quality and aberration content with 40 percent, compared to a conventional temporal imaging system.

Keywords

Time domain processing of optical signals, Duality of dispersion and diffraction of light, Temporal imaging, Time lens, Aberration.

1- Introduction

There is an aesthetic analogy between paraxial diffraction of beams in space domain and the dispersion of optical pulses in time domain, called the principle of space-time duality. Temporal imaging is a technique for controlling and deforming temporal waves that is equated using the space-time duality principle. One of the problems in the field of temporal imaging, is the existence of various aberrations in the system, which leads to a decrease in output quality. Among different structures for reducing spatial aberration, the Double-Gauss lens has been able to compensate for aberrations more effectively. Therefore, in this paper, temporal Double-Gauss lens is equated using the concept of temporal ray propagation.

2- Compensation of aberration using temporal double Gaussian lens

Using the space-time duality principle, temporal equivalent structure of a double Gaussian imaging system includes a dispersive medium, a double Gaussian lens and another dispersive medium. Consider a temporal ray that propagates through an imaging system and has an input time of τ_{in} and an input frequency of Ω_{in} . After simplifying the expressions for output frequency and time, two final conditions for compensating temporal aberration in double Gaussian system are as follows:

$$1. \quad \phi_2'' = -\phi_3'' \quad (1)$$

$$2. \quad \Phi_1''' = -\Phi_2''' \quad (2)$$

As a result, to compensate for the third order temporal aberration in Double Gaussian imaging system:

1. Group delay dispersion of the second and third dispersive medium should be symmetrical.
2. Focal third order group delay dispersion of the first and second three lenses should be symmetrical.

To implement this system, we use an electro-optical phase modulator (EOPM) as a time lens and fiber Bragg grating as a dispersive medium.

First, we consider a conventional imaging system with a single lens by the use of a phase modulator at frequency of 10GHz. Parameters of time lens will be $|\phi_f''| = 8.44 \text{ ps}^2$ and $|\Phi_f'''| = 7.44 \text{ ps}^{-3}$. Figure 12 shows the output of the conventional temporal imaging system with a simple lens. As could be seen, the output image has many distortions.

In the next step, a double gaussian temporal imaging system is implemented. For the first medium, we consider the same medium as the conventional single-lens imaging system with parameter $\phi_1'' = 2.3 \text{ ps}^2$. For implementing first three lenses, we use two phase modulator with frequencies of 11 and 12GHz and another phase modulator with frequency of 16.2GHz with Negative phase (equivalent to a concave lens). The equivalent frequency of first three lenses would be 1.6GHz. Consequently, the parameters of the first three lenses will be $\phi_{f1}'' = 329 \text{ ps}^2$ and $\Phi_{f1}''' = -0.03 \text{ ps}^{-3}$. Using the image condition and relation (1), GDD of second and third medium will be $\phi_2'' = -2.3 \text{ ps}^2$ and $\phi_3'' = 2.3 \text{ ps}^2$. For the second three lenses, according to relation (2), we use the same phase modulators used in the first imaging system with negative phases. The resulting diagrams are shown in Figure 13. As could be noticed from Figure 13 (b), the output pulse is very similar to the input pulse, so the input-output correlation is 0.9995 which is a very significant number. Still, a conventional imaging system with a single lens did not yield acceptable results at higher frequencies, as shown in Figure 12.

3- Conclusion

In this research, using the space-time duality principle, the temporal equivalent of the spatial double-Gaussian imaging system was presented. Then, with optimal design of this structure and considering the techniques for implementing time lenses and dispersive mediums, we reduced the third-order temporal aberration by two basic conditions obtained for reducing aberration in the double-Gaussian system. The simulation results showed that with increasing frequency, Double Gaussian imaging system can still take images with an input-output correlation above 0.99. while the output of the conventional imaging system with a single lens was distorted at higher frequencies.

4- References

- [6] B. H. Kolner, "Space-time duality and the theory of temporal imaging," *IEEE J. Quantum Electron.* 30, 1951-1936 (1994).
- [24] C. V. Bennett and B. H. Kolner, "Aberrations in temporal imaging," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 20-32, Jan. 2001, doi: 10.1109/3.892720.
- [44] Jan Hoogland, "Synthesis of The Double Gauss Lens," *Proc. SPIE 0399, Optical System Design, Analysis, and Production*, (26 October 1983); <https://doi.org/10.1117/12.935432>

کاهش ابیراهی زمانی با استفاده از دوگانی مکان-زمان در سیستم تصویربرداری متشکل از عدسی گوسی دوبل زمانی

فاطمه اکثیری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

زهرا کاوه‌وش

استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

ابیراهی زمانی یکی از چالش‌های موجود در فرایند شکل‌دهی پالس بر اساس سیستم‌های تصویربرداری زمانی است. تصویربرداری زمانی مبتنی بر تقارن ریاضی بین دو حوزه نور مکانی و زمانی است که از تشابه معادله دیفرانسیل حاکم بر پراش یک پرتوی پیرامحور و پاشندگی یک پالس با باند باریک نشأت می‌گیرد. در این پژوهش، تلاش کرده‌ایم تا با بهره‌گیری از اصل دوگانی مکان-زمان و استفاده از دوگان حوزه زمان عدسی مکانی و سیستم تصویربرداری مکانی به ارائه سیستم معادل عدسی گوسی دوبل مکانی در حوزه زمان جهت جبران ابیراهی زمانی بپردازیم. در این مقاله با الهام از سیستم‌های حوزه مکان که تاکنون در حوزه زمان معادل‌سازی شده‌اند، ساختاری برای عدسی گوسی دوبل زمانی با قابلیت ابیراهی کاهش‌یافته ارائه می‌دهیم. در این ساختار، تصویر خروجی نهایی در مقایسه با سیستم تصویربرداری با یک عدسی زمانی ساده، از نظر کیفیت و ابیراهی به میزان ۴۰٪ بر اساس معیار همبستگی بهبود یافته است.

کلمات کلیدی

پردازش حوزه زمان سیگنال‌های نوری، دوگانی پاشندگی و پراش نور، تصویربرداری حوزه زمان، عدسی گوسی دوبل زمانی، ابیراهی.

نام نویسنده مسئول: دکتر زهرا کاوه‌وش

ایمیل نویسنده مسئول: kavehvash@sharif.edu

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶

۱- مقدمه

در چندین دهه گذشته، با توجه به افزایش روزافزون نیاز به نرخ انتقال داده بالا و پیچیدگی شبکه‌ها، محققان به بررسی و تحقیق در مورد چگونگی استفاده از نور جهت پردازش و انتقال سریع‌تر اطلاعات پرداخته‌اند. پتانسیلی که نور برای دستیابی به پهنای باند بالا و مجتمع سازی با سیستم‌های ارتباطی نوری سریع دارد، منجر به ارائه روش‌های تماماً نوری^۱ در علوم و تکنولوژی مربوط به علم نوری گردیده است. هدف از این کار شکل‌دهی، مدولاسیون و اعمال هرگونه عملگر ریاضی بر روی سیگنال موردنظر و درعین حال حفظ سرعت بالای سیگنال است [۱]. دوگانی زیبایی بین معادلات دیفرانسیل حاکم بر پراش^۲ یک پرتوی پیرامحور و پاشندگی^۳ یک پالس با باند باریک وجود دارد که امکان بهره‌برداری از روش‌های حوزه مکان را در حوزه زمان می‌سازد [۲-۵]. این دوگانی که به آن اصل دوگانی مکان-زمان^۴ می‌گویند، منجر به ارائه رویکردهای متنوعی در پردازش سیگنال نوری حوزه زمان با سرعت بالا، توسعه سیستم‌های تصویربرداری زمانی [۶] و توصیف اطلاعات شده‌است. بزرگ‌نمایی زمانی برای نمونه‌برداری نوری و شناسایی پالس فوق‌سریع [۷]، جبران نقص خطی و غیرخطی در پیوندهای مخابراتی فیبر نوری [۹، ۸] همگام‌سازی نوری [۱۰]، فشرده‌سازی خطی [۱۱]، نگاشت زمان به بسامد (T-to-F)^۵ برای تبدیل OTDM به WDM^۶ [۱۲]، نمونه‌ای از کاربردهای اصل دوگانی است.

تصویربرداری زمانی نوری، روشی برای کنترل و تغییر شکل موج‌های زمانی است که با استفاده از اصل دوگانی فضا-زمان معادل‌سازی شده‌است. نقشی که سیستم‌های تصویربرداری زمانی در فناوری‌های نوری امروزی ایفا می‌کنند شامل تصویربرداری و ضبط سیگنال‌های کوتاه در زمان، بزرگ‌نمایی یا فشرده‌سازی و رسم طیف نوری آن‌ها در حوزه زمان است. همچنین به علت کاربردهای بالقوه زیادی که تصویربرداری زمانی در حوزه نور کوانتومی و پردازش اطلاعات کوانتومی دارد، منجر به ایجاد شاخه جدید تصویربرداری زمانی کوانتومی شده‌است [۱۳].

تحقیقات بسیار زیادی در این حوزه انجام شده‌است که از جمله آن، کاربردهایی مانند میکروسکوپ زمانی و ساعت زمانی [۱۴، ۱۵] است. پالس‌های ساعت نوری قبلاً در حوزه مکان با استفاده از فناوری‌های مختلف از جمله فناوری CMOS ارائه شده است [۱۶]. از کارهای دیگر انجام‌شده در این حوزه، ارائه معادل زمانی تزویج‌گرهای پراش [۱۷] است که در حوزه مکان کاربردهای مختلفی دارد به‌عنوان مثال در موج‌بر بلور فوتونی نور آهسته [۱۸] یا کوچک‌سازی و افزایش پهنای باند تفکیک‌کننده قطبش ماخ - زندر با استفاده از تزویج‌گر چندمد غیریکنواخت [۱۹]. از دیگر معادل‌های دیگر ارائه‌شده ورقه منطقه‌ای زمانی [۲۰]، پیاده‌سازی دو شکاف یانگ، دو منشور فرنل و Billet bilens در حوزه زمان [۲۱]، پیاده‌سازی عدسی زمانی عدس‌گون با استفاده از دوگانی مکان-زمان [۲۲] را که امکان نمونه‌برداری و بزرگ‌نمایی همزمان سیگنال نوری دلخواه را فراهم می‌کند، می‌توان نام برد.

مشابه سیستم تصویربرداری مکانی، آرایش یک سیستم تصویربرداری زمانی متشکل از قرارگیری پشت سرهم پاشندگی ورودی، مدولاسیون عدسی زمانی

و پاشندگی خروجی، در تعادل مناسب است. عنصر کلیدی برای اجرای این قابلیت‌ها، معادل حوزه زمانی یک عدسی مکانی است که اصطلاحاً عدسی زمانی نامیده می‌شود. همان‌طور که یک عدسی مکانی مدولاسیون فاز درجه دوم در بعد عرضی ایجاد می‌کند، عدسی زمانی مدولاسیون فاز زمانی درجه دوم را به شکل موج ورودی اعمال می‌کند. عدسی زمانی قابلیت تصویربرداری از سیگنال‌های فوق‌سریع در مقیاس‌های زمانی زیر قله‌ثوانیه تا مقیاس زمانی نانو ثانیه را دارد و اندازه‌گیری سیگنال‌های فوق‌سریع را که قبلاً با آشکارسازهای الکترونیکی محدود اندازه‌گیری نمی‌شدند، امکان‌پذیر می‌کند [۲۳]. استفاده از یک المان الکترونیکی (به‌عنوان مثال، مدولاتور فاز) که با یک سیگنال ولتاژ سینوسی کنترل می‌شود، یک راه ساده برای ایجاد عدسی زمانی است که می‌تواند بزرگ‌نمایی زمانی تا ۱۰۰ برابر ارائه دهد. نکته مثبت عدسی‌های زمانی جایی مشخص می‌شود که این تصویربرداری را با حفظ شدت، فاز و حالت قطبش انجام می‌دهند.

یکی از مشکلات حوزه تصویربرداری زمانی، مشابه دوگان مکانی آن، وجود انواع ابیراهی‌ها در سیستم است که منجر به کاهش کیفیت خروجی می‌شود [۲۴]. در پژوهش قبلی انجام شده [۲۴] به کاهش ابیراهی در حوزه زمان پرداخته شده‌است که شرطی برای کاهش ابیراهی توسط یک سیستم تصویربرداری ایده‌آل با یک عدسی ساده به‌دست آمده است. همچنین در پژوهش [۲۵] شرطی برای حذف ابیراهی یک سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده و محیط‌های پاشنده غیرایده‌آل ارائه شده است. اگر محیط‌ها را ایده‌آل در نظر بگیریم، این شرط بیان می‌کند که برای جبران ابیراهی، کافی است ضریب عبارت مرتبه سوم بسیار کوچک‌تر از یک باشد. همان‌طور که در ادامه نشان خواهیم داد، این شرط در همه بسامدها برقرار نیست. لذا بهتر است به ساختار مناسب‌تری جهت کاهش ابیراهی زمانی دست پیدا کنیم که در همه بسامدها کارایی بالایی داشته باشد.

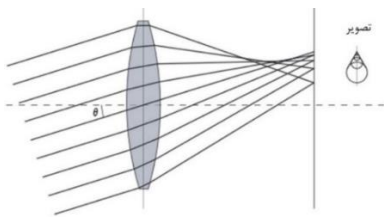
در حوزه مکان راهکارهای متنوعی جهت کاهش ابیراهی مکانی ارائه شده است [۲۶-۴۰]. در این میان معروف‌ترین کارها شامل طراحی عدسی پتروال [۲۶، ۲۷]، عدسی‌های متقارن [۲۸]، عدسی telephoto [۲۹، ۳۰، ۳۱]، عدسی telephoto معکوس [۲۸]، عدسی سه‌گانه کوک [۲۸، ۳۲، ۴۰] و عدسی گوسی دوبل [۳۴، ۳۵، ۳۷] هستند. در میان این ساختارها عدسی گوسی دوبل ساختار کامل‌تری دارد و لذا توانسته است به‌طور مؤثرتری به جبران ابیراهی بپردازد و در نتیجه کاربرد بیشتری در حوزه مکان داشته است. بنابراین در این مقاله، عدسی گوسی دوبل جهت کاهش ابیراهی زمانی در حوزه زمان معادل‌سازی شده‌است. سپس با طراحی بهینه سیستم تصویربرداری زمانی متشکل از دو محیط پاشنده و یک عدسی گوسی دوبل سعی شده‌است که ابیراهی به میزان قابل توجه در مقایسه با تک عدسی معمولی کاهش یابد.

لذا بخش‌های دیگر مقاله به این صورت است: ساختار عدسی گوسی دوبل و ابیراهی در حوزه مکان را در بخش دوم بیان می‌کنیم و انواع آن را بررسی می‌کنیم. در بخش سوم، ابتدا ابیراهی زمانی را بررسی می‌کنیم و سپس ساختار

^۵ Frequency to time mapping^۶ Optical time domain multiplexing^۷ wavelength division multiplexing^۱ All-optical^۲ Diffraction^۳ Dispersion^۴ Space-time duality

$$c_n^m = \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{2(n+1)(1+\delta_{m0})} \times \int_0^1 \int_0^{2\pi} (r, \theta) R_n^m(r) \cos m\theta r dr d\theta \quad (4)$$

در بین جملات بسط رابطه Z_n^m ، دو جمله $\sqrt{22}(2r^2 - 2r) \sin \theta$ و $\sqrt{22}(2r^2 - 2r) \cos \theta$ به ترتیب بیانگر ابیراهی کما در راستای y و x است هستند. نام این ابیراهی از کلمه «Comet» به معنی ستاره‌ی دنباله‌دار گرفته شده است. به این دلیل که اگر عکسی از آسمان شب تهیه کنید، خواهید دید که تصویر ستاره‌هایی که در لبه‌های تصویر قرار دارند، به شکل ستاره‌های دنباله‌دار درآمده است. این ابیراهی، زمانی به وجود می‌آید که شیء روی محور نوری سیستم نباشد. دلیل ایجاد ابیراهی کما را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید. همان‌طور که دیده می‌شود، در این شکل پرتوها به‌صورت زاویه‌دار به عدسی تابیده‌اند و عدسی توانایی متمرکز کردن این پرتوهای نوری را در یک نقطه ندارد و به همین دلیل تصویر خروجی شامل پخش‌شدگی می‌شود.

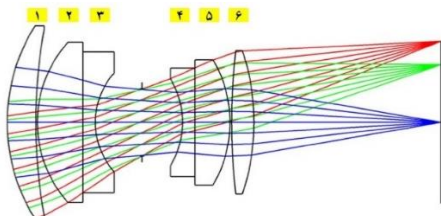


شکل ۱- ابیراهی کما

کما را می‌توان با روش‌های مختلفی کاهش داد. از جمله این روش‌ها، ایجاد تغییراتی روی انحنای سطوح عدسی‌ها، تغییر ضخامت و فواصل اجزای سیستم نوری و ضرایب شکست آن‌ها و همچنین استفاده از ترکیبی از عناصر نوری به‌طوری‌که در مجموع، خطای همدیگر را خنثی کنند. معروف‌ترین این ساختارها عدسی گوسی دوپل است که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

عدسی گوسی دوپل از سه راهکار اصلی کاهش ابیراهی شامل ایجاد عدسی خمیده، ایجاد فاصله و تفاوت شاخص به اصلاح مشخصه‌های ابیراهی می‌پردازد [۴۴]. مطابق شکل ۲، این عدسی در حوزه مکان، از ترکیب شش عدسی محدب و مقعر تشکیل شده است که عدسی شماره یک، عدسی هلالی (کوژ)، عدسی شماره دو و پنج کوژ - تخت، عدسی شماره سه و چهار تخت - کاو و عدسی شماره شش دو کوژ است.

با توجه به عملکرد خوبی که عدسی گوسی دوپل در جبران ابیراهی کما در حوزه مکان دارد، در این مقاله سعی کرده‌ایم این ساختار را در حوزه زمان جهت جبران ابیراهی کمای زمانی پیاده‌سازی کنیم. لذا در ادامه به معرفی ساختار این عدسی در حوزه زمان می‌پردازیم.



شکل ۲- ساختار عدسی گوسی دوپل مکانی

پیشنهادی عدسی گوسی دوپل زمانی به‌منظور جبران ابیراهی زمانی را ارائه می‌دهیم. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های مربوطه ارائه شده است و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری و کارهای پیشنهادی آینده را ارائه خواهیم کرد.

۲- مروری بر مفهوم ابیراهی و ساختار عدسی گوسی دوپل در حوزه‌ی مکان

هر انحرافی از تصویر ایده‌آل شیء در سیستم‌های تصویربرداری، ابیراهی^۸ نامیده می‌شود که برای نور تک‌رنگ شامل ابیراهی کروی^۹، ابیراهی کما^{۱۰}، انحنای میدان^{۱۱}، اعوجاج^{۱۲} و آستیگماتیسم^{۱۳} است و برای نور مرکب علاوه بر ابیراهی‌های مذکور، ابیراهی رنگی^{۱۴} نیز وجود دارد.

ابیراهی که یکی از ویژگی‌های سیستم‌های نوری است، باعث می‌شود تصویر تشکیل شده تاری یا مخدوش شود که این اتفاق به دلیل پخش شدن نور در ناحیه‌ای از فضا به جای تمرکز بر یک نقطه رخ می‌دهد.

وجود ابیراهی در یک سیستم تصویربرداری نوری، اثرات منفی زیادی به دنبال دارد که این اثرات به دودسته تقسیم می‌شوند: دسته‌ی اول کاهش کیفیت تصویر خروجی است و دسته‌ی دوم کشیدگی و جمع شدگی حاصل از بزرگ‌نمایی محلی در نواحی مختلف تصویر است که باعث تغییر ابعاد و جابه‌جایی تصویر شیء می‌شود.

در اینجا از چندجمله‌ای زرنیک^{۱۵} برای مدل‌سازی ابیراهی استفاده می‌کنیم. همان‌طور که می‌دانید به مکان هندسی نقاطی که فاز در تمام آن‌ها یکسان باشند جبهه‌ی موج گفته می‌شود. این مجموعه نقاط، رویه‌ی هندسی تشکیل می‌دهند که می‌توان آن را برحسب چندجمله‌ای‌های زرنیک بسط داد و به‌افتخار فیزیک‌دان حوزه‌ی نوری، فریتز زرنیک، برنده‌ی جایزه‌ی نوبل فیزیک در سال ۱۹۵۳ به این نام شناخته شده است [۴۱، ۴۲]. تابع ابیراهی یک سیستم نوری را برای موج تک‌رنگ، با استفاده از تعداد محدود جملات چندجمله‌ای می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۴۳]:

$$W(r, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n c_n^m Z_n^m(r, \theta) + \epsilon(r, \theta) \quad (1)$$

که $\epsilon(r, \theta)$ خطای مدل‌سازی است و c_n^m ضرایب توسعه‌ی زرنیک و Z_n^m چندجمله‌ای زرنیک است. پرتوهای نور با ورود به عدسی، به دلیل اختلاف در قطر و چگالی نواحی مختلف عدسی تأخیرهای متفاوتی را تجربه می‌کنند. به همین دلیل به تابع ابیراهی موج تک‌رنگ با تأخیرهای زمانی متفاوت، تابع ابیراهی فاز نیز می‌گویند. فرم دایروی تابع ابیراهی فاز به‌صورت زیر است:

$$W(r, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n c_n^m \left[\sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}} \right] R_n^m(r) \cos m\theta \quad (2)$$

در این رابطه، δ_{m0} تابع دلتای کرونکر^{۱۶} است و m و n اعداد صحیح مثبت با شرط $n - m \geq 0$ هستند و برای $R_n^m(r)$ داریم:

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)!} r^{n-2s} \quad (3)$$

که یک تابع چندجمله‌ای با درجه‌ی n است برای ضرایب توسعه زرنیک خواهیم داشت:

^{۱۳} Astigmatism

^{۱۴} Chromatic aberration

^{۱۵} Zernike polynomials

^{۱۶} Kronecker delta

^۸ Aberration

^۹ Spherical aberration (SA)

^{۱۰} Coma

^{۱۱} Curvature of field

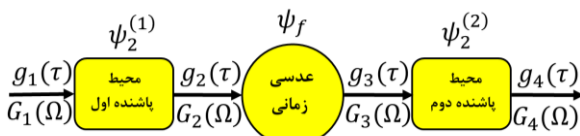
^{۱۲} Distortion

عبارت‌های مرتبه بالاتر در رابطه (۱۱)، باعث ایجاد ابیراهی‌های زمانی می‌شوند. به‌طور دقیق‌تر، عبارت فازی مرتبه سوم، باعث جابه‌جایی بسامدی و تأخیر زمانی پالس و در نتیجه یک‌طرفه شدن پالس خروجی می‌شود و یک دنباله تار مشابه ابیراهی کما در سیستم‌های مکانی ایجاد می‌کند (ابیراهی زمانی کما). بسامد پرتو زمانی خروجی از عدسی زمانی غیر ایده‌آل (همراه با ابیراهی) به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

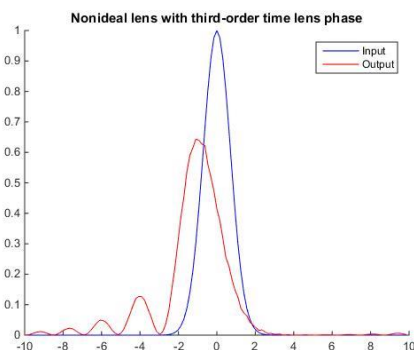
$$\Omega_{out} = \Omega_{in} + \tau \Phi'' + \left[\tau^2 \frac{\Phi'''}{2!} + \tau^3 \frac{\Phi''''}{3!} + \dots \right] \quad (۱۳)$$

پس از آشنایی با ابیراهی زمانی، به ارائه ساختار پیشنهادی جهت جبران این ابیراهی می‌پردازیم. در ابتدا یک سیستم تصویربرداری زمانی متشکل از یک عدسی ساده را که در شکل ۳ نشان داده شده است در نظر می‌گیریم.

از رابطه ۸، عبارت فازی مرتبه سوم را به فاز سهموی عدسی اضافه می‌کنیم و از سایر عبارت‌ها صرف‌نظر می‌کنیم تا شاهد ابیراهی مرتبه سوم در خروجی عدسی زمانی باشیم. خروجی این شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید پالس خروجی قرمز رنگ، به یک سمت کشیده شده است که مشابه پخش‌شدگی و تاری تصویر به یک سمت توسط ابیراهی کما در حوزه مکان است.



شکل ۳- ساختار یک سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده



شکل ۴- ابیراهی کما در سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده غیرایده‌آل (پالس آبی رنگ: ورودی، پالس قرمز رنگ: خروجی)

با تغییر ضرایب فاز مرتبه سوم عدسی زمانی مذکور، شدت ابیراهی کما در شکل پالس خروجی تغییر می‌کند. هرچه ضریب عبارت مرتبه سوم در تابع فازی عدسی زمانی بیشتر شود عدسی زمانی از تصویر ایده‌آل به سمت چپ تصویر منحرف می‌شود و تصویر در ضرایب حدود یک، اعوجاج زیادی دارد. شکل ۵، تأثیر این ضرایب را به‌طور دقیق‌تری به نمایش می‌گذارد.

حال برای اصلاح ابیراهی زمانی حاصل از جملات مرتبه بالاتر، ساختار زمانی معادل با عدسی گوسی دوپل مکانی را ارائه می‌دهیم. شمای کلی این ساختار به‌صورت شکل ۶ است. حال برای سادگی در مدل‌سازی عدسی مکانی گوسی دوپل در حوزه زمان، سیستم تصویربرداری کلی را به دو سیستم تصویربرداری تقسیم می‌کنیم و محاسبات هر قسمت را جدا انجام می‌دهیم. شمای کلی این سیستم را در شکل ۷ ملاحظه می‌کنید.

۳- ساختار پیشنهادی عدسی گوسی دوپل زمانی به‌منظور جبران ابیراهی

در این بخش، ابتدا با توسل به مفهوم پرتو زمانی به بررسی ابیراهی زمانی و روابط حاکم بر آن در حوزه زمان می‌پردازیم و در ادامه، ساختار پیشنهادی جهت جبران‌سازی ابیراهی زمانی بر اساس ساختار گوسی دوپل زمانی را ارائه می‌کنیم. در انتها نیز روش پیاده‌سازی عدسی‌های زمانی مورد استفاده را مورد بررسی قرار خواهیم داد. یکی از عناصر ضروری در پیاده‌سازی سیستم‌های پردازش نوری، عدسی است که در حوزه مکان یک تغییر فاز سهموی در جهات عرضی x و y ایجاد می‌کند. اگر دامنه مختلط موج ورودی به عدسی را $U_{in}(x, y)$ در نظر بگیریم، پس از عبور از عدسی به‌صورت

$$U_{out}(x, y) = U_{in}(x, y) P(x, y) \times \exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] \quad (۵)$$

مدوله می‌شود که در این رابطه $P(x, y)$ تابع مردمک عدسی مکانی، f فاصله کانونی و k عدد موج است. طبق اصل دوگانگی مکان-زمان، انتشار از طریق عدسی زمانی را به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌کنیم:

$$A_{out}(\tau) = A_{in}(\tau) P(\tau) H(\tau) \quad (۶)$$

در این رابطه $H(\tau)$ تابع مدولاسیون فاز عدسی زمانی نام دارد که معادل دوگان حوزه مکان آن است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(\tau) = \exp(i\Phi(\tau)) = \exp \left(\frac{-i\tau^2}{2\psi_f} \right) \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، ψ_f پاشندگی پاشندگی تأخیر گروه کانونی عدسی است که رفتاری مشابه فاصله کانونی در عدسی مکانی دارد. همچنین $P(\tau)$ به‌صورت تابع مردمک عدسی زمانی تعریف می‌شود که به‌منظور سادگی در اینجا از آن صرف‌نظر خواهد شد.

اگر بسط تیلور تابع فاز عدسی یعنی $\Phi(\tau)$ را حول $\tau=0$ بنویسیم، خواهیم داشت:

$$\Phi(\tau) = \Phi_0 + \tau \Phi' + \tau^2 \frac{\Phi''}{2!} + \tau^3 \frac{\Phi'''}{3!} + \dots + \tau^n \frac{\Phi^{(n)}}{n!} \quad (۸)$$

که Φ_0 یک عبارت ثابت است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. بسامد لحظه‌ای اعمال‌شده توسط عدسی با مشتق‌گیری از تابع فاز بیان شده در رابطه (۸) به دست‌به‌دست می‌آید:

$$\omega_i(\tau) = d\Phi(\tau)/d\tau \quad (۹)$$

با حذف عبارت ثابت $\Phi'(0) = \omega_i(0)$ ، که یک آفست بسامدی از حامل ورودی است و نقش مهمی در تشکیل تصویر ندارد، جابه‌جایی بسامدی لحظه‌ای اعمال‌شده توسط عدسی را به‌صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$\Omega_L(\tau) \equiv \frac{d\Phi(\tau)}{d\tau} - \left[\frac{d\Phi(\tau)}{d\tau} \right]_{\tau=0} = \tau \Phi'' \left(1 + \frac{\tau \Phi'''}{2! \Phi''} + \dots + \frac{\tau^{n-2}}{(n-1)!} \frac{\Phi^{(n)}}{\Phi''} \right) \quad (۱۰)$$

پرتو زمانی که به‌عنوان دوگان پرتو نور مکانی شناخته می‌شود با بسامد Ω_{in} در زمان τ_{in} وارد عدسی زمانی می‌شود و به بسامد $\Omega_{out} = \Omega_{in} + \Omega_L(\tau)$ منتقل می‌شود. در این حالت برای تأخیر گروه کانونی عدسی زمانی خواهیم داشت:

$$\frac{-1}{\phi_f(\tau)} = \frac{d\Omega_L(\tau)}{d\tau} = \Phi'' \left(1 + \tau \frac{\Phi'''}{\Phi''} + \frac{\tau^2 \Phi''''}{2! \Phi''} + \dots \right) \quad (۱۱)$$

که با صفر قرار دادن زمان τ در رابطه (۱۱)، تأخیر گروه کانونی مرکزی عدسی نیز به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\phi_f'(0) = -1/\Phi'' \quad (۱۲)$$

$$G_4(\Omega) = [G_1(\Omega)H^{(1)}(\Omega) \otimes T_1(\Omega)]H^{(2)}(\Omega) \quad (19)$$

خواهد بود. در انتهای سیستم تصویربرداری اول، با گرفتن تبدیل فوریه معکوس از خروجی خواهیم داشت:

$$g_4(\tau) = \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}^{-1}\{[G_1(\Omega)H^{(1)}(\Omega) \otimes T_1(\Omega)]H^{(2)}(\Omega)\} \quad (20)$$

سپس پالس ورودی به سیستم تصویربرداری دوم وارد خواهد شد و در نهایت خروجی کلی سیستم $g_7(\tau)$ از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$g_7(\tau) = \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}^{-1}\{[G_4(\Omega)H^{(3)}(\Omega) \otimes T_2(\Omega)]H^{(4)}(\Omega)\} \quad (21)$$

که در این رابطه $H^{(3)}(\Omega)$ ، $T_2(\Omega)$ به ترتیب تابع تبدیل محیط پاشنده اول و تابع تبدیل معادل عدسی‌های زمانی شماره چهار، پنج، شش است. همچنین $H^{(4)}(\Omega)$ تابع تبدیل محیط پاشنده چهارم خواهد بود. نکته اساسی در این مدل‌سازی، انتخاب بهینه مقدار تأخیر گروه کانونی معادل دسته عدسی اول (عدسی شماره یک، دو و سه) و دوم (عدسی شماره چهار، پنج و شش) خواهد بود. البته مقدار تأخیر گروه محیط پاشنده اول تا چهارم نیز باید در بهترین مقدار خود قرار گیرد تا در نهایت تصویری با کمترین ابیراهی داشته باشیم.

جدول ۱- روابط بین ورودی و خروجی محیط پاشنده و عدسی زمانی

اجزای سیستم	معادلات
محیط پاشنده	$\tau_{out} = \tau_{in} + \Omega\phi'' + \Omega^2 \frac{\phi'''}{2!} + \Omega^3 \frac{\phi^{(4)}}{3!} + \dots$ $\Omega_{out} = \Omega_{in}$
خروجی عدسی زمانی	$\tau_{out} = \tau_{in}$ $\Omega_{out} = \Omega_{in} + \tau\phi'' + \tau^2 \frac{\phi'''}{2!} + \tau^3 \frac{\phi^{(4)}}{3!} + \dots$

لازم به ذکر است که در این بهینه‌سازی‌ها، از شرط تشکیل تصویر در سیستم زمانی نیز نباید غافل شویم:

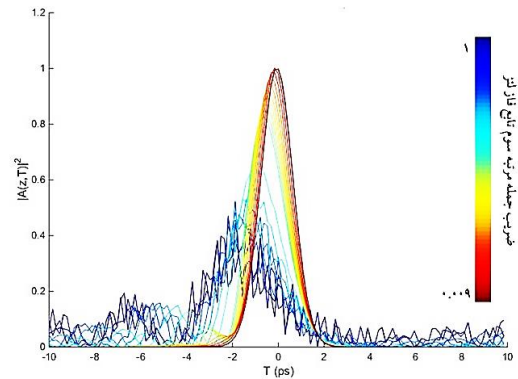
$$\frac{1}{\psi_2^{(1)}} + \frac{1}{\psi_2^{(2)}} - \frac{1}{\psi_{FT1}} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{1}{\psi_2^{(3)}} + \frac{1}{\psi_2^{(4)}} - \frac{1}{\psi_{FT2}} = 0 \quad (23)$$

در این رابطه $\psi_2^{(1)}$ ، $\psi_2^{(2)}$ ، $\psi_2^{(3)}$ ، $\psi_2^{(4)}$ به ترتیب پاشندگی گروه محیط پاشنده یک تا چهار خواهد بود. در ادامه روابط جبران ابیراهی بر اساس ساختار سیستم گوسی دوبل تشریح خواهند شد.

روش انتشار پرتو زمانی در سیستم‌های تصویربرداری زمانی، یک روش سودمند برای بررسی و جبران ابیراهی ناشی از جملات مرتبه بالا، است. با استفاده از این روش، با ایجاد رابطه بین زمان ورودی τ_{in} و زمان خروجی τ_{out} و همچنین بسامد ورودی Ω_{in} و بسامد خروجی Ω_{out} می‌توان پاشندگی محیط‌های پاشنده و عدسی‌های زمانی را توصیف کرد.

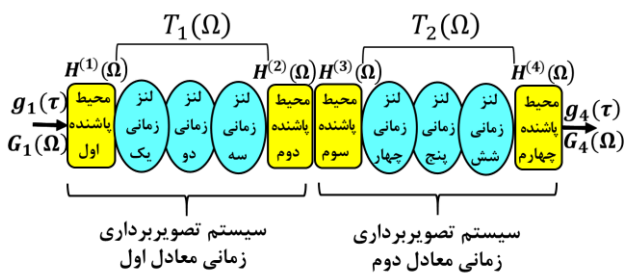
در جدول ۱، روابط بین بسامد ورودی و خروجی و زمان ورودی و خروجی برای عدسی زمانی و محیط پاشنده، آورده شده است. $\phi^{(n)} = \beta^{(n)}\xi$ و $\Phi^{(n)}$ به ترتیب فاز طیفی Ω ناشی از پاشندگی و فاز زمانی Ω ناشی از عدسی زمانی هستند. همچنین ξ ، τ ، Ω به ترتیب بسامد بهنجار شده، زمان بهنجار شده، طول بهنجار شده و ضریب پراکندگی مرتبه n هستند.



شکل ۵- تأثیر ضریب عبارت مرتبه سوم تابع فازی در شدت ابیراهی کما در سیستم تصویربرداری ساده زمانی با یک عدسی غیرایده‌آل (پالس آبی رنگ: ضریب یک، پالس قرمز رنگ: ضریب ۰،۰۰۹)



شکل ۶- ساختار کلی سیستم تصویربرداری زمانی با عدسی گوسی دوبل زمانی



شکل ۷- ساختار سیستم تصویربرداری زمانی متشکل از عدسی گوسی دوبل زمانی شامل چهار محیط پاشنده و شش عدسی زمانی

ابتدا سیستم تصویربرداری اول را مدل‌سازی می‌کنیم. پالس گوسی $g_1(\tau)$ با تبدیل فوریه $G_1(\Omega)$ به عنوان ورودی سیستم در نظر می‌گیریم. با بهره‌گیری از نور فوریه، پس از عبور از محیط پاشنده اول خواهیم داشت:

$$G_2(\Omega) = G_1(\Omega)H^{(1)}(\Omega) \quad (14)$$

که در این رابطه $G_2(\Omega)$ تبدیل فوریه پالس خروجی از محیط پاشنده اول است و $H^{(1)}(\Omega)$ تابع تبدیل محیط پاشنده اول است و رابطه آن به صورت زیر است:

$$H^{(1)}(\Omega) = \exp\left[i\frac{\psi_2^{(1)}\Omega^2}{2}\right] \quad (15)$$

برای سادگی محاسبات، سه عدسی شماره یک، دو و سه را با یک عدسی زمانی با تابع تبدیل $T_1(\Omega)$ معادل می‌کنیم و در ادامه تأثیر سه عدسی را در نظر می‌گیریم.

برای $T_1(\Omega)$ خواهیم داشت:

$$T_1(\Omega) = \exp\left[-i\frac{\psi_{FT1}\Omega^2}{2}\right] \quad (16)$$

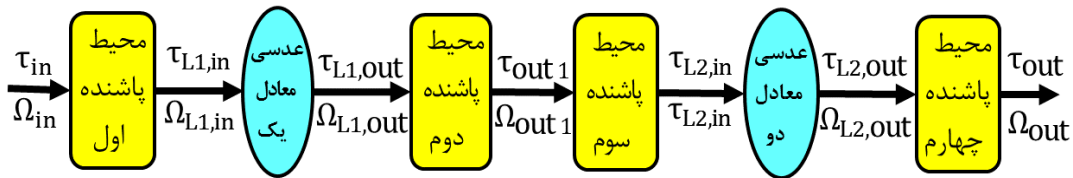
در این حالت پس از عبور از دسته عدسی اول خواهیم داشت:

$$G_3(\Omega) = G_1(\Omega)H^{(1)}(\Omega) \otimes T_1(\Omega) \quad (17)$$

سپس به محیط پاشنده دوم خواهیم رسید که تابع تبدیل آن به صورت

$$H^{(2)}(\Omega) = \exp\left[i\frac{\psi_2^{(2)}\Omega^2}{2}\right] \quad (18)$$

است که پالس خروجی از آن به صورت



شکل ۸- انتشار پرتو زمانی در سیستم تصویربرداری متشکل از لنز دابل گوسی زمانی

$$\tau_{L2, out} = \tau_{L2, in} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \Omega_{L2, out} &= \Omega_{L2, in} + \tau_{L2, in} \Phi_2'' + \tau_{L2, in}^2 \frac{\Phi_2'''}{2!} \\ &= -\frac{\tau_{in}}{\phi_1''} + (1 + \phi_1'' \Phi_1') \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\Phi_1'''}{2!} \\ &\quad + \left(-\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} - \frac{\tau_{in} \phi_3''}{\phi_1''} + \right. \\ &\quad \left. (1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_3'' \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \right) \Phi_2'' \\ &\quad + \left(-\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} - \frac{\tau_{in} \phi_3''}{\phi_1''} + \right. \\ &\quad \left. (1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_3'' \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \right)^2 \frac{\Phi_2'''}{2!} \quad (34) \end{aligned}$$

در نهایت برای خروجی نهایی سیستم، روابط زیر به دست می آیند:

$$\Omega_{out} = \Omega_{L2, out} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \tau_{out} &= \tau_{L2, out} + \Omega_{L2, out} \phi_4'' \\ &= -\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} \\ &\quad - \frac{\tau_{in} \phi_3''}{\phi_1''} + (1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_3'' \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \\ &\quad - \frac{\phi_4'' \tau_{in}}{\phi_1''} + (1 + \phi_1'' \Phi_1') \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_4'' \Phi_1'''}{2!} \\ &\quad + \left(-\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} - \frac{\tau_{in} \phi_3''}{\phi_1''} + \right. \\ &\quad \left. (1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_3'' \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \right) \Phi_4'' \\ &\quad + \left(-\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} - \frac{\tau_{in} \phi_3''}{\phi_1''} + \right. \\ &\quad \left. (1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_3'' \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \right)^2 \frac{\phi_4'' \Phi_2'''}{2!} \quad (36) \end{aligned}$$

برای این سیستم گوسی دوبل، شرایط تصویربرداری زمانی و بزرگنمایی، برای

دو سیستم تصویربرداری به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{\phi_1''} + \frac{1}{\phi_2''} - \frac{1}{\phi_{f1}''} = 0 \quad (37)$$

$$\frac{1}{\phi_3''} + \frac{1}{\phi_4''} - \frac{1}{\phi_{f2}''} = 0 \quad (38)$$

$$M_1 = -\frac{\phi_2''}{\phi_1''} \quad (39)$$

$$M_2 = -\frac{\phi_4''}{\phi_3''} \quad (40)$$

که $\phi_{f1}'' = -1/\Phi_1''$ و $\phi_{f2}'' = -1/\Phi_2''$ ، پاشندگی تأخیر گروه کانونی معادل دسته عدسی‌های اول و دوم خواهند بود. با ساده‌سازی عبارت حاصل برای τ_{out} و صرف‌نظر از جملات شامل $\phi_1''' \Phi_1'''$ یا $\phi_2''' \Phi_2'''$ (جملات مرتبه سه بسیار کوچک‌تر از جملات مرتبه دو هستند)، به عبارت ساده‌تری برای τ_{out} دست پیدا می‌کنیم و از آنجاکه ورودی ما، سیگنال فوق‌کوتاه است برای حذف ابیراهی‌های مرتبه سوم، کافی است ضریب عبارت $\Delta \Omega^2$ را برابر با صفر قرار دهیم.

$$\begin{aligned} \Delta \Omega^2 \left[\frac{\phi_1''^2 \phi_2'' \Phi_1'''}{2!} + \frac{\phi_1''^2 \phi_3'' \Phi_1'''}{2!} + \frac{\phi_4'' \phi_1''^2 \Phi_1'''}{2!} + \frac{\phi_1''^2 \phi_2'' \phi_3'' \Phi_1'''}{2!} + \right. \\ \left. \frac{\phi_1''^2 \phi_2'' \phi_4'' \Phi_1'''}{2!} + \frac{(1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_4'' \phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \right] = 0 \quad (41) \end{aligned}$$

پس از ساده‌سازی‌های عبارات بالا، دو شرط نهایی جهت جبران‌سازی ابیراهی زمانی سیستم گوسی دوبل به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\phi_2'' = -\phi_3'' \quad (42)$$

یک پرتو زمانی را در نظر بگیرید که از طریق یک سیستم تصویربرداری منتشر می‌شود و دارای زمان ورود τ_{in} و بسامد ورودی Ω_{in} است. معمولاً سیگنال‌های ورودی در بسیاری از سیستم‌های تصویربرداری زمانی، بسیار کوتاه هستند [۶، ۲۴، ۴۵]. بنابراین تأثیر بسامد را بیشتر از زمان در نظر می‌گیریم. از این‌رو، سیگنال ورودی پیشنهادی به صورت زیر است [۲۴]:

$$\Omega_{in} = -\tau_{in} / \phi_1'' + \Delta \Omega \quad (24)$$

که در آن، $-\tau_{in} / \phi_1''$ بسامد پرتو زمانی ورودی به عدسی است و $\Delta \Omega$ آفست بسامدی می‌باشد

در شکل ۸، شمای کلی سیستم گوسی دوبل و انتشار پرتو زمانی در طول سیستم را مشاهده می‌کنید. در اینجا، محیط‌های پاشنده یک تا چهار را ایده‌آل در نظر گرفته و ابیراهی زمانی ایجادشده توسط عبارت فازی مرتبه سوم در عدسی‌های زمانی را مورد بررسی قرار می‌دهیم و سپس به جبران آن می‌پردازیم. با توجه به جدول ۱، بسامد و زمان خروج پرتو زمانی از محیط پاشنده اول از روابط (۲۵) و (۲۶) به دست می‌آیند:

$$\Omega_{L1, in} = \Omega_{in} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \tau_{L1, in} &= \tau_{in} + \Omega_{in} \phi_1'' = \tau_{in} + \left(-\frac{\tau_{in}}{\phi_1''} + \Delta \Omega \right) \phi_1'' \\ &= \Delta \Omega \phi_1'' \quad (26) \end{aligned}$$

بعد از انتشار پرتو زمانی از دسته عدسی اول، $\tau_{L1, out}$ و $\Omega_{L1, out}$ به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\tau_{L1, out} = \tau_{L1, in} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Omega_{L1, out} &= \Omega_{L1, in} + \tau_{L1, in} \Phi_1'' + \tau_{L1, in}^2 \frac{\Phi_1'''}{2!} \\ &= -\frac{\tau_{in}}{\phi_1''} + \Delta \Omega + \Delta \Omega \phi_1'' \Phi_1'' + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\Phi_1'''}{2!} \\ &= -\frac{\tau_{in}}{\phi_1''} + (1 + \phi_1'' \Phi_1') \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\Phi_1'''}{2!} \quad (28) \end{aligned}$$

سپس خروجی حاصل از محیط پاشنده دوم یا همان سیستم تصویربرداری اول، به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\Omega_{out, 1} = \Omega_{L1, out} \quad (29)$$

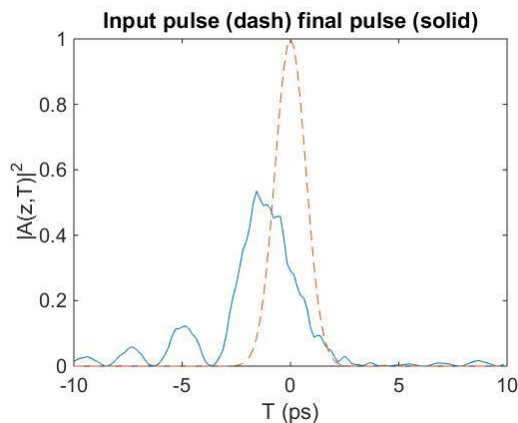
$$\begin{aligned} \tau_{out, 1} &= \tau_{L1, out} + \Omega_{L1, out} \phi_2'' \\ &= \Delta \Omega \phi_1'' + \left(-\frac{\tau_{in}}{\phi_1''} + (1 + \phi_1'' \Phi_1') \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\Phi_1'''}{2!} \right) \phi_2'' \\ &= -\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} \quad (30) \end{aligned}$$

در ادامه پرتو زمانی، وارد سیستم تصویربرداری دوم و محیط پاشنده سوم خواهد شد که روابط آن به صورت زیر است:

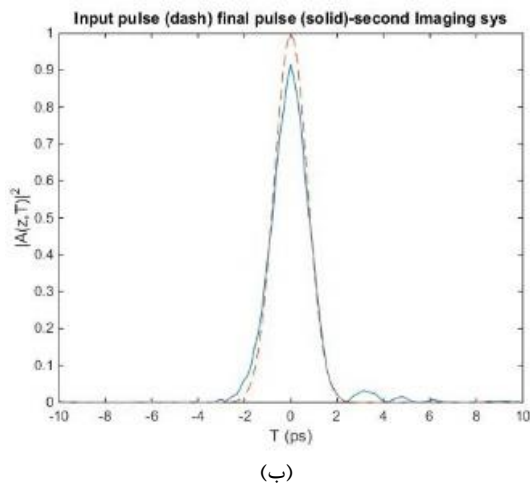
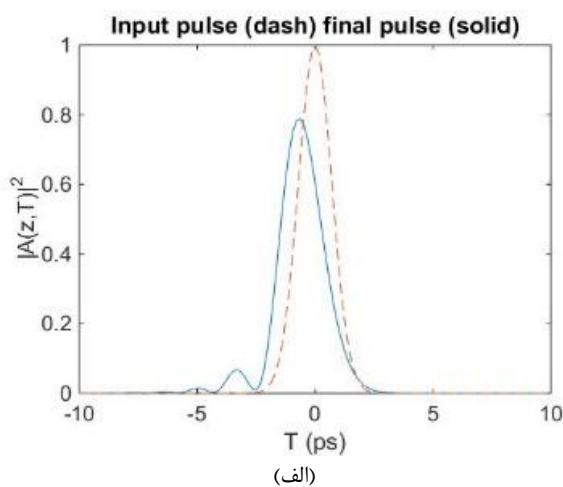
$$\Omega_{L2, in} = \Omega_{out, 1} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \tau_{L2, in} &= \tau_{out, 1} + \Omega_{out, 1} \phi_3'' \\ &= -\frac{\tau_{in} \phi_2''}{\phi_1''} + \Delta \Omega (\phi_1'' + \phi_2'' + \phi_1'' \phi_2'' \Phi_1') + \Delta \Omega^2 \phi_1''^2 \phi_2'' \frac{\Phi_1'''}{2!} \\ &\quad - \frac{\tau_{in} \phi_3''}{\phi_1''} + (1 + \phi_1'' \Phi_1') \phi_3'' \Delta \Omega + (\Delta \Omega \phi_1'')^2 \frac{\phi_3'' \Phi_1'''}{2!} \quad (32) \end{aligned}$$

پس از آن پرتو زمانی وارد دسته عدسی دوم خواهد شد که برای خروجی آن خواهیم داشت:



شکل ۹- خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده در بسامد محدوده ۴ گیگاهرتز (پالس خط چین قرمز رنگ: پالس ورودی، پالس آبی رنگ: خروجی)



شکل ۱۰- خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری متشکل از عدسی گوسی دوبل زمانی با استفاده از مدولاتورهای فازی در محدوده ۴ گیگاهرتز (الف) خروجی از سیستم تصویربرداری اول (ب) خروجی نهایی (خط چین قرمز رنگ: پالس ورودی، پالس آبی رنگ: خروجی) برای پارامترهای عدسی زمانی، $|\phi_1''| = 50.22 \text{ ps}^2$ و $|\phi_1''''| = 0.51 \text{ ps}^{-3}$ به دست خواهد آمد. در این حالت طبق شرط تشکیل تصویر:

$$\frac{1}{\phi_2''} = \frac{1}{\phi_1''} - \frac{1}{\phi_1'''} \quad (۴۸)$$

$$\frac{\phi_1''^2 \phi_1''''}{2!} = -\frac{(1+\phi_1'' \phi_1''')^2 \phi_2''^2 \phi_2''''}{2!} \Rightarrow \phi_1''' = -\phi_2''' \quad (۴۳)$$

در نتیجه برای جبران ابیراهی زمانی مرتبه سوم در سیستم تصویربرداری گوسی دوبل، کافی است:

۱. پاشندگی تأخیر گروه محیط پاشنده دوم و سوم را قرینه هم قرار دهیم.

۲. پاشندگی تأخیر گروه کانونی مرتبه سوم معادل دسته عدسی اول و دوم را قرینه هم قرار دهیم.

حال قبل از ارائه نتایج شبیه سازی سیستم گوسی دوبل، شرایط پیاده سازی عملی سیستم تصویربرداری گوسی دوبل پیشنهادی را مورد بررسی قرار می دهیم تا شرایط شبیه سازی را به شرایط واقعی نزدیک تر کنیم.

۴- پیاده سازی سیستم تصویربرداری گوسی دوبل زمانی

برای پیاده سازی عدسی زمانی، نیاز به روش هایی برای ایجاد فاز سهمی داریم. مثلاً در پژوهش [۴۶] از روش ترکیب چهار موج ناشی از مدولاتورهای فاز خودی موج پمپ استفاده شده است. ساده ترین راه، استفاده از یک مدولاتور فاز الکترونی (EOPM) است [۴۷]. یک EOPM معمولاً با یک کریستال غیرخطی (مانند لیتیوم نئوبات LiNbO_3) با ضریب الکترونی بالا ساخته می شود که ضریب شکست آن تابعی از شدت میدان الکتریکی اعمال شده به آن است. در پژوهش [۴۸] یک عدسی زمانی با دیافراگم بهبود یافته توسط یک مدولاتور فاز الکترونی پیاده سازی شده است. تغییر فاز اعمالی توسط مدولاتور الکترونی به صورت زیر است:

$$\phi_m(t) = \phi_0 \cos(\omega_m t - \theta) \quad (۴۴)$$

که در آن ϕ_0 دامنه قله است و $\omega_m = 2\pi\nu_m$ بسامد مدولاتور زاویه ای است، و آفست فاز $\theta = \omega_m t_0$ حاصل از آفست زمانی t_0 بین قله ولتاژ سینوسی و قله پالس نوری در $t=0$ است. اگر بسط تیلور حول $t=0$ را برای رابطه بالا بنویسیم، خواهیم داشت:

$$\phi_m(t) = \phi_0 \times \left[\cos \theta - (\omega_m \sin \theta) t - \left(\frac{\omega_m^2}{2!} \cos \theta \right) t^2 + \left(\frac{\omega_m^3}{3!} \sin \theta \right) t^3 + \dots \right] \quad (۴۵)$$

اگر آفست فازی را صفر در نظر بگیریم ($\theta=0$) و از عبارات بالاتر از مرتبه دوم چشم پوشی کنیم، رابطه (۴۵) به صورت عبارت فازی مرتبه دوم در می آید که همان فاز مورد نیاز برای تحقق عدسی زمانی ایده آل است:

$$\phi_m(t) \approx \phi_0 \left(1 - \frac{\omega_m^2 t^2}{2} \right) \quad (۴۶)$$

همان طور که قبلاً ذکر شد عبارات مرتبه بالاتر، عامل ایجاد ابیراهی در سیستم تصویربرداری هستند. جهت پیاده سازی محیط پاشنده نیز می توان از ساختار توری فیبر براگ استفاده کرد که محیطی پاشنده با کمترین عبارات پاشندگی مرتبه بالا فراهم می کند [۴۹].

۵- نتایج شبیه سازی

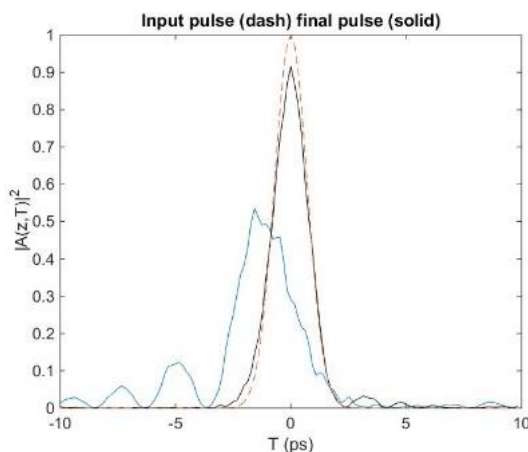
در این بخش مقادیر پارامترها بر اساس قابلیت های عملی یک مدولاتور الکترونی فازی مدرن و تجاری که در $\lambda_0 = 1053 \text{ nm}$ کار می کند انتخاب شدند. همچنین $\phi_0 = 30 \text{ rad}$ در نظر گرفته شده است. شبیه سازی های این مقاله با متلب انجام شده است. ابتدا یک سیستم تصویربرداری با یک عدسی ساده را در نظر می گیریم (شکل ۳). برای محیط پاشنده اول، پاشندگی تأخیر گروه $\phi_1'' = 2.3 \text{ ps}^2$ در نظر می گیریم. سپس با استفاده از مدولاتور الکترونی فازی مذکور، در بسامد ۴.۱ گیگاهرتز، با توجه به فرمول زیر

$$\phi_{f1}'' = -1/(\phi_0 \omega_m^2) \quad (۴۷)$$

برقرار باشد، مقدار پاشندگی تأخیر گروه محیط چهارم، قرینه مقدار پاشندگی تأخیر گروه محیط اول به دست خواهد آمد. به عبارتی محیط چهارم، محیط اول را خنثی خواهد کرد.

خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری متشکل از عدسی گوسی دوبل زمانی با استفاده از مدولاتورهای فازی محدوده ۴ گیگاهرتز در شکل ۱۰ آورده شده است. همان طور که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می کنید، خروجی سیستم اول، تأثیر قرارگیری سه عدسی پشت سر هم به جای یک عدسی را نشان می دهد، اما هنوز ابیراهی مرتبه سوم مشاهده می شود که با سیستم تصویربرداری دوم (شکل ۱۰ (ب))، آن نیز برطرف شده است. همبستگی خروجی و ورودی در سیستم تصویربرداری با یک عدسی ساده که خروجی آن را در شکل ۹ مشاهده کردیم، برابر با ۰.۵۸۸۶ است. این در حالی است که همبستگی خروجی و ورودی در سیستم تصویربرداری گوسی دوبل به مقدار ۰.۹۹۷۱ رسیده است. که به میزان قابل توجه ۰.۴۰۸۵ (۴۰.۸۵ درصد) بهبود یافته. مقایسه خروجی حاصل از یک سیستم تصویربرداری با یک عدسی ساده و سیستم تصویربرداری گوسی دوبل نیز در شکل ۱۱ آورده شده است.

در بخش دوم، از مدولاتورهای فازی با بسامدهای بالاتری برای پیاده سازی دو سیستم تصویربرداری با عدسی ساده و سیستم تصویربرداری با عدسی گوسی دوبل استفاده می کنیم تا قابلیت دو سیستم را در بسامدهای بالاتر مقایسه کنیم. برای سیستم تصویربرداری با عدسی ساده، محیط پاشنده اول را با همان شرایط قبلی یعنی محیطی با پاشندگی تأخیر گروه $\phi_1' = 2.3 \text{ ps}^2$ به کار می بریم. لذا برای عدسی ساده، مدولاتور فازی با بسامد ۱۰ گیگاهرتز انتخاب می کنیم. پارامترهای عدسی زمانی به صورت $\phi_f' = 8.44 \text{ ps}^2$ و $\phi_s' = 7.44 \text{ ps}^{-3}$ به دست خواهد آمد. در این حالت برای محیط پاشنده دوم طبق شرط تشکیل تصویر، $\phi_2'' = -3.16 \text{ ps}^2$ به دست خواهد آمد. در این شرایط خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده به صورت شکل ۱۲ خواهد بود. همان طور که مشاهده می کنید تصویر خروجی دارای اعوج فراوانی است و تقریباً تصویری از شکل موج ورودی به دست نیامده است. لذا اگر بخواهیم سیستم تصویربرداری با عدسی ساده را با مدولاتورهای فازی در بسامدهای بالاتر پیاده سازی کنیم، به تصویر خوبی در خروجی سیستم نخواهیم رسید.



شکل ۱۱- مقایسه سیستم تصویربرداری متشکل از عدسی گوسی دوبل زمانی و سیستم تصویربرداری با عدسی ساده

برای محیط پاشنده دوم مقدار $\phi_2'' = -2.4 \text{ ps}^2$ به دست خواهد آمد. با توجه به اعداد به دست آمده، خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده در بسامد ۴.۱ گیگاهرتز به صورت شکل ۹ خواهد بود. با توجه به شکل ۹، مشاهده می کنیم که در یک سیستم تصویربرداری متشکل از یک عدسی ساده، خروجی نهایی از یک طرف دچار اغتشاش شده است که معادل ابیراهی کما در حوزه مکان است. حال با استفاده از سیستم گوسی دوبل، به کاهش ابیراهی زمانی حاصل می پردازیم. همان طور که می دانید در سیستم گوسی دوبل مکانی، با قرار دادن سه عدسی در کنار هم، به تابع فاز موردنظر خود دست پیدا می کنیم. در سیستم گوسی دوبل زمانی نیز دقیقاً به همین صورت عمل می کنیم و با قرار دادن سه مدولاتور فاز با بسامدهای مختلف در کنار هم، به تابع فاز موردنظر خود برای دست یابی به کم ترین میزان ابیراهی می رسیم.

لازم به ذکر است که پاشندگی گروه محیط پاشنده اول، در خروجی نهایی تأثیر بسزایی دارد. لذا مقدار آن را برابر با آزمایش اول در سیستم تصویربرداری با عدسی ساده یعنی $\phi_1' = 2.3 \text{ ps}^2$ در نظر می گیریم. با ثابت گرفتن این مقدار در دو آزمایش می توانیم تأثیر استفاده از عدسی گوسی دوبل به جای عدسی ساده را دقیق تر بررسی کنیم. همچنین مطابق با سیستم تصویربرداری با یک عدسی ساده، برای سیستم تصویربرداری با عدسی گوسی دوبل نیز از مدولاتورهای فازی در بسامد حدود ۴ گیگاهرتز استفاده می کنیم.

پس از مشخص کردن مقدار پاشندگی گروه محیط اول، مقادیر مناسبی برای پارامترهای دسته عدسی اول (عدسی شماره یک، دو و سه) انتخاب می کنیم. به این ترتیب، از دو مدولاتور فازی با بسامد ۴ گیگاهرتز و یک مدولاتور با بسامد ۴.۹ گیگاهرتز با فاز منفی (معادل با عدسی مقعر) استفاده می کنیم. بنابراین تابع فاز عدسی معادل طبق رابطه (۴۷)، برابر با $\phi_{f1}' = 10.77 \text{ ps}^2$ و $\phi_{s1}' = -0.16 \text{ ps}^{-3}$ در بسامد معادل ۲.۸ گیگاهرتز خواهد بود. در ادامه با استفاده از شرط تشکیل تصویر، برای پاشندگی تأخیر گروه محیط دوم مقدار $\phi_2'' = -2.35 \text{ ps}^2$ به دست خواهد آمد. تا به اینجا سیستم تصویربرداری اول طراحی شد. برای طراحی پارامترهای سیستم تصویربرداری دوم از شروط به دست آمده برای جبران ابیراهی در سیستم گوسی دوبل زمانی یعنی (۴۲) و (۴۳) استفاده می کنیم. درواقع کافی است پاشندگی تأخیر گروه محیط پاشنده سوم را قرینه پاشندگی تأخیر گروه محیط پاشنده دوم قرار دهیم. لذا برای محیط سوم، مقدار پاشندگی تأخیر گروه $\phi_3'' = 2.35 \text{ ps}^2$ به دست خواهد آمد. برای دسته عدسی دوم (عدسی شماره چهار، پنج و شش)، نیز طبق شرط (۴۳) برای جبران ابیراهی کافی است پاشندگی تأخیر گروه کانونی مرتبه سوم معادل دسته عدسی اول و دوم را قرینه هم قرار دهیم. لذا از مدولاتورهای فازی در همان بسامدهایی که در سیستم تصویربرداری اول به کار بردیم استفاده می کنیم، با این تفاوت که مقدار فاز طبق شرط (۴۳)، منفی است. در نتیجه مقادیر $\phi_{f1}'' = -10.77 \text{ ps}^2$ و $\phi_{s1}'' = 0.16 \text{ ps}^{-3}$ برای دسته عدسی معادل دوم به دست خواهد آمد. برای محیط چهارم نیز، طبق شرط تصویربرداری، مقدار $\phi_2'' = -2.3 \text{ ps}^2$ به دست خواهد آمد.

از مقدار به دست آمده برای پاشندگی تأخیر گروه محیط چهارم به این نتیجه می رسیم که اگر دو شرط (۴۲) و (۴۳) برای سیستم تصویربرداری گوسی دوبل

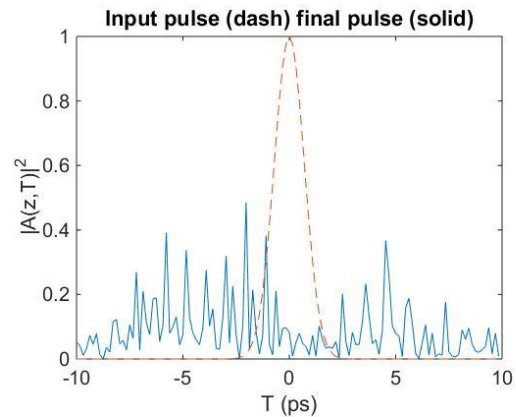
گیگاهرتز است. لذا پارامترهای $\phi_1'' = 329 \text{ ps}^2$ و $\phi_1''' = -0.3 \text{ ps}^{-3}$ برای دسته عدسی اول به دست خواهد آمد. با استفاده از شرط تشکیل تصویر و رابطه (۴۹)، برای پاشندگی تأخیر گروه محیط دوم و سوم مقدار $\phi_2'' = -2.3 \text{ ps}^2$ و $\phi_3'' = 2.3 \text{ ps}^2$ به دست خواهد آمد. برای دسته عدسی دوم نیز مطابق با شرط (۵۰)، مدولاتورهای فازی مورد استفاده در سیستم تصویربرداری اول را با فاز منفی به کار می‌بریم. نمودارهای حاصل به صورت شکل ۱۳ خواهد بود.

همان‌طور که در نمودار ۱۳ (ب) مشاهده می‌شود، شکل پالس خروجی شباهت بسیار زیادی با شکل پالس ورودی دارد و همبستگی ورودی و خروجی ۰.۹۹۹۵ است که عددی بسیار قابل‌توجهی است. این در حالی است که پیاده‌سازی عدسی ساده در بسامدهای بالا، همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده گردید، نتیجه قابل قبولی را به همراه نخواهد داشت.

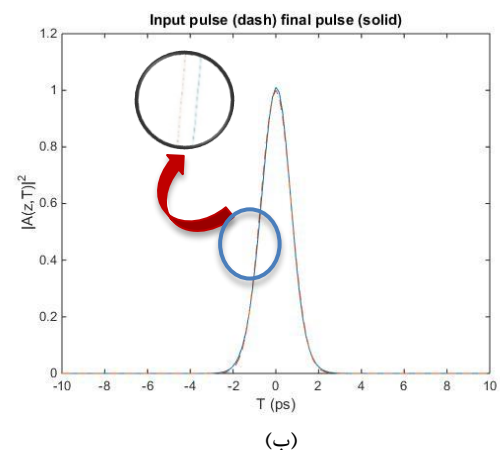
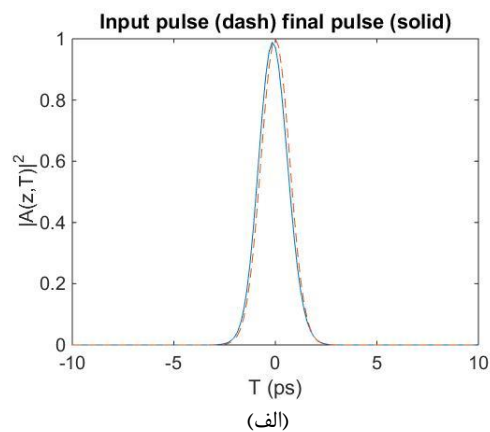
با توجه به نتایج و نمودارهای به دست آمده، قابلیت سیستم گوسی دوبل در بهبود سیستم‌های تصویربرداری و حذف ابیراهی مرتبه سوم را مشاهده کردیم. همچنین شبیه‌سازی‌ها را مطابق با سیستم‌های تجاری و رایج انجام دادیم و مشاهده کردیم که در بسامدهای بالاتر، شرط به دست آمده در پژوهش [۲۴] برقرار نیست و لذا تصاویر حاصل از سیستم تصویربرداری با یک عدسی ساده، اعوجاج زیادی دارد. این در حالی است که سیستم تصویربرداری گوسی دوبل زمانی، قابلیت پیاده‌سازی با مدولاتورهای فازی در بسامدهای بالاتر را نیز دارد. همچنین در سیستم تصویربرداری گوسی دوبل زمانی به دلیل قرارگیری سه عدسی پشت سرهم در سیستم تصویربرداری اول و دوم، قابلیت تنظیم تابع فاز نهایی و ایجاد تصاویری با کمترین ابیراهی را خواهد داشت که مستلزم طراحی استاندارد با توجه به روابط دوگان موجود در نور مکانی و زمانی و پیاده‌سازی عددی دو شرط (۴۲) و (۴۳) در عدسی‌های زمانی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از اصل دوگانی مکان-زمان که از تقارن ریاضی بین معادلات پراش و پاشندگی نشأت می‌گیرد، سیستم تصویربرداری گوسی دوبل مکانی را در حوزه زمان معادل کردیم و با بهره‌گیری از روش پرتو زمانی، دو شرط اساسی برای کاهش ابیراهی در سیستم گوسی دوبل را به دست آوردیم. سپس با طراحی بهینه این ساختار و با توجه به ادوات موجود برای پیاده‌سازی عدسی‌های زمانی و محیط‌های پاشنده، ابیراهی زمانی مرتبه سوم حاصل از عبارات فازی مرتبه بالاتر را کاهش دادیم و نتایج شبیه‌سازی حاصل از سیستم تصویربرداری گوسی دوبل را با سیستم تصویربرداری ساده با یک عدسی مقایسه کردیم. در این نتایج مشاهده کردیم که تصاویر در سیستم تصویربرداری ساده با یک عدسی، با افزایش بسامد دچار اعوجاج شدند و با شکل پالس ورودی، اختلاف زیادی پیدا کردند اما سیستم تصویربرداری گوسی دوبل، در بسامدهای بالاتر هم می‌تواند تصاویری با همبستگی بالاتر از ۰.۹۹ در اختیار ما بگذارد. این نتایج، قابلیت تنظیم تابع فاز سیستم تصویربرداری گوسی دوبل در بسامدهای بالاتر به خوبی نشان دادند. طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، حتی در بسامدهای کمتر از ۱۰ گیگاهرتز نیز سیستم تصویربرداری گوسی دوبل نتیجه بسیار بهتری نسبت به سیستم تصویربرداری با یک عدسی ساده به نمایش گذاشت. این در حالی است که در این پژوهش، محیط‌های پاشنده، ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند و اگر محیط‌های پاشنده را نیز از حالت ایده‌آل خارج کنیم، تأثیر سیستم گوسی دوبل بیش‌ازپیش مشخص خواهد شد. لذا استفاده از همین ساختار با به کارگیری محیط‌های غیرایده‌آل برای سیستم گوسی دابل می‌تواند پیشنهادی برای



شکل ۱۲- خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری زمانی با یک عدسی ساده در بسامد ۱۰ گیگاهرتز (خط چین: پالس ورودی، پالس آبی‌رنگ: خروجی)



شکل ۱۳- خروجی حاصل از سیستم تصویربرداری متشکل از عدسی گوسی دوبل زمانی در بسامد بالاتر از ۱۰ گیگاهرتز (الف) خروجی سیستم تصویربرداری اول (ب) خروجی نهایی (خط چین: پالس ورودی، پالس آبی‌رنگ: خروجی از سیستم اول عدسی گوسی دوبل)

حال به بررسی سیستم تصویربرداری با عدسی گوسی دوبل در بسامدهای بالاتر می‌پردازیم. برای محیط پاشنده اول همان پاشندگی تأخیر گروه قبلی یعنی $\phi_1'' = 2.3 \text{ ps}^2$ را در نظر می‌گیریم. برای دسته عدسی اول، از مدولاتورهای فازی با بسامد ۱۲ و ۱۱ گیگاهرتز و یک مدولاتور با بسامد ۱۶.۲ گیگاهرتز با فاز منفی (معادل با عدسی مقعر) استفاده می‌کنیم که بسامد معادل آن ۱.۶

Gómez-Reino, "Temporal zone plate," *J. Opt. Soc. Am. A* 25(12), 3077–3082 (2008)

[21] Chausse F, Rigneault H, Finot C. Two-wave interferences space-time duality: young slits, Fresnel biprism and Billet bilens. *Opt Commun* 2017; 397:31–8

[22] Javier Nuño, Christophe Finot, Julien Fatome. Linear Sampling and Magnification Technique Based on Phase Modulators and Dispersive Elements: The Temporal Lenticular Lens. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, 2017, 36, pp.125-129.

[23] Avi Klein, Inbar Sibony, Sara Meir, Ori Friedman, Shir Shahal, Hamootal Duadi, Moti Fridman, "Temporal imaging of ultrafast signals in time and space simultaneously," *Proc. SPIE* 11358, Nonlinear Optics and its Applications 2020, 1135805 (1 April 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2557269>

[24] C. V. Bennett and B. H. Kolner, "Aberrations in temporal imaging," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 20-32, Jan. 2001, doi: 10.1109/3.892720.

[25] Bo Li and Shuqin Lou, "Elimination of Aberrations Due to High-Order Terms in Systems Based on Linear Time Lenses," *J. Lightwave Technol.* 31, 2200-2206 (2013)

[26] US Grant US2500046 A, Willy Schade, "Petzval-type photographic objective", published 7 March 1950, assigned to Eastman Kodak Co.

[27] Sasián, José. (2019). Petzval Portrait Objective, Cooke Triplet, and Double Gauss Lens. 10.1017/9781108625388.013.

[28] Kingslake, Rudolph (1989). *A History of the Photographic Lens*. Academic Press. pp. 59–62. ISBN 0-12-408640-3.

[29] "Zeiss Apo Sonnar T* 1700 mm F4 lens". *Digital Photography Review*. Retrieved 1 October 2006.

[30] Edward John Wall and Thomas Bolas (1902). *The Dictionary of Photography for the Amateur and Professional Photographer*. London: Hazell, Watson, and Viney Ltd.

[31] Ray N. Wilson (2004). *Reflecting Telescope Optics*. Springer. ISBN 978-3-540-40106 3.

[32] Vasiljević, Darko (2002). "The Cooke triplet optimizations". *Classical and Evolutionary Algorithms in the Optimization of Optical Systems*. pp. 187–211. doi:10.1007/978-1-4615-1051-2_13. ISBN 978-1-4613-5370-6.

[33] Gauss: Titan of Science, G. Waldo Dunnington (with additions by Jeremy Gray), 2004, reprint of 1955 edition, 537 pp.

[34] US patent 399499, Alvan G. Clark, "Photographic Lens", issued 1889-March-12

[35] US patent 583336, Paul Rudolph, "Objective Glass", issued 1897-May-25

[35] U.S. Patent 2,019,985 Dec 26, 1930.

[37] R. P. Jonas and M. D. Thorpe, "Double Gauss lens design: a review of some classics using modern methods," in *International Optical Design, Technical Digest* (CD) (Optical Society of America, 2006), paper MB2.

[38] C. V. Bennett and B. H. Kolner, "Aberrations in temporal imaging," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 20-32, Jan. 2001, doi: 10.1109/3.892720.

[39] Ghafoor, Moeen. (2017). Synthesis of high refractive index materials for manufacturing apochromatic lens by 3D printing

[40] Kidger, Michael J. (2002). *Fundamental Optical Design*. SPIE Press. ISBN 9780819439154.

[41] Zernike, F. (1934). "Beugungstheorie des Schneidverfahrens und Seiner Verbesserten Form, der Phasenkontrastmethode". *Physica*. 1 (8): 689–70

[42] Born, Max & Wolf, Emil (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (7th ed.). Cambridge, UK: Cambridge.

[43] K. Rahbar, K. Faez, "Blind Correction of Lens Aberration Using Modified Zernike Moments", *Journal of Information and Communication Technology* 2, no.5 (2010): 37-44. magiran.com/p1154689

[44] Jan Hoogland, "Synthesis of The Double Gauss Lens," *Proc. SPIE* 0399, Optical System Design, Analysis, and Production, (26 October 1983); <https://doi.org/10.1117/12.935432>

[45] C. Bennett, R. Scott, and B. Kolner, "Temporal magnification and reversal of 100 Gb/s optical data with an up-conversion time microscope," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 20, pp. 2513–2515, Nov. 1994.

[46] Hamootal Duadi, Avi Klein, Inbar Sibony, Sara Meir, and Moti Fridman, "Cross-phase modulation aberrations in time lenses," *Opt. Lett.*

تحقیقات آینده باشد همچنین در این پژوهش تنها ابیراهی زمانی حاصل از تابع فاز مرتبه سوم در نظر گرفته شد. از آنجاکه سیستم گوسی دابل زمانی در کاهش انواع ابیراهی‌ها مفید است، لذا برای تحقیقات آتی می‌توان ابیراهی‌های مرتبه چهارم و بالاتر را نیز بررسی و مدل‌سازی کرد که خود تأثیر زیادی در بهبود کیفیت سیستم‌های تصویربرداری زمانی خواهد داشت.

مرجع

- [1] Achromatic doublet intraocular lens for full aberration correction. *Biomedical Optics Express*. 8. 2396. 10.1364/BOE.8.002396.
- [2] P. Tournois, "Analogie optique de la compression d'impulsion," *Science*, vol. 258, pp. 3839-3842, 1964.
- [3] P. Tournois, J. Verner and G. Bienvenu, "Sur l'analogie optique de certains montages électroniques: formation d'images temporelles de signaux électriques," *C. R. Acad. Sci.*, vol. 267, pp. 375-378, 1968.
- [4] W. J. Caputi, "Stretch: a time transformation technique," *IEEE Trans. Aerosp. Electronic Syst*, pp. 269-278, 1971.
- [5] E. B. Treacy, "Optical pulse compression with diffraction gratings," *IEEE J. Quantum Electron*, Vols. QE-5, pp. 454-458, 1969
- [6] B. H. Kolner, "Space-time duality and the theory of temporal imaging," *IEEE J. Quantum Electron*. 30, 1951-1936 (1994).
- [7] V. J. Hernandez, C. V. Bennett, B. D. Moran, A. D. Drobshoff, D. Chang, C. Langrock, M. M. Fejer, and M. Ibsen, "104 MHz rate singleshot recording with subpicosecond resolution using temporal imaging," *Opt. Express* 21, 196–203 (2013).
- [8] T. T. Ng, F. Parmigiani, M. Ibsen, Z. Zhang, P. Petropoulos, and D. J. Richardson, "Compensation of linear distortions by using XPM with parabolic pulses as a time lens," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20, 1097–1099 (2008).
- [9] O. Kuzucu, Y. Okawachi, R. Salem, M. A. Foster, A. C. Turner-Foster, M. Lipson, and A. L. Gaeta, "Spectral phase conjugation via temporal imaging," *Opt. Express* 17, 20605–20614 (2009).
- [10] H. Hao, J. L. Areal, E. Palushani, L. K. Oxenlowe, A. Clausen, M. S. Berger, and P. Jeppesen, "Optical Synchronization of a 10-G Ethernet
- [11] J. van Howe, J. Hansryd, and C. Xu, "Multiwavelength pulse generator using time-lens compression," *Opt. Lett.* 29, 1470-1472 (2004).
- [12] M. A. Foster, R. Salem, D. F. Geraghty, A. C. Turner-Foster, M. Lipson, and A. L. Gaeta, "Silicon-chip-based ultrafast optical oscilloscope," *Nature* 456, 81-84 (2008).
- [13] G. Patera, D. B. Horoshko and M. I. Kolobov, "Quantum temporal imaging," *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2019.8840211.
- [14] Broaddus, D. H., Foster, M. A., Kuzucu, O., Turner-Foster, A. C., Koch, K. W., Lipson, M. & Gaeta, A. L. Temporal-imaging system with simple external-clock triggering. *Opt. Express* 18, 14262-14269 (2010).
- [15] Fridman, M., Farsi, A., Okawachi, Y. et al. Demonstration of temporal cloaking. *Nature* 481, 62–65 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature10695>
- [16] کرمی، محمد عظیم، انصاریان، میثاق. سامانه توزیع پالس ساعت نوری با استفاده از دیودهای بهمنی تک فوتون در فن‌آوری CMOS. *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۹؛ ۵۰(۲): ۸۳۲-۸۲۵.
- [17] Anastasiia Sheveleva, Pierre Colman, Christophe Finot. The temporal analogue of diffractive couplers. *Results in Optics*, Elsevier, In press.
- [18] مظلوم تهرانی، فاطمه، دانایی، محمد، کشاورزی، پرویز. طراحی طبقه تطبیق‌گر برای موج‌بر بلور فوتونی نور آهسته بر مبنای تزویج‌گر سمتی. *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۷؛ ۴۸(۴): ۱۷۷۳-۱۷۸۳.
- [19] فرهادی، شهریار، میری، مهدی، شیخی، محمدحسین. کوچک‌سازی و افزایش پهنای باند تفکیک‌کننده قطبش ماخ - زندر با استفاده از تزویج‌گر چندمد غیریکنواخت. *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۸؛ ۴۹(۲): ۷۳۵-۷۴۵.
- [20] M. T. Flores-Arias, L. Chantada, C. Bao, M. V. Pérez, and C.

Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), 2019, pp. 4311-4314, doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017608.
 [49] J. Azana and M. A. Muriel, "Real-time optical spectrum analysis based on the time-space duality in chirped fiber gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 5, pp. 517-526, May 2000

46, 3255-3258 (2021)
 [47] B. H. Kolner, "Electro-optic time lenses for shaping and imaging optical waveforms," in *Broadband optical modulators: Science, Technology, and Applications*, CRC press, 2011, p. chap 19.
 [48] B. Zhang, D. Zhu, Y. Zhang and S. Pan, "Time Lens with Improved Aperture to Resolution Ratio Based on a Phase Modulator," 2019