

Görgül Kip Ayrıştırması Kullanılarak Optik Faz Kırınımında Hassasiyet İyileştirilmesi

Sensitivity Improvement in Optical Phase Diffraction Using Empirical Mode Decomposition

Enes Ataç, Mehmet Salih Dinleyici
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye
enesatac@iyte.edu.tr, salihdinleyici@iyte.edu.tr

Özetçe —Faz kırınımı, şeffaf dielektrik film karakterizasyonunda kullanılan güçlü bir özelliktir. Kamerada ölçülen kırınım deseni, çok-ince filmlerin optik özelliklerini (kırılma indisi, kalınlık, vb.) belirlemek için sayısal olarak hesaplanan kırınım modelleri ile eşleştirilerek değerlendirilir. Ancak elde edilen kırınım verisi lineer olmayan ve durağan olmayan bir sinyal olmakla kalmayıp aynı zamanda mikron ölçeğinde varyasyonlar sergilemekte ve dolayısıyla ölçüm doğruluğunu sınırlamaktadır. Bu nedenle, faz nesnelere optik özellikleri hakkında bilgi elde etmek için kırınım verilerinde minimumlardaki kaymaları ve genlikteki sapmaları belirlemek zordur. Bu çalışmada, düzlemsel dalga tabanlı yakın alan faz kırınımı verisine Görgül Kip Ayrıştırması (GKA) uygulayarak sistemin kalınlık hassasiyetinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. GKA, sinyaldeki uzaysal frekans bileşenleri nedeniyle oluşan ani değişikliklere karşı çok hassas olduğundan, film kalınlığındaki nano ölçekli değişimler daha iyi gözlemlenebilir ve tespit edilebilir hale gelmektedir. Deneysel çıktılar ve sayısal simülasyonlar, ayrıştırmanın klasik eşleştirme tekniğine kıyasla kalınlık hassasiyetini artırdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—görgül kip ayrıştırması, faz kırınımı, kalınlık hassasiyeti

Abstract—Phase diffraction is a potent property used in transparent dielectric film characterization. The measured diffraction pattern on the camera is evaluated by matching numerically computed diffraction patterns to determine the optical properties of the ultra-thin films (refractive index, thickness, etc.). However, the obtained diffraction data is not only a non-linear and non-stationary signal but also exhibits micron-scale variations, thus limiting the measurement accuracy. Therefore, it is challenging to identify shifts in minima and deviations in amplitude on diffraction data to extract information about the optical properties of phase objects. In this study, it is aimed to improve the thickness sensitivity of the system by applying Empirical Mode Decomposition (EMD) to plane wave-based near-field phase diffraction data. Since EMD is very sensitive to abrupt changes in the signal due to the spatial frequency components, the nanoscale variations in the film thickness become more observable and detectable. Experimental outputs and numerical simulations show that the decomposition increases the thickness sensitivity comparing the classical matching technique.

Keywords—empirical mode decomposition, phase diffraction, thickness sensitivity

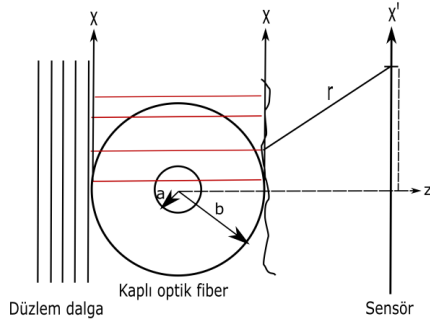
979-8-3503-4355-7/23/\$31.00 ©2023 IEEE

I. GİRİŞ

Dielektrik filmlerinin optik özelliklerinin (kırılma indisi ve kalınlık) tam ve doğru bir şekilde ölçülmesi fiber optik tabanlı sensörlerin hassasiyetini etkilediğinden kritik bir öneme sahiptir [1], [2]. Bu nedenle, daha iyi optik performans elde etmek için film özelliklerinin hassas ölçümü esastır. Faz kırınım yöntemi de etkin ölçüm yöntemlerinden bir tanesidir [3]. Pratik ve tahribatsız bu yöntemde, kamerada elde edilen kırınım deseninin şeffaf filmin kalınlığına göre değişimine bakılarak optik özellikler tahmin edilebilmektedir. Ancak elde edilen desen lineer olmamasının yanı sıra çok hızlı uzaysal frekans değişimleri göstermektedir. Film kalınlığı kullanılan dalga boyunun belirli bir katından daha küçük olmaya başladığında, kırınım verisinde klasik eğri uydurma yöntemleriyle ayrt edilmesi güç değişimler ortaya çıkmaktadır [4], [5]. Bu yüzden, pratik olması sebebiyle düzlemsel dalga kullanılarak gerçekleştirilen faz difraksiyon düzeneklerinde kalınlık tahmini dalga boyunun yaklaşık olarak yarısı ile sınırlıdır [6].

Görgül Kip Ayrıştırması (GKA) lineer ve durağan olmayan sinyaller için tasarlanan etkili bir ayrıştırma yöntemidir [7]. Literatürde birçok sinyal analizi türüne yaygın olarak uygulandığı görülmektedir. Bunlardan bazıları yüzey topografisinin analizi [8], fiber optik tabanlı sensörlerde hata düzeltilmesi [9] görüntü işleme uygulamaları [10], [11], biyomedikal sinyal işleme uygulamaları [12] ve makine arıza teşhisidir [13]. Ayrıştırma, sinyal sıfır ortalama genliğe sahip frekans modülasyonu bileşenlerini temsil eden Özel Kip Fonksiyonlarına (IMF) ayrılarak ifade edilir. Her bir IMF sinyaldeki osilasyonu temsil etmektedir. İlk IMF en yüksek frekanslı bileşene karşılık gelirken, en son IMF en düşük frekans bileşenine sahip osilasyondur. GKA'nın en büyük avantajlarından biri ise ayrıştırmanın sinyalin kendisinden elde edilmesidir. Bu yüzden, ayrıştırma adaptif olarak nitelendirilmektedir. Şeffaf bir objeden faz kırınımı sonrası elde edilen kırınım deseninin de birçok yüksek frekans bileşeni içerdiği ve buradaki kalınlık bilgisini nanometrik düzeyde çıkarmanın zor olduğu düşünülürse, GKA hassasiyeti arttırmada yardımcı bir yöntem olabilir.

Bu çalışmada, deneysel olarak ölçülen düzlemsel dalga



Şekil 1: Kaplanmış fiberden geçen düzlemsel dalganın paraksial ışın yöntemi ile izlenmesi ve kırınım geometrisi

faz kırınım desenine GKA uygulayarak şeffaf dielektrik filmin nano düzeydeki kalınlık tahmin hassasiyetinin artırılması amaçlanmıştır. Dedektörde elde edildikten sonra GKA uygulanmış kırınım deseni, teorik olarak hesaplanan GKA uygulanmış kırınım desenleriyle eşleştirilerek kalınlık tahmini yapılmıştır. Kalınlıkların yarattığı değişimler yüksek frekanslı bileşenler içinde kaybolduğundan dolayı ikinci veya üçüncü IMF'leri değerlendirmek, nano düzeydeki değişimleri gözlemlenebilir hale getirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, GKA kullanılan faz kırınım yöntemi klasik eşleştirme yönteminden daha iyi sonuç vermiştir. Günümüz teknolojisinde film kalınlıklarının her geçen gün daha da azaldığı düşünülürse, bu ayırıştırma yönteminin optik özellik karakterizasyonunda kullanılması fayda sağlayacaktır.

II. MATERYAL VE METOT

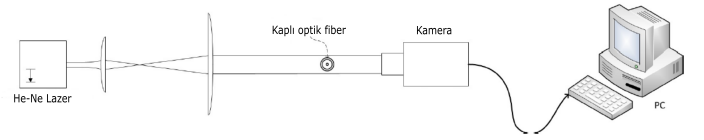
A. Teorik yaklaşım ve deneysel prosedür

Nümerik hesaplamalar için kullanılan matematiksel model Şekil-1'de verilmiştir. Yollanan düzlemsel dalga şeffaf film kaplı fiber boyunca alacağı optik yollardan dolayı farklı faz gecikmelerine maruz kalarak bir faz yüzeyi oluşturacaktır [14]. Faz yüzeyindeki her bir nokta Huygens prensibine göre sanal bir noktasal kaynak olarak düşünülerek sensördeki herhangi bir P noktasındaki kırınımın yakın alan aşağıdaki formüle göre hesaplanır [15]:

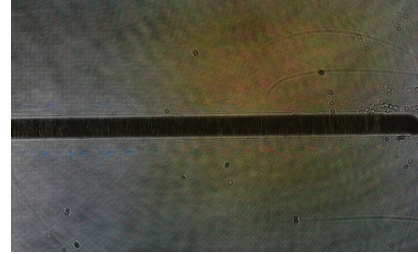
$$U'(P) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{x'=-\infty}^{\infty} \left(ik(1 + \cos\theta) - \frac{\cos\theta}{r} \right) \frac{e^{ikr}}{r} U \quad (1)$$

$\cos(\theta) = \frac{x''-x'}{z}$ eğilim faktörünü, U ise kaplı fiber sonundaki eş faz yüzeyini temsil etmektedir. Sensörde oluşacak kırınım deseni (yoğunluk deseni) ise bu ifadenin karesi alınarak $I = |U'(P)|^2$ bulunur.

Deneysel prosedür Şekil-2 de verilmiştir. Düzenekteki polimer film kaplaması çok tabakalı katman yöntemi (LbL) ile yapılmıştır [16]. He-Ne lazerden elde edilen Gauss dağılımına sahip ışık, ışın genişletici yardımıyla düzlemsel dalga haline getirilmiştir. Faz objesi olan şeffaf dielektrik film kaplı fiberden kademeli olarak kırılan düzlemsel dalga serbest uzayda yol katedecektir. Düzenek sonunda bulunan kamerada oluşacak kırınım deseni kaydedilip bilgisayarda işlenmektedir. GKA uygulanan desen teorik olarak hesaplanan sonuçlarla eşleştirilerek kalınlık bilgisi çıkarılmaktadır.



Şekil 2: Kaplanmış optik fiberin film kalınlığını tahmin etmek için ölçüm düzeneği



Şekil 3: Faz objesinde kırınıma uğrayan düzlemsel dalganın kamera tarafından kaydedilmiş kırınım deseni

B. Veri seti

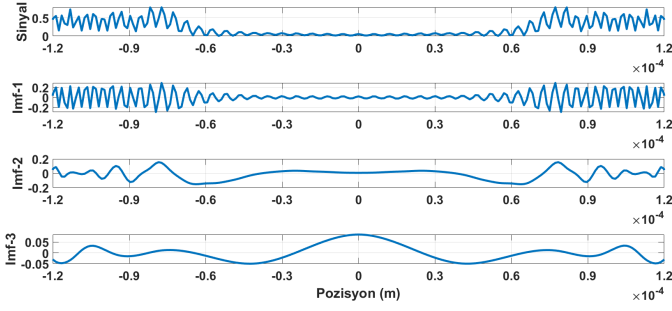
Veri seti nümerik simülasyonları ve deneysel ölçümleri içermektedir. Kullanılan fiber çekirdek ve kılıfının kırılma indisleri sırasıyla 1.4623 ve 1.4591'dir. Yarıçapları ise 4.15 μm ve 62.5 μm dir. Kaplama için poliakrilik asit (PAA) ve polietilenin (PEI) karışımı kullanılmıştır. Oluşan karışımın kırıcılık indisinin 1.5 olduğu tahmin edilmektedir. Kameranın piksel büyüklüğü 1.12 μm 'dir. Yakın alan kırınım yöntemi kullanıldığından kaplı optik fiber ile kamera arasındaki mesafe 600 μm olarak ayarlanmıştır. Kamerada elde edilen 130 nm kaplanmış optik fiberden kırınım deseni Şekil-3'te verilmiştir. Her bir kesitten alınan veri o hat boyunca oluşan kırınım desenini vermektedir.

C. Görgül kip ayırıştırması

GKA, doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyalleri bant sınırlı salınım bileşenlerinin doğrusal kombinasyonu açısından temsil eden bir sinyal işleme tekniğidir. Fourier veya dalgacık dönüşümüne dayalı olağan yöntemlerle üstesinden gelinmesi zor olan ve genellikle özel çözümler gerektiren sinyallerde çok verimli olabilmektedir. Bant sınırlı salınım bileşenleri ekstremum noktaları ve ortalama zarf ile ilgili temel iki özelliği sağlama durumuna göre özsel kip fonksiyonları olarak ifade edilmektedir [17]. Birbirlerine küresel olarak dik olan bu fonksiyonlar eleme işlemi ile elde edilmektedir. Bu eleme bazı durdurma kriterleri karşılanana kadar sinyal üzerinde doğrusal olmayan bir operatörü yineler [18]. Ana sinyalimiz $\omega(k)$ için ayırıştırma işleminin genel temsili eşitlik (2)'deki gibidir:

$$w(k) = \sum_n w_n(k) + r(k) \quad (2)$$

Eşitlikte $w_n(k)$ özsel kip fonksiyonlarını, $r(k)$ ise kalıntı bileşenini temsil etmektedir. Ayırıştırma algoritması aşağıdaki gibidir:



Şekil 4: 130 nm kaplı fiberin kırınım deseni ve ilk üç özsel kip fonksiyonları

- 1) Orijinal sinyalin yerel maksimumlarını ve yerel minimumlarını bulunur.
- 2) Ekstrem noktaların kübik spline interpolasyonu ile üst ve alt zarfı oluşturulur.
- 3) Üst ve alt zarfın ortalaması hesaplanır ve ardından bu ortalamayı orijinal sinyalden çıkarılır.

$$m(k) = \frac{e_{max}(k) + e_{min}(k)}{2} \quad (3)$$

$$h(k) = w(k) - m(k) \quad (4)$$

- 4) $h(k)$ 'nin IMF olup olmadığı kontrol edilir. IMF ise $w_1(k)$ olarak kaydedilir, değilse ilk aşamaya dönülerek prosedür tekrarlanır.
- 5) Bulunan ilk IMF sinyalden çıkarılır ve kalıntı fonksiyonu bulunur.

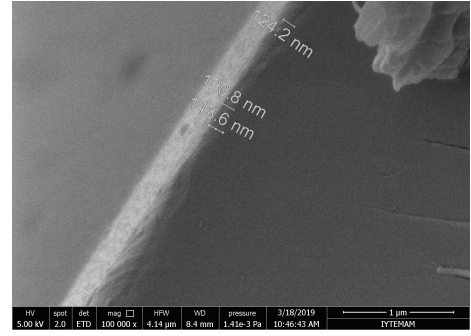
$$r(k) = w(k) - w_1(k) \quad (5)$$

Bu prosedür, nihai kalıntı sinyali monoton bir fonksiyon olana kadar diğer IMF'leri oluşturmak için tekrarlanır.

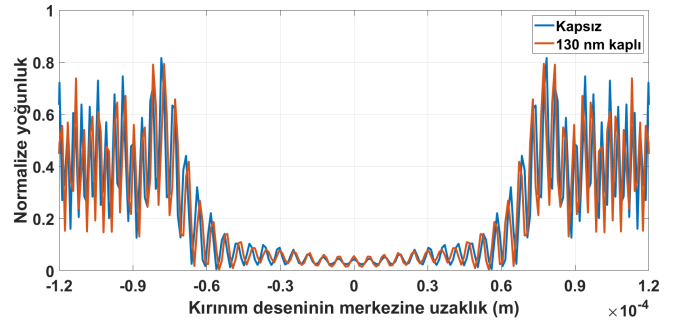
Şekil-4'te 130 nm kalınlığında polimer kaplanmış optik fiberin simülasyon sonucunda bulunmuş IMF'leri yer almaktadır. Birkaç kademeli eleme daha makul ve gerçekçi sonuçlar yarattığından ilk üç IMF gösterilmiştir [19]. Birinci IMF yüksek frekans bileşenlerini içerirken, sonraki IMF'ler daha düşük frekanslı bileşenleri içermektedir. Bu ayrıştırma sayesinde yüksek frekanslı bileşenler arasında kaybolan bilgi çıkarılabilmektedir.

III. SONUÇLAR

Bu kısımda GKA uygulanmış faz kırınım deseninin etkin sonuçlar ortaya koyduğu gösterilmiştir. Deneysel olarak elde edilmiş ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarıyla eşleştirilerek dielektrik filmin kalınlığı tahminlenmeye çalışılmıştır. Kalınlık tespiti deneylerinde kırıcılık indisi bilinen kaplamalar kullanıldığından kırınım desenini etkileyecek tek faktör kaplama kalınlığıdır. Simülasyonlar MATLAB programında gerçekleştirilmiştir. Filmlerin kaplama homojenliği göz önünde bulundurularak 3 farklı kalınlıktaki fiber örnek olarak seçilmiştir. Bunlar kapsız, 65 nm kaplı ve 130 nm kaplı fiberlerdir. Uygulanan yöntemden elde edilen sonuçlar tahribatlı bir yöntem olan Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak doğrulanmıştır (Şekil-5).



Şekil 5: SEM'de elde edilmiş ortalama 130 nm kaplı fiber resmi



Şekil 6: Kapsız ve 130 nm kaplı fiberlerin simülasyon sonucu elde edilmiş kırınım deseni farkları

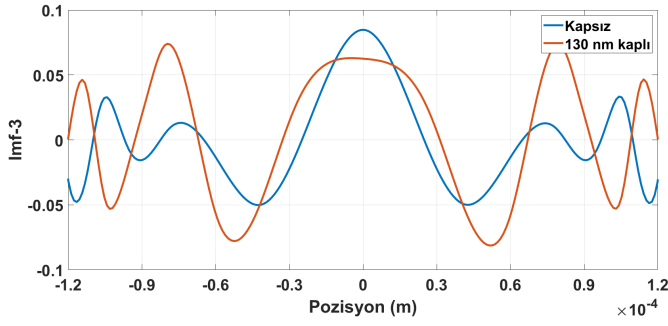
Şekil-6, kapsız ve 130 nm kaplı fiberlerin kırınım deseni sonuçlarını göstermektedir. Film kalınlığı, kullanılan dalga boyunun beşte biri kadar olduğundan desenler arası farklılıklar ayırt etmek için yeterli değildir. Hem genlikteki değişimler hem de minimumlardaki kaymalar eşleştirme esnasında hassasiyeti çok düşürmektedir. Dolayısıyla sonuçların doğruluğu sınırlanmaktadır. Bu yüzden elde edilen kırınım desenine GKA uygulanması kalınlık bilgisinin çıkarılabilmesi için faydalı olacaktır.

Şekil-7'de, GKA uygulanmış kapsız ve 130 nm kaplı fiberlerin kırınım desenlerinin üçüncü derece özsel kip fonksiyonları verilmiştir. Bir önceki figürün aksine, desenler arasında gözle görülebilir farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bunun başlıca sebebi düşük frekanslı bileşenlerde kalınlık değişiminde ötürü gerçekleşen sapmaların yüksek frekanslı bileşenler arasında kaybolmasıdır. GKA sayesinde bu sapmalar daha kolay tespit edilebilir ve eşleştirilebilir hale getirilmektedir. Şekil-8' de GKA uygulanmış 130 nm kaplı fiberin teorik sonucu ile ölçüm sonucu eşleştirilmesi görülmektedir. Eşleştirmedeki gerçekleşen hata miktarına göre kalınlık tahmininde bulunulmuştur.

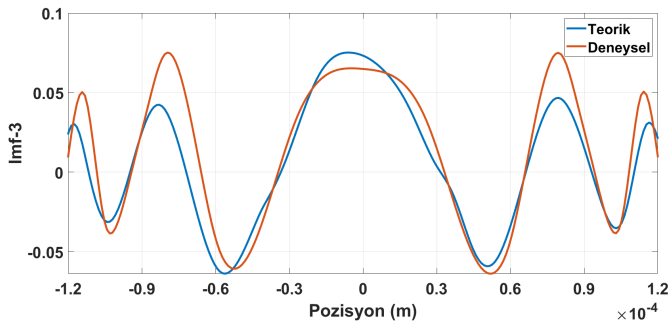
Farklı yöntemler uygulanarak elde edilmiş film kalınlık ortalamaları (μ_i) sonuçları Tablo-1'de verilmiştir. Faz kırınım

TABLO I: Farklı metotlara dayalı film kalınlığı tahminleri

Metot	Fiber-1	Fiber-2	Fiber-3
GKA uygulanmamış faz kırınımı (nm)	$\mu_1=0$	$\mu_2=86$	$\mu_3=154$
GKA uygulanmış faz kırınımı (nm)	$\mu_1=0$	$\mu_2=70$	$\mu_3=136$
SEM (nm)	$\mu_1=0$	$\mu_2=65$	$\mu_3=130$



Şekil 7: Kapsız ve 130 nm kaplı fiberlerin görgül kip ayrıştırılması ile elde edilmiş üçüncü derece özsel kip fonksiyonları



Şekil 8: 130 nm kaplı fiberin üçüncü derece özsel kip fonksiyonu: teorik ve deneysel eşleşmesi

yönteminin GKA ile kombinasyonu ile oluşturulan sistem SEM sonuçlarıyla örtüşen değerler ortaya koymuştur. GKA kullanılarak yapılan tahminlerin 10 nm'lik aralıkta hata sapmaları gösterdiği görülürken GKA kullanılmadan yapılan tahminler daha büyük hata sapmalarına sahiptir. Kullanılan film kalınlıklarının çok küçük olduğu düşünüldüğünde, GKA'nın mevcut kullanılan faz kırınımı metodunu iyileştirdiği ve hassasiyeti arttırdığı görülmektedir. Minimumlardaki kaymalar ve genlikteki değişimler incelendiğinde tahminlenebilecek en düşük kalınlık hassasiyeti ise 50 nm'dir. Piyasada kullanılan mevcut fiberler ile gerçekleştirilen sensörler ele alındığında, daha düşük kaplama kalınlıklarında, dielektrik filmde geçen faz gecikmesine maruz kalan dalganın, fiberden ve havadan geçen dalgaya oranı küçüldüğünden desenler arası farklar birbirlerine çok yaklaşmaktadır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada şeffaf dielektrik filmlerin karakterizasyonunda kullanılan klasik faz kırınımı yöntemine GKA uygulandığında kalınlık tahmin hassasiyetinin iyileştirildiği gösterilmiştir. Kamerada elde edilen kırınım verisi lineer olmayan ve durağan olmayan sinyal olduğundan model tabanına dayalı olmayan GKA tekniği tercih edilmiştir. Daha sonra bu veri özsel fonksiyonlarına ayrıştırılarak düşük frekanslı bileşenleri incelenmiştir. Film kalınlığındaki değişim sebebiyle oluşan genlikteki sapmaları ve minimumlardaki kaymaları düşük frekanslı bileşenler yarattığından, GKA bu metrikleri özellikle üçüncü derece IMF'de ayırt edici ve gözlemlenebilir hale

getirmiştir. Bu sayede daha kesin tahminlerde bulunulabilmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar SEM sonuçlarıyla kıyaslanarak doğrulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] S. K. Mishra and B. D. Gupta, "Surface plasmon resonance-based fiber-optic hydrogen gas sensor utilizing indium-tin oxide (ito) thin films," *Plasmonics*, vol. 7, pp. 627–632, 2012.
- [2] V. Mishra, M. Lohar, and A. Amphawan, "Improvement in temperature sensitivity of fbg by coating of different materials," *Optik*, vol. 127, no. 2, pp. 825–828, 2016.
- [3] M. T. Tavassoly, A. Darudi, H. R. Khalesifard, and S. M. R. S. Hosseini, "Applications of fresnel diffraction from phase objects," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection II: Applications in Production Engineering*, vol. 4399. SPIE, 2001, pp. 98–106.
- [4] E. Ataç and M. S. Dinleyici, "Nanoscale curved dielectric film characterization beyond diffraction limits using spatially structured illumination," *Optical Fiber Technology*, vol. 58, p. 102267, 2020.
- [5] M. T. Tavassoly, I. M. Haghighi, and K. Hassani, "Application of fresnel diffraction from a phase step to the measurement of film thickness," *Applied optics*, vol. 48, no. 29, pp. 5497–5501, 2009.
- [6] Ç. Ekici and M. S. Dinleyici, "A practical approach for optical characterization of a film coated on the optical fiber," *Optical Fiber Technology*, vol. 36, pp. 382–386, 2017.
- [7] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 454, no. 1971, pp. 903–995, 1998.
- [8] Z. Zhang, Y. Zhang, and Y. Zhu, "A new approach to analysis of surface topography," *Precision Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 807–810, 2010.
- [9] M. K. Saxena, S. J. Raju, R. Arya, R. B. Pachori, S. Ravindranath, S. Kher, and S. M. Oak, "Empirical mode decomposition-based detection of bend-induced error and its correction in a raman optical fiber distributed temperature sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 5, pp. 1243–1252, 2015.
- [10] A. Linderhed, "Image empirical mode decomposition: A new tool for image processing," *Advances in Adaptive Data Analysis*, vol. 1, no. 02, pp. 265–294, 2009.
- [11] E. Tunçer, B. O. Olcay, and M. Z. Ünlü, "Handwritten character recognition using empirical mode decomposition applied writing movements," in *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [12] E. Izi, M. A. Ozdemir, R. Sadighzadeh, and A. Akan, "Arrhythmia detection on ecg signals by using empirical mode decomposition," in *2018 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [13] Q. Du and S. Yang, "Application of the emd method in the vibration analysis of ball bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 6, pp. 2634–2644, 2007.
- [14] A. Sabatyan and M. T. Tavassoly, "Application of fresnel diffraction to nondestructive measurement of the refractive index of optical fibers," *Optical Engineering*, vol. 46, no. 12, pp. 128 001–128 001, 2007.
- [15] K. G. Makris and D. Psaltis, "Huygens–fresnel diffraction and evanescent waves," *Optics Communications*, vol. 284, no. 6, pp. 1686–1689, 2011.
- [16] L. Zhang, H. Liu, E. Zhao, L. Qiu, J. Sun, and J. Shen, "Drying and nondrying layer-by-layer assembly for the fabrication of sodium silicate/tio2 nanoparticle composite films," *Langmuir*, vol. 28, no. 3, pp. 1816–1823, 2012.
- [17] D. Kim and H.-S. Oh, "Emd: A package for empirical mode decomposition and hilbert spectrum," *R J.*, vol. 1, no. 1, p. 40, 2009.
- [18] G. Rilling and P. Flandrin, "One or two frequencies? the empirical mode decomposition answers," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 56, no. 1, pp. 85–95, 2007.
- [19] M. Peel, G. Pegram, and T. McMahon, "Empirical mode decomposition: improvement and application," in *Proc. Int. Congress Modelling Simulation*, vol. 1. Citeseer, 2007, pp. 2996–3002.