



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۱۳۹۷ بهمن ۹-۱۱



## شبیه سازی انتشار پرتو گاوسی در یک سیستم پنهان ساز اپتیکی با استفاده از قانون ABCD

کاوش برمومنش، علیرضا کشاورز، محسن حاتمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز [Keshavarz@sutech.ac.ir](mailto:Keshavarz@sutech.ac.ir)

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز [K.Barmoumanesh@sutech.ac.ir](mailto:K.Barmoumanesh@sutech.ac.ir)

در این مقاله پنهان سازی به روش اپتیک پیرامحوری با استفاده از قانون ABCD معرفی خواهد شد. برای اجرایی کردن پنهان سازی به روش اپتیک پیرامحوری از یک سیستم پنهان ساز که شامل چهار عدد عدسی با چینش خطی است، استفاده می شود. به طوری که مرکز تمامی عدسی ها روی یک محور اپتیکی قرار می گیرند. هدف از اجرای این طرح، شبیه سازی انتشار پرتو گاوسی در این سیستم پنهان ساز به منظور شناسایی نواحی نامرئی کننده است. نتایج نشان می دهند که نواحی نامرئی کننده در اطراف محور اپتیکی مرکزی به مانند یک حلقه شکل می گیرند.

کلید واژه - اپتیک، پنهان سازی، پیرامحوری، ردیابی پرتو

## Simulation of Gaussian Beam Propagation in an Optical Cloaking System by ABCD Law

Kavosh Barmoumanesh, Alireza Keshavarz, Mohsen Hatami

Department of Physics, Shiraz University of Technology – [Keshavarz@sutech.ac.ir](mailto:Keshavarz@sutech.ac.ir)

Department of Physics, Shiraz University of Technology – [K.Barmoumanesh@sutech.ac.ir](mailto:K.Barmoumanesh@sutech.ac.ir)

In this paper, Cloaking will be introduced by using the paraxial optics method and ABCD law. In this way a cloaking system consists of four thin alignment lenses is used, so that the center of all the lenses are placed on an optical axis. The purpose of this project is to simulate Gaussian beam in this cloaking system to identify cloaking regions. Results show that cloaking regions around the central optical axis form as a ring.

Keywords: Optic, Cloaking, Paraxial, Ray\_tracing

## مقدمه

پنهان سازی تخیل عامه مردم و همچنین جوامع علمی را در تلاش برای پنهان کردن آنچه که قابل مشاهده است، به تسخیر درآورده است [۱]. جدا از حس کنجکاوی کاربردهای علمی زیادی برای پنهان سازی وجود دارد که برخی از آنها شامل: (۱) غیر قابل آشکار کردن اشیاء یا قسمتی از فضا برای مشاهده کننده که اهداف مخفی کاری دارد، (۲) فراهم کردن شرایطی که امواج (صوتی- اقیانوسی- لرزه ای) از اطراف یک محیط عبور کنند بدون اینکه در آن محیط اختلال ایجاد کنند. (۳) غیر قابل مشاهده کردن اجسام و اجزاء برای اهدافی مانند افزایش زیبایی یک اثر یا وسیله و حتی طراحی یک اثر یا وسیله. از طرفی، نامرئی سازی را می توان برای مرئی کردن اشیاء و یا فضاهای مختلف که ممکن است مبهم باشند و یا مانعی برای دیدن آن ها وجود دارد به کار گرفت [۲]. پیشرفت های علمی زیادی از زمان کارهای بنیادی لئون هارد [۳] پندری، شورینگ و اسمیت [۴] در زمینه نامرئی سازی صورت گرفته است. در مسیر همین تحولات برای اجرای کاربردی نامرئی سازی، ژانگ یک تغییر جهت از مواد سنتی به پلیمرها و مواد طبیعی مشاهده می کند و پیشنهاد می کند که به جای استفاده از فرامواد، استفاده از "اپتیک هندسی" می تواند به توسعه دادن فناوری های نامرئی سازی برای کاربردی تر شدن و ورود به بازار کمک کند [۵].

به همین منظور کار بر روی نامرئی سازی بر پایه روش هایی مبتنی بر اپتیک هندسی و ساده آغاز شد که در آنها از تقریب ها چپش های مختلفی استفاده شد. در نهایت در سال ۲۰۱۴ جوزف چوئی دانشجوی دانشگاه روچستر موفق به طراحی سیستمی شد که در آن از تقریب پیرامحوری استفاده می شود و تنها نیاز به چهار عدد عدسی دارد تا بتواند نامرئی سازی کامل و ایده آل را عملی کند [۲].

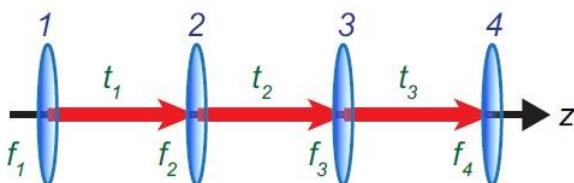
در این مقاله از تحقیقات جوزف چوئی الهام گرفته شده با این تفاوت که پرتو ورودی به نامرئی ساز گاوسی در نظر گرفته شده و همچنین برای اجرای شبیه سازی از قانون ABCD به جای حل انتگرال پراش استفاده شده است.

## مبانی نظری

ماتریس ABCD در اپتیک هندسی یک ماتریس  $2 \times 2$  است که بیانگر و توصیف کننده مسیری است که پرتو نوری در آن محیط به خصوص می پیماید و به وسیله آن می توان عمل های پرتو خروجی از قبیل ارتفاع و زاویه خروج از محیط را بدست آورد. هر پرتو یا موج ورودی به یک سیستم و خروجی از آن سیستم دربردارنده ی اطلاعاتی از همین قبیل می باشند که از عامل  $q$  برای معرفی آن ها استفاده می شود. اگر  $q_1$  را معرف پرتو ورودی و  $q_2$  را معرف پرتو خروجی در نظر بگیریم، قانون ABCD رابطه ی میان این دو را معرفی می کند و به ما کمک می کند تا از روی مشخصات پرتو ورودی به یک سیستم مشخص با ماتریس ABCD مخصوص به خود، بتوانیم مشخصات پرتو خروجی از سیستم را نیز به دست آوریم. قانون ABCD به صورت زیر معرفی می شود [۶]:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{D \left( \frac{1}{q_1} \right) + C}{B \left( \frac{1}{q_1} \right) + A} \quad (1)$$

سیستم پنهان ساز مورد بحث در این تحقیق (مطابق شکل ۱) از چهار عدد عدسی نازک و سه فضای آزاد بین آنها تشکیل شده است [۲]:



شکل ۱: سیستم پنهان ساز طراحی شده توسط جوزف چوئی.  
مشکل از چهار عدسی نازک و سه فضای آزاد بین آنها [۲]

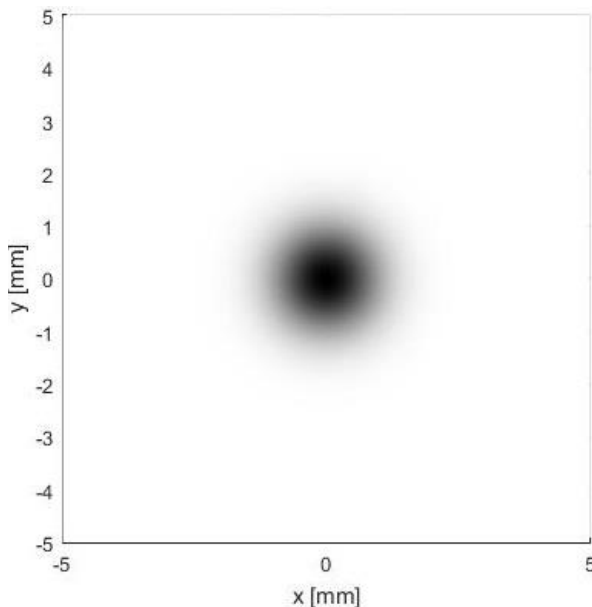
سیستم پنهان‌ساز است و  $n = 1$  که بیانگر احاطه شدن سیستم پنهان‌ساز توسط هوا است.

### شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی در این مقاله از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. همچنین پرتو گاوسی ورودی به سیستم پنهان‌ساز در شبیه‌سازی دارای رابطه‌ای به شکل زیر است:

$$E = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \quad (۹)$$

که در آن  $w_0$  اندازه کمر پرتو را مشخص می‌کند در ابتدا با استفاده از قانون ABCD و کمک ماتریس‌های مربوطه، انتشار پرتو گاوسی به قطر ۲ میلی‌متر در فضای آزاد و سپس انتشار و عبور از یک عدسی نازک (همگی در طول انتشاری به مقدار ۴۰۰۰ میلی‌متر) اجرا و شکل‌های مورد نظر رسم شدند. سپس با قرار دادن ماتریس ABCD نهایی سیستم پنهان‌ساز در برنامه ابتدا موج گاوسی ورودی به پنهان‌ساز مطابق شکل ۲(الف) و همچنین موج خروجی از پنهان‌ساز در شکل ۲(ب) رسم شدند:



شکل ۲(الف): موج گاوسی ورودی به سیستم پنهان‌ساز

برای اینکه این سیستم بتواند پنهان‌سازی را به صورت صحیح و کامل اجرا کند باید در انتخاب عدسی‌ها و طول فضاهاهای آزاد شرایط زیر رعایت شوند:

$$f1 = f4 \quad (۲)$$

$$f2 = f3 \quad (۳)$$

$$t1 = t3 = f1 + f2 \quad (۴)$$

$$t2 = 2 \times f2(f1 + f2) \div (f1 - f2) \quad (۵)$$

هر المان اپتیکی دارای ماتریس ABCD مخصوص به خود است. ماتریس ABCD هر کدام از اجزای این سیستم پنهان‌ساز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

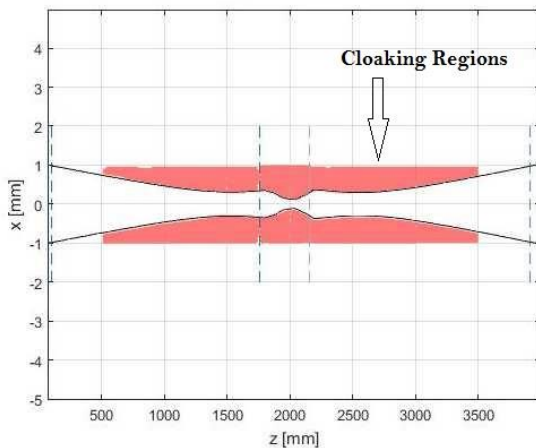
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (۶) \text{ عدسی نازک:}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷) \text{ فضای آزاد:}$$

با قرار دادن ماتریس ABCD مربوطه به جای هر کدام از عدسی‌ها و فضاهاهای آزاد بین آنها و اعمال ضرب ماتریسی، در نهایت به یک ماتریس ABCD  $2 \times 2$  نهایی دست می‌یابیم که معرف کل سیستم پنهان‌ساز ما می‌باشد که با استفاده از آن و به کمک شبیه‌سازی می‌توان رفتار پرتو گاوسی عبور کننده از سیستم پنهان‌ساز را مورد مطالعه قرار داد و نواحی نامرئی کننده را مشخص کرد. ماتریس ABCD معرفی شده برای سیستم پنهان‌ساز ایده‌آل به صورت زیر است [۲]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۸) \text{ سیستم پنهان‌ساز:}$$

که در آن  $L$  طول کل سیستم پنهان‌ساز و  $n$  ضریب شکست محیط دربرگیرنده سیستم (هوا) می‌باشند. دلیل معرفی این ماتریس این است که از آنجایی که یک پنهان‌ساز ایده‌آل باید محیط دربرگیرنده‌ی اطرافش را در حجم خود جایگذاری کند [۲]، این ماتریس دقیقاً ماتریس ABCD فضای آزاد (رابطه ۷) است. به این صورت که  $L = t$  می‌باشد که مشخص کننده طول فضای آزاد که در اینجا همان طول



شکل ۳: تغییرات اندازه کمر پرتو در طول سیستم پنهان ساز  
(محور z) - خط چین‌ها نمایانگر مکان عدسی‌های نازک می‌باشند،  
قسمت‌های رنگی نمایانگر نواحی نامرئی کننده می‌باشند.

لازم به ذکر است که تمامی نتایج با نتایج مرجع شماره ۲  
همخوانی کامل دارد.

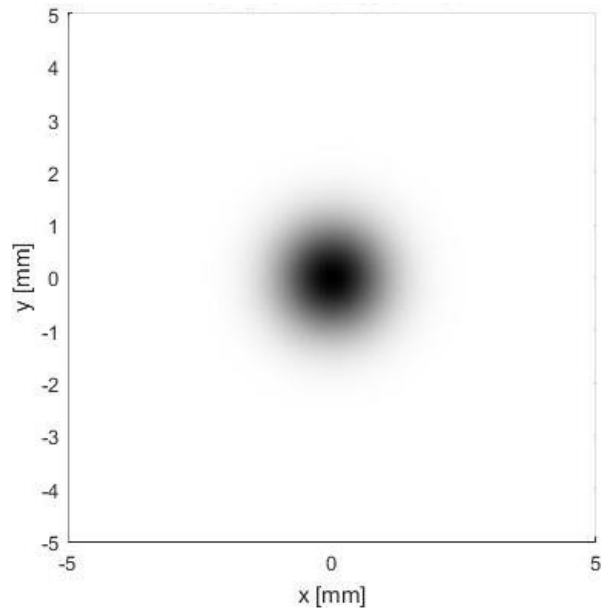
### نتیجه گیری

نظر به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان اینگونه نتیجه  
گرفت که اگر تحت یک زاویه پیرامحوری نسبت محور  
اپتیکی عبوری از چهار عدسی به پنهان ساز بنگریم، نواحی  
نامرئی کننده مانند حلقه‌ای اطراف محور اپتیکی را در بر  
گرفته است و نور به این نواحی نمی‌رسد. بنابراین هر جسمی  
که در این نواحی قرار بگیرد از دیده پنهان خواهد ماند.

### مرجع‌ها

- [1] G. Gbur, *Invisibility Physics: Past, Present, and Future*, Progress in Optics 58, 65 (2013).
- [2] J. S. Choi and J. C. Howell, *Paraxial ray optics cloaking*, Opt Express 22, 29465-29478 (2014).
- [3] U. Leonhardt, *Optical Conformal Mapping*, Science 312, 1777 (2006).
- [4] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, *Controlling Electromagnetic Fields*, Science 312, 1780 (2006).
- [5] B. Zhang, *Electrodynamics of transformation-based invisibility cloaking*, Light-Science and Applications 1, e32 (2012).

[۶] وردین، جوزف، *الکترونیک لیزر*، انتشارات دانشگاه صنعتی  
شریف، ۱۳۸۲.



شکل ۲(ب): موج خروجی از سیستم پنهان ساز

همانطور که مشاهده می‌شود موج خروجی دقیقاً با همان  
ابعاد و اندازه لکه‌ای که به سیستم پنهان ساز وارد شده بود،  
(۲ میلی‌متر) خارج شده است. بدین ترتیب به نظر می‌رسد  
موج گاوسی در طول این مسیر در فضای آزاد حرکت کرده  
و با هیچ المان اپتیکی خاصی برخورد نداشته است. البته  
لازم به ذکر است که اندازه لکه خروجی از شبیه‌سازی همین  
پرتو در فضای آزاد دقیقاً مطابق با لکه ورودی نبوده و به  
مقدار بسیار کمی در حدود ۰/۳ میلی‌متر افزایش داشت که  
این نیز به دلیل واگرایی حاصل از حرکت در فضای آزاد  
می‌باشد. بدیهی است که برای اجرای صحیح پنهان‌سازی،  
اندازه لکه ورودی به سیستم پنهان‌ساز باید کوچکتر از سطح  
مقطع عدسی شماره یک باشد.

آنچه که مهم است تحولاتی است که درون سیستم پنهان  
ساز برای پرتو نور روی می‌دهد. شکل ۳ بیانگر این تحولات  
است و تغییرات اندازه کمر پرتو را در طول راستای انتشار  
(محور z) که ۴۰۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است که نشان  
می‌دهد می‌توان نواحی پنهان ساز یا همان نواحی نامرئی  
کننده را مشاهده کرد.