



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



بررسی تداخل گردابه‌های نوری با استفاده از تداخل سنج ماخ زندر

آرش ثباتیان^۱، شراره جلالی^۲

۱) به ترتیب استاد و دانشجو کارشناسی ارشد گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

a.sabatyan@urmia.ac.ir, st_sh.jalali@urmia.ac.ir

چکیده - در این مقاله بر هم‌نهی پرتوهای گردابی نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد، اصول کار بر پایه ترکیب تیغه‌های منطقه‌ای فرنل مارپیچی است. بر هم‌نهی پرتوهای گردابی نوری، حاصل از تیغه‌های منطقه‌ای فرنل مارپیچی، را در کانون مورد مطالعه قرار داده و نتیجه حاصل تولید تنوع بسیار زیادی از باریکه‌های گردابی نوری است که دارای توزیع شدت مختلف اند که می‌توانند حامل بارهای توپولوژیکی صحیح یا غیر صحیح باشند. نتایج شبیه سازی شده در آزمایشگاه مورد راستی آزمایی قرار گرفت که مشخص شد نتایج شبیه سازی، با نتایج تجربی همخوانی بسیار نزدیکی دارد.

کلید واژه- بار توپولوژیکی، برهم‌نهی، پرتوهای گردابی نوری، تداخل، تیغه‌های منطقه‌ای فرنل مارپیچی.

Investigation of optical vortex interference using Mach Zander's interferometer

Arash Sabatyan¹, Sharareh Jalali²

The Physics Department, Faculty of Science, Urmia University

a.sabatyan@urmia.ac.ir, st_sh.jalali@urmia.ac.ir

Abstract- In this paper, The superposition of optical vortex beams will be examined. In order to produce, optical vortex beams, we used of Fresnel spiral regional plates and superposition of optical vortex beams, we used Fresnel spiral zone plates and studied the overlap of the optical vortex beams resulting from the spiral fresnel zonal plates inside the focus. The result is the production of huge variety of optical vortex beams with different intensities, that can carry integer and fractional topological charges.

Keywords: Fresnel spiral regional plates, Optical vortex beams, Superposition, Topological charge.

داده های شبیه سازی و تجربی

تیغه منطقه‌ای فرنل مارپیچی یک عدسی پراشی است که در مقایسه با تیغه‌ی منطقه‌ی دایره‌ای از نواحی مارپیچی تشکیل شده است. بنابراین تابع عبور تیغه‌ی منطقه‌ای مارپیچی (SZP) به صورت زیر تعریف می شود [۳]:

$$T_{SZP1}(r, \theta) = \sum_n C_n \left| \exp\left(\frac{-ikr^2}{2f} + ip_1\theta\right) \right| \quad (1)$$

$$T_{SZP2}(r, \theta) = \sum_n C_n \left| \exp\left(\frac{-ikr^2}{2f} + ip_2\theta\right) \right| \quad (2)$$

که در آن (r, θ) مختصات قطبی در صفحه تیغه، f فاصله کانونی و p بار توپولوژیکی است. پراش حاصل از تیغه‌ها را با استفاده از قضیه هم‌تافتگی و انتگرال فرنل کیرشلف بدست می آوریم [۳]:

(3)

$$U_i(r, \theta; z) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[T_i(r, \theta)]\mathcal{F}[h(r; z)]\}, \\ i = 1, 2$$

که در آن $h(r; z) = \exp(\frac{ikr^2}{2z})$ تابع پاسخ فضای آزاد و $\mathcal{F}$ تبدیل فوریه است. پس شدت حاصل را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

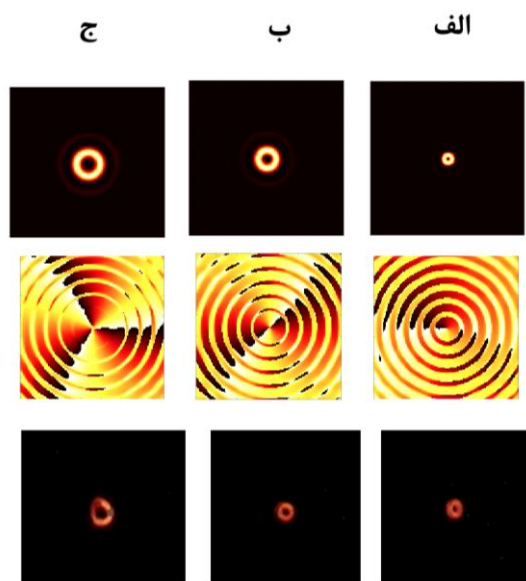
$$I = |U_1 + U_2| \quad (4)$$

مدل ریاضی ساده را برای برهم‌نهی دو پرتو گردابی با دامنه‌های یکسان را می توان به صورت زیر نوشت:

$$A_0 e^{iL_1\varphi} + A_0 e^{iL_2\varphi} = 2A_0 e^{i\frac{L_1+L_2}{2}\varphi} \times \cos\left(\frac{L_1-L_2}{2}\right) \quad (5)$$

مقدمه

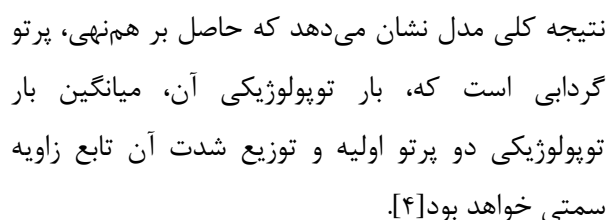
باریکه‌های نوری (optical vortex)، پرتوهایی هستند که می‌توانند تکانه زاویه‌های مداری را با خود حمل کنند. این پرتوها به صورت پیچشی در فضا انتشار می‌یابند، از این رو اگر از این پیچش مقطعی (فرضی) بریده شود، آن گاه توزیع فازی آن سطح مقطع شبیه به یک گرداب خواهد بود، به همین دلیل این امواج یا پرتوها را با نام گردابه نوری می‌شناسند، بنابراین این توزیع فازی خواهد بود که به صورت گرداب است. در اصل باریکه‌های گردابی با تکینگی فازی و جابه جایی پیچشی فاز در جبهه موجشان به عنوان پرتو گردابی شناخته می‌شوند [۱]. این باریکه‌ها دارای اندازه حرکت زاویه‌ای مداری هستند و سطح موج این باریکه‌ها دارای فاز چرخشی با رابطه‌ی $\exp(ip\varphi)$ است، که در آن φ زاویه سمتی و p بار توپولوژیکی باریکه است. پرتوهای گردابی به دلیل داشتن این ویژگی منحصر بفرد مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند و کاربردهای بسیار وسیعی در مخابرات کوانتومی، تله اندازی اتم‌ها و پردازش تصویر دارند [۲]. کاربردهای گسترده، باعث مطالعه باریکه‌های گردابی نوری و اندازه‌گیری بار توپولوژیکی می‌گردد.



شکل ۲: ردیف اول (شکل الف - ج)، توزیع شدت ناشی از برهم‌نهی دو پرتو گردابی نوری به ترتیب حامل بار توپولوژیکی (۱، ۲، ۳).
ردیف دوم: توزیع فاز متناظر با این توزیع شدت.

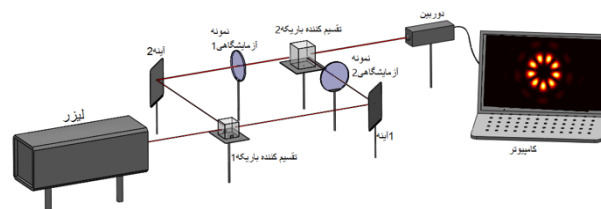
ردیف سوم: نتایج تجربی متناظر با نمونه‌های در نظر گرفته شده در شبیه سازی.

مطالعات بیشتر بر روی پرتوهای گردابی نوری با بارهای توپولوژیکی متفاوت صورت گرفت. و نشان داده شد که می توان تنوع بسیار زیادی از باریکه های نوری را تولید کرد. که شکل ۳ و ۴، نتایج حاصل از این مطالعات را نشان می دهد.



مثلاً، اگر بار توپولوژیکی دو باریکه گردابی از لحاظ اندازه و علامت یکسان باشند، بار پرتو گردابی حاصل، پرتو گردابی با همان بار توپولوژیکی خواهد بود در غیر این صورت، اگر اندازه بارها یکسان ولی علامت متفاوتی داشته باشند پرتو حاصل، پرتو گردابی نیست.

برای بررسی برهم‌نهی باریکه‌های گردابی نوری، تعدادی تیغه فرنل مارپیچی با مقادیر مختلفی از بارهای توپولوژیکی که شامل صفر، مثبت و منفی در نظر گرفته شد و توزیع شدت توسط رابطه (۴) شبیه‌سازی شد. هم‌چنین تیغه‌های در نظر گرفته شده با روش فتولیتوگرافی تهیه و در آزمایشگاه تحت چیدمان تداخل سنج ماخ زندر مطابق شکل (۱) مورد راستی آزمایی قرار گرفت.



شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی

در شکل ۳ (الف - ب)، توزیع شدت ناشی از برهم‌نهی دو پرتو گردابی به ترتیب حامل بارهای توپولوژیکی ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۳۶، ۳۸، ۴۰، ۴۲، ۴۴، ۴۶، ۴۸، ۵۰، ۵۲، ۵۴، ۵۶، ۵۸، ۶۰، ۶۲، ۶۴، ۶۶، ۶۸، ۷۰، ۷۲، ۷۴، ۷۶، ۷۸، ۸۰، ۸۲، ۸۴، ۸۶، ۸۸، ۹۰، ۹۲، ۹۴، ۹۶، ۹۸، ۱۰۰، ۱۰۲، ۱۰۴، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۰، ۱۱۲، ۱۱۴، ۱۱۶، ۱۱۸، ۱۲۰، ۱۲۲، ۱۲۴، ۱۲۶، ۱۲۸، ۱۳۰، ۱۳۲، ۱۳۴، ۱۳۶، ۱۳۸، ۱۴۰، ۱۴۲، ۱۴۴، ۱۴۶، ۱۴۸، ۱۵۰، ۱۵۲، ۱۵۴، ۱۵۶، ۱۵۸، ۱۶۰، ۱۶۲، ۱۶۴، ۱۶۶، ۱۶۸، ۱۷۰، ۱۷۲، ۱۷۴، ۱۷۶، ۱۷۸، ۱۸۰، ۱۸۲، ۱۸۴، ۱۸۶، ۱۸۸، ۱۹۰، ۱۹۲، ۱۹۴، ۱۹۶، ۱۹۸، ۲۰۰، ۲۰۲، ۲۰۴، ۲۰۶، ۲۰۸، ۲۱۰، ۲۱۲، ۲۱۴، ۲۱۶، ۲۱۸، ۲۲۰، ۲۲۲، ۲۲۴، ۲۲۶، ۲۲۸، ۲۳۰، ۲۳۲، ۲۳۴، ۲۳۶، ۲۳۸، ۲۴۰، ۲۴۲، ۲۴۴، ۲۴۶، ۲۴۸، ۲۵۰، ۲۵۲، ۲۵۴، ۲۵۶، ۲۵۸، ۲۶۰، ۲۶۲، ۲۶۴، ۲۶۶، ۲۶۸، ۲۷۰، ۲۷۲، ۲۷۴، ۲۷۶، ۲۷۸، ۲۸۰، ۲۸۲، ۲۸۴، ۲۸۶، ۲۸۸، ۲۹۰، ۲۹۲، ۲۹۴، ۲۹۶، ۲۹۸، ۳۰۰، ۳۰۲، ۳۰۴، ۳۰۶، ۳۰۸، ۳۱۰، ۳۱۲، ۳۱۴، ۳۱۶، ۳۱۸، ۳۲۰، ۳۲۲، ۳۲۴، ۳۲۶، ۳۲۸، ۳۳۰، ۳۳۲، ۳۳۴، ۳۳۶، ۳۳۸، ۳۴۰، ۳۴۲، ۳۴۴، ۳۴۶، ۳۴۸، ۳۵۰، ۳۵۲، ۳۵۴، ۳۵۶، ۳۵۸، ۳۶۰، ۳۶۲، ۳۶۴، ۳۶۶، ۳۶۸، ۳۷۰، ۳۷۲، ۳۷۴، ۳۷۶، ۳۷۸، ۳۸۰، ۳۸۲، ۳۸۴، ۳۸۶، ۳۸۸، ۳۹۰، ۳۹۲، ۳۹۴، ۳۹۶، ۳۹۸، ۴۰۰، ۴۰۲، ۴۰۴، ۴۰۶، ۴۰۸، ۴۱۰، ۴۱۲، ۴۱۴، ۴۱۶، ۴۱۸، ۴۲۰، ۴۲۲، ۴۲۴، ۴۲۶، ۴۲۸، ۴۳۰، ۴۳۲، ۴۳۴، ۴۳۶، ۴۳۸، ۴۴۰، ۴۴۲، ۴۴۴، ۴۴۶، ۴۴۸، ۴۵۰، ۴۵۲، ۴۵۴، ۴۵۶، ۴۵۸، ۴۶۰، ۴۶۲، ۴۶۴، ۴۶۶، ۴۶۸، ۴۷۰، ۴۷۲، ۴۷۴، ۴۷۶، ۴۷۸، ۴۸۰، ۴۸۲، ۴۸۴، ۴۸۶، ۴۸۸، ۴۹۰، ۴۹۲، ۴۹۴، ۴۹۶، ۴۹۸، ۵۰۰، ۵۰۲، ۵۰۴، ۵۰۶، ۵۰۸، ۵۱۰، ۵۱۲، ۵۱۴، ۵۱۶، ۵۱۸، ۵۲۰، ۵۲۲، ۵۲۴، ۵۲۶، ۵۲۸، ۵۳۰، ۵۳۲، ۵۳۴، ۵۳۶، ۵۳۸، ۵۴۰، ۵۴۲، ۵۴۴، ۵۴۶، ۵۴۸، ۵۵۰، ۵۵۲، ۵۵۴، ۵۵۶، ۵۵۸، ۵۶۰، ۵۶۲، ۵۶۴، ۵۶۶، ۵۶۸، ۵۷۰، ۵۷۲، ۵۷۴، ۵۷۶، ۵۷۸، ۵۸۰، ۵۸۲، ۵۸۴، ۵۸۶، ۵۸۸، ۵۹۰، ۵۹۲، ۵۹۴، ۵۹۶، ۵۹۸، ۶۰۰، ۶۰۲، ۶۰۴، ۶۰۶، ۶۰۸، ۶۱۰، ۶۱۲، ۶۱۴، ۶۱۶، ۶۱۸، ۶۲۰، ۶۲۲، ۶۲۴، ۶۲۶، ۶۲۸، ۶۳۰، ۶۳۲، ۶۳۴، ۶۳۶، ۶۳۸، ۶۴۰، ۶۴۲، ۶۴۴، ۶۴۶، ۶۴۸، ۶۵۰، ۶۵۲، ۶۵۴، ۶۵۶، ۶۵۸، ۶۶۰، ۶۶۲، ۶۶۴، ۶۶۶، ۶۶۸، ۶۷۰، ۶۷۲، ۶۷۴، ۶۷۶، ۶۷۸، ۶۸۰، ۶۸۲، ۶۸۴، ۶۸۶، ۶۸۸، ۶۹۰، ۶۹۲، ۶۹۴، ۶۹۶، ۶۹۸، ۷۰۰، ۷۰۲، ۷۰۴، ۷۰۶، ۷۰۸، ۷۱۰، ۷۱۲، ۷۱۴، ۷۱۶، ۷۱۸، ۷۲۰، ۷۲۲، ۷۲۴، ۷۲۶، ۷۲۸، ۷۳۰، ۷۳۲، ۷۳۴، ۷۳۶، ۷۳۸، ۷۴۰، ۷۴۲، ۷۴۴، ۷۴۶، ۷۴۸، ۷۵۰، ۷۵۲، ۷۵۴، ۷۵۶، ۷۵۸، ۷۶۰، ۷۶۲، ۷۶۴، ۷۶۶، ۷۶۸، ۷۷۰، ۷۷۲، ۷۷۴، ۷۷۶، ۷۷۸، ۷۸۰، ۷۸۲، ۷۸۴، ۷۸۶، ۷۸۸، ۷۹۰، ۷۹۲، ۷۹۴، ۷۹۶، ۷۹۸، ۸۰۰، ۸۰۲، ۸۰۴، ۸۰۶، ۸۰۸، ۸۱۰، ۸۱۲، ۸۱۴، ۸۱۶، ۸۱۸، ۸۲۰، ۸۲۲، ۸۲۴، ۸۲۶، ۸۲۸، ۸۳۰، ۸۳۲، ۸۳۴، ۸۳۶، ۸۳۸، ۸۴۰، ۸۴۲، ۸۴۴، ۸۴۶، ۸۴۸، ۸۵۰، ۸۵۲، ۸۵۴، ۸۵۶، ۸۵۸، ۸۶۰، ۸۶۲، ۸۶۴، ۸۶۶، ۸۶۸، ۸۷۰، ۸۷۲، ۸۷۴، ۸۷۶، ۸۷۸، ۸۸۰، ۸۸۲، ۸۸۴، ۸۸۶، ۸۸۸، ۸۹۰، ۸۹۲، ۸۹۴، ۸۹۶، ۸۹۸، ۹۰۰، ۹۰۲، ۹۰۴، ۹۰۶، ۹۰۸، ۹۱۰، ۹۱۲، ۹۱۴، ۹۱۶، ۹۱۸، ۹۲۰، ۹۲۲، ۹۲۴، ۹۲۶، ۹۲۸، ۹۳۰، ۹۳۲، ۹۳۴، ۹۳۶، ۹۳۸، ۹۴۰، ۹۴۲، ۹۴۴، ۹۴۶، ۹۴۸، ۹۵۰، ۹۵۲، ۹۵۴، ۹۵۶، ۹۵۸، ۹۶۰، ۹۶۲، ۹۶۴، ۹۶۶، ۹۶۸، ۹۷۰، ۹۷۲، ۹۷۴، ۹۷۶، ۹۷۸، ۹۸۰، ۹۸۲، ۹۸۴، ۹۸۶، ۹۸۸، ۹۹۰، ۹۹۲، ۹۹۴، ۹۹۶، ۹۹۸، ۱۰۰۰، ۱۰۰۲، ۱۰۰۴، ۱۰۰۶، ۱۰۰۸، ۱۰۱۰، ۱۰۱۲، ۱۰۱۴، ۱۰۱۶، ۱۰۱۸، ۱۰۲۰، ۱۰۲۲، ۱۰۲۴، ۱۰۲۶، ۱۰۲۸، ۱۰۳۰، ۱۰۳۲، ۱۰۳۴، ۱۰

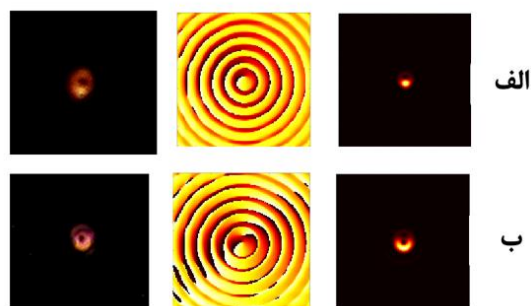
در مطالعه اول دو پرتو گردابی با بار توپولوژیکی یکسان هم از نظر اندازه و هم از نظر علامت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و شکل (۲) نتایج حاصل از این مطالعه را نشان می‌دهد، که به ترتیب شکل الف - ج پرتوهای اولیه با بار توپولوژیکی ۱، ۲، ۳، که پرتو حاصل یک پرتو گردابی با بار توپولوژیکی ۱، ۲، ۳، می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله بر هم نهی پرتوهای گردابی نوری حامل طیف های متنوعی از بارهای توپولوژیکی در تداخل سنج ماخ زندر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. طراحی این عناصر با استفاده از محاسبات انجام شده در نرم افزار متلب انجام گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با استفاده از برهم نهی باریکه های گردابی نوری می توان تنوع بسیاری از پرتوهای گردابی حامل بارهای صحیح و کسری و همچنین باریکه های نوری در شکل های مختلفی همچون باریکه های گلبرگی و آرایه ی از نقاط کانونی را ایجاد کرد. نتایج شبیه سازی و تجربی نشان می دهد که حاصل بر هم نهی دو باریکه گردابی در تداخل سنج ماخ زندر، پرتو گردابی است که، بار توپولوژیکی آن، میانگین بار توپولوژیکی دو پرتو اولیه و توزیع شدت آن تابع زاویه ی سمتی خواهد بود نتایج تجربی و شبیه سازی با تقریبی خوبی با هم هماهنگ هستند.

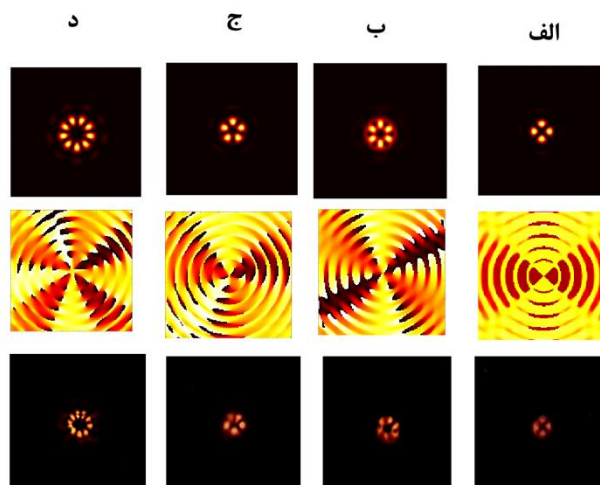
مرجع ها

- [۱] J.E Curtis, D.G Grier, Phys. Rev. Lett. ۹۰. ۱۳۳۹۰۱. ۲۰۰۳.
- [۲] J.W Goodman. *Introduction to Fourier optics*. ۳rd edition. Roberts & Company. ۲۰۰.
- [۳] A Sabatyan, & Z Behjat, The Annual Physics conference of Iran, Shiraz University. ۱۰۶۵. ۲۰۱۶.
- [۴] S Tao, J. Lin, & X. Peng, Fractional optical vortex beam induced particles. Opt. Express, vol. ۱۳, pp. ۷۷۲۶-۷۷۳۱. ۲۰۰۵.



شکل ۳: ستون اول: (شکل الف-ب) توزیع شدت ناشی از برهم نهی دو پرتو گردابی نوری، به ترتیب با بارهای توپولوژیکی ۱، ۰، ۱، ۰، ۲، ۱. ستون دوم: توزیع فاز متناظر با این توزیع شدت. ستون سوم: نتایج تجربی متناظر با نمونه های در نظر گرفته شده در شبیه سازی.

شکل ۴، نمونه ای دیگری از بر هم نهی پرتوهای گردابی نوری را نشان می دهد، که بار توپولوژیکی پرتوها نسبت به هم علامت متفاوتی دارند در این صورت پرتوهای حاصل، به شکل پرتو گلبرگی مانند تشکیل می شود.



شکل ۴: ردیف اول: (شکل الف-د) توزیع شدت ناشی از برهم نهی دو پرتو گردابی نوری، به ترتیب با بارهای توپولوژیکی ۲، -۲، ۲، -۲، ۳، -۳، ۵، -۴، ۴. ردیف دوم: توزیع فاز متناظر با این توزیع شدت. ردیف سوم: نتایج تجربی متناظر با نمونه های در نظر گرفته شده در شبیه سازی.

بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران، ۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰