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

مطالعه دقت اندازه‌گیری و تعیین مشخصات زبری سطح با استفاده از روش‌های فوریه و جابجایی فازی

یزدان رشیدی، محمد حسین مهدیه،محمدرضا جعفر فرد،

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

در این مقاله با استفاده از روش‌های جابجایی فازی و تبدیل فوریه، مشخصات سطوح با ناهمواری‌های مشخص تعیین شده است و خطای اندازه‌گیری هر یک از روش‌ها تعیین و مقایسه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که برای سطوح با تغییرات ناهمواری کند ، روش تبدیل فوریه و برای سطوح با تغییرات ناهمواری سریع ، روش جابجایی فازی (الگوریتم هاریهاران) مناسب‌ترین روش است.

کلید واژه-ناهمواری سطح، تداخل سنجی،تبدیل فوریه،جابه‌جایی فاز

Investigation of accuracy in characterization of rough surfaces by Fourier and Phase shifting techniques

Yazdan Rashidi, Mohammad Hossein Mahdieh and Mohammad Reza Jafarfard

Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the measurement error of the Phase-shifting and Fast Fourier Transform (FFT) methods are obtained for different surface samples. According to the results, for surfaces in which the roughness changes are slow, FFT method is more accurate and for other roughness surfaces Phase-shifting technique is more appropriate.

Keywords: surface roughness, interferometry, Phase-shifting, Fast Fourier Transform

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

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

مقدمه

اندازه‌گیری ناهمواری و داشتن اطلاعاتی از صافی سطح، همواره یکی از موارد مهم در بخشی از فعالیت‌های صنعتی است. مطالعات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است و روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ناهمواری سطح ابداع شده، که در دو بخش روش‌های غیرتماسی(اپتیکی) و تماسی تقسیم شده‌اند [۱]. در مقایسه با روش‌های تماسی، روش‌های اپتیکی دارای مزیت‌های بی‌نظیر، ازجمله عدم تخریب نمونه (بدلیل غیر تماسی بودن)، کم‌هزینه بودن و سرعت بالا در اندازه‌گیری می‌باشند. تداخل‌سنجی یک روش مناسب و قدرتمند در بین روش‌های اپتیکی، برای اندازه‌گیری ناهمواری سطح، محسوب می‌گردد[۲, ۳]. اندازه‌گیری ناهمواری سطح با روش تداخل‌سنجی در دو مرحله اجرا می‌گردد. مرحله اول به دست آوردن یک یا چند طرح تداخلی مناسب و مرحله دوم آنالیز طرح‌های تداخلی ثبت شده (در مرحله اول) با توجه به روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف است. در این مقاله از روش‌های تبدیل فوریه و جابه‌جایی فازی با الگوریتم سه‌تایی، چهارتایی و هاریهاران (Hariharan) [۴] استفاده شده است و دقت این روش‌ها با توجه به نوع ناهمواری سطح ، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مبانی نظری

در این قسمت ریاضیات روش‌های تبدیل فوریه و جابجایی فازی و نحوه‌ی استخراج اطلاعات فازی شرح داده می‌شود.

۱- تبدیل فوریه

رابطه‌ی ریاضی الگوی تداخلی ثبت شده حاصل از برهم‌نهی دو موج مرجع (E_r) و موج شئی (E_s) تحت زاویه θ به صورت رابطه زیر است[۵].

$$I=|E_r+E_s|^2=|E_r|^2+|E_s|^2 +2|E_r|.|E_s|\cos[q_x x+\varphi(x,y)+\varphi_0] \quad (۱)$$

که در رابطه (۱)، $\varphi(x,y)$ مربوط به اطلاعات فازی نمونه، q_x فرکانس فضایی الگوی تداخلی ثبت شده و φ_0 اختلاف فاز مربوط به پس زمینه است که باید به صورت جداگانه محاسبه شود. با اجرای تبدیل فوریه از رابطه (۱) در فضای فرکانسی سه طیف مشاهده می‌شود. با توجه به فرکانس فضایی این سه طیف از یکدیگر جدا شده‌اند. حال اگر یکی از طیف‌های تصاویر مزدوج، با فیلترگذاری مناسب جدا شود و سپس از آن تبدیل فوریه معکوس گرفته شود رابطه زیر نتیجه می‌شود[۵].

$$i=2|E_r|.|E_s|.\exp\{i[q_x x+\varphi(x,y)+\varphi_0]\} \quad (۲)$$

اگر مراحل بالا را بدون نمونه انجام دهیم اختلاف فاز مربوط به پس زمینه به‌صورت رابطه‌ی زیر به دست می‌آید[۵].

$$i_0=2|E_r|.|E_s|.\exp\{i[q_x x+\varphi_0]\} \quad (۳)$$

با توجه به روابط بدست آمده و با استفاده از رابطه زیر می‌توان اطلاعات فازی که همان اطلاعات ناهمواری سطح نمونه است را بدست آورد[۵].

$$\varphi(x,y)=\arg(\frac{i}{i_0}) \quad (۴)$$

۲- جابجایی فازی

در این روش برای بدست آوردن اطلاعات فازی حداقل نیاز به سه الگوی تداخلی با اختلاف فاز مشخص است.که معمولاً این اخلاف فاز از نظر تجربی با پیزو الکتریک ایجاد می‌شود[۶]. با توجه به تعداد الگوهای تداخلی ثبت شده، این روش دارای الگوریتم‌های مختلفی است. به عنوان

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

مثال در الگوریتم سه‌تایی نیاز به سه طرح تداخلی است. اگر اختلاف فاز طرح‌های تداخلی بصورت $(\delta_1=-\alpha,\delta_2=0,\delta_3=\alpha)$ باشد روابط ریاضی الگوهای تداخلی به‌صورت زیر خواهد بود[۷]:

$$I_1(x,y)=I'(x,y)+I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)-\alpha] \quad (۵)$$

$$I_1(x,y)=I'(x,y)+I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)] \quad (۶)$$

$$I_1(x,y)=I'(x,y)+I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)+\alpha] \quad (۷)$$

در روابط بالا $I'(x,y)=I_s(x,y)+I_r(x,y)$ شدت میانگین (جمع شدت موج شئی و موج مرجع) و $I''(x,y)=2\sqrt{I_s(x,y)I_r(x,y)}$ است. حال با استفاده از رابطه زیر می‌توان اطلاعات فازی را محاسبه کرد[۷].

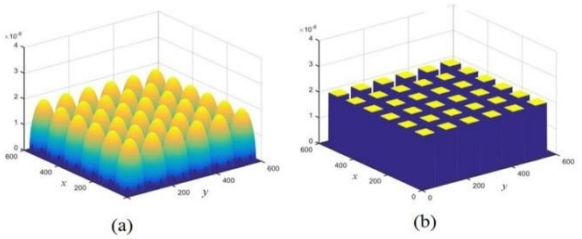
$$\varphi(x,y)=\tan^{-1}\{[\frac{1-\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)}]\frac{I_1-I_3}{2I_2-I_1-I_3}\} \quad (۸)$$

روابط ریاضی دیگر الگوریتم‌های روش جابجایی فازی مشابه همین الگوریتم هستند.

شبیه سازی

۱-نمونه

عوامل بسیاری در دقت روش‌های اپتیکی تأثیر گذار هستند. نوع ناهمواری سطح یکی از مهم‌ترین عوامل در دقت روش‌های اپتیکی است که می‌توان با انتخاب مناسب‌ترین روش، دقت اندازه‌گیری را بالا برد. با توجه به این نکته دو سطح مختلف با شکل و نوع ناهمواری متفاوت مورد بررسی قرا گرفته و شبیه سازی شده است. در شکل (۱-a) نوع ناهمواری با تغییرات ناهمواری کند و در شکل (۱-b) نوع ناهمواری با تغییرات تند(آنی) یا پله‌ای نشان داده شده‌اند. در شکل (۱) صفحه xy مربوط به صفحه نمایش است که اعداد روی محور x و y تعداد پیکسل‌های صفحه نمایش است. هر پیکسل به‌صورت یک مربع با اندازه ضلع $3\mu m$ (بصورت نوعی) است. محور Z مربوط به ارتفاع ناهمواری نمونه است.



شکل۱: نمونه‌های شبیه سازی شده.

۲- محاسبه نسبت سیگنال به نویز و خطای اندازه‌گیری

به دلیل وجود همیشگی نویز در کارهای آزمایشگاهی، از تابع توزیع پواسون برای شبیه سازی مقدار نویز استفاده کرده‌ایم. در محاسبات این مقدار نویز را به الگوهای تداخلی ثبت شده که به‌صورت ماتریس‌های $n\times n$ هستند، را اضافه کرده‌ایم. با توجه به این نکته، می‌توان مقدار نسبت سیگنال به نویز سیستم را به‌صورت رابطه زیر تعریف کنیم.

$$SNR=\frac{\sum_{i,j} I_{ij}}{\sum_{i,j} N_{ij}} \quad (۹)$$

که در رابطه (۹)، I_{ij} و N_{ij} به ترتیب ماتریس مربوط به الگوهای تداخلی و نویز هستند.

برای بدست آوردن بهترین روش اندازه‌گیری، محاسبه خطای اندازه‌گیری بهترین راه است. با توجه به رابطه زیر می‌توان خطای اندازه‌گیری هر کدام از روش‌های اندازه‌گیری را محاسبه کرد. در رابطه‌ی زیر Z_{ij} و Z'_{ij} به ترتیب ماتریس‌های سطح شبیه سازی شده و سطح اندازه‌گیری شده هستند.

$$ERROR=\frac{\sum_{i,j}\left|Z_{ij}-Z'_{ij}\right|}{\sum_{i,j} Z_{ij}} \quad (۱۰)$$

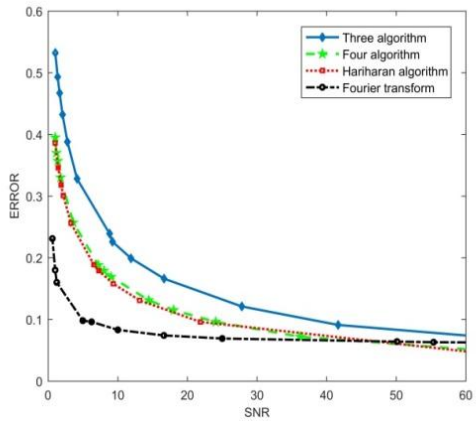
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

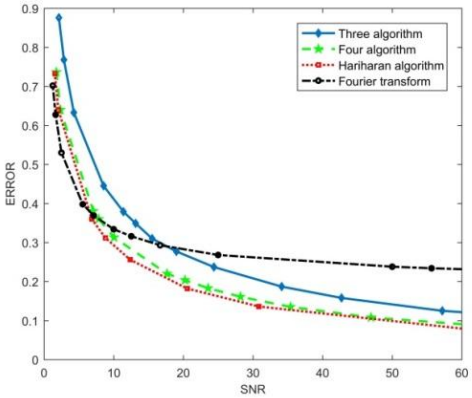
نتیجه‌گیری

برای سطوح مختلف شبیه سازی شده با بیشینه ارتفاع ناهمواری ۳۰ نانومتر (به عنوان یک نمونه)، مقدار خطای اندازه‌گیری برای الگوریتم‌های سه‌تایی، چهارتایی و هاریهاران در روش جابه‌جایی فازی و همچنین روش تبدیل فوریه بر حسب مقدار نسبت سیگنال به نویز ترسیم شده و در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار نسبت سیگنال به نویز ، کاهش مقدار خطای اندازه‌گیری الگوریتم‌های جابه‌جایی فازی بیشتر از روش تبدیل فوریه است. همچنین الگوریتم هاریهاران در بین دیگر الگوریتم‌های روش جابه‌جایی فازی دارای بیشترین دقت است.

با توجه به شکل (۲) که مربوط به سطوحی با تغییرات ناهمواری کند است، می‌توان نتیجه گرفت که دقیق‌ترین روش برای این نوع ناهمواری‌ها روش تبدیل فوریه است. همچنین با توجه به شکل (۳) که مربوط به سطوحی با تغییرات ناهمواری تند می‌باشد ملاحظه می‌شود که روش جابه‌جایی فازی الگوریتم هاریهاران و چهارتایی دارای دقت بیشتری نسبت به روش تبدیل فوریه است.



شکل ۲: مقدار خطای اندازه‌گیری بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای سطح شکل (a-۱).



شکل ۳: مقدار خطای اندازه‌گیری بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای سطح شکل (b-۱).

مرجع‌ها

1. Lin, C.S., et al., *Measurement of Surface Profile and Surface Roughness of Fibre-Optic Interconnect by Fast Fourier Transform.* Metrology and Measurement Systems, 2017. **24**(2): p. 381-390.
2. Chen, L.-C., et al., *3-D surface profilometry using simultaneous phase-shifting interferometry.* Optics Communications, 2010. **283**(18): p. 3376-3382.
3. Guo, H. and P.S. Huang. *Absolute phase retrieval for 3d shape measurement by Fourier transform method*. in *Proceedings of the SPIE*. 2007.
4. Hecht, E., *Optics, 4th.* International edition, Addison-Wesley, San Francisco, 2002. **3**.
5. Tayebi, B., et al., *Reduced-phase dual-illumination interferometer for measuring large stepped objects.* Optics letters, 2014. **39**(19): p. 5740-5743.
6. Hariharan, P., B. Oreb, and T. Eiju, *Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm.* Applied optics, 1987. **26**(13): p. 2504-2506.
7. Malacara, D., *Optical shop testing*. Vol. 59. 2007: John Wiley & Sons.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

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