# اندازه‌گیری ابیراهی ناکانونی جبهه‌موج با استفاده از تمام‌نگاری دیجیتالی محوری

مجید پناهی، احمد درودی*، پیمان سلطانی

گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

**چکیده- در این مقاله از تمام‌نگاری دیجیتالی محوری برای اندازه‌گیری ابیراهی ناکانونی جبهه‌موج استفاده شده است. با استفاده از تمام نگاری دیجیتالی محوری مکان جسم قابل اندازه گیری است. وجود ابیراهی ناکانونی سبب ایجاد خطا در فاصله‌یابی می شود. نشان می دهیم که با اندازه گیری میزان خطای فاصله‌یابی ابیراهی ناکانونی جبهه‌موج بدست می‌آید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از تمام-نگاری دیجیتالی محوری با نتایج حسگر جبهه‌موج هارتمن مقایسه می‌شود.**

کلید واژه- ابیراهی ناکانونی، تمام‌نگار، تمام‌نگاری دیجیتالی محوری، جبهه‌موج، حسگر هارتمن

# Measurement of wavefront defocus aberration by digital in-line holography

Majid Panahi, Ahmad Darudi*, and Peyman Soltani

Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan

Abstract- In this paper we used digital in-line holography to measure defocus aberration of wavefront. Object's position can be measured by digital in-line holography. Defocus aberration causes errors in the range finding. We showed that the range finding error can be measured by wavefront defocus aberration. Finally, we compared the results of in-line digital holography with the results obtained from Hartmann wavefront sensor.

Keywords: Defocus aberration, Hologram, Digital in-line holography, wavefront, Hartmann sensor

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]



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

## ۱- مقدمه

جهت دست‌یابی به یک سیستم اپتیکی با کیفیت مطلوب، اندازه‌گیری ابیراهی‌ها و به حداقل رساندن آن‌ها شرط اول است. تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ابیراهی سیستم‌های تصویرساز ارائه شده است که به روش‌های تداخل‌سنجی و غیر تداخل‌سنجی تقسیم می‌شوند [۱]. از جمله روش‌های غیر تداخلی و تداخلی می‌توان به ترتیب حسگر هارتمن و تمام‌نگاری غیر محوری دیجیتالی را نام برد. روش تمام‌نگاری محوری جهت اندازه‌گیری مکان جسم استفاده شده است. در این مقاله نشان می‌دهیم که ابیراهی ناکانونی با اندازه‌گیری خطای مکان‌یابی به روش تمام‌نگاری دیجیتال محوری قابل اندازه‌گیری است. جهت آزمون روش ارائه شده میزان ابیراهی ناکانونی توسط حسگر هارتمن اندازه گیری می‌شود [۲].

## ۲- تمام‌نگاری

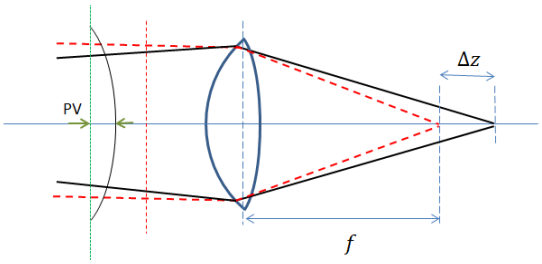
دنیس گابور در سال ۱۹۴۸ تمام‌نگاری را به عنوان روشی برای ثبت و بازسازی همزمان دامنه و فاز موج، ارائه داد [۳]. در تمام‌نگاری موج شیئی که موج پراکنده شده از جسم است با یک موج پس زمینه همدوس که موج مرجع نامیده می‌شود تداخل می‌کند و طرح تداخلی آن در یک فیلم حساس به نور ثبت می‌شود پس از ظهور فیلم با روشن کردن تمام نگار ثبت شده موج شیئی بازسازی می‌شود. در تمام‌نگاری محوری، امتداد انتشار موج مرجع و موج شیئی تقریبا در یک راستا هستند. با پیشرفت فن‌آوری، تمام‌نگارها توسط دوربین‌های CCD ثبت می‌شوند که این روش، تمام‌نگاری دیجیتال نام گرفته است و در آن بازسازی به روش عددی انجام می‌شود [۴]. در فرایندهای شبیه‌سازی و بازسازی تمام‌نگارهای دیجیتال از تبدیلات فوریه سریع(FFT) استفاده می‌شود. بازسازی تمام‌نگار ثبت شده با امواج تخت با استفاده از انتگرال فرنل-کیرشهوف به صورت زیر است [۵]:

$$U(x,y) \approx \frac{i}{\lambda}\iint H_0(X,Y)\frac{\exp\left(-ik\left|\vec{r}-\vec{R}\right|\right)}{\left|\vec{r}-\vec{R}\right|}dXdY \qquad (۱)$$

که در آن $(x,y)$ مختصات صفحه شیئی، $(X,Y)$ مختصات صفحه آشکار ساز، $H_0(X,Y)$ تابع عبور تمام-نگار و $\left|\vec{r}-\vec{R}\right|=\sqrt{(x-X)^2+(y-Y)^2+z^2}$ است که $z$ فاصله تا صفحه مشاهده است.

## ۳- ابیراهی ناکانونی

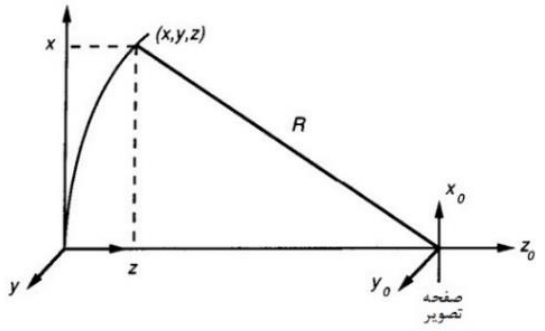
ابیراهی ناکانونی یکی از انواع ابیراهی‌های محوری است و زمانی رخ می‌دهد که منبع نقطه‌ای برای تولید نور موازی دقیقا روی محل کانون عدسی قرار نداشته باشد (شکل ۱).




شکل ۲: ابیراهی ناکانونی

با توجه به شکل ۲ اگر $R$ شعاع انحنای جبهه‌موج کروی باشد، برای $x$ و $y$ کوچک در مقایسه با $R$ و همچنین $z$ به اندازه کافی کوچک، معادله جبهه‌موج کروی می‌تواند به صورت زیر تخمین زده شود [۶]:

$$z=\frac{x^2+y^2}{2R} \qquad (۲)$$




شکل ۲: رابطه بین تصویر و مختصات دهانه خروجی

بنابراین توزیع جبهه‌موج کروی (اختلاف راه نوری) به صورت رابطه ۳ است:

$$W(x,y)=\frac{x^2+y^2}{2R} \qquad (۳)$$

حال مقدار ابیراهی ناکانونی را می‌توان با استفاده از رابطه ۴ به دست آورد:

$$(W_2-W_1)\times k=\Delta W\times k \qquad (۴)$$

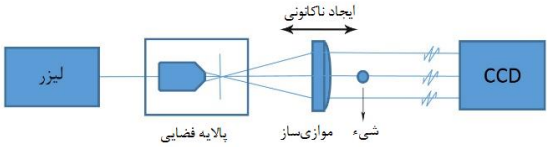


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

## ۴- چیدمان آزمایش و نتایج تجربی

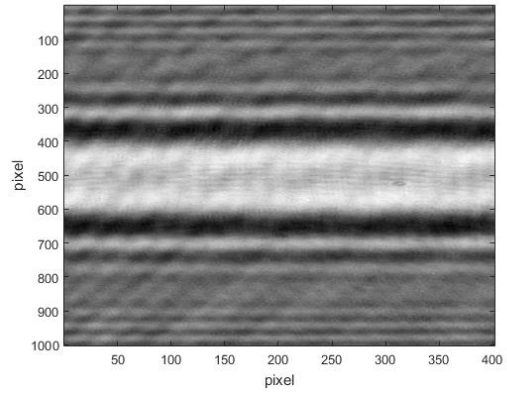
چیدمان مورد استفاده برای ثبت تمام‌نگارها در شکل ۳ نشان داده شده است. برای ثبت تمام‌نگارها از یک دوربین دیجیتال Canon (40D) بهره برده‌ایم و طول موج لیزر 532 nm است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است در چیدمان تجربی آزمایش برای ایجاد ناکانونی در جبهه‌موج کافیست لنز موازی‌کننده را در امتداد محور اپتیکی لنز اندکی جابجا کنیم.



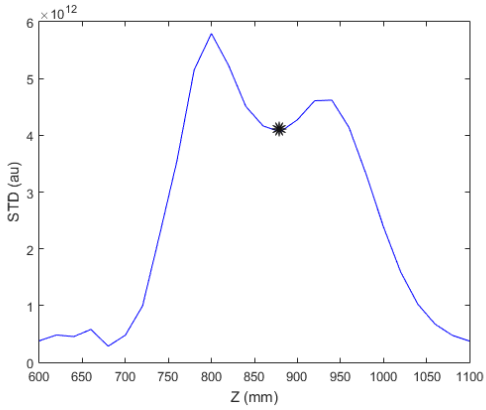

شکل ۳: طرحواره ایجاد عدم توازی در باریکه مرجع

در این جا یک سیم به جای جسم قرار دارد. برای تعیین محل دقیق جسم یک تمام‌نگار در توازی کامل نور ثبت می‌شود. جهت تشخیص توازی نور از حسگر هارتمن استفاده می‌شود. با استفاده از کدی که به روش FFT در نرم افزار Matlab نوشته شده است تابع موج جسم بازسازی شده که در این آزمایش توزیع شدت جسم مورد نظر است، به دست می‌آید. شکل ۴ نشان‌دهنده توزیع شدت تمام‌نگار برای یک فاصله مشخص است. از آنجایی که سیم کدر است انتظار می‌رود که شدت بر روی جسم در بازسازی یکنواخت باشد و این نکته به عنوان معیاری جهت تشخیص محل صحیح جسم استفاده می‌شود. جهت کمی کردن این موضوع، انحراف معیار شدت در محل جسم برای فواصل مختلف بازسازی استفاده می‌شود و مینیمم تغییرات آن یکنواختی شدت محل جسم را مشخص می‌کند. حال با رسم نمودار انحراف معیار برای توزیع شدت تمام‌نگار، محل جسم که محل صحیح آن است به دست می‌آید (شکل ۵). محل جسم با علامت ستاره مشخص شده است و در فاصله ۸۷۴ میلیمتری از صفحه دوربین قرار دارد.

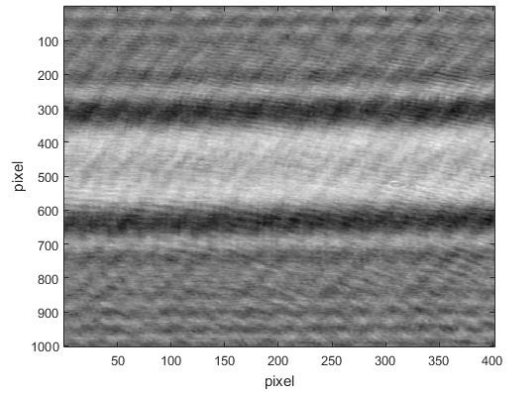
برای مطالعه تأثیر ناکانونی جبهه‌موج در فاصله‌یابی، بدون تغییر دادن محل جسم، نور را از حالت توازی خارج کرده و تمام‌نگار دیگری ثبت می‌شود. مانند قبل محل جسم در حالت ناکانونی موج مرجع به دست می‌آید. شکل ۶ نشان‌دهنده توزیع شدت تمام‌نگار برای حالت عدم توازی باریکه مرجع و شکل ۷ نمودار انحراف معیار این حالت است. محل جسم همان‌طور که در نمودار با علامت ستاره مشخص شده است، در این حالت در فاصله ۱۱۴۷ میلیمتری صفحه دوربین است.




شکل ۴: توزیع شدت تمام‌نگار در حالت توازی باریکه مرجع




شکل ۵: نمودار مقدار انحراف معیار در حالت توازی باریکه مرجع




شکل ۶: توزیع شدت تمام‌نگار در حالت عدم توازی باریکه مرجع

با استفاده از رابطه ۳ و ۴ مقدار ابیراهی ناکانونی ۱۰/۹ رادیان به دست می‌آید:

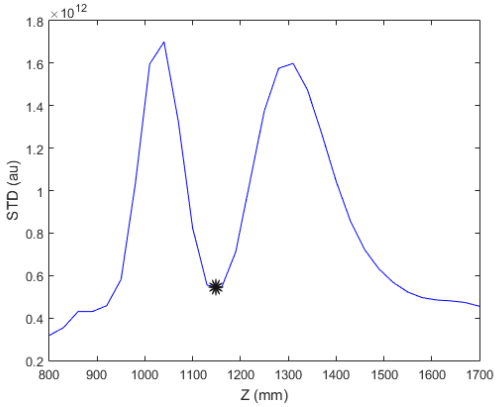
$$W_1 = \frac{2.85^2}{2\times 874} \quad \text{و} \quad W_2 = \frac{2.85^2}{2\times 1147}$$

$$\Delta W \times k = (W_2 - W_1)\times k = 10.9\, rad$$



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

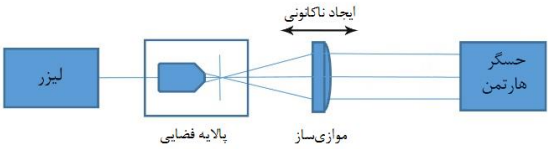
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]




شکل ۷: نمودار مقدار انحراف معیار در حالت عدم توازی باریکه مرجع

## ۱-۴- استفاده از حسگر هارتمن در محاسبه جبهه‌موج ابیراهی‌دار

حسگر هارتمن مورد استفاده در آزمایش ما حسگر هارتمن مدل HWSAP-20 شرکت پرتو افزار صنعت با آرایه‌ی روزنه ۲۰*۲۰ است. برای جلوگیری از اشباع دوربین حسگر، شدت باریکه لیزر را توسط یک فیلتر ND کم کرده و حسگر را در چیدمان تجربی به جای دوربین ثبت تمام‌نگارها قرار می‌دهیم. طرحواره این چیدمان در شکل ۸ نشان داده شده است.



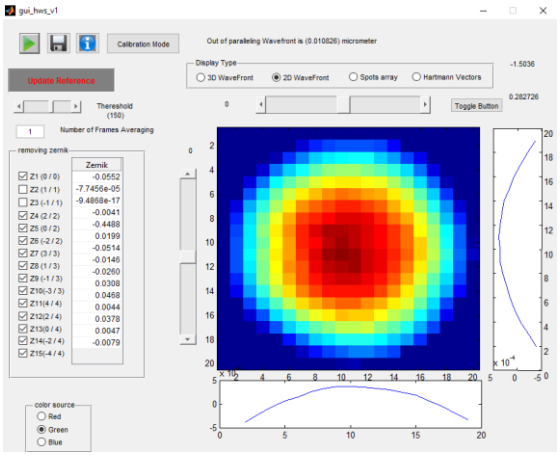

شکل ۸: طرحواره اندازه‌گیری ناکانونی جبهه‌موج توسط حسگر هارتمن

برای سنجش ابیراهی با استفاده از حسگر هارتمن ابتدا نیاز به ثبت یک مرجع است و در اینجا مرجع حالتی است که ناکانونی در جبهه‌موج ایجاد نشده است. پس از ثبت مرجع، با ایجاد ناکانونی در جبهه‌موج توزیع فاز آن ثبت می‌شود. شکل ۹ توزیع فاز ناکانونی اندازه‌گیری‌شده با استفاده از حسگر هارتمن را نشان می‌دهد.

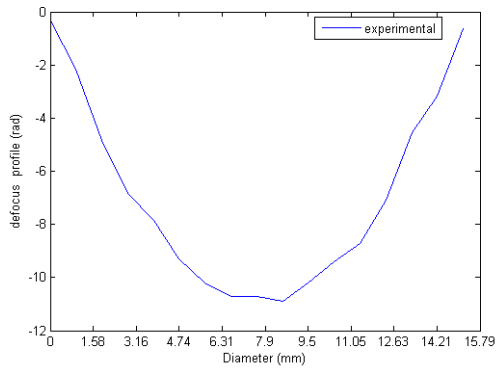
نمایه یک بعدی از توزیع فاز ناکانونی تجربی در شکل ۱۰ نشان داده شده است و مقدار ناکانونی ۱۱/۳ رادیان است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تمام‌نگاری دیجیتالی محوری برای اندازه‌گیری ابیراهی ناکانونی استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از حسگر هارتمن، مشهود




شکل ۹: توزیع فاز ناکانونی ثبت شده با استفاده از حسگر هارتمن




شکل ۱۰: نمایه یک بعدی ابیراهی ناکانونی در چیدمان حسگر هارتمن

است که نتایج تجربی اندازه‌گیری ابیراهی ناکانونی به روش پیشنهادی با آن مطابقت دارد. در اندازه‌گیری به روش تمام‌نگاری محوری ابیراهی ناکانونی ۱۰/۹ رادیان به دست آمد و در استفاده از حسگر هارتمن این ابیراهی ۱۱/۳ رادیان به دست آمده است که اختلافی در در حدود ۴ درصد با هم دارند. با توجه به تطابق نتایج می‌توان این مسئله را مطرح کرد که آیا سایر مرتبه‌های ابیراهی را نیز می‌توان با روش تمام‌نگاری محوری به دست آورد؟

## مراجع


[1] Tyson, Robert K. *Principles of adaptive optics*. CRC press, (2015).

[2] Malacara, Daniel, ed. *Optical shop testing*. Vol. 59. John Wiley & Sons, 2007.

[3] Gabor, D., Apparatus for producing images of small objects by photographic means. Patent, 1947.

[4] Schnars, U. and W. Jüptner, Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. Applied optics, 1994. 33(2): p. 179-181.

[5] Latychevskaia, T. and H.-W. Fink, Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms. Applied optics, 2015. 54(9): p. 2424-2434.

[6] Wyant, James C. "Basic wavefront aberration theory for optical metrology." Applied optics and optical engineering, (1992): 28-39.




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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]