

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



بررسى الكوريتمهاى انتقالفاز تحت تاثير منابع خطا

محمد خانجانی^۱، سیما حسینی^۱، مرتضی جعفری سیاوشانی^{۲٬۱}، هادی برزویی^۳، احسان احدی اخلاقی^۱

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی۴۵۱۳۷۶۶۷۳۱. ۲- دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران کد پستی ۱۱۱۵۵۹۱۶۱. ۳- گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، کد پستی ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷.

<u>Mohammadkhanjani@iasbs.ac.ir</u> <u>simahosseini@iasbs.ac.ir</u> <u>m.siavashani@sharif.edu</u> <u>h.borzouei@hsu.ac.ir</u> <u>e.a.akhlaghi@iasbs.ac.ir</u>

چکیده – در این مقاله پاسخ الگوریتمهای شاخص انتقالفاز تحت تأثیر سه نوع منبع خطا بررسی شده است. شدت تداخلی تحت خطاهای لرزش پله Nهای کمترین مربعات، هاریهاران، محیطی، نوسانات شدتی و عدم صحت گامهای جابهجایی فاز شبیهسازی شد. توزیع فاز با استفاده از الگوریتم و میانگین گیری به دست آمد. براساس نتایج شبیهسازیها، روشهای میانگین گیری و کمترین مربعات، بهترین صحت و دقت را دارا بودند.

كليد واژه- انتقالفاز، تداخلسنجي، دقت، منابع خطا، صحت

Investigation of phase-shift algorithms affected by error sources

Mohammad Khanjani¹, Sima Hosseini¹, Morteza Jafari Siavashani², Hadi Borzouei³, Ehsan Ahadi Akhlaghi¹

1- Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 4513766731, Iran.

2- Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran 111559161, Iran.

3- Department of Science engineering, Hakim Sabzevary University, Razavi Khorasan, 9617976487, Iran.

<u>Mohammadkhanjani@iasbs.ac.ir</u> <u>simahosseini@iasbs.ac.ir</u> <u>m.siavashani@sharif.edu</u> <u>h.borzouei@hsu.ac.ir</u> <u>e.a.akhlaghi@iasbs.ac.ir</u>

Abstract- In this paper, the responses of phase shift index algorithms have been studied under the various errors; the influence of environmental vibration, intensity fluctuations, and inaccuracies of phase shift steps. The phase distribution is obtained using least-squares, Hariharan, N-buckets, and averaging algorithms. Based on the results, the least-square and averaging have the best accuracy and precision.

Keywords: accuracy, error sources, interferometry, phase-shift, precision.

مقدمه

تداخلسنجی به عنوان یک روش نوری دقیق برای اندازه گیری پارامتراهای مختلف شناخته میشود. معمولا دادههای به دست آمده در این روش براساس دو روش انتقال فاز و تبدیل فوریه تحلیل میشود. در روش فوریه نتایج با استفاده از تحلیل یک توزیع شدت و در نظر گرفتن رفتار جمعی نقاط در فضای فرکانس به دست میآید [1]. در مقابل، روش انتقال فاز با استفاده از حداقل دو توزیع شدت برای هر نقطه از صفحه مشاهده، توزیع فاز را نتیجه میدهد است، در مقابل روش انتقال فاز دارای سرعت دادهبرداری بالاتری و دادههای هر نقطه مستقل از نقاط همسایه و تعداد نقاط صفحه مشاهده است [1–۳].

تا کنون الگوریتمهای مختلفی بر اساس روش انتقال فاز معرفی شده است که هر کدام بسته به شرایط دادهبرداری و نوع نمونه، قابل استفاده هستند [۴]. در این مقاله، دقت، صحت و سرعت الگوریتمهای مختلف انتقالفاز تحت شرایط نوفه و خطاهای محیطی مختلف بررسی شده است.

مبانی نظری

برای تحلیل دادهها به روش انتقالفاز، شدت تداخلی برای هر گام فازی ثبت میشود و با استفاده از الگوریتم مناسب، توزیع اختلاف فاز به دست میآید. رابطه شدت تداخلی در روش انتقالفاز به صورت،

 $I_i(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos \left[\Delta \phi(x,y) + \delta_i\right] (1)$

است. در این رابطه، I میانگین شدت دو باریکه مرجع و نمونه، I دامنه شدت مدوله شده و $\Delta \phi(x, y)$ اختلاف فاز باریکههای بازوی نمونه و مرجع، مقادیر مجهول هستند و اختلاف فازگام iام نسبت به حالت اولیه است [۴]. با مشخص بودن شدت برای هر گام و استفاده از الگوریتم مناسب، اختلاف فاز تداخلی به دست میآید.

مبانی شبیهسازی

پاسخ الگوریتمهای مختلف تحلیل فاز به انواع خطاها، توسط شبیه سازی فریزهای تداخلی بررسی شده است. تداخل نگاشتها در شرایط وجود خطاهای تصادفی و سیستماتیک، ثبت و سپس توسط الگوریتمهای کمترین مربعات، هاریهاران، Nپله و میانگین گیری پردازش شدهاند [۴].

الگوریتم کمترین مربعات: این الگوریتم حداقل به ۳ تداخلنگاشت نیاز دارد. در شبیه سازی های صورت گرفته از ۱۰ تغییر فاز با گام های نابرابر استفاده شده است.

الگوریتم هاریهاران: در این روش، ۵ تداخلنگاشت با گامهای فازی آ $\delta_i = i \frac{\pi}{2}$ فاز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می شود،

$$\Delta \phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(l_2 - l_4)}{2l_3 - l_5 - l_1} \right]. \tag{(7)}$$

الگوریتم Nپله: این الگوریتم متناسب با تعداد گامهای تغییرفاز، گام فازی به مقدار $\delta_i = \frac{(i-1)2\pi}{N}$ را اختیار می کند. توزیع اختلاف فاز از رابطهی،

$$\Delta \phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\mathbb{N} = -\sum_{i=1}^{N} I_i \sin\left(i\frac{2\pi}{N}\right)}{\mathbb{D} = \sum_{i=1}^{N} I_i \cos\left(i\frac{2\pi}{N}\right)} \right]$$
(7)

قابل محاسبه است که در شبیهسازی انجام شده N برابر ۹ در نظر گرفته شده است.

الگوریتم میانگین گیری: این الگوریتم به مانند الگوریتم N مرتبه M مرتبه این تفاوت که تعداد اندازه گیریها m مرتبه افزایش مییابد و بر این مقادیر میانگین گیری می شود. توزیع فاز از رابطه (۴) به دست می آید،

$$\Delta \phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{j=1}^{m} \mathbb{N}_j}{\sum_{j=1}^{m} \mathbb{D}_j} \right]. \tag{(f)}$$

در این روش N = 9 و m = 3 فرض شدهاند.

تاثیر سه خطای انتقالفاز، پایداری دامنه و خطای لرزش بر الگوریتمهای معرفی شده بررسی شده است.

خطای انتقال فاز: در روش انتقال فاز، ممکن است مقدار هر گام دقیقا برابر با مقدار مورد انتظار نباشد و مقدار ثابتی بیشتر یا کمتر باشد که میتواند ناشی از سیستم تغییردهنده فاز مانند جابه جاگر پیزوالکتریک باشد.

خطای پایداری دامنه (منبع نور): خطای ناشی از عدم ثبات دامنه منابع نوری به صورت یک مقدار تصادفی بر روی یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است،

$$E'_0 = E_0 + E_{\text{error}}.$$
 (9)

 $E_{
m error}$ در این رابطه E_0 دامنه مورد انتظار با مقدار یک و E_0 مقدار خطای دامنه تصادفی است.

خطای لرزش: لرزش چیدمان نوری باعث تغییر اختلاف راه نوری و اضافه شدن یک مقدار تصادفی به فاز میشود.

نتايج

شبیهسازی و تحلیل توسط رایانهای با مشخصات (R) Intel(R در نرمافزار متلب Core(TM) i7-6700HQ و IGGB RAM در نرمافزار متلب انجام شدهاند. از آنجایی که در الگوریتمهای انتقالفاز، تحلیل مستقل از اطلاعات نقاط همسایه انجام میشود، نتایج تنها برای یک نقطه دادهبرداری مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی خطای تصادفی محاسبات یک میلیون مرتبه تکرار شد. مقدار دامنه در حالت پایدار برابر الگوریتمها خطاهای تصادفی شبیهسازی شده برای همه الگوریتمها یکسان در نظر گرفته شد. دامنه خطاها براساس مقادیر محتمل شرایط آزمایشگاهی انتخاب شدهاند و بر این اساس پاسخ الگوریتمهای مختلف به دست آمده است. شکل ۱ نمونهای از اختلاف نتایج ناشی از الگوریتم کمترین مربعات نسبت به مقدار ایدهآل شبیهسازی را برای ۱۰۰ مربعات نسبت به مقدار ایدهآل شبیهسازی را برای مید.



شکل ۱: اختلاف نتایج ناشی از الگوریتم کمترین مربعات نسبت مقدار ایده آل شبیه سازی بر حسب راه نوری در حضور: (الف) خطای لرزش با بیشینه ۲۰ نانومتری، (ب) خطای پایداری دامنه با بیشینه ۲۰،۲ (ج) خطای انتقال فاز به میزان ۲۰۰/ به ازای هر گام، (د) همزمان خطاهای بخشهای (الف)، (ب) و (ج) در شبیه سازی.

شکل ۱ مشخص می سازد با افزودن خطا تصادفی پایداری دامنه به مقدار ۲۰ درصد تأثیر بسیار بیشتری نسبت به دیگر پارامترهای مورد بررسی دارد و در مرحله بعد لرزش چیدمان اپتیکی تاثیر از مرتبه نصف دامنه ارتعاش سیستم دارد.



شکل ۲: میانگین اختلاف ارتفاع سطح بازسازی شده و انحراف از معیار آن برای تمامی نقاط توسط الگوریتمها در حضور: (الف) خطای لرزش چیدمان اپتیکی به ازای بیشینه مقادیر ۲٫۰ نانومتر (نقاط پایداری دامنه به ازای بیشینه مقادیر ۲۰۰۲ (نقاط آبی)، ۲۰٫۲ (نقاط قرمز) و ۲٫۰ (نقاط سبز). (ج) خطای انتقال فاز برای مقادیر ۳٫۳٫۲ (آبی)، ۶٫۹٫۶ (قرمز) و ۲۰۰ (سبز) به ازای هر انتقال فاز. (د) بیشینه خطاهای بخشهای (الف)، (ب) و (ج).

در ادامه نتایج بررسی صحت و دقت پاسخ الگوریتمها نسبت به حالات مختلف خطاها ارائه شده است. شکل ۲ مقدار خطای الگوریتمهای تحلیل را برای سه نوع خطا نمایش میدهد. خطوط رنگی معرف اندازه دامنه خطای اعمال شده در شبیهسازی است، به طوری که خطوط آبی نشانگر کمترین مقدار و خطوط سبز معرف بیشترین مقدار خطای تکرارپذیری و پراکندگی نتایج تحلیلهای انجام شده را نشان میدهد. در این حالت دامنه تغییرات کمتر از ۴۰ نانومتر به دست آمد. نتایج نشان میدهد روش کمترین مربعات دارای بهترین دقت و صحت است.

الگوریتمها از نظر زمان پردازش نیز با هم مقایسه شدند که زمان پردازش الگوریتمهای کمترین مربعات، هاریهاران، Nپله و میانگین گیری به ترتیب برابر ۶٬۹۹، ۰٬۰۲۲، ۳۳،۰ و ۰٬۳۳ به دست آمد.

نتيجهگيرى

در این مقاله به بررسی پاسخ الگوریتمها کمترین مربعات، هاریهاران، ۸ پله و میانگین گیری در شرایط حضور خطاهای انتقال فاز، لرزش چیدمان اپتیکی و پایداری دامنه از نظر دقت، صحت و سرعت پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد، الگوریتم کمترین مربعات در شرایط وجود انواع خطا صحت و دقت بهتری دارد و در مقابل دارای کمترین سرعت محاسبات است. هرچند الگوریتم هاریهان بهترین عملکرد را نسبت به خطای انتقال فاز نشان داده است اما نسبت به خطاهای تصادفی به خصوص خطای پایداری دامنه بیشترین تاثیرپذیری را داشته است.

مرجعها

- [1] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fouriertransform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", JosA, Vol. 72, No. 1, pp. 156-160, 1982.
- [2] K. E. Perry and Jr. J. McKelvie, "A comparison of phase shifting and fourier methods in the analysis of discontinuous fringe patterns", Opt. and Las. in Eng. Vol. 19, pp. 269-284, 1993.
- [3] E. B. Li, X. Peng, J. Xi, J. F. Chicharo, J. Q. Yao, and D. W. Zhang, "Multi-frequency and multiple phase-shift sinusoidal fringe projection for 3D profilometry", Vol. 13, pp. 1561-1569, 2005.
- [4] Malacara, Daniel (ed.), *Optical shop testing*, John Wiley & Sons, pp. 547-666, 2007.

اعمال شده است. با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۲(الف))، الگوریتمهای میانگین گیری و کمترین مربعات دارای صحت بیشتر و الگوریتمهای Nپله و هاریهاران دارای صحت كمترى تحت نوفه لرزش چيدمان اپتيكي هستند. همچنین در این بررسی، روش Nپله و هاریهاران دارای کمترین دقت در مقایسه با دیگر الگوریتمها هستند. در مقابل، برای خطای ناشی از نوفههای شدت (شکل ۲(ب))، الگوریتم Nیله دارای بیشترین صحت و روش هاریهاران دارای کمترین صحت است. در این حالت دقت الگوریتمها از یک مرتبه به دست آمده است. در بررسی خطای انتقال فاز (شکل ۲(ج))، الگوریتم هاریهاران بهترین صحت و دقت را داراست و پس از آن الگوریتم میانگین گیری قرار دارد. با این حال، میزان خطای به دست آمده به طور قابل ملاحظهای کمتر از خطای ناشی از دیگر منابع خطا است، به طوری که می توان به راحتی از اثر این خطا چشم پوشی کرد. شکل ۲(د) نتایج حالتی را نمایش میدهد که تمامی خطاها وجود دارد. در این حالت الگوریتم Nپله بیشترین صحت را داراست و دقت همه الگوریتمها از یک مرتبه است. به طور کلی می توان نتیجه گرفت، روشهای میانگین گیری و کمترین مربعات، به نسبت بهترین صحت و دقت را دارا بودند.



شکل ۳: تکرار ۱۰ بار داده گیری برای اندازه گیری میانگین اختلاف ارتفاع سطح بازسازی شده و انحراف از معیار آن برای تمامی نقاط و پاسخ الگوریتمها به خطای لرزش چیدمان اپتیکی به بیشینه مقدار ۲۰ نانومتر، خطای پایداری دامنه به بیشینه مقدار ۲٫۲ و خطای انتقال فاز برای ۲۰۲ به ازای هر تغییر فاز.

در ادامه، برای بررسی تکرارپذیری و میزان اعتبار نتایج به دست آمده، حالتی که تمامی خطاها بیش ترین مقدار فرض شده خود را دارا هستند، ۱۰ مرتبه تکرار شد. شکل ۳ میزان