



A novel approach based on harmonic analysis in angular velocity measurement with open-loop fiberoptic gyroscopes

İsa Navruz*^{ID}, Fikret Arı^{ID}, Kaan Yücel^{ID}, Fatma Kübra Çetinkaya^{ID}

Ankara University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Golbaşı, Ankara, 06830, Turkey

Highlights:

- Sensitive angular velocity measurement
- Extended measurement range
- Cost effective fiberoptic gyroscope

Graphical/Tabular Abstract

Fiber optic gyroscopes are optoelectronic technology products that are sensitive to angular velocity. In this study, a cost-effective open loop optical fiber gyroscope configuration is proposed, which can accurately measure the angular velocity of rotating objects. By performing a harmonic analysis of the signal at the gyroscope output, a novel angular velocity model that correlate the angular velocity of rotation with high accuracy is presented. Using this model in an open-loop fiber gyroscope, it has been shown that angular velocity can be measured at a wider measuring range with higher measurement sensitivity.

Keywords:

- Sagnac effect
- Angular velocity
- Rotation
- Fiberoptic
- Interferometer

Article Info:

Research Article
Received: 23.06.2017
Accepted: 17.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416497

Acknowledgement:

This research has been supported by Ankara University Scientific Research Projects Coordination Unit, Project Number: 15Ö0443007, 2016

Correspondence:

Author: İsa Navruz
e-mail: inavruz@ankara.edu.tr
phone: +90 312 203 3300 /1779

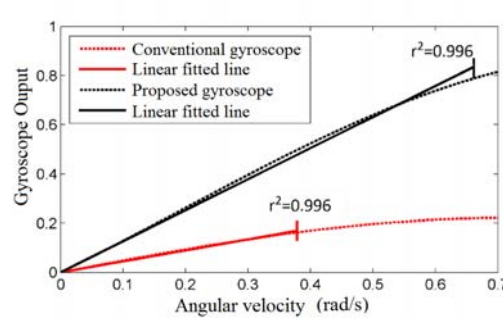


Figure A. Gyroscope output signal versus angular velocity obtained by numerical calculation

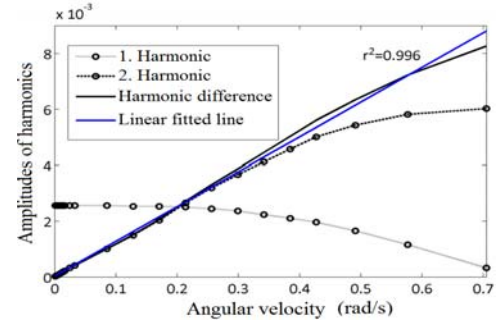


Figure B. Gyroscope output signal versus angular velocity obtained by experimental data

Purpose: This paper has multiple purposes. The main purpose is to present a novel open loop fiber optic gyroscope design to more accurately measure the angular rotation speed in a wider measuring range. Other objectives are to perform time and frequency domain analysis of the fiberoptic gyroscope, to determine the relationship between the first and second harmonics changing with angular velocity and to develop a low cost and uncomplicated gyroscope design for experimental studies.

Theory and Methods: Harmonic analysis of the gyroscope demonstrates that the 1st and 2nd harmonics show periodic changes with the circular velocity. By deriving the difference of harmonics, a highly accurate output signal associated with angular velocity and can be generated. A more precise angular velocity measurement can be performed in a wider dynamic measurement range using the obtained gyroscope signal. Analysis and testing of the presented model is simulated in Matlab software. Furthermore, the proposed fiber gyroscope system has been successfully installed to obtain real-time measurements.

Results: Both the graphs generated from the simulation studies and the experimentally obtained data clearly demonstrate the gyroscopic properties overlapping each other. All results clearly show that the proposed model increases the dynamic range of the gyroscope and its sensitivity to angular velocity. In the experimental measurements performed within the 0 to 0.7 rad/s angular velocity measurement range, the smallest angular velocity that can be measured is $5 \cdot 10^{-4}$ rad/s and the corresponding 1st harmonic amplitude is -93.5dB.

Conclusion: The studies presented in this paper contribute to the development of a cost effective gyroscope. The proposed design method increases the measurement accuracy and range of the open loop fiberoptic gyroscope.



Açık çevrim fiberoptik jiroskoplar ile açısasal hız ölçümünde harmonik analize dayalı yeni bir yaklaşım

İsa Navruz*^{ID}, Fikret Arı^{ID}, Kaan Yücel^{ID}, Fatma Kübra Çetinkaya^{ID}

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara, 06830, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Hassas açısasal hız ölçümü
- Genişletilmiş ölçüm aralığı
- Düşük maliyetli fiberoptik jiroskop

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.06.2017

Kabul: 17.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416497

Anahtar Kelimeler:

Sagnac etkisi,
açısasal hız,
dönme,
fiberoptik,
girişimölçer,
jiroskop

ÖZET

Fiberoptik jiroskoplar açısasal dönmeye duyarlı optoelektronik teknoloji ürünleridir. Bu çalışmada, dönen nesnelerin açısasal dönüş hızını çok hassas olarak ölçebilen düşük maliyetli bir açık çevrim fiberoptik jiroskop tasarımı önerilmiştir. Jiroskopun dedektör çıkışında üretilen işaretin harmonik analizi yapılarak, açısasal dönüş hızını yüksek doğrulukta ilişkilendiren yeni bir model sunulmuştur. Bu model kullanılarak, açık çevrim bir fiber jiroskopta açısasal hızın daha geniş ölçüm aralığında daha yüksek ölçüm duyarlılığı ile ölçülebileceği gösterilmiştir. Sunulan modelin analizi ve testi Matlab yazılım ortamında benzetimlerle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tasarlanan fiber jiroskop düzeneği gerçek zamanlı ölçümler almak üzere başarıyla kurulmuş ve jiroskopun geniş bir ölçüm aralığında açısasal hız duyarlılığı deneysel olarak doğrulanmıştır. Hem benzetim çalışmalarından hem de deneysel olarak elde edilen verilerden üretilen grafikler, birbirleriyle örtüşen jiroskop karakteristikleri sunmaktadır. Diğer taraftan tüm sonuçlar, önerilen modelin jiroskopun dinamik ölçüm aralığını ve açısasal hız duyarlılığını artırdığını açıkça ortaya koymaktadır.

A novel approach based on harmonic analysis in angular velocity measurement with open-loop fiberoptic gyroscopes

H I G H L I G H T S

- Sensitive angular velocity measurement
- Extended measurement range
- Cost effective fiberoptic gyroscope

Article Info

Research Article

Received: 23.06.2017

Accepted: 17.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416497

Keywords:

Sagnac effect,
angular velocity,
rotation,
fiberoptic,
interferometer,
gyroscope

ABSTRACT

Fiber optic gyroscopes are optoelectronic technology products that are sensitive to angular velocity. In this study, a cost-effective open loop optical fiber gyroscope configuration is proposed, which can accurately measure the angular velocity of rotating objects. By performing a harmonic analysis of the signal at the gyroscope output, a novel angular velocity model that correlate the angular velocity of rotation with high accuracy is presented. Using this model in an open-loop fiber gyroscope, it has been shown that angular velocity can be measured at a wider measuring range with higher measurement sensitivity. Analysis and testing of the presented model is simulated in Matlab software. Furthermore, the proposed fiber gyroscope system has been successfully installed to obtain real-time measurements and, its sensitivity to angular velocity has been experimentally tested over a wide measurement range. Both the graphs generated from the simulation studies and the experimentally obtained data clearly demonstrate the gyroscopic properties overlapping each other. On the other hand, all results clearly show that the proposed model increases the dynamic range of the gyroscope and its sensitivity to angular velocity.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: inavruz@ankara.edu.tr, fari@eng.ankara.edu.tr, kaanyucel0@gmail.com, f.kubracetinkaya@gmail.com / Tel: +90 312 203 3300 / 1779

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dönme hassasiyetinin önemli olduğu, kara, deniz ve hava ve hatta uzay taşıtlarındaki seyrüsefer (navigasyon) sistemlerinde ve hareketli parçaların dönme mekanizmalarının kontrolünde jiroskoplardan yararlanılır. Optoelektronik teknolojilerin gelişmesi ile birlikte son yıllarda fiberoptik jiroskoplara olan ilgi artarak devam etmektedir. Askeri ve özellikle uzay taşıtlarında kritik bir aygıt olarak karşımıza çıkan fiberoptik jiroskopların, bugünlerde ticari bir ürün olarak pek çok sektörde pazarı hızla büyümektedir.

Fiberoptik jiroskoplarda hassas açısal hız ve konum ölçümünün temelini, dönme hareketi esnasında zıt yönlerde ilerleyen iki ışın demeti arasında meydana gelen faz kayması oluşturur. Işığın faz girişimine sebep olan bu olay Sagnac etkisi olarak da bilinir. Lazerler ile böyle bir faz girişiminden ölçüm yapabilmeyi amaçlayan girişimölçer fikri çok daha erken yıllarda atılmasına rağmen, bu alandaki ilk çalışma, ışığın fiberoptik kablolar ile kılavuzlanabildiği 1970'li yılların ortalarında sergilenmiştir [1]. Jiroskoplarda optik fiberlerin kullanılabilmesinin gösterildiği bu çalışmanın ardından, optik jiroskop alanındaki çalışmaların seyri değişmiştir. Bu süreçte, çeşitli fiberoptik jiroskop tasarımları geliştirilmiş ve her biri için özel kullanım alanları geliştirilmiştir. Fiberoptik jiroskop tasarımları arasında; Halka Lazer (Ring Laser) [2, 3], Kapalı Çevrim (Closed-Loop) [4-6], Açık Çevrim (Open Loop) [7-9] ve Mikro-Elektromekanik Sistemli (MEMS) [10, 11] jiroskoplar en çok göze çarpanlardır. Ancak, sağladığı avantajlar nedeniyle bu alanda yürütülen ve günümüze kadar uzanan çalışmalarda genellikle açık çevrim ve kapalı çevrim jiroskop konfigürasyonları araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Bu araştırmaların ortak hedefi, jiroskop boyutlarının küçültülmesi [12, 13], maliyetinin düşürülmesi [14-16], ölçüm hassasiyetinin ve/veya dinamik ölçüm aralığının artırılması olmuştur [17, 18].

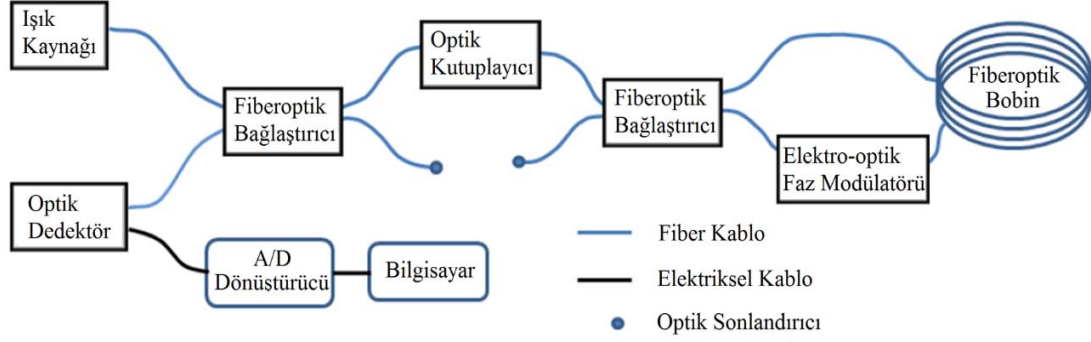
Jiroskop konfigürasyonlarından biri olan açık çevrim fiberoptik jiroskoplar, daha az elektro-optik ve elektronik donanım içermesi, düşük maliyet, yüksek hızda veri okuma kabiliyeti, daha küçük boyutlu olması ve ısınma sorunu olmaması gibi sahip olduğu özellikler nedeniyle önemli avantajlar sunmaktadır. Kapalı çevrim tipi fiberoptik jiroskoplar, açık çevrim tipi jiroskoplara göre geniş bir dinamik ölçüm aralığında daha hassas ve doğrusal ölçüm çıktısı sunabilirler. Ancak bu tip bir jiroskop tasarımı, optik ve elektro-optik donanımlara ilave olarak kilitlemeli yükselteç [5, 17] ile sayısal işaret işleyebilen elektronik donanımlar ve yazılımlar [13, 19] gerektirecektir. Bu durumda jiroskop maliyeti artabileceği gibi onun fiziksel boyutlarının artması da kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca yüksek frekanslarda analog/sayısal dönüştürücünün uygulamada getireceği zorluk, sayısal elektronik bileşenlerin ölçüm hızını sınırlaması, ısınma ve enerji tüketiminin daha fazla olması gibi olumsuzluklar da kapalı çevrim tipi fiberoptik jiroskoplar için üstesinden gelinmesi gereken problemler

arasındadır. Kapalı çevrim jiroskop donanımlarına göre daha az elektro-optik ve elektronik bileşen içeren açık çevrim jiroskoplar, sahip oldukları önemli avantajlara karşın çıkış işaretinin açısal hız ile ilişkisinin yaklaşık doğrusal olduğu sınırlı bir dinamik ölçüm aralığında işlevini yerine getirebilirler. Bu nedenle daha yüksek açısal hız ölçümü gerektiren uygulamalarda yetersiz kalmaktadırlar. Eğer açık çevrim bir jiroskopun doğrusal ölçüm çıktısı üretebilen dinamik ölçüm aralığı genişletilebilirse, yüksek derecelerde açısal hız ölçümü gerektiren pek çok uygulamada kapalı çevrim jiroskopun yerine bir alternatif olarak sunulabilir. Bu çalışmada, bu hedef doğrultusunda bir açık çevrim fiberoptik jiroskop tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sayesinde, dönen nesnelerin açısal dönme hızını hassas olarak ölçebilmek için düşük maliyetli bir açık çevrim fiberoptik jiroskop tasarımı geliştirilerek, bu jiroskopun daha geniş ölçüm aralığında doğrusal bir ölçüm çıktısı sunabileceği gösterilmiştir. Bölüm 2'de açık çevrim fiberoptik jiroskopun zaman ve frekans bölgesinde teorik analizi yapılmıştır. Bölüm 3'de, gerçekte uygulanabilir tasarım parametrelerine sahip bir jiroskop kurgulanmış, benzetim modeli geliştirilmiş ve ardından elde edilen bilgiler ışığında üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, jiroskop çıkış işaretinin düşük dereceli harmoniklerinden açısal hızla doğrusal değişen yeni bir çıkış işaretinin elde edilebileceği, hem sayısal hesaplamalarla hem de deneysel olarak gösterilmiştir. Tüm bu çalışmalardan elde edilen sonuç ve yorumlar son bölümde anlatılmıştır.

2. TEORİ (THEORY)

Açık çevrim fiberoptik jiroskopun optik ve elektriksel bağlantılarını gösteren bağlantı şeması Şekil 1'de gösterilmiştir [9, 15, 16]. Şeklin solunda görülen fiberoptik bağlaştırmacı (fiber coupler), ışık kaynağından çıkan ışık demetini %50 oranında iki ayrı kola ayırır. Bu bağlaştırmacı aslında fiberoptik bobinden geri dönen ışığın optik dedektöre ulaşması için kullanılmıştır. Fiberde ilerleyen ışığın +z yönünde ilerlediğini varsayarsak, x ve y yönünde polarize olan iki farklı ışık, fiberin doğrusal olmayan optiksel özelliklerinden dolayı farklı grup hızlarına sahip olacaktır. Bu durum jiroskop içinde faz karışıklığına sebep olacaktır. Şekildeki iki bağlaştırmacı arasında kullanılan optik kutuplayıcı, ışığı sadece bir yönde doğrusal kutuplayarak bu karışıklığı engellemektedir. Sağda görülen fiberoptik bağlaştırmacı, çıkışındaki ışın demetini yine %50 oranında iki kola ayırmaktadır. Böylece fiber sarmalında (bobin) zıt yönde ilerleyen iki ayrı ışın demeti oluşacaktır. Bu iki koldan birinde bulunan optik faz modülatörü ışığın fazını modüle etmektedir. Optik faz modülatyonu sayesinde, dedektörden alınan elektriksel çıkış sinyalinin şiddetinde faz girişiminden kaynaklanan ve sinüs biçiminde değişmesi arzu edilen genlik dalgalanmaları oluşacaktır.

Durağan bir jiroskopta fiber bobininde zıt yönde hareket eden iki ışın demeti arasında herhangi bir faz farkı meydana gelmezken, dönme durumunda bu iki ışın demeti farklı zamanlarda dedektöre ulaşacaktır. Bu zaman farkı ışığın



Şekil 1. Açık çevrim bir fiber optik jiroskopun bağlantı şeması (Schematic connection of an open loop optical fiber gyroscope)

fiber bobinindeki tek bir döngüsü için Eş. 1 ile hesaplanabilir [20].

$$t_{CW} = \frac{R(2\pi - \Omega t_{CW})}{c} \quad t_{CCW} = \frac{R(2\pi + \Omega t_{CW})}{c} \quad (1)$$

Burada t_{CW} ve t_{CCW} ışığın sırasıyla saat yönünde ve saatin tersi yönünde bir turluk dolanma süresi, R fiber bobininin yarıçapı ve Ω jiroskopun açısal hızıdır. Böylece, bir turluk fiber bobininde birbirine zıt olarak hareket eden iki ışın demeti arasındaki zaman farkı Eş. 2 ile hesaplanabilir.

$$\Delta t = t_{CW} - t_{CCW} = 4\pi \frac{R}{c} \left(\frac{R\Omega}{c} \right) \quad (2)$$

Hassasiyetin artırılması için R yarıçaplı dairesel bobin üzerine N tane sarım yapılır. Şayet fiber bobini N sarımdan oluşuyorsa, fiberin toplam uzunluğu $L_T = 2\pi RN$ olur ve bobin çapı $D = 2R$ olarak yerine yazılırsa iki ışın demeti arasındaki faz kayması Eş. 3 ile hesaplanabilir.

$$\Delta\phi = \omega\Delta t = \frac{\omega L_T D \Omega}{c^2} \quad (3)$$

Dairesel bobin içerisinde ilerleyen ve λ dalgaboyuna sahip bir ışık için dalga sayısı $\omega/c = 2\pi/\lambda$ yazılırsa, Sagnac faz kayması Eş. 4'deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\Delta\phi_s = \frac{2\pi L_T D \Omega}{\lambda c} \quad (4)$$

Dedektör çıkışındaki sinyal seviyesi, dedektöre ulaşan ve birbirine zıt olarak yayılan ışık dalgalarının elektrik alanlarının toplamı ilişkilendirilebilir. Standart bir girişimölçer tekniğinde, karşılıklı yayılan dalgaların optik güçlerini P_1 ve P_2 ile ifade edersek, dedektörde algılanan güç Eş. 5 ile hesaplamak mümkündür.

$$P_D = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos(\Delta\phi) \quad (5)$$

Bir fiber optik jiroskopta zıt yönde ilerleyen dalgaların optik güçleri eşit olduğundan bu ilişki Eş. 6 ile hesaplanabilir.

$$P_D = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \Delta\phi_s) \quad (6)$$

Eş. 6' da P_0 durağan durumdaki jiroskopun dedektör girişindeki ışık gücü olup bu güç, Sagnac etkisini oluşturan dönme hareketleri neticesinde değişecektir. Fakat ışın kaynağındaki optik güç dalgalanmalarından dolayı algılanan güç üzerinde oluşan sapma, dönme hareketi ile daha da karmaşıklaşır. Bu sorunu çözmek için sistemde dolaşan ışığa faz modülasyonu uygulamak oldukça kullanışlı bir tekniktir. Fiber döngünün herhangi bir sonuna yerleştirilen elektro-optik faz modülatörü, zıt yönlere ilerleyen ışık demetinin fazını modüle edecektir. Bu iki ışık demetinden faz modülatörüne geç gelen ışığın gecikme süresi τ ile gösterilirse, Sagnac etkisi ve faz modülatörünün her ikisinden kaynaklanan toplam faz farkının zamana göre değişimi Eş. 7' de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \Delta\phi_s(t) + \Delta\phi_m(t) \\ &= \Delta\phi_s(t) + \phi_m(t) - \phi_m(t - \tau) \end{aligned} \quad (7)$$

Burada, $\phi_m(t) = \phi_0 \sin(\omega_m t)$ faz modülatöründen kaynaklanan faz değişimi olup ω_m modülasyon frekansıdır. Faz modülatörüne geç ulaşan ışık demetinin gecikme süresi $\tau = NL/c$ ile hesaplanabilir. Böylece, dedektör girişinde ışık gücünün zamansal ortalaması, Eş. 7' deki faz teriminde faz modülasyonu ve Sagnac etkisi birleştirilerek ışık gücü Eş. 8' deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\langle P_D(t) \rangle = \frac{1}{2} P_0 [1 + \cos(\Delta\phi_s(t) + \Delta\phi_m(t))] \quad (8)$$

Burada $\Delta\phi_m(t) = \phi_0 [\sin(\omega_m t) - \sin(\omega_m t - \omega_m \tau)]$ olup basit trigonometrik işlemlerden sonra Eş. 9 elde edilir.

$$\Delta\phi_m(t) = 2\phi_0 \cos(\omega_m t - \omega_m \tau/2) \sin(\omega_m \tau/2) \quad (9)$$

Eş. 8 ve Eş. 9' u kullanarak dedektöre ulaşan ışığın gücü Eş. 10' da verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \langle P_D(t) \rangle &= \frac{1}{2} P_0 \{1 + \cos[\Delta\phi_s(t)] \cos[\alpha \cos(\omega_m t - \delta)] \\ &\quad - \sin[\Delta\phi_s(t)] \sin[\alpha \cos(\omega_m t - \delta)]\} \end{aligned} \quad (10)$$

Kolaylık olması açısından bu eşitlikte $\delta = \omega_m \tau/2$ ve $\alpha = 2\phi_0 \sin \delta$ tanımlamaları yapılmıştır. Eş. 10, Sagnac ve faz

modülâtörünün birlikte etkileriyle optik dedektöre ulaşan ışık gücünün zamansal değişimini göstermektedir. Optik dedektör çıkışında üretilecek gerilim işareti de bu değişimle oransal olarak değişecektir. Bu işaretin frekans bileşenlerini analiz etmek için, Eş. 10' u dedektör çıkış akımı olarak kabul edip ($P \approx I$) frekans bölgesine dönüşüm (transform) sağlanabilir. Jiroskopun belirli bir sabit açısal hızı için Sagnac faz kayması ($\Delta\varphi_s$) sabit olacaktır. Bu durumda işaretin frekans spektrumu, faz modülâtörü frekansı olan ω_m ve bunun harmonik frekanslarını içerecektir. Böylece işaretin frekans bölgesindeki değişimi Bessel fonksiyonları ile Eş. 11' de verildiği gibi kolayca hesaplanabilir [21].

$$I_D = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + \left[2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\alpha) \cos(2k(\omega_m t - \delta)) \right] \cos(\Delta\varphi_s) - \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\alpha) \cos((2k+1)(\omega_m t - \delta)) \right] \sin(\Delta\varphi_s) \right\} \quad (11)$$

Eş. 11' den işaretin harmoniklerini Eş. 12' de verilen biçimde elde edebiliriz.

$$I_D = \frac{I_0}{2} \left\{ \begin{array}{l} 1 + J_0(\alpha) \cos(\Delta\varphi_s) \\ -2J_1(\alpha) \sin(\Delta\varphi_s) \cos(\omega_m t - \delta) \\ -2J_2(\alpha) \cos(\Delta\varphi_s) \cos(2(\omega_m t - \delta)) \\ +2J_3(\alpha) \sin(\Delta\varphi_s) \cos(3(\omega_m t - \delta)) \\ + \dots \end{array} \right\} \quad (12)$$

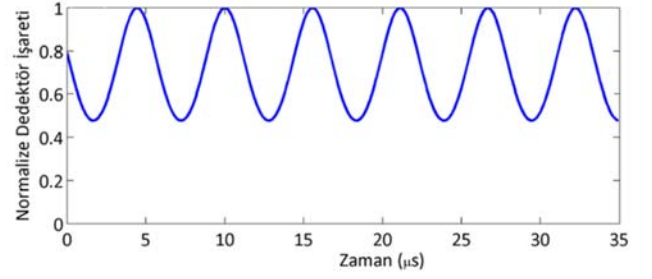
Eş. 12' de parantez içindeki ilk terim işaretin DC bileşeni olup frekanstan bağımsızdır. Diğer terimler sırasıyla 1. harmonikten itibaren derecesi artan harmonik bileşenleridir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Benzetim Çalışmaları (Simulation Studies)

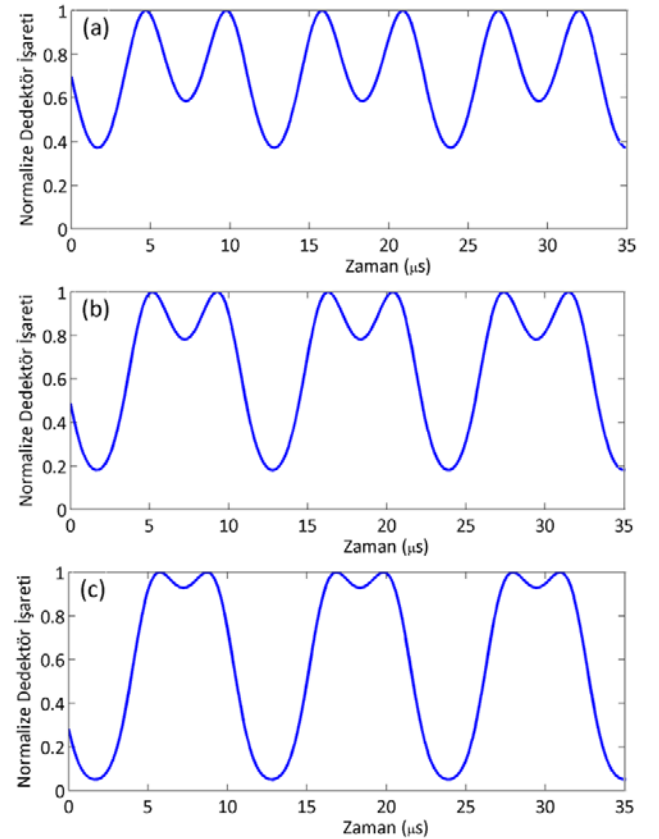
Bu bölümde, ilk olarak Sagnac etkisi ve elektro-optik faz modülasyonu birlikteliğinde, fiberoptik jiroskopun dedektör çıkışındaki işaretin zaman ve frekans bölgesi değişimleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Eş. 10 ve Eş. 12 ile elde edilen zaman ve frekans bölgesi verileri grafiksel olarak gösterilmiş ve analiz edilmiştir. Sayısal hesaplamalarda jiroskop tasarım parametrelerinden fiber bobinin çevre uzunluğu $L=50\text{cm}$, tur sayısı $N=2000$, modülasyon frekansı $f_m=90\text{ kHz}$, kullanılan ışığın dalga boyu $\lambda=1550\text{ nm}$ olarak belirlenmiş ve dedektör işareti genliğini 1' e normalize etmek için faz modülasyonu şiddeti $\varphi_0 = 1$ olarak hesaba katılmıştır.

Şekil 2' de jiroskop durağan ($\Omega=0\text{ rad/s}$) durumda iken 0-35 μs zaman aralığı boyunca elde edilen jiroskop işaretinin değişimi gösterilmiştir. İşaretin formu sinüs biçimli olup, normalize edilmiş genlik değişimi 0,5 ile 1 aralığında ve frekansı 180 kHz' dir. Bu frekans, faz modülâtörüne uygulanan modülasyon frekansı olan 90 kHz' in tam iki katıdır.



Şekil 2. Durağan jiroskop için işaretinin zamana göre değişimi (Signal variation in time domain for stationary gyroscope)

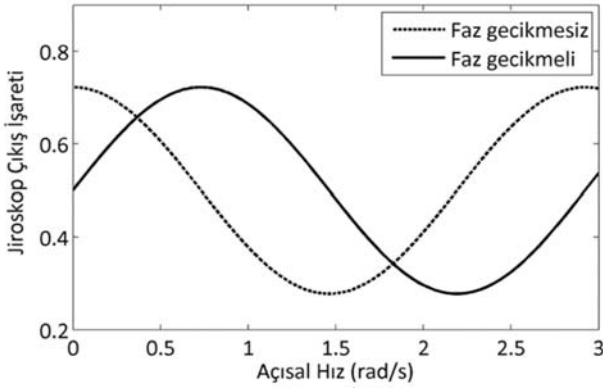
Dönme hızının sırasıyla $\Omega=0,1, 0,3,$ ve $0,5\text{ rad/s}$ olduğu durumlarda, işaretin genlik-zaman değişimi Şekil 3' de verilmiştir. Şekilde, tepe genliği seviyesi 1' e karşılık gelirken çukur seviyesinin ardışık düzende yüksek ve düşük genlikli değişimler gösterdiği ve açısal hız arttıkça işaretin sinüs biçiminin bozulduğu görülmektedir. Bu durum farklı açısal hızlarda, işaret formunda maksimum (tepe) seviyesini değiştirmezken iki farklı minimum seviye oluşturan dalgalanmaya sebep olmaktadır. Minimum seviyeleri takip ederek jiroskopun açısal dönme hızı hakkında bilgi çıkartılabilir ancak işaretin genlik zaman değişiminden açısal hız bilgisini doğrudan elde etmek oldukça güçtür.



Şekil 3. Farklı açısal hızlarda dönen jiroskop işaretinin genlik-zaman değişimi, a) $\Omega=0,1\text{ rad/s}$, b) $\Omega=0,3\text{ rad/s}$, c) $\Omega=0,5\text{ rad/s}$

(Signal variation in time domain of rotating gyroscope with different angular velocities, a) $\Omega=0.1\text{ rad/s}$, b) $\Omega=0.3\text{ rad/s}$, c) $\Omega=0.5\text{ rad/s}$)

Açık döngü çalışan bir fiber jiroskopun çıkış işaretinden açısal hız bilgisini üretmek için alçak geçiren bir filtre ve zarf dedektörü (genlik demodülatörü) kullanmak yeterli olacaktır [15]. Bu yöntem karmaşık sayısal hesaplama gerektirmemesi, düşük güç tüketimi, kolayca uygulanabilmesi, maliyet avantajı, az yer kaplaması ve çok hızlı tepki vermesi gibi özellikleri ile bir açık çevrim jiroskop tasarımında önemli avantajlar sunacaktır. Şekil 4’de sunulan grafik, jiroskopun 0-3 rad/s arasında 0,02 rad/s adımlarla değişen açısal hıza verdiği tepkiyi ölçmek için gerçekleştirilen benzetim sonuçlarından üretilmiştir. Alçak geçiren filtre ve zarf dedektöründen geçen jiroskop işareti açısal hız ile periyodik değişimler göstermektedir. Kesikli eğride görüldüğü üzere bu değişim, jiroskop durağan iken Sagnac etkisinin sıfır olması nedeniyle, optik dedektördeki faz girişimi maksimum seviyeye ulaştığı için tepe seviyesinden başlamaktadır. Ancak, bu işaretle düşük açısal hız seviyelerine karşılık gelen değişim miktarı çok küçük kalmaktadır. Açısal hızın çok küçük seviyelerindeki hassasiyeti artırmak için jiroskop sistemine literatürde iyi bilinen π faz geciktirici tekniği uygulanır [20]. Jiroskop işaretinde $\pi/2$ faz kaymasına sebep olan bu işlem, ya uygun bir seviyede bias gerilimini elektro-optik faz modülatörüne uygulayarak ya da fiber bobininde doğrudan bir optik faz geciktirici kullanarak sağlanabilir. Böyle bir faz kayması sonrası, Şekil 4’deki sürekli eğride görüldüğü gibi açısal hızın sıfıra yakın seviyelerinde duyarlılığı yüksek bir jiroskop çıkış karakteristiği elde edilebilir.



Şekil 4. Faz gecikmeli ve faz gecikmesiz iki ayrı sistem için jiroskop çıkış işareti
(Gyroscope output signal for two separate systems with phase delay and without phase delay)

Fiberoptik jiroskop ile açısal dönme hızını ölçebilmek için, yukarıda sunulan geleneksel yaklaşımdan farklı bir yaklaşım olarak çıkış işaretinin frekans spektrumundan çıkartımlar yapılabilir. Jiroskop çıkış işaretinin frekans bölgesindeki değişimini analiz etmek için en pratik yol bilgisayar ortamında yazılımsal yöntemler kullanmaktır. Ancak laboratuvar çalışmalarında kurulacak gerçek bir jiroskop düzeneğinde, bu işlem için yeterli örnekleme hızında çalışan analog/sayısal dönüştürücü gerekli olacaktır. Jiroskopun açısal hızla değişen çıkış işaretinden genlik-frekans değişimini elde etmek için, frekans bölgesindeki her bir

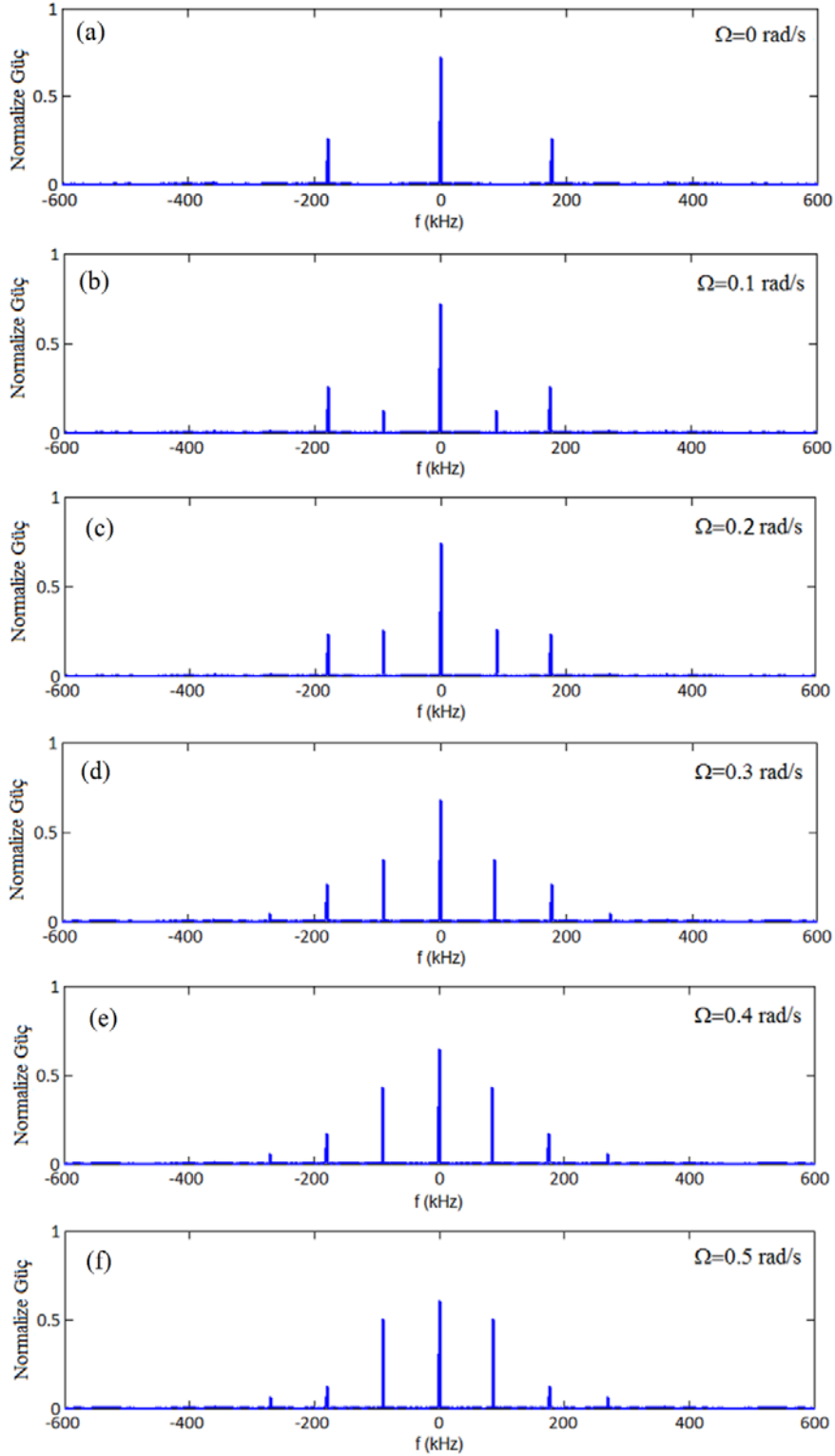
harmonik bileşeni Eş.12 ile tanımlanan Bessel fonksiyonları ile hesaplanabilir. Şekil 5’de sırasıyla 0 rad/s’ den 0,5 rad/s’ ye kadar 0,1 rad/s aralıklarla artan farklı açısal hızlarda dönen bir fiber jiroskopun, çıkış işaretinden hesaplanan güç spektrumu görülmektedir.

Şekil 5’de fiberoptik jiroskop 0,1 rad/s aralıklarla artan hızlarda dönerken, dedektör çıkış işaretininin 90 kHz ve katlarında harmonik frekanslara sahip olduğu ve bu frekanslardaki harmonik güçlerinin açısal hız ile değiştiği görülmektedir. Grafiklerden edinilen ilk izlenimde, artan dönme hızı ile birlikte 90 kHz frekansına sahip 1. harmoniğin şiddetlendiği kolayca fark edilmektedir. Sıfırıncı harmonik, başka bir ifadeyle DC bileşen ile 2. harmonik şiddeti artan açısal hıza karşılık hafifçe zayıflamaktadır. Aslında DC bileşenin, açısal hızın ölçüldüğü geleneksel yaklaşımda π faz kaydırılmamış çıkış işaretine karşılık geldiğini anımsamak gerekir. Diğer yüksek dereceli harmoniklerin şiddeti çok zayıf görümlü olduğu için, DC ve ilk iki harmonik genliklerinin açısal hız ile ilişkisini analiz etmek yeterli olacaktır. Jiroskop durağan durumdan 0,02 rad/s aralıklarla 3 rad/s’ lik açısal hıza ulaşırken bu harmonik genliklerindeki değişim grafiği Şekil 6’ da gösterilmiştir.

Şekil 6’da işaretin harmonik genliklerinin jiroskop açısal hızı ile periyodik değişimler gösterdiği görülmektedir. Grafikte 2. harmonik bileşeni genliğinin açısal hız ölçüm aralığında sıfıra düştüğü ilk nokta yaklaşık 0,73 rad/s hıza karşılık gelmektedir. Teorik olarak, tasarlanan bu jiroskop için bu hıza kadar ölçüm yapılabileceği söylenebilir. Ancak, jiroskop üzerinden açısal hızın basitçe algılanabilmesi için grafikteki eğrilerin istenilen ölçüm aralığında doğrusal olması beklenir. Aksi durumda tasarlanan her bir jiroskopa özgü dönüşüm tablosu oluşturmak gerekir ki bu da, jiroskop elektronik donanımının daha da karmaşıklaşmasına sebep olacaktır.

Bu çalışmada, pratik bir çözüm olarak 1. ve 2. harmoniklerin farkı kullanılarak açısal hız ile yüksek doğrusallık gösteren bir çıkış eğrisi elde edilmiştir. Açısal hız sıfır olduğunda işaret genliğinin de sıfıra karşılık gelmesi için, çıkış işareti sıfır başlangıç değerine ofset edildiğinde Şekil 7’ deki gibi bir karakteristik gözlenecektir.

Şekil 7’deki mavi renkli çıkış işareti, 1. ve 2. harmoniklerin farkı alınarak üretilmiştir. Harmonik farkı olarak isimlendirilen bu eğrinin diğerlerine göre, 0-0,70 rad/s açısal hız aralığında doğrusala oldukça yakın bir değişim gösterdiği açıkça fark edilmektedir. Kırmızı çizgi ile gösterilen işaret, karakteristiği Şekil 4’de verilen geleneksel fiber jiroskopun sıfır başlangıç değerine ofset edilen çıkış eğrisidir. Açısal hız ölçümünde hangi işaretin daha kullanışlı olduğunu anlamak için, bu çıkış işaretlerinin doğrusallık analizini yaparak eğrilere en iyi uyan doğruyu hesaplayabiliriz. Bir eğriye en iyi uyan doğru yaklaşımı için en küçük kareler yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde, literatürde iyi bilinen r^2 (r-squared) katsayısı hesaplanarak bir eğriye uyan doğrunun ne kadar iyi yaklaştığı 0 ile 1 arasında derecelendirilir [22]. Bu katsayı, bir eğrinin ya da dağılımın doğruya yaklaşım sağlaması durumunda 1’e doğru yakınsar. Şekil 8’de,

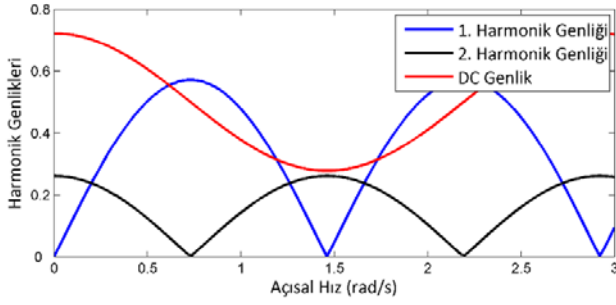


Şekil 5. Farklı açısal hızlarda dönen jiroskop işaretinin güç spektrumu
(Power spectrum of rotating gyroscope signal with different angular velocities)

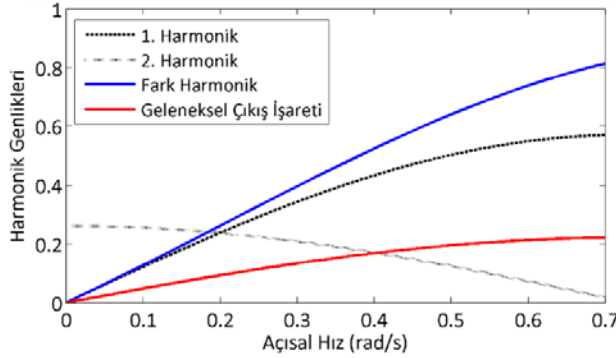
geleneksel bir jiroskop çıkış işareti ile harmoniklerden üretilen işaretin açısal hız ile doğrusallık ilişkileri gösterilmiştir. Yapılan analizde, harmoniklerden üretilen

işaretin 0-0,66 rad/s açısal hız aralığında doğrusallık katsayısı r^2 (r-squared) 0,996 olarak hesaplanmıştır ki; bu değer pek çok sensör uygulamalarında doğrusal bir çıkış

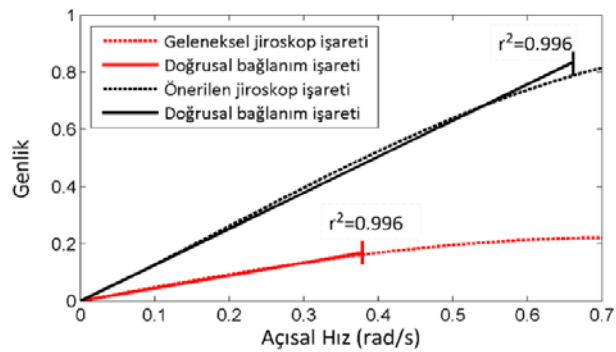
işareti için kabul edilebilir ölçüttedir [23, 24]. Geleneksel jiroskop için aynı doğrusal ilişki içinde dinamik ölçüm aralığı ise 0-0,38 rad/s hesaplanmıştır. Diğer yandan, şekildeki işaretlerin açısal hız ile değişim oranlarına dikkat edilirse, bir jiroskop için önemli performans göstergesi olan ölçüm duyarlılığında da kayda değer bir iyileşmenin olduğu açıktır. Grafikten, geleneksel jiroskop için duyarlılık 0,45 birim-genlik/rad·s⁻¹ iken önerilen jiroskop modelinde için bu değer 1,26'ya yükselmiştir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, harmonik bileşenlerinden üretilen jiroskop işareti sayesinde, daha geniş bir dinamik ölçüm aralığında daha hassas açısal hız ölçümü yapılabilmektedir.



Şekil 6. İşaretin harmonik genliklerinin açısal hız ile değişimi (Signal harmonic amplitudes variation with angular velocity)



Şekil 7. 1. ve 2. harmonik genlikleri ile harmonik farkının açısal hız ile değişimi (First two harmonic amplitudes and harmonic difference versus angular velocity)



Şekil 8. Jiroskop çıkış işaretinin (harmonik farkı) açısal hız ile değişimi ve en uygun doğruya yaklaşımı (Gyroscope output signal (harmonic difference) versus angular velocity and approach to a line of best fit)

3.2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Şekil 1'de gösterilen açık çevrim fiberoptik jiroskop sistemini test etmek ve gerçek zamanlı ölçüm sonuçları elde etmek için, önce titreşimsiz bir optik masa üzerine hassas hız ayarlı yuvarlak döner bir tabla monte edilmiştir. Ardından sistemin tüm optik ve elektriksel bileşenleri bu tablanın üzerine yerleştirilerek birbirine bağlanmıştır. Deneysel çalışmaların tüm aşamalarında, jiroskop sistemde kullanılan her bir bileşene kolayca ulaşabilmek ve ölçüm alabilmek için, tüm bileşenler birbirinden yeterince uzak olacak biçimde yerleştirilmiştir. Şekil 9'da laboratuvar ortamında kurulan bu düzeneğin bir görünümü yer almaktadır. Jiroskopun ışık kaynağı olarak, erbiyum katkılı fiber yükselticinin (FP-EDFA C-26G-S) kendiliğinden yükseltilmiş ışması (ASE) kullanılmıştır. Bu ışmanın dalgaboyu aralığı, 1530-1580 nm'yi kapsayan tipik bir EDFA'nın C bandına karşılık gelmektedir. Işıma kaynağına doğru geri yansımaları engellemek için EDFA çıkışı ile fiber bağlaştırıcı arasına fiberoptik izolatör (Newport ISC-1550-FCAPC) yerleştirilmiştir. Sistemde kullanılan iki adet fiber bağlaştırıcı (Thorlabs- TW1550R5F2) %50 kublaj oranına ve 2x2 porta sahiptir. Bağlaştırıcıların boşa kalan portlarına geri yansımaları engellemek için sonlandırıcı takılmıştır.

Fiberoptik jiroskopun çalışma prensibine göre, eksen etrafında dönen bir sistemde birbirine zıt yönde ilerleyen iki ışık arasında bir faz kayması oluşacağı için, bu faz kaymasını ölçebilecek fiber bobininin yeterli uzunlukla olması gerekir. Bu çalışmada, tasarım parametrelerine de uygun olarak, bobindeki fiber uzunluğu yaklaşık 1 km olup bobinin çevresi 50 cm'dir. Kullanılan fiber türü haberleşme sektöründe yaygınca kullanılan Corning SMF-28 tek modlu fiberdir.

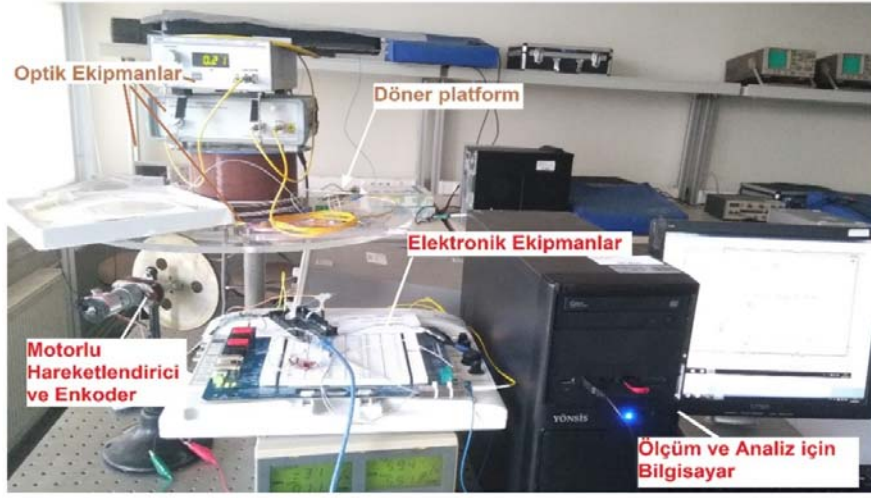
Elektro-optik faz modülatörü jiroskop sisteminde doğrudan fiber bobinine bağlanmaktadır. Girişine uygulanan elektriksel sinyalle oransal biçimde faz kontrolü sağlayan optik faz modülatörü, fiber bobininde zıt yönde ilerleyen iki ışık demetinden birinin fazını modüle etmektedir. Bu işlem jiroskopun çalışma prensibinde oldukça kritik görevdir. Modülasyondan kaynaklanan bu faz değişimi sayesinde, jiroskop bobininde dolaşan iki ışığın faz girişimi sonrası optik dedektörde kolayca ölçülebilen güç değişimleri gözlenecektir. Bu çalışmada elektro-optik faz modülatörü olarak Thorlabs LN65S-FC kullanılmış ve modülatör girişine genliği 5V, DC ofset 2,5 V, frekansı 90 kHz olan sinüs işareti uygulanmıştır.

Sistemin dedektör katında optik işareti elektriksel işarete dönüştüren bir elektro-optik dedektör bulunmaktadır. 1550 nm dalgaboyu civarında çalışan, girişi fiber kablo bağlantılı bir elektro-optik dedektör ticari olarak bulunabilir. Ancak bu ihtiyacı karşılayacak ucuz ve basit bir çözüm olarak, kullanımı ilk defa bu çalışmada önerilen, fiberoptik haberleşme şebekelerinde sıkça kullanılan mini-GBIC (Finisar 4,5 Ghz) modülünün dedektör katı kullanılmıştır. Dedektör çıkış işareti, standart SFP sokete sahip olan bu modülün "data out" bağlantı ucundan alınmıştır. Bu işaretin 1. ve 2. harmonik bileşenlerini elde etmek için uygun

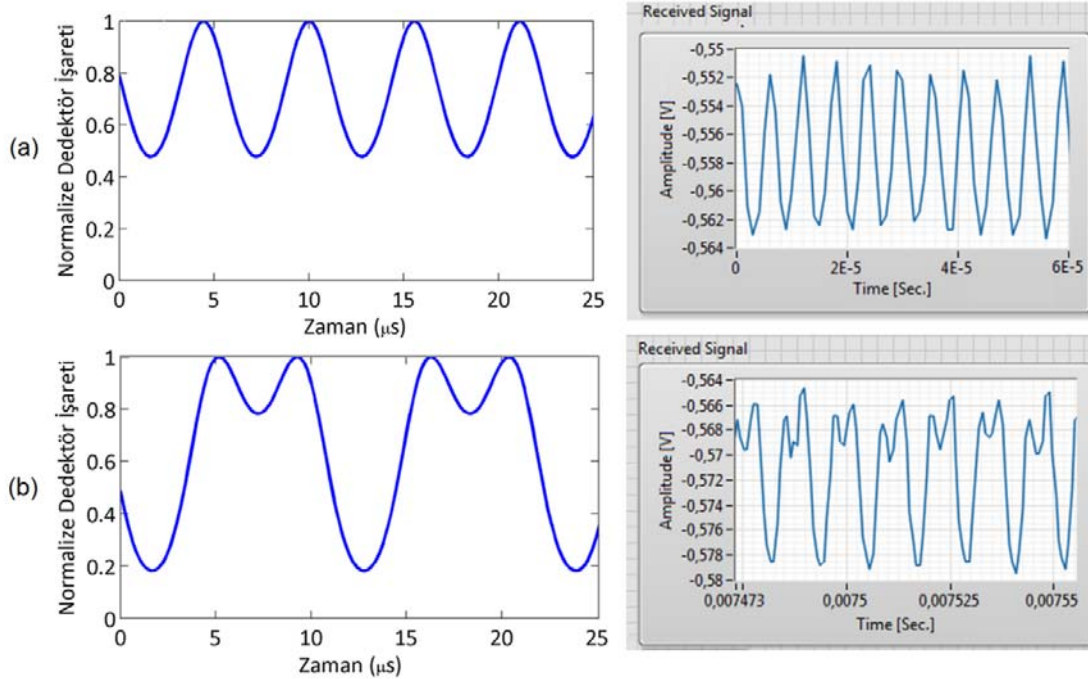
frekanslara ayar edilmiş birer band geçiren elektronik filtre tasarlanabilir ki; bu haliyle sistemin elektronik katı oldukça basit bir yapıya indirgenebilir. Ancak deneysel çalışmalarda döner tabla hareketini kontrol ederken, eşzamanlı olarak gerçek zamanlı ölçümler alabilmek için bilgisayar ortamından yararlanılmıştır. Dedektörden alınan işaretleri bilgisayar ortamına aktarabilmek için 1,2Mb/s hızında örnekleme yapabilen National Instruments firmasının ELVIS II sayısal platformu kullanılmıştır. Bu aşamada, jiroskop sisteminin zaman ve frekans bölgesinde gerçek zamanlı işaret analizini gerçekleştirmek ve aynı zamanda jiroskop düzeneğinin döndürüldüğü tablayı kontrol

edebilmek için Labview tabanlı bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Döner tablayı çok hassas biçimde hareketlendirmek için çift redüktörlü bir DC motor kullanılmıştır. Tablanın hız ayarını bilgisayar üzerinden kontrol edebilmek amacıyla, motor miline takılan bir optik enkoder ile geri besleme sağlanmıştır.

Elde edilen deneysel veriler ile benzetim sonuçlarını kıyaslayabilmek üzere, jiroskopun 0 ve 0,3 rad/s açısal hızları için benzetim sonucu elde edilen dedektör çıkış işaretleri ile deneysel düzenekteki dedektör çıkış işaretinin zaman bölgesindeki değişimleri Şekil 10’da gösterilmiştir.

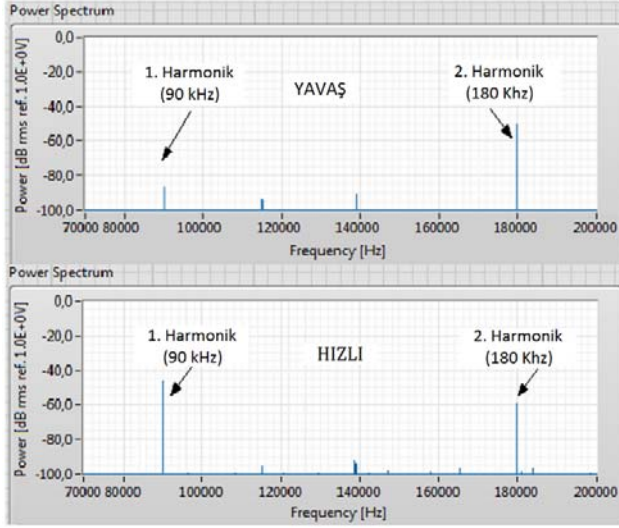


Şekil 9. Laboratuvar ortamında kurulan jiroskop düzeneğinin görünümü (A view of gyroscope setup at laboratory)



Şekil 10. Dedektör işaretinin iki farklı açısal hız için elde edilen genlik-zaman değişimleri; soldaki grafikler benzetim çıktıları, sağdakiler deneysel çıktılar, a) $\Omega=0$ ve b) $\Omega=0,3$ rad/s (Detector signal in time domain for two different angular velocities, the graphics sided left obtained from simulations and right from experimental measurements, a) $\Omega=0$ and b) $\Omega=0,3$ rad/s)

Fiberoptik jiroskopta açılal hızın sıfır (durağan) ve 0,3 rad/s olduğu durumlar için, deneysel olarak elde edilen gerçek zamanlı dedektör işareti ile benzetim yoluyla hesaplanan işaretin hemen hemen örtüştüğü Şekil 10'dan açıkça görülmektedir. Farklı açılal hızlar için yapılan karşılaştırmalarda da bu örtüşmenin sağlandığı gözlenmiştir. Benzer bir örtüşme frekans bölgesinde de oluşmaktadır. Şekil 11'de, deneysel düzenekteki jiroskop dedektör işaretinin güç spektrumu gösterilmiştir.



Şekil 11. İki farklı hız için dedektör işaretinin frekans spektrumu, üsteki grafik için açılal hız yavaş, alttaki hızlı (Detector signal in frequency domain for two different angular velocities, the graphic on top for low angular velocity and bottom for higher)

Şekil 11'de jiroskopun sırasıyla yavaş ve hızlı döndürülmesi neticesinde, işaretin 1. ve 2. harmonik güçlerinde değişimler meydana geldiği görülmektedir. Bu ölçümlerde, jiroskopun

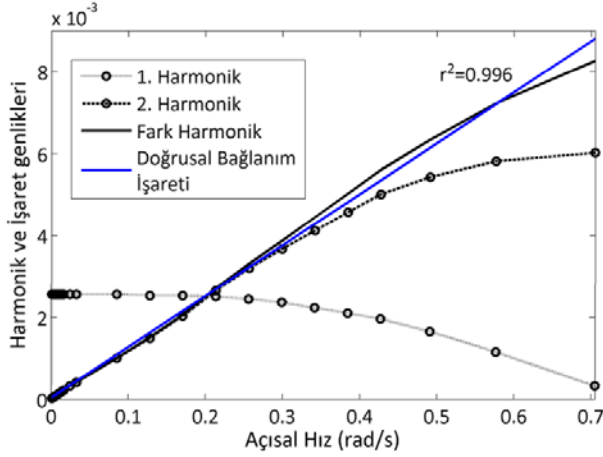
dönme hızı yavaş bir hızdan yüksek bir hıza çıkarıldığında 1. harmonik gücünün arttığı, 2. harmonikte ise azalma olduğu kolayca anlaşılmaktadır. Harmonik güçlerindeki bu değişimlerin, Şekil 5'de sunulan benzetim çalışmaları ile elde edilen grafiklere oldukça benzediği gözlenmiştir.

Benzetim çalışmalarında kurgulanan harmonik analize dayalı açılal hız ölçüm modelinin deneysel çalışmalarda da uygulanabilirliğini test etmek için, jiroskop çok küçük açılal hızlarda adım adım hızlandırılmış ve çıkış işaretinin 1. ve 2. harmonik genlikleri dB ölçeğinde ($V_{ref}=1V$) bilgisayarda kaydedilerek Tablo 1'deki deneysel veriler elde edilmiştir.

Jiroskopu hareketlendiren motordaki redüktörlerin mekanik zorlanmalarını engellemek için Tablo 1'deki ölçümler, çok yavaş hızlardaki dönme hareketi için çift redüktör, hızlı dönme hareketleri için tek redüktör kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Döner tablanın kararlı döndüğü en küçük açılal hız yaklaşık $5 \cdot 10^{-4}$ rad/s tespit edilmiş ve bu hıza karşılık 1. harmonik genliği -93,5dB olarak ölçülmüştür. Jiroskop durağan durumda iken gürültü seviyesi $-100 \pm 1,5$ dB olarak ölçülmüştür. Güç spektrumundan alınan ölçüm değerleri dB ölçeğinde sonuç ürettiği için, grafiksel analize başlamadan önce ölçüm sonuçları doğrusal ölçeğe $X=(10^{X(dB)/10})^{1/2}$ dönüşümüyle transfer edilmiştir. Şekil 12'de sunulan deneysel ölçüm sonuçlarında, 1. ve 2. harmoniklerin genlik değişimindeki "o" belirteçleri deneysel ortamda kaydedilen ölçüm noktalarına karşılık gelmektedir. Bu iki harmonik işaretten hesaplanan fark harmonik ve bu işarete en iyi uyum doğrusal bağlanım işareti aynı grafikte sırasıyla düz çizgili siyah ve mavi renklerle gösterilmiştir. Açılal hızın değiştiği yaklaşık 0-0,7 rad/s ölçüm aralığında doğrusal bağlanım işaretinin r^2 katsayısı 0,996 olarak hesaplanmıştır ki; bu sonucun teorik hesaplamalardaki sonuçla aynı olması, önerilen modelin deneysel çalışmalarda da beklenen sonucu ürettiğinin önemli bir kanıtıdır.

Tablo 1. (Jiroskop ile açılal hız ölçümünde deneysel veriler)

Çift redüksiyonlu ölçümler				Tek redüksiyonlu ölçümler			
Darbe Sayısı (Puls/100ms)	Açılal Hız (rad/s)	Çıkış İşareti (dB)		Darbe Sayısı (Puls/100ms)	Açılal Hız (rad/s)	Çıkış İşareti (dB)	
		1. Harmonik	2. Harmonik			1. Harmonik	2. Harmonik
10	0,0005	-93,5	-51,8	20	0,0854	-59,9	-51,8
20	0,0011	-91,4	-51,8	30	0,1281	-56,5	-51,9
40	0,0022	-88,1	-51,8	40	0,1708	-53,8	-51,9
80	0,0044	-84,0	-51,8	50	0,2135	-51,5	-52,0
100	0,0055	-82,0	-51,8	60	0,2562	-49,9	-52,2
140	0,0077	-79,3	-51,8	70	0,2989	-48,7	-52,5
180	0,0099	-77,2	-51,8	80	0,3416	-47,7	-53,0
220	0,0120	-75,6	-51,8	90	0,3843	-46,8	-53,5
260	0,0142	-74,0	-51,8	100	0,4270	-46,0	-54,1
300	0,0164	-73,0	-51,8	115	0,4911	-45,3	-55,6
450	0,0246	-69,7	-51,8	135	0,5765	-44,7	-58,7
600	0,0329	-67,6	-51,8	165	0,7046	-44,4	-69,7



Şekil 12. Deneysel ölçüm sonuçları, 1. ve 2. harmonikler ile fark harmoniğinin açısal hız ile değişimi ve en uygun doğruya yaklaşımı (Experimental measurement results, the variation of first and second harmonics and difference harmonic versus angular velocity and its approach to a line of best fit)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

- P : optik güç
 λ : dalgaboyu
 ϕ : optik faz
 c : ışık hızı
 Ω : jiroskopun açısal dönme hızı
 ω : açısal frekans
 t : zaman
 D : fiber bobininin çapı
 L : fiber bobininin çevre uzunluğu
 N : tur sayısı
 L_T : bobindeki toplam fiber uzunluğu

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makalede, açısal dönme hızını daha geniş bir ölçüm aralığında daha hassas olarak ölçebilmek üzere açık çevrim yapılandırılan bir fiberoptik jiroskopun tasarımından ve prototip öncesi üretimine kadar yürütülen çalışmalar sunulmuştur. İlk olarak, jiroskopun bir benzetim modeli geliştirilmiş, zaman ve frekans bölgesinde sayısal analizler yapılmıştır. Jiroskop çıkışındaki dedektör işaretinin harmonik analizi yapılarak 1. ve 2. harmoniklerinden açısal hız ölçülebilen yeni bir model geliştirilmiştir. Uzunluğu 1 km olan fiber bobini, iki adet fiberoptik bağlaştırıcı, bir adet elektro-optik faz modülatörü, ışına kaynağı, optik dedektör ve band geçiren filtre ile düşük maliyetli ve karmaşık olmayan bir jiroskop tasarımı önerilmiştir.

Geliştirilen modelin benzetim sonuçlarından, tasarlanan jiroskopun geleneksel bir açık çevrim fiberoptik jiroskopa göre daha geniş bir ölçüm aralığına ve daha yüksek bir ölçüm duyarlılığına sahip olduğu gösterilmiştir. Doğrusallık göstergesi olan r^2 katsayısı, yaklaşık 0-0,7 rad/s açısal hız ölçüm aralığında 0,996 olarak hesaplanırken, jiroskopun açısal hız değişimlerine duyarlılığın 0,45 birim-genlik/rad·s⁻¹ değerinden 1,26'ya yaklaşık üç kat yükseldiği gözlenmiştir.

Geliştirilen bu modelin deneysel olarak da uygulanabilirliğini ispatlamak için, tasarım parametrelerine uygun fiberoptik jiroskop düzeneği laboratuvar ortamında başarıyla kurulmuş ve gerçek zamanlı ölçümler alınarak test edilmiştir. Yürütülen deneysel çalışmalardan, benzetim sonuçlarıyla bütünüyle örtüşen veriler elde edilmiştir. Jiroskopun optik dedektör çıkışındaki harmoniklerinden üretilen yeni çıkış işaretinin, benzetim çalışmalarında sunulan aynı ölçüm aralığında benzer karakteristiği göstermesi, önerilen yeni yaklaşımın başarıyla çalıştığının önemli bir göstergesi olmuştur. Deneysel ölçümlerde gürültü seviyesi -100dB, ölçülebilen en küçük açısal hız $5 \cdot 10^{-4}$ rad/s ve buna karşılık gelen 1. harmonik genliği -93,5dB olarak not edilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmaların tüm detaylarının sunulduğu bu çalışma, açık döngü bir fiberoptik jiroskopun performansını iyileştiren bir tasarım örneği sunarken, bu alanda yapılacak yeni araştırmalara da ışık tutabilir.

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu makalede sunulan çalışmalar, Ankara Üniversitesi 15Ö0443007 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi olan "Fiberoptik Jiroskop Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi" isimli proje kapsamında yürütülmüştür. Yazarlar, sağlanan destekten dolayı Ankara Üniversitesine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Vali V., Shorthill R.W., Fiber ring interferometer, Appl. Opt., 15 (5) 1099-1100, 1976.
2. Huang S., Toyama K., Kim B.Y., Shaw H.J., Lock-in reduction technique for fiber-optic ring laser gyros, Opt. Lett., 18 (7), 555-557, 1993.
3. Huang S., Nicati P.A., Toyama K., Kim B.Y., Shaw H.J., Synthetic heterodyne detection in a fiber-optic ring-laser gyro, Opt. Lett., 18 (1), 81-83, 1993.
4. Ebberg A., Schiffner G., Closed-loop fiber-optic gyroscope with a sawtooth phase-modulated feedback, Opt. Lett., 10 (6), 300-302, 1985.
5. Yah Y., Kim D.I., Kim B.Y., New digital closed-loop processor for a fiber-optic gyroscope, IEEE Photonics Technol. Lett., 11 (3), 361-363, 1999.
6. Çelikel O., San S., Construction of all digital closed-loop interferometric fiber optic gyroscope with erbium doped fiber amplifier, Indian Journal of Pure and Applied Physics, 47 (7), 491-500, 2009.
7. Gronau Y., Tur M., Digital signal processing for an open loop fiber optic gyroscope, Appl. Opt., 34 (25), 5849-5853, 1991.
8. Liaw C.Y., Zhou Y., Lam Y.L., Characterization of an open-loop interferometric fiber-optic gyroscope with the Sagnac coil closed by an erbium-doped fiber amplifier, J. Lightwave Technol., 16 (12), 2385-2392, 1998.
9. Zhang Y., Guo Y., Li C., Wang Y., Wang Z., A new open-loop fiber optic gyro error compensation method based on angular velocity error modeling, Sensors, 15 (3), 4899-4912, 2015.

10. Annovazzi-Lodi V., Merlo S., Mechanical-thermal noise in micromachined gyros, *Microelectron. J.*, 30 (12), 1227-1230, 1999.
11. Guillen-Torres M. A., Feasibility of optical gyroscopic sensors in silicon-on-insulator Technology, Doktora Tezi, The University of British Columbia, The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies, 2015.
12. Emge, S., Bennett, S. Dyott, R. Brunner, J., Allen, D., Reduced minimum configuration fiber optic gyro for land navigation applications, *Fiber Integr. Opt.*, 16, 427-437, 1997.
13. Sun Q.D., Zhu Z.H., Larouche B.P., FPGA-based hardware design of closed loop control for fiber optic gyroscope, *J. Theor. Adv. Technol.*, 51 (1), 121-128, 2013.
14. Yahalom R., Moslehi B., Oblea L., Sotoudeh V., Ha J.C., Low-cost, compact fiber-optic gyroscope for super-stable line-of-sight stabilization, *Proc. IEEE Position Location and Navigation Symp.*, 180-186, CA, USA, 4-6 May 2010.
15. Şenyürek V.Y., Varol H.S., Low cost fiber optic angular velocity sensor, *ELECO'2007 5th Int. Conf. Elect. Electron. Eng. Bursa*, 1-4, 2007.
16. Medjadba, H., Si Mohamed L.M., Low cost technique for improving open loop fiber optic gyroscope scale factor linearity, *IEEE Conf. Inf. Commun. Technol.*, 2057-2060, Damascus, Syria, 2006.
17. Jin Z., Yu X., Ma H., Closed-loop resonant fiber optic gyro with an improved digital serrodyne modulation, *Opt. Exp.*, 21 (2), 26578-26588, 2013.
18. Zhang Y.S., Wang Y.Y., Yang T., Yin R., Fang J.C., Dynamic angular velocity modeling and error compensation of one-fiber fiber optic gyroscope (OFFOG) in the whole temperature range, *Meas. Sci. Technol.*, 23 (2), 1-6, 2012.
19. Rajulapati R.M., Nayak J., Modeling and simulation of signal processing for a closed loop fiber optic gyro's using FPGA, *Int. J. Eng. Sci & Technol.*, 4 (3), 947-959, 2012.
20. Vukmirica V., Interferometric fiber optic gyroscope: Principle of operation and basic parameters determination, *Scientific Technical Review*, LVIII (3-4), 2008.
21. Nasiri-Avanaki R.M., Soleimani V., Mazrea-Khoshki R., Comparative assessments on the performance of open-loop and closed-loop IFOGs, *Optics and Photonics Journal*, 4, 17-29, 2012.
22. W de. Silva C., *Sensor Systems: Fundamentals and applications*, CRC press, Taylor & Francis Group, 2016.
23. Cuccato D., Beghi A., Belfi J., Beverini N., Ortolan A., Virgilio A.D., Controlling the nonlinear intracavity dynamics of large He-Ne laser gyroscopes, *Metrologia*, 51 (1), 97-107, 2014.
24. Xin Y., Dong X., Meng Q., Qi F., Zhao C.L., Alcohol-filled side-hole fiber Sagnac interferometer for temperature measurement, *Sens. Actuators A Phys.*, 193, 182-185, 2013.