

İNTERFEROMETRİK OPTİK FİBERLİ JİROSKOPLARDA AÇIK VE KAPALI ÇEVİRİM YAPILARININ ANALİZİ

Gülsüm HOROZOĞLU*

Sait Eser KARLIK**

Özet: Günümüzde, optik fiberlerin haberleşme sistemlerinde düşük kayıplı iletim ortamı olarak kullanımının yanı sıra algılayıcı olarak kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Jiroskop, kesin yön tayini, konumlandırma ve durum kontrolü için kullanılan en temel cihazlardandır. Navigasyon sistemleri başta olmak üzere, çeşitli askeri ve ticari uygulamalarda en çok tercih edilen jiroskop türü interferometrik optik fiberli jiroskoptur (IFOG). Bu çalışmada faz modülasyonlu IFOG ile açısal yer değiştirme algılamanın teorik altyapısı açıklanmış, IFOG'un temel yapısında bulunan performans problemlerini ortadan kaldırmak için geliştirilen faz modülasyonlu açık ve kapalı çevrim IFOG yapıları analiz edilmiş, IFOG'un performans karakteristiklerine değinilmiş ve karasal navigasyon uygulamaları baz alınarak Sagnac faz farkının benzetimi yapılmıştır. Benzetimlerde, farklı fiber uzunlukları için Sagnac faz farkının açısal hız ile değişimi, fotoalıcı çıkış gücünün ve çıkış işaretinin Sagnac faz farkı ile değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçların pratik uygulamalardaki sonuçlarla örtüşen ve ayrılan yönleri vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: IFOG, jiroskop, optik fiberli algılayıcı, Sagnac faz farkı, faz modülasyonu.

Analysis of Open and Closed Loop Configurations for Interferometric Optical Fiber Gyroscopes

Abstract: Currently, using optical fibers as sensors is gradually spreading beside their usage in communication systems as low-loss transmission media. The gyroscope is one of the basic devices used for accurate direction forecast, location and position control. The interferometric optical fiber gyroscope (IFOG) is the most preferred gyroscope type in various military and commercial applications, especially in navigation systems. In this paper, theoretical background of angular displacement sensing with phase modulating IFOG has been described, phase modulating open and closed loop IFOG structures developed to overcome performance problems occurring in the basic IFOG structure have been analyzed, IFOG performance characteristics have been mentioned and Sagnac phase difference simulations based on terrestrial navigation applications have been performed. In the simulations, variations of Sagnac phase difference with angular velocity for different fiber lengths, variations of photodetector output power and output signal with Sagnac phase difference have been investigated. The important points where the simulation results are in good agreement with or separate from the results obtained in practical applications have been emphasized.

Key Words: IFOG, gyroscope, optical fiber sensor, Sagnac phase difference, phase modulation.

1. GİRİŞ

Optik fiberli algılayıcının temel ilkesi, ışığın algılanacak büyüklük tarafından elektriksel arabirime ihtiyaç duyulmadan doğrudan ya da dolaylı şekilde modüle edilmesidir. Işık, beş temel özelliği ile modüle edilir. Bunlar, optik yoğunluk, faz, polarizasyon, dalga boyu ve spektral dağılımdır. Optik fiberli algılayıcıların büyük bir kısmı ilk üç özelliği kullanmaktadır. Bir optik fiberli algılayıcı sisteminde, optik kaynaktan çıkan ışık fiberin içinde ya da dışında modüle edilerek optik alıcıya iletilir.

Açısal yer değiştirmeyi algılayan cihazlara jiroskop denir. Jiroskop, kesin yön tayini, konumlandırma ve durum kontrolü için kullanılan en temel cihazlardandır. Gelişen teknoloji ile birlikte, me-

* Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 16059 Görükle, BURSA.

** Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle, BURSA.

kanik jiroskop (DTG) (Howe ve Savet, 1964), ring lazer jiroskop (RLG) (Rosenthal, 1962), interferometrik optik fiberli jiroskop (IFOG) (Vali ve Shorthill, 1976), mikro-elektromekanik sistem (MEMS) (Piyabongkarn ve diğ., 2005) gibi farklı jiroskop çeşitleri üretilmiştir. Optik fiberli jiroskop, uzun ömürlü olması, düşük enerji tüketimi, fiber yapısının sağladığı yüksek güvenilirliği, yer çekimi kuvveti ve ivmeye duyarsızlığı, yüksek hassasiyetli ölçüm yapabilmesi, geniş dinamik bölgesi, darbe ve titreşime karşı dayanıklılığı gibi avantajları nedeniyle en çok tercih edilen açısız yer değiştirme algılayıcısıdır (López-Higuera, 2002).

Optik fiberli jiroskopun çıkışı yükseltilmiş kosinüs işaretidir. Bu nedenle temel IFOG yapısında Sagnac faz farkı Θ_R 'nin çok küçük değerleri için doğrusal çıkış elde edilemez. Bu durum, küçük açısız yer değiştirmelerin yüksek duyarlılıkla ölçümüne engel olur (Horozoğlu ve Karlık, 2009). Bu sorunu çözmek için, çalışma noktasını duyarlılığın maksimum olduğu yükseltilmiş kosinüsün sözde doğrusal bölgesine $[\Theta_R=(2n+1)\pi/2]$ kaydırmak gereklidir. Bu işlem faz modülatörü kullanılarak gerçekleştirilir (Polynkin, 2000).

Faz modülasyonlu açık çevrim IFOG yapısı, çalışma noktasını duyarlılığın maksimum olduğu yükseltilmiş kosinüsün sözde doğrusal bölgesine kaydırır. Ancak, yüksek dönme hızlarında, çalışma noktası tekrar duyarlılığı düşük olan bölgelere kayar. Bu durum, açık çevrim IFOG'un yüksek hızlarda yüksek duyarlılıkla ölçüm yapabilmesine engel olur (Wilson ve Hawkes, 2000). Aynı zamanda IFOG'un doğrusal dinamik bölgesini de sınırlar. Ayrıca, çıkış işaretinin Sagnac faz farkı ile ilişkisini ortaya koyan ölçek katsayısının (skala faktörünün) kararsızlığı, açık çevrim IFOG'daki önemli bir problemdir. Tüm bu problemleri ortadan kaldırarak IFOG'un performansını geliştirmek için, çıkış işaretinin tek taraflı faz kaydırıcıya geri beslendiği kapalı çevrim yapısı geliştirilmiştir.

Bu çalışmada IFOG'un çalışma ilkesi açıklanmış, faz modülasyonlu açık ve kapalı çevrim IFOG yapıları analiz edilmiş, IFOG'un performansını etkileyen parametreler değerlendirilmiş, Sagnac faz farkının ve fotoalıcı çıkış işaret gücünün benzetimi yapılmış, elde edilen sonuçlar yorumlanarak pratik uygulamalardaki sonuçlarla örtüşen ve ayrılan yönleri vurgulanmıştır.

2. IFOG ÇALIŞMA İLKELERİ

Optik fiberli jiroskop, Sagnac etkisini temel alır. IFOG sisteminde kangalın açısız dönme hızı Ω , sistemin giriş parametresi olarak alınır ve Sagnac faz farkı giriş dönme hızı ile orantılı biçimde ifade edilir. Tek sarımlı ve r yarıçaplı fiber kangal hareketsiz ise, aynı yol üzerinde zıt yönlerde ilerleyen ışın demetleri, aynı hıza sahip olur. Bu durumda her iki ışın demeti başlangıç noktasına (1) ile hesaplanabilen bir t süresi sonunda ulaşır.

$$t = 2\pi r / c \quad (1)$$

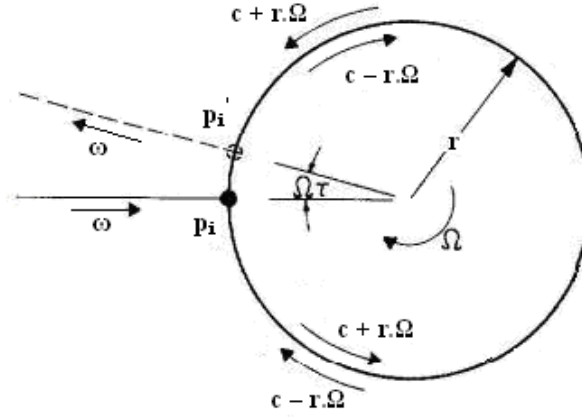
Burada, c ışığın ortamdaki hızıdır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, fiber kangal saat yönünde Ω rad/s'lik açısız hız ile dönüyorsa, saat yönünün tersi yönde hareket eden ışın demetinin başlangıç noktasındaki etkin demet hızı $c + r.\Omega$ ve başlangıç noktasına ulaşma süresi

$$t_1 = L / (c+r.\Omega) \quad (2)$$

olacağından, ışın demeti başlangıç noktasına kangalın hareketsiz durumundakine kıyasla daha erken varır. (2)'de L fiber uzunluğudur ($L = 2\pi r$). Benzer biçimde saat yönünde ilerleyen ışın demetinin başlangıç noktasında etkin hızı $c - r.\Omega$ ve başlangıç noktasına ulaşma süresi

$$t_2 = L / (c-r.\Omega) \quad (3)$$

olur. Dolayısıyla, saat yönünde ilerleyen demet, başlangıç noktasına kangalın hareketsiz durumundakine kıyasla geç varır.



Şekil 1:
Sagnac İnterferometresi

Zıt yönlü ışın demetlerinin başlangıç noktasına ulaşma süreleri arasındaki fark (2) ve (3)'ten

$$\Delta t = t_2 - t_1 = L [(1 / (c-r.\Omega)) - (1 / (c+r.\Omega))] = 4\pi r^2 \Omega / (c^2 - r^2 \Omega^2) \quad (4)$$

şeklinde elde edilir. $c^2 \gg r^2 \Omega^2$ olduğundan hesaplamalarda

$$\Delta t = 4\Omega A / c^2 \quad (5)$$

kullanılabilir. (5)'te A fiber kangalın kapladığı alandır ($A = \pi r^2$).

Δt zaman farkının, açısal frekansı $\omega = 2\pi f$ olan bir sürekli dalga için oluşturacağı Sagnac faz farkı

$$\Phi_R = 2\pi f \Delta t \quad (6)$$

olur. $f = c / \lambda$ ve (5) denklemleri (6)'da yerine konulursa Sagnac faz farkı

$$\Phi_R = 8\pi A \Omega / \lambda c \quad (7)$$

olarak elde edilir.

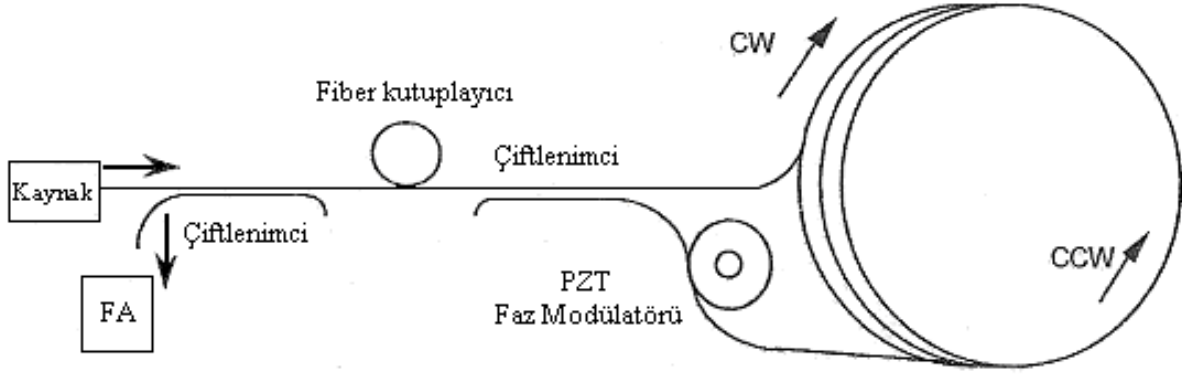
Çok sarımlı fiber kangal yapı kullanılarak jiroskopun duyarlılığı artırılabilir. N sarımlı fiber kullanıldığında, ışık dalgası N katı fazla yol kat edecek ve Sagnac faz kayması bu oranda artarak duyarlılığın artmasını sağlayacaktır. N sarımlı fiber kangal yapısına sahip bir jiroskopta faz farkı

$$\Phi_R = 8\pi N A \Omega / \lambda c = 2\pi L_T D \Omega / \lambda c \quad (8)$$

ile hesaplanır. (8)'de L_T toplam fiber uzunluğu ($L_T = 2\pi r N$), D fiber kangal çapı ($D = 2r$) olup $2\pi L_T D / \lambda c$ ölçek katsayısı olarak adlandırılır.

3. AÇIK ÇEVİRİM IFOG MODÜLASYON İLKELERİ

IFOG temel yapısındaki en önemli problem Sagnac faz farkı Φ_R 'nin çok küçük değerleri için çıkışın doğrusal olmamasıdır. Bu durum, küçük dönme açılarının yüksek duyarlılıkla ölçümüne engel olur (Horozoğlu ve Karlık, 2009). Kosinüs formu yüzünden, küçük açısal hız değerleri için girişimölçer çıkışındaki değişim çok küçük olur. Eğer toplam faz farkı 1 radyandan küçükse kosinüs maksimum değerine yaklaşır ve alıcı bu küçük farka duyarlı olmaz. Bu durumda optik işaretin Sagnac faz farkını belirlemek mümkün olmaz. Bu sorunu çözmek için, çalışma noktasını duyarlılığın maksimum olduğu yükseltilmiş kosinüsün sözde doğrusal bölgesine [$\Phi_R = (2n+1)\pi/2$] kaydırmak gereklidir (Polynkin, 2000). Bu işlem faz modülasyonu ile gerçekleştirilir. Açık çevrimli yapıda, faz modülasyonu için yaygın olarak fiber kangalın sonuna yerleştirilen PZT faz modülatörü kullanılır. Açık çevrim IFOG yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Açık çevrim IFOG, genellikle yüksek duyarlılık gerektirmeyen, düşük maliyetli uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2:
Açık Çevrim IFOG Blok Şeması

İnterferometrik optik fiberli jiroskoplarda kaynak olarak lazer ya da parlak ışıklı LED kullanılır. Bu kaynaklar Rayleigh saçılmasının etkisini azaltır. Açık çevrim IFOG'da, daha çok LED gibi geniş bantlı bir ışık kaynağı kullanılır. Fiber kutuplayıcı tarafından kutuplanan ışık, saat yönünde belirli bir açısal hız ile dönen N sarımlı fiber kablının girişindeki çiftlenimci tarafından eşit güçlü iki demete ayrılır. Böylece, ışın demetlerinin fiber kabloda karşıt yönlere yayılması garantilenir. Modülâtör, karşıt yönde yayılan iki ışın demeti arasındaki zaman farkını dengeler ve optimize demodülasyon işaretinin elde edilebilmesini mümkün kılar. IFOG'larda yaygın olarak bir piezoelektrik halka üzerine sarılan optik fiberden oluşan PZT faz modülâtörü kullanılır. Halkaya uygulanan gerilim, halka çevresini ve fiber uzunluğunu değiştirir. Faz değişimi, boyuna kuvvet uygulanmasıyla, sıcaklıkla fiberin boyunun değiştirilmesiyle veya radyal kuvvet uygulanmasıyla sağlanabilir.

Üstesinden gelmesi gereken bir diğer problem 'terslenme' olarak bilinir. Bu, herhangi bir yol farkı potansiyel faz gürültüsü kaynağı olduğundan, iki zıt yönde ilerleyen demetin tam olarak özdeş yolları izlemesinin sağlanmasını gerektirir (Wilson ve Hawkes, 2000). Bu durum, kontrollü faz gecikmesi oluşturularak gerçekleştirilebilir.

Saat yönünün tersi yönde ve saat yönünde yayılan dalgalarda meydana gelen faz gecikmesi, sırasıyla $\Phi(t)$ ve $\Phi(t + \tau)$, L uzunluklu fiber boyunca ışın geçiş süresi $\tau = L / c$ olmak üzere algılayıcıdaki faz farkı

$$\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \Phi_R + \Phi(t) - \Phi(t + \tau) \quad (9)$$

olur. (9)'da Φ_{CCW} ve Φ_{CW} sırasıyla saat yönünün tersi yönde ve saat yönünde ilerleyen ışık dalgasının fazıdır.

Aynı zamanda, algılayıcıdaki faz farkı

$$\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \Phi_R + \Phi(t - \tau / 2) - \Phi(t + \tau / 2) \quad (10)$$

olarak da yazılabilir.

ω_m açısal frekansındaki faz gecikmesi

$$\Phi(t) = \Phi_{m0} \cdot \cos \omega_m t \quad (11)$$

iken, algılayıcıdaki faz farkı

$$\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \Phi_R + 2\Phi_{m0} \cdot \sin \omega_m \tau / 2 \cdot \sin \omega_m t = \Phi_R + \Phi_m \cdot \sin \omega_m t \quad (12)$$

olur.

PZT modülasyon frekansı $f_m = \omega_m / 2\pi = 1 / (2\tau)$ seçilerek, genlik ($\Phi_m = 2\Phi_{m0} \cdot \sin \omega_m \tau / 2$) en büyük yapılabilir. Bu, aynı zamanda Rayleigh saçılma gürültüsünün de baskılanmasını sağlar.

Algılanan işaret, DC bileşenden başka, modülasyon işaretinin tüm harmoniklerini de içerir. Tek harmonik bileşenleri istenilen $\sin\theta_R$ bağımlılığını taşıırken, çift harmonik bileşenlerinin genliği $\cos\theta_R$ 'ye bağlı olarak değişir (Udd, 1991).

Şekil 2'deki sistemde, fotoalıcı, algılanan anlık ışık yoğunluklarının ortalamasını alır ve dönme hızının fonksiyonu olan kosinüs formunda bir çıkış üretir. Bu nedenle dönmenin yönü algılanamaz. Bu durumda alıcının çıkış gücü

$$P_A = P_0 (1 + \cos \theta_R) / 2 \quad (13)$$

olur. P_0 dönmenin olmadığı durumdaki maksimum alıcı çıkış gücüdür.

Dönme yönünü tanımlayabilmek için faz modülatörü olarak, AC-kutup modülatör kullanılır. Böylece fotoalıcıdaki çıkış işareti I , dönme yönünün algılanabilmesini mümkün kılan tek harmonik bileşenlerinden oluşan, Sagnac faz farkının sinüsoidal bir fonksiyonu olur.

$$I = P_0 \cdot J_1(A) \cdot \sin\theta_R \quad (14)$$

(14)'te P_0 ana demetin gücü, A AC-kutup modülatörünün faz kaymasını etkinleştirmesi ile üretilen sinüsoidal işaretin genliği, $J_1(A)$ birinci derece Bessel Fonksiyonu' dur. Çıkış işareti, $A = 1.8$ ($J_1(1.8) = 0.5815$) seçilerek, en büyük yapıdır (Noureldin, 2002). Bu işaret ile ilgili iki temel problem mevcuttur. Birincisi, sinüsoidal fonksiyonun sınırlı dinamik bölgesi ve doğrusal olmayan yapısına bağlı olan düşük duyarlılıktır. Küçük dönme hızları için bu ilişki doğrusal kabul edilebilir. Küçük dönme hızlarında yüksek duyarlılık ($\sim 10^{-2}$ °/s) ve kararlılığa ($\sim 10^{-1}$ °/s) sahip ölçümler AC-kutup modülatör kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ancak açık çevrimli sistem, yüksek dönme hızlarında sinüsoidal işaretin doğrusalsızlığından etkilenir. Demodüle edilen çıkış işaretinin dönme hızı ile ilişkisi doğrusal değildir. AC kutup modülasyonu sıfır dönme hızı için çalışma noktasını duyarlılığın maksimum olduğu noktaya kaydırır. Ancak bu durum, $(2n+1)\pi/2$ 'lik Sagnac faz kayması üreten yüksek dönme hızlarında, çalışma noktasının tekrar düşük duyarlılıklı noktaya taşınmasına neden olur. Bu, IFOG'un doğrusal dinamik bölgesini sınırlar. İkinci problem ölçek katsayısı (skala faktörü, S_F) kararlılığıdır. Ölçek katsayısı, dönme hızı ile çıkış işareti arasındaki ilişkiyi ortaya koyar.

$$\theta_R = S_F \cdot \Omega \quad (15)$$

Ölçek katsayısı, fiber kangalın geometrik parametrelerinin ve kullanılan algılayıcı sistemin elektronik bileşen parametrelerinin fonksiyonudur. FOG'un açık çevrim minimum yapısı için S_F ,

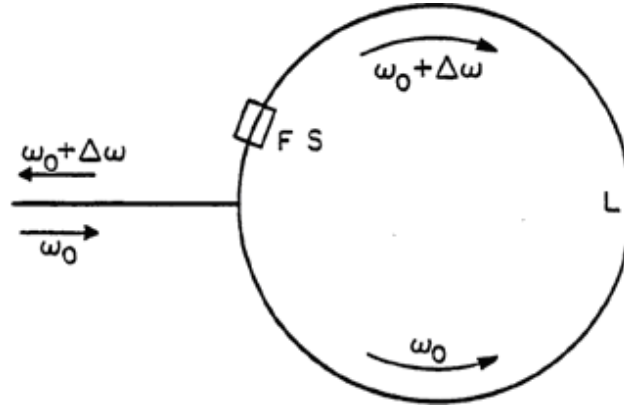
$$S_F = G \cdot P_0 \cdot J_1(\Delta\theta_m) \cdot \sin\theta_R \quad (16)$$

şeklindedir. (16)'da G faz demodülatörü ve fotoalıcıdaki elektronik kazanç, $\Delta\theta_m$ dinamik kutup için diferansiyel faz modülasyon genliğidir. Ölçek katsayısı kararlılığının FOG ile ilgili hemen hemen tüm parametrelere bağlı olduğu (16) eşitliğinden görülmektedir. Ölçek katsayısının kararlılığını sağlamak için, bu parametrelerden bağımsız bir alıcı sistem geliştirilmelidir. Sadece analog çıkışın varlığı da bu yapının dikkate alınabilecek üçüncü dezavantajıdır. Bu problemleri çözmek için kapalı çevrim IFOG geliştirilmiştir.

4. KAPALI ÇEVİRİM IFOG MODÜLASYON İLKELERİ

IFOG'da yüksek dönme hızlarında doğrusal çıkış elde etmek, jiroskopun kapalı çevrim çalıştırılmasıyla sağlanmıştır. Bu yapıda kutuplanmış olarak demodüle edilen işaret, oluşan Sagnac faz kaymasını dengelemek için tekrar tek taraflı faz kaydırıcıya gönderilir. Bu yöntemle çalışma noktası her zaman duyarlılığın maksimum olduğu noktalarda tutulur ve sistemin geribesleme işareti dönme hızını yansıtır. Geribesleme işareti tek taraflı faz kaymasıyla doğru orantılı olduğunda dönme hızının doğrusal çıkış cevabı elde edilmiş olur.

Tek taraflı faz kaydırıcı olarak manyeto-optik kaydırıcılar denenmiştir. Ancak manyeto-optik etki kullanılarak tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir.



Şekil 3:
Frekans Kaydırıcılı Sagnac İnterferometre Döngüsü

Kapalı çevrim IFOG'un başarılı tasarımları, tek yan bant frekans kaydırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Frekans kaydırıcı aslında karşıt yönde yayılan her iki ışın demetinin frekansını aynı miktarda kaydıran çift taraflı bir cihazdır. Ancak Şekil 3'te gösterildiği gibi, frekans kaydırıcı fiber kavgalda asimetrik konumda yerleştirildiğinde, bu cihaz karşıt yönde yayılan dalgalar arasında farklı frekans kaymaları oluşturur. Demetler, çiftlenimciye aynı $\omega_0 + \Delta\omega$ frekansında vardığı halde, saat yönünün tersinde ilerleyen dalga, kangalı ω_0 frekansıyla, saat yönünde ilerleyen dalga ise kangalı $\omega_0 + \Delta\omega$ frekansıyla geçer. Bu nedenle karşıt yönde yayılan dalgalar arasında $\Delta\phi$ faz farkı oluşacaktır.

$$\Delta\phi = \Delta\omega \cdot \tau = 2\pi \cdot \Delta f \cdot (n \cdot L / c) \quad (17)$$

(17)'de τ karşıt yönlü iki dalganın frekans kaydırıcıdan geçiş süreleri arasındaki fark, n fiberin kırılma indisidir. Elde edilen faz farkı, Sagnac faz kaymasını dengelemek için kullanılabilir ve $\Delta\omega$, dönme hızı ile doğru orantılı olur.

(8) ve (17)'den dönme hızının etkisini yok etmek için ihtiyaç duyulan Δf hesaplanabilir.

$$\Delta f = (D/n \cdot \lambda) \cdot \Omega \quad (18)$$

Bu durumda bu yapının ölçek katsayısı

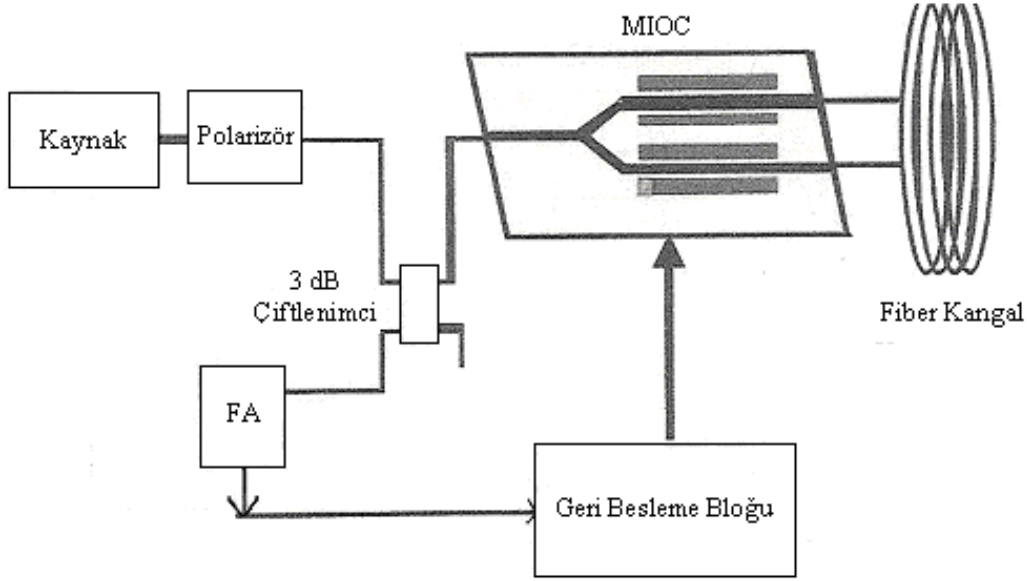
$$S_F = D/n \cdot \lambda \quad (19)$$

olarak elde edilir.

IFOG'un açık çevrim minimum yapısı için (16) ile verilen ölçek katsayısı ile karşılaştırıldığında, bu yapının ölçek katsayısının sadece kangal çapına (D), kaynağın dalga boyuna (λ) ve fiberin kırılma indisine (n) bağlı olduğunu görebiliriz. Bu durum, ölçek katsayısı kararlılığının artmasına neden olur.

Günümüzde kapalı çevrim yapı için sayısal faz tırmanış ve kare dalga kutuplama modülasyonlarını temel alan, tamamı sayısal yapıdaki yaklaşım ile büyük iyileştirmeler sağlanmıştır (López-Higuera, 2002). Bu yapının fonksiyonel blok şeması Şekil 4'te gösterilmiştir.

Günümüzde yüksek duyarlılıklı IFOG'ların sayısal kapalı çevrim kontrol sistemi, tamamıyla tümleşik optik aygıtlara (MIOC) dayanmaktadır. MIOC kullanan bir kapalı çevrim IFOG blok şeması Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6:
MIOC Kullanan Kapalı Çevrim IFOG Blok Şeması

MIOC üç fonksiyonu gerçekleştirir:

1. Terslenmeden kaynaklanan kutuplanma kararsızlığını engellemek için ışın demetlerinin kutuplanmasını sağlar.
2. Işını saat yönünde (CW) ve saat yönünün tersi yönde (CCW) ilerleyebilmesi için iki demete ayırır ve fiber kargalının içerisine gönderir. Aynı zamanda geri dönen ışın demetlerinin tekrar birleştirilmesini sağlar.
3. Elektro-optik faz modülatörleri yardımıyla karşıt yönlerde ilerleyen ışın demetleri arasında kutuplanma faz kayması sağlar.

Geri besleme bloğunda sinyal işleme devreleri kullanılarak, genliği Sagnac faz kaymasına ve süresi τ 'a eşit olan faz adımları üretilir. Oluşturulan bu işaret, kare dalga kutuplama işareti ile birlikte MIOC'a gönderilir. MIOC'un iki koluna yerleştirilen optik faz modülatörleri ile kapalı çevrim çalışma gerçekleştirilmiş olur. Bu sistem, ölçek katsayısının fotoalıcısındaki ve faz demodülatöründeki elektronik parametrelere bağımlılığını ortadan kaldırır.

IFOG çıkış sinyali ve faz kayması arasındaki ilişki

$$I = I_0 [1 + \cos (\Delta\theta_R + \Delta\theta_J + \Delta\theta_F)] \quad (20)$$

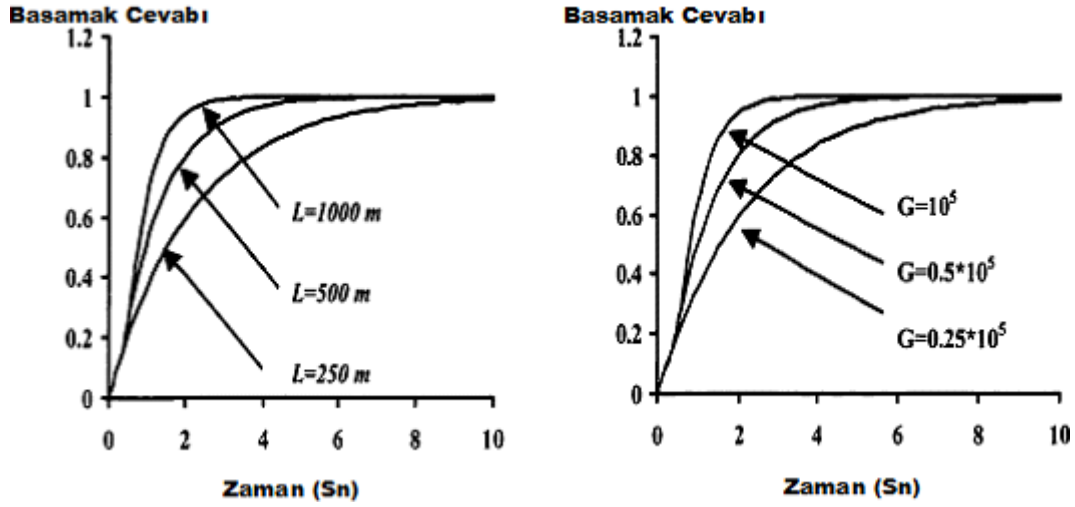
olarak ifade edilebilir. $\Delta\theta_R$ Sagnac faz kayması, $\Delta\theta_J$ ve $\Delta\theta_F$ sırasıyla faz tırmanış ve kare dalga modülasyonları ile oluşan faz kaymasını belirtir. Burada $\Delta\theta_F$ 'nin pozitif ve negatif yarı döngülerinde değeri sırasıyla $+\pi/2$ ve $-\pi/2$ 'dir. Bu nedenle kare dalganın pozitif ve negatif döngüleri arasındaki girişim işareti farkı

$$\Delta I = I_0 [\cos (\Delta\theta_R + \Delta\theta_J + \pi/2) - \cos (\Delta\theta_R + \Delta\theta_J - \pi/2)] \quad (21)$$

olarak tanımlanabilir. Jiroskop kapalı çevrimi kararlı haldeyken, $\Delta I \sim 0$ 'dır ve tırmanma işaretinin genliği IFOG açısal hızıyla orantılıdır (Li ve diğ., 2008).

Açık çevrim IFOG sorunlarını ortadan kaldırmak için geliştirilen kapalı çevrim IFOG ile çok yüksek performans elde edilebilir. Kaynaktaki doğrusal çalışma bölgesine sahiptir. Sistemin kararlılığı ve doğrusallığı kullanılan faz modülatörüne bağlıdır. Uçak ve helikopter navigasyonu gibi yüksek

doğrusallık ve geniş dinamik bölge gerektiren, yüksek dönme hızına sahip navigasyon uygulamalarında kapalı çevrim IFOG kullanılır.



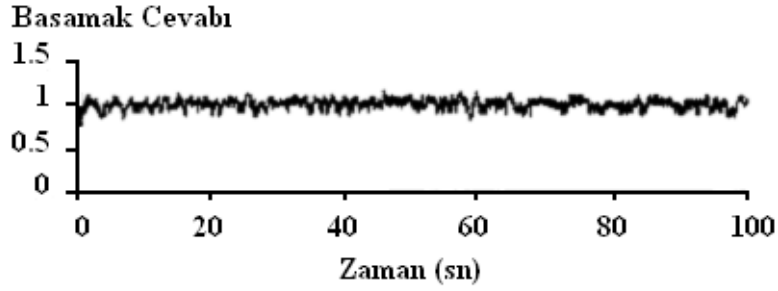
Şekil 7:
Farklı L Değerleri için ($G=10^5$) ve Farklı G Değerleri için ($L=1000 m$)
IFOG Basamak Cevabı

5. IFOG PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ

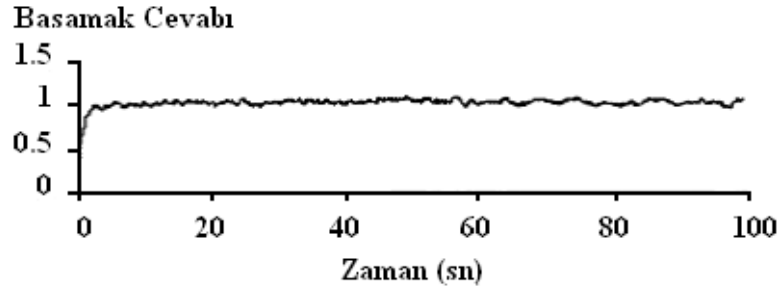
1. Kutuplanma Noktası Kayması (Bias Drift): Kutuplanma noktası kararsızlığı olarak da adlandırılır. Sabit sıcaklıkta ölçülen açısal yer değiştirme hızındaki sapma olarak tanımlanır. Kutuplanma noktası kayması, sistemin elektronik kazancı (G) ve fiber uzunluğundan (L) etkilenir. Bu değerlerdeki artış, kutuplanma noktası kaymasını azaltır. Böylece sistemin kararlılığı artar. Sistem kararlılığının artış derecesi, basamak cevabının yükselme süresini azaltır ve IFOG'un duyarlılığını artırır. Farklı L ve G değerleri için IFOG sisteminin basamak cevabı Şekil 7'de gösterilmiştir (Noureldin ve diğ., 1999).

Genellikle küçük yükselme süresi sağlamak ve dar bir döngü oluşturmak için elektronik sistemin kazancı büyük tutulur. Optik işaretlerle ilgili zayıflama ve dispersiyon problemleri olduğundan, fiber uzunluğu 1000 m ile sınırlanır.

2. ARW (Angle Random Walk) Gürültüsü: IFOG'un alıcısındaki çıkışı, atış gürültüsü (shot noise) ve ısı gürültüsünden kaynaklanan genişbandlı rasgele gürültü bileşenleri içerir. Bu gürültü, ARW (Angle Random Walk) gürültüsü olarak bilinir ve beyaz gürültü biçiminde modellenir. ARW gürültüsü için en etkili parametre elektronik kazançtır (G). Fiber uzunluğu, kargal çapı, kırılma indisi ve dalgaboyu etkin değildir. G değeri ne kadar büyükse gürültü o kadar fazla olur. Farklı G değerleri için, ARW gürültüsünün IFOG basamak cevabı üzerindeki etkisi Şekil 8'deki grafiklerde gösterilmiştir (Noureldin ve diğ., 1999).



(a)

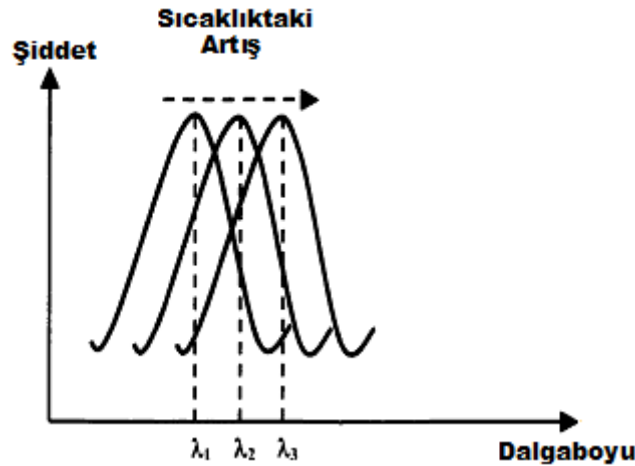


(b)

Şekil 8:
Farklı G Değerleri için [a) $G = 2 \cdot 10^5$ ve b) $G = 0.5 \cdot 10^5$]
ARW gürültüsünün IFOG Basamak Cevabı Üzerindeki Etkisi

3. Ölçek Katsayısı: Ölçek katsayısı, açısal yer değiştirme ve Sagnac faz kayması arasındaki ilişkiyi tanımlar. (16) ve (19) eşitliklerinde sırasıyla açık ve kapalı çevrim IFOG yapılarının ölçek katsayıları belirtilmiştir. Ölçek katsayısının kararsızlığı, λ değerini değiştiren sıcaklık değişiminden kaynaklanır. Şekil 9'daki grafikte, sıcaklık değişiminin optik işaretin dalgaboyuna etkisi gösterilmiştir.

Ticari uygulamalar için üretilen IFOG'lar genellikle 80 °C'ye kadar işlevselliğini sürdürebilmektedir.

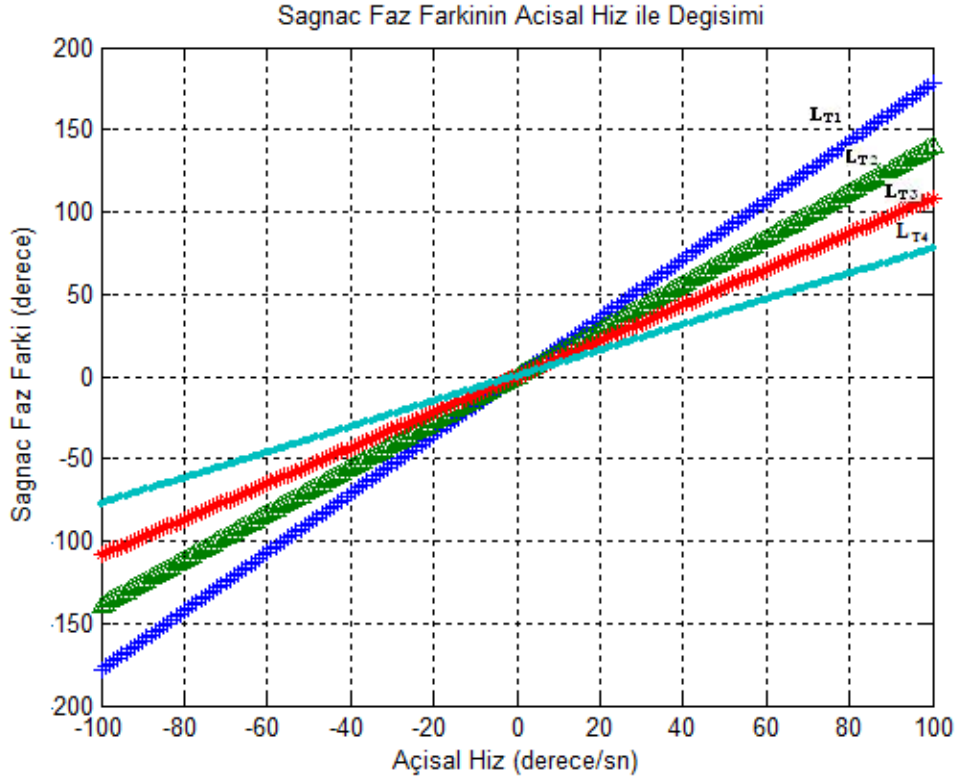


Şekil 9:
Sıcaklık Değişiminin Optik İşaretin Dalgaboyuna Etkisi

6. BENZETİMLER

Bu bölümde, Matlab programı kullanılarak IFOG için Sagnac faz farkının, fotoalıcı çıkış gücünün ve çıkış işaretinin benzetimleri yapılmıştır. Benzetimlerde, kara navigasyon uygulamalarında kullanılan kapalı çevrim IFOG için uygun açısal hız ve fiber uzunluğu değerleri baz alınarak, Sagnac

faz farkının açısal hız ile değişimi, fotoalıcı çıkış gücünün Sagnac faz farkı ile değişimi ve dönme yönünü ortaya koyan çıkış işaretinin Sagnac faz farkı ile değişimi incelenmiştir.



Şekil 10:

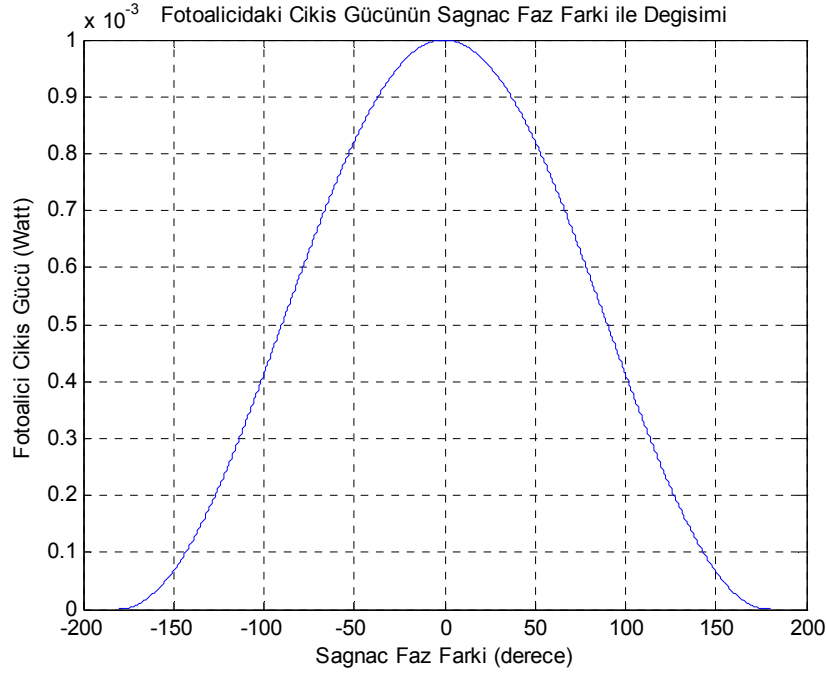
Farklı Fiber Uzunlukları için Sagnac Faz Farkının Açısal Hız ile Değişimi
($L_{T1}=1.15$ km, $L_{T2}=0.9$ km, $L_{T3}=0.7$ km, $L_{T4}=0.5$ km)

IFOG'un kara navigasyon uygulamalarında, genellikle açısal hızın ± 100 °/s 'lik değerleri ölçülebilmektedir. Bu noktadan hareketle, farklı fiber uzunlukları için Sagnac faz farkının -100 °/s - $+100$ °/s aralığındaki açısal hız ile değişiminin benzetimi yapılmıştır. Benzetimde, fiber kangal çapı $D = 77$ mm ve fiberde yayılan ışığın dalgaboyu $\lambda = 1550$ nm olarak alınmıştır. Fiber uzunlukları ise $L_{T1} = 1.15$ km, $L_{T2} = 0.9$ km, $L_{T3} = 0.7$ km ve $L_{T4} = 0.5$ km olarak seçilmiştir.

Şekil 10'da görüldüğü gibi, dönmenin olmadığı durumda Sagnac faz farkı sıfır iken, kangalın ivmeli olarak dönmesiyle birlikte Sagnac faz farkı doğrusal olarak artmaktadır. Kapalı çevrim IFOG sistemde açısal hız ile Sagnac faz farkı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan ölçek katsayısının kararlılığı sağlandığında, bu beklenen bir durumdur. Ancak pratikte grafiğin doğrusallığını bozan Faraday etkisi, Rayleigh saçılımı ve sıcaklık değişimi gibi etkiler mevcuttur (Lopez-Higuera, 2002). Bunlara ek olarak sistemdeki elemanların ve fiberin kayıpları nedeniyle, pratikte ölçülebilen hız aralığı ± 100 °/s'nin altında olur (Noureldin, 2002). Grafikteki negatif değerler kangalın ters yönde döndüğünü ifade etmektedir.

Şekil 10'da, Sagnac faz farkının fiber uzunluğu ile orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Bu beklenen bir durumdur. Fiber uzunluğunun artması, karşıt yönlerde yayılan iki ışın demetinin yol uzunluklarının artması anlamına gelir. Bu durumda Sagnac faz farkı da fiber uzunluğu ile doğru orantılı bir değişim gösterir. Ancak pratikte, optik fiberin kangala sarılması sırasında uygulanan gücün etkisiyle fiberin boyunda meydana gelen pikometreler mertebesindeki artış (Udd, 1991), değişimdeki doğrusallığı az da olsa bozacaktır.

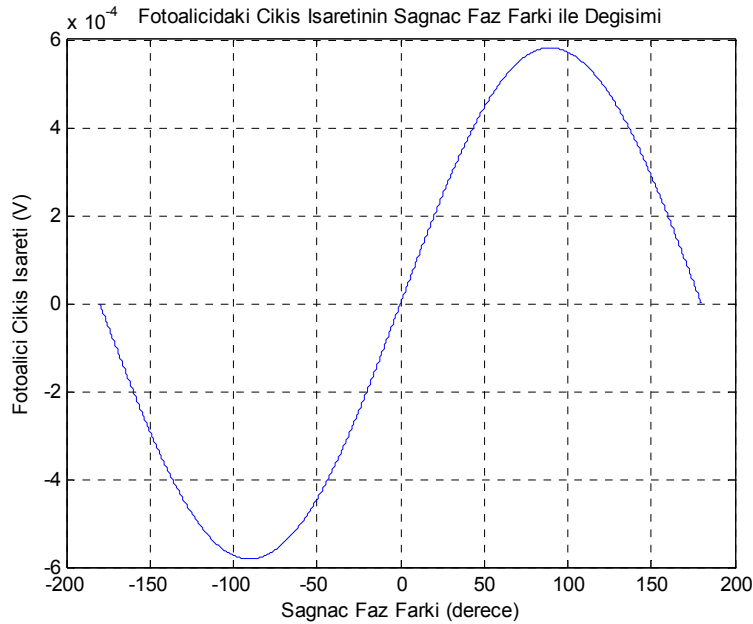
Fotoalıcıdaki çıkış gücünün Sagnac faz farkı ile değişimi, fiber kangalın -100 °/s - $+100$ °/s aralığındaki açısal hızlardaki hareketi için incelenmiştir. Benzetimde, fiber kangal çapı $D = 77$ mm, fiber uzunluğu $L_T = 1.15$ km ve kaynağın gücü $P_0 = 1$ mW alınmıştır.



Şekil 11:
Fotoalıcı Çıkış Gücünün Sagnac Faz Farkı ile Değişimi

Şekil 11’de görüldüğü gibi, IFOG ’un çıkış gücündeki değişim, yükseltilmiş kosinüs formundadır ($P_A = [P_0 (1 + \cos \Theta_R) / 2]$). Açısal hareketin olmadığı durumda ($\Theta_R = 0$), çıkış gücü maksimum alıcı gücüdür ($P_A = P_0$). Ancak pratikte, ışın demetinin fibere kuplajı ve sistemdeki optik bileşenlerden geçişi sırasında oluşan zayıflamalar nedeniyle (Polynkin, 2000), fotoalıcısındaki maksimum çıkış gücü P_0 ’dan daha düşük bir değere sahip olacaktır.

Fotoalıcısındaki yükseltilmiş kosinüs formundaki çıkış nedeniyle, dönmenin yönü algılanamaz. Dönme yönünü tanımlamak için AC-kutup modülatörünün kullanıldığı sistemde, fotoalıcıda elde edilen modüleli çıkış işaretinin Sagnac faz farkı ile değişiminin benzetim sonucu Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12:
Fotoalıcısındaki Tek Harmonik Bileşenlerinden Oluşan Enbüyüklenmiş Çıkış İşaretinin Sagnac Faz Farkı ile Değişimi

Şekil 12’de görüldüğü gibi, açısal hareketin olmadığı durumda çıkış ışareti sıfırdır. Fiber kangalın dönmeye başlamasıyla Sagnac faz farkı artmaya başlar. Buna bağlı olarak da fotoalıcı çıkışında bir gerilim değişimi gözlenir. Çıkış ışaretinin pozitif ve negatif değerler alması fiber kangalın ters yönlerde döndüğünü gösterir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, temel interferometrik optik fiberli jiroskobun (IFOG) performans problemlerini ortadan kaldırmak için geliştirilen faz modülasyonlu açık ve kapalı çevrim IFOG yapıları analiz edilmiş, performans karakteristiklerine değinilmiş ve karasal navigasyon uygulamalarının baz alındığı benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerde, 0.5 km ile 1.15 km arasındaki dört farklı fiber uzunluğu için Sagnac faz farkının açısal hız ile değişimi, fotoalıcı çıkış ışaretinin ve çıkış gücünün Sagnac faz farkı ile değişimleri incelenmiştir.

Sagnac faz farkının fiber kangalın dönme hızı ile değişimi incelendiğinde, dönmenin olmadığı durumda Sagnac faz farkı sıfır iken fiber kangalın ivmeli olarak dönmesiyle birlikte Sagnac faz farkının doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir. Ancak pratikte Faraday etkisi ve Rayleigh saçılımı gibi etkiler nedeniyle doğrusallık bozulmaktadır.

Sagnac faz farkı fiber uzunluğu ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Fiber uzunluğunun artması, karşıt yönlerde yayılan iki ışın demetinin yol uzunluklarının artması anlamına geldiğinden, bu beklenen bir durumdur. Ancak pratikte, optik fiberin kangala sarılması sırasında uygulanan gücün etkisiyle fiberin boyunda meydana gelen pikometreler mertebesindeki artış, Sagnac faz farkının fiberin boyu ile değişimindeki doğrusallığı az da olsa bozacaktır.

Fotoalıcı çıkış ışaret gücünün Sagnac faz farkı ile değişimi incelendiğinde, hareketin olmadığı durumda ($\theta_R = 0$) çıkış gücünün maksimum alıcı gücüne eşit olduğu ($P_A = P_0$) görülmüştür. Kangalın açısal hareketi ile faz farkının artması, fotoalıcıdaki optik gücün yükseltilmiş kosinüs formunda değişmesine neden olmaktadır. Pratik uygulamalarda, ışın demetinin fibere kuplajı ve sistemdeki optik bileşenlerden geçişi sırasında zayıflamalar meydana geleceğinden, fotoalıcıdaki maksimum güç P_0 ’a eşit olmayacaktır. Çıkış ışaretinin yükseltilmiş kosinüs formu, küçük dönme açılarının yüksek duyarlılıkla ölçümüne engel olur. Bu sorunu çözmek için, faz modülatörü kullanılarak, çalışma noktasını duyarlılığın maksimum olduğu yükseltilmiş kosinüsün sözde doğrusal bölgesine [$\theta_R = (2n+1)\pi/2$] kaydırmak gereklidir.

Fotoalıcı, algılanan anlık ışık yoğunluklarının ortalamasını alıp dönme hızının fonksiyonu olan kosinüs formunda bir çıkış ürettiğinden, dönmenin yönü algılanamaz. Dönme yönünü tanımlayabilmek için faz modülatörü olarak, AC-kutup modülatör kullanılır. AC-kutup modülatör ile modüle edilmiş ışaretin Sagnac faz farkı ile değişiminin incelendiği benzetimde, açısal hareketin olmadığı durumda Sagnac faz farkı ve çıkış ışareti sıfırdır. Açısal hareketin ve dolayısıyla Sagnac faz farkının artmaya başlamasıyla birlikte fotoalıcı çıkışında sinüsoidal formda bir gerilim değişimi gözlenmiştir. Çıkış ışaretinin pozitif ve negatif değerler alması fiber kangalın ters yönlerde döndüğünü gösterir.

KAYNAKLAR

1. Horozoğlu, G., Karlık, S. E. (2009) Optik Fiberlerin Açısal Yerdeğiştirme Algılamasında Kullanımı, 2. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Çankaya Üniversitesi, Ankara, 106-113.
2. Howe, E. W., Savet, P. H. (1964) The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro, Control Engineering, 11(6):67-72.
3. Li, X., Zhang, Y., Yu, Q. (2008) Four-State Modulation in Fiber Optic Gyro, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2008), Takamatsu, Japan, 189-192.
4. López-Higuera, J. M. (2002) Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, John Wiley & Sons Ltd, Chippingham, Wiltshire, UK.
5. Noureldin, A. (2002) New Measurement-While-Drilling Surveying Technique Utilizing Sets of Fiber Optic Rotation Sensors, Doktora Tezi, University of Calgary, Canada.
6. Noureldin, A., Mintchev, M., Halliday, D. I., Tabler, H. (1999) Computer Modelling of Microelectronic Closed Loop Fiber Optic Gyroscope, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Alberta, Canada, 633-638.

7. Piyabongkarn, D., Rajamani, R., Greminger, M. (2005) The Development of a MEMS Gyroscope for Absolute Angle Measurement, IEEE Trans. Cont. Syst. Tech., 13(2): 185-195.
8. Polynkin, P. (2000) Sagnac and In-Line Interferometer Technology Advances, Doktora Tezi, Texas A&M University, USA.
9. Rosenthal, A. H. (1962) Regenerative Circulatory Multiple-Beam Interferometry for the Study of Light-Propagation Effects, J. Opt. Soc. Am., 52(10):1143-1147.
10. Udd, E. (1991) Fiber Optic Sensors, John Wiley & Sons, Inc, USA.
11. Vali, V., Shorthill, R. W. (1976) Fiber Ring Interferometer, Appl. Opt., 15(5):1099-1100.
12. Wilson, J., Hawkes, J. F. B. (2000) Optoelektronik, Çeviri: Dr. İbrahim Okur, Değişim Yayınları, Adapazarı, 464-466.

Makale 17.08.2010 tarihinde alınmış, 23.12.2010 tarihinde düzeltilmiş, 30.12.2010 tarihinde kabul edilmiştir. İletişim Yazarı: S.E. KARLIK (ekarlık@uludag.edu.tr).