

Landau-Placzek Oranından Yararlanarak Dağılık Sıcaklığın Yüksek Çözünürlükte Algılanması

Fikri Serdar GÖKHAN

Türk Pirelli Kablo ve Sistemleri A.Ş.

AR-GE Bölümü

Mudanya/BURSA

E-mail: serdar.gokhan@tr.pirelli.com

Güneş YILMAZ

Türk Pirelli Kablo ve Sistemleri A.Ş.

AR-GE Bölümü

Mudanya/BURSA

E-mail: gunes.yilmaz@tr.pirelli.com

Abstract

In this letter, we present a high spatial resolution distributed temperature sensor based on measuring the ratio of the intensity of the spontaneous Brillouin to Rayleigh backscattered signal (Landau-Placzek ratio). This DTS system has been demonstrated utilizing conventional single-mode silica fibers for a range of 1 km from a single-ended source, and a temperature resolution of 4.3 C was achieved.

Index Terms—Laser applications, optical fiber devices, optical fiber measurement applications, temperature measurement.

1. Giriş

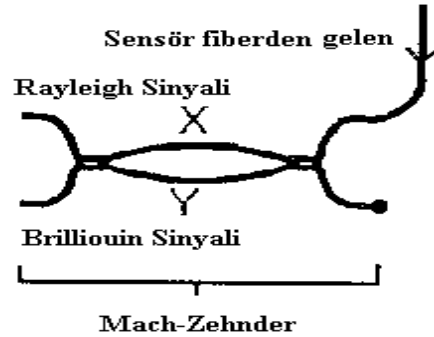
Optik fiberli sensörler ile dağılık sıcaklık ölçümlerinde, ölçüm alınan noktaların birbirine yakınlığı (iki nokta çözünürlüğü) ve sıcaklık çözünürlüğü ile uzun mesafeli sıcaklık algılama düzenekleri üzerinde çalışmalar sürmektedir. 2000 yılında H.H.Kee tarafından yapılan çalışmada Landau-Placzek oranı kullanılarak şu ana dek başarılı olmuş en yüksek iki nokta çözünürlüğü (35 cm) elde edilmiştir [1]. Bu teknikte dağılık sıcaklık ölçümleri, Rayleigh saçılmasının şiddetinin Brillouin saçılmasının şiddetine oranından (Landau-Placzek oranı) faydalanılarak elde edilmektedir. Bu yöntemde OTDR yöntemine benzer şekilde ışık darbesi fiber içerisine gönderildikten sonra fiberin nümerik açıklığından geri yansıyan ışığın şiddeti ölçülmektedir. Geriye saçılan ışığın algılanma zamanı ile darbeyi fiber içerisine gönderme zamanı arasındaki süreden yararlanarak saçılma noktası tespit edilmektedir. Sıcaklık bilgisi ise geriye saçılan Rayleigh ışık şiddetine göre referans alınan Brillouin ışık şiddetinden elde edilmektedir. Eğer geriye saçılan Brillouin işareti, geriye saçılan Rayleigh işareti göre doğru şekilde referans alınırsa, Rayleigh ve Brillouin işaretleri aynı uzamsal çözünürlükte elde edilebilmektedir. İstenen uzamsal çözünürlük değeri, gerekli olan minimum darbe süresini belirlemektedir.

Rayleigh ve Brillouin işaretlerini oluşturmak için önceleri farklı kaynaklar kullanılmışsa da daha

sonra geliştirilen devre düzeneklerinde her iki saçılım tek bir kaynakla oluşturulmuştur. Bu tekniğin Raman saçılması kullanılarak dağılık sıcaklık ölçülmesine dayanan tekniğe göre iki önemli avantajı bulunmaktadır. Birincisi, birbirlerine yaklaşık 11 GHz'lik bir frekans farkı aralığı ile oluşan pompalama (Rayleigh) ve Brillouin sinyallerini eş zamanlı olarak elde etmek mümkündür. İkincisi ise, geriye saçılan Brillouin sinyalinin şiddeti büyüklük olarak Raman şiddetinden daha fazla olduğundan sistem işaretin gürültüye oranı bakımından daha gelişmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda [2], Rayleigh ve Brillouin sinyallerini birbirinden ayırmak için kaybı çok yüksek olan (~10 dB) Fabry-Perot interferometresi kullanılmıştır. Ancak sonraları, Rayleigh ve Brillouin sinyallerini birbirinden ayırmak için düşük maliyetli ve en önemlisi kaybı 1 dB'den düşük olan tümüyle fiber yapılı Mach-Zehnder interferometresi kullanılmıştır. Mach-Zehnder interferometresi kullanmanın diğer bir avantajı ise Rayleigh ve Brillouin sinyalleri eşzamanlı olarak ölçülebilmektedir.

2. Tümüyle fiber yapılı Mach-Zehnder Interferometre Teorisi;



Şekil 1, Tümüyle Fiberden yapılmış Mach-Zehnder interferometresi

Şekil 1'de verilen interferometrenin X ve Y kolları arasındaki yol dengesizliği Δx , Rayleigh ve Brillouin sinyallerini iki kola ayırmaktadır.

$$\Delta x = \frac{c/n}{FSR} \quad (1)$$

(1) eşitliğinde, c ışığın boşluktaki hızı, n fiberin kırıcılık indisi, FSR ise interferometrenin serbest spektral bölgesidir. Brillouin sinyalindeki Stokes kayması; ν_B (2) eşitliği ile verilir;

$$\nu_B = \frac{2n\nu_a}{\lambda_p} \quad (2)$$

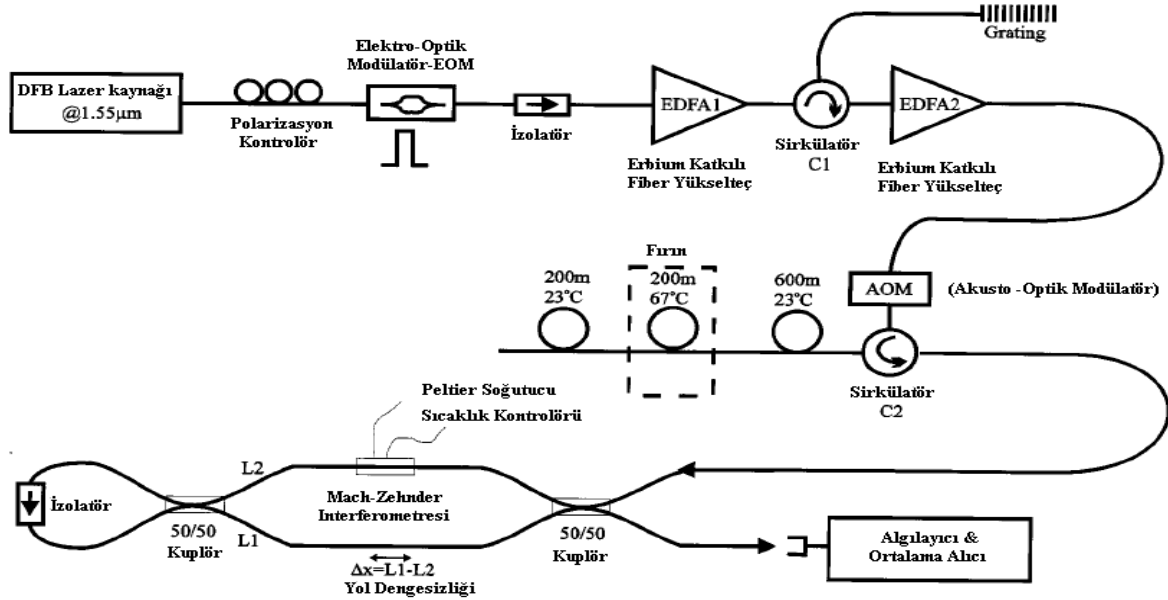
(2) eşitliğinden faydalanarak, interferometrenin olması gereken serbest spektral aralığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$FSR = \frac{4n\nu_a}{\lambda_p} \quad (3)$$

(3) eşitliğinde ν_a akustik hız olup silika fiberler için değeri yaklaşık 5.96 km/s. Pompalanan ışık dalgaboyu $\lambda_p=1530.1$ nm ve fiberin kırıcılık indisi $n=1.446$ için $FSR = 22.5$ GHz ve $\Delta x=9.2$ mm'dir [3].

3. Deney Düzenegi

Optik fibere 1,53 μm . dalga boylu monokromatik ışık gönderildiğinde, Brillouin ve Rayleigh çizgileri yaklaşık 11 GHz'lik bir frekans farkı ile



Şekil 2. Landau-Placzec yöntemi ile günlük sıcaklığın yüksek hassasiyetle algılanması için önerilen devre düzenegi

Darbe işareti, zamanın fonksiyonu biçiminde şiddeti değişen, spektral genişliği 100 MHz'ten küçük olan, dar hat genişlikli DFB (Distributed Feedback Laser - Dağınık-Geri Beslemeli Lazer) lazer diyot tarafından üretilmektedir. Lazer diyotun çıkış gücü 2.5 mW olup, diyot LiNbO3 EOM (Elektro Optik Modülatör) tarafından harici olarak modüle edilir.

oluşmaktadır. Birbirine bu kadar az bir frekans farkı ile oluşmaları, bu iki saçılmanın ayrıştırılmasını zorlaştırmaktadır. Hat genişliği dar olan bir kaynak kullanılarak Rayleigh ve Brillouin işaretleri ayırt edilebilmektedir. Ancak dar hat genişlikli bir kaynak kullanıldığı takdirde, eşzamanlı olarak Rayleigh gürültüsü de meydana gelmektedir (CRN-Coherent Rayleigh Noise). Bu nedenle, Rayleigh gürültüsünü minimal düzeye düşürmek için, Rayleigh işaretini oluştururken geniş bandlı kaynak kullanmak gereklidir. 1998 yılında, G.P.Lees tarafından, Rayleigh ve Brillouin işaretlerini problemsiz olarak üretmek için Erbiyum katkılı Q-Anahtarlamalı fiber lazerler önerilmiştir [4].

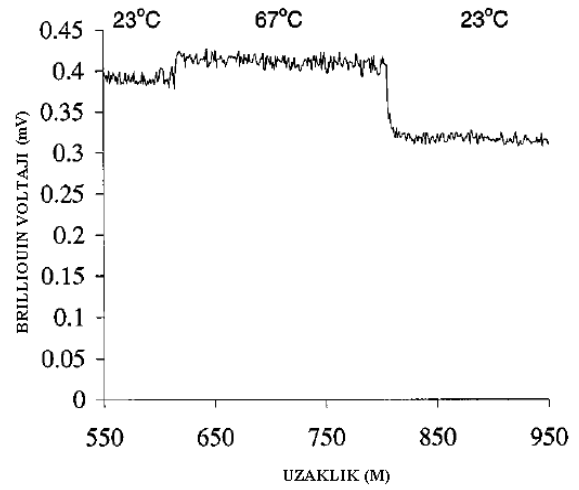
Landau-Placzec oranından faydalanarak sıcaklığın ölçülmesine ilişkin Kee tarafından Şekil 2' de önerilen devre düzeneginde fiber sensöre ek olarak, geriye doğru saçılan Brillouin işaretini oluşturan bir lazer kaynağı, düşük maliyetli filtreleme ve algılama sistemi bulunmaktadır. Algılama sistemi, tümüyle fiber yapıllı Mach-Zehnder interferometresi (MZI) ve bilgisayar tabanlı ortalama alıcı devreye bağlanmış yüksek duyarlılıkları InGaAs dedektör içermektedir.

Ayrıca, LiNbO3 EOM'un darbe yükselme süresi 100 ps.'dir. Bu darbe işareti, erbiyum katkılı fiber yükselteç (EDFA1) ile kuvvetlendirilir. Darbenin kuvvetlendirilmesi ile oluşan ASE gürültüsü (Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Emisyon) 1. sirkülatör (C1) tarafından Fiber Bragg Gratings kullanılarak filtrelenmektedir. Burada kullanılan Fiber

Bragg Gratings'ın $\lambda=1533.4\text{nm}$. 'de yansıtma katsayısı 99.4% ve dalga boyu kayması $\Delta\lambda=0.08\text{nm}$. 'dir. Akustooptik modülatörün (AOM) zayıflamasını telafi etmek için Fiber Bragg Gratings'ten yansıyan işaret ikinci bir Erbium katkılı fiber yükselteç (EDFA2) tarafından kuvvetlendirilmektedir. AOM modülatör darbeye hem anahtarlama yapmakta hem de işaret üzerinde ikinci yükselteçte oluşan ASE gürültüsünü filtrelemektedir. Akustooptik modülatör çıkışındaki işaretin güç tepe değeri 4.5 W ve darbe genişliği 3.5 ns.'dir. Akustooptik modülatör (AOM), elektrooptik modülatör ile (EOM) senkronize edilmiş olup 6600 Hz'lik tekrarlama frekansına sahip darbeler oluşturmaktadır (1/6600, 15 ms de bir). Darbeler fiber sensöre sirkülör üzerinden yollanmaktadır.

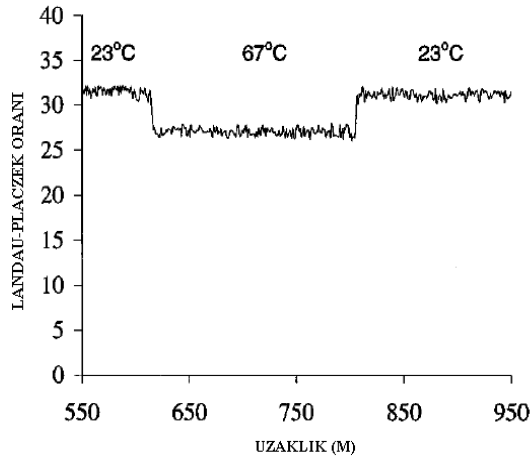
Brillouin işaretinin spektrumunu Rayleigh işaretinin spektrumundan ayırmak için, Fabry-Perot interferometresi yerine çift bant geçirecek şekilde tasarlanmış fiber yapıları MZI (Mach-Zender Interferometresi) kullanılmıştır. Bu düşük kayıplı interferometre, Brillouin işareti içerisindeki Rayleigh işaretinin gücü 26 dB'in üzerine çıktığında, fazla olan Rayleigh işaretini sönmülemektedir. Ayrıca bu interferometrenin kaybı 1dB'den küçüktür. Interferometrenin düşük kayıplı olması, işaretin gürültüye oranını yeterli kılmasının yanı sıra, ölçümün doğruluğu bakımından da bundan önceki sistemlere göre önemli bir ilerleme olarak ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık ile temas halindeki interferometrenin bir kolu, yoğun soğutucu kullanılarak kilitlenmektedir. Burada kullanılan geleneksel tek modlu sensör ($NA=0,12$, kesim dalga boyu= $1,2\mu\text{m}$) fiberi 3 kısımdan müteşekkil olup toplam uzunluğu 1 km'dir. Fiber kısımları sıra ile 600, 200 ve 200 m. uzunlukta olup birbirlerine kaynak yapılarak bağlanmışlardır. Geriye saçılan Brillouin işareti dedektör ve band genişliği 100 MHz, duyarlılığı 0,1 mV/nW olan transempedans kuvvetlendirici ile algılanmaktadır. Bilgisayara sayısal osiloskop bağlanarak geriye saçılan işaretlerin 26 dakikada 2^{17} defa ortalama değer alınmıştır.

Şekil 3.de, 550 m. uzaktaki fiber noktasından geriye doğru saçılan Brillouin işaretinin grafiği görülmektedir. İkinci makara (200m), oda sıcaklığına (23°C) göre 44°C derece ısıtılarak 67°C 'ye ulaştırılmıştır. Çizimden görüldüğü gibi, ısıtılan kısımda belirgin bir yükselme mevcuttur.



Şekil 3. Fiberin ek yerlerinde oluşan kayıpların kompanzasyonu yapılmadan önce 67°C 'ye kadar ısıtılmış fiber kısmından geriye saçılan Brillouin işaretinin güç seviyesindeki artış

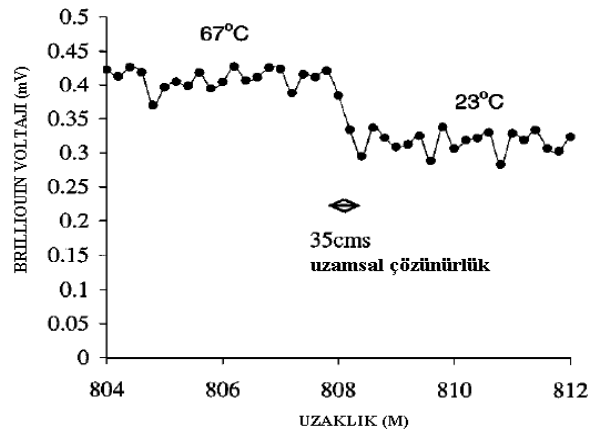
Buna ek olarak, sensör fiberin en sonundaki işaret seviyesi, gürültü seviyesinin üzerinde kalmaktadır. Bu durum, 1 km'nin üzerindeki uzunluklarda da ölçümlerin yapılabileceğini göstermektedir. Eldeki kaynak ile daha yüksek pompalama güçlerinin üretilmesi mümkünse de, pompalama gücünün tepe değeri belli bir eşik değeri üzerine çıktığında, geriye saçılımda kendiliğinden faz modülasyonu nedeniyle distorsiyon oluştuğu ve hatalı sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. Elde edilen Brillouin işareti, fiber zayıflamasına bağımlı olduğundan, belli noktadaki bağlantı kayıpları ve fiberin bükülme kayıpları nedeniyle mutlak sıcaklığın ölçülmesinde kullanılamaz. Mutlak sıcaklık ölçümlerinin yapılabilmesi için, Brillouin işareti, sıcaklık değişimlerine karşı etkisiz olan Rayleigh işaretine göre referans alınmalıdır. Eş zamanlı bozucu etkileri minimum seviyede tutmak için, DFB lazer diyot yerine geniş bantlı darbe üreten kaynak konularak Rayleigh işareti elde edilmektedir. Landau-Placzek oranı olarak bilinen Brillouin ve Rayleigh işaretlerinin oranı ile, sıcaklığın fiber zayıflamasından, ek yerlerindeki bağlantı kayıplarından ve fiberin bükülme kayıplarından bağımsız olarak ölçülmesi sağlanmaktadır. Rayleigh ve Brillouin işaretlerinin bölünmesi sonucu Landau-Placzek oranı kullanılarak ek yerlerindeki bağlantı kayıplarının kompanze edildiği sıcaklık profili Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4 Rayleigh işaretinin Brillouin işaretine bölünmesi (Landau-Placzek oranı) yöntemi ile bağlantı kayıplarının kompanse edilmesi

4. Sonuçlar

4,3°C olarak ölçülen sıcaklığın çözünürlüğü hakkında bilgi sahibi olmak için Landau-Placzek oranındaki etkin gürültü hesaplanmıştır. Şekil 5’de, uzamsal çözünürlüğün görüntülenmesi amacıyla 67 °C ve 23°C’deki fiber bölmeleri için geriye saçılan Brillouin işaretinin, basamak-basamak ölçüm grafiği gösterilmektedir. Fiberin belli bir noktada sıcaklık Δt kadar değiştiğinde, sıcaklık değişiminin %10 u ile % 90’ı arasındaki geçen sürede ölçülen mesafe iki nokta çözünürlüğü olarak belirlenmektedir. Isıtılmış ve ısıtılmamış fiber kısımlarındaki noktalardan gelen işaretlerin ortalama değerleri alınarak, birim sıcaklığın %10 ile % 90 değişim süresi içinde ölçülen mesafe 34.2 cm olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, bu güne kadar geriye saçılan Brillouin işaretinin şiddeti kullanılarak dağımik sıcaklık algılama yöntemi ile elde edilen en yüksek uzamsal çözünürlüktür. 1 km’lik sensör fiberde, 1,5 μm de 3,5 ns’lik darbe genişliği, 6600 Hz’lik darbe tekrarlama aralığı ve 4,5 W tepe değeri olan darbeleri kaynak ile 35 cm’lik uzamsal çözünürlük ve 4.3°C’lik sıcaklık çözünürlüğü elde edilmiştir. Bu derece yüksek uzamsal çözünürlük elde etmek için Brillouin işaretinin band genişliği, kullanılan darbeleri kaynağın bant genişliğine eşit olacak şekilde artırılmıştır. Bu sistem, fiberin tek ucundan ölçüm alınması yönünden de avantajlıdır. Bu sensör düzeneği, geriye saçılan Brillouin işaretinin şiddetini kullanarak sıcaklık değişimlerinin izlenmesi için uygun olmasının yanı sıra, tümleşik sıcaklık ve uzama ölçümlerinin bu yöntemle yüksek iki nokta çözünürlüğü ile ölçülebilmesini sağlayabilecek potansiyele sahip olması bakımından da önemli bir gelişmedir.



Şekil 5. 35 cm’lik uzamsal çözünürlükle 67 °C’lik sıcaklık bölgesinden 23 °C’lik sıcaklık bölgesine geçiş esnasında Brillouin gerilimindeki değişim

KAYNAKLAR

- [1] Kee, H.H., G.P.Lees and T.P.Newson., Technique for measuring distributed temperature with 35-cm spatial resolution utilizing the Landau-Placzek ratio, IEEE 2000 Photonics Technology Lett. vol.12 No.7 p. 873-875.
- [2] Wait, P.C. and NEWSON, T.P.: ‘Landau-Placzek ratio applied to distributed temperature sensing’, Opt. Common., 1996, 122, (4-6), pp.141-146
- [3] F.S.GOKHAN, “Haberleşme ve Enerji Kablolarının Performansını etkileyen Sıcaklık, Nem ve Mekanik Streslerin Optik Fiberli Sensörlerle Ölçülebilirliğinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2002. s:75-81
- [4] LEES, G. P., P. C. WAIT, M. J. COLE ve T.P. NEWSON. 1998. Advances in Optical Fiber Distributed Temperature Sensing Using the Landau-Placzek Ratio. IEEE Phot. Tech Let, 10(1), p. 126-128