

OPTİK KUVVETLENDİRİCİLİ UZAK MESAFE İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE POLARİZASYON MOD DİSPERSİYONUNUN SABİT ÇÖZÜMLEYİCİ VE JONES MATRİSİ YÖNTEMLERİYLE ÖLÇÜLMESİ

Sait Eser KARLIK¹Güneş YILMAZ²

^{1,2}Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, BURSA e-mail: ekarlik@uludag.edu.tr

Anahtar Sözcükler: PMD, Sabit Çözümleyici, Jones Matrisi, EDFA İletişim Sistemi, Optik Fiber

ÖZET

Polarizasyon Mod Dispersiyonu (PMD), yüksek hızlı haberleşme sistemlerinde band genişliğini sınırlayan temel faktörlerden biridir. Uzak mesafe iletişim sistemlerindeki optik kuvvetlendiricilerde, optik işaretin yanısıra PMD'den kaynaklanan optik gürültü de kuvvetlendirilir. Bu nedenle, sistemdeki toplam PMD'nin yüksek doğrulukla belirlenmesi, optik iletişim sisteminin güvenilirliğinin sağlanması açısından büyük önem taşır. Sabit çözümleyici ve Jones matrisi metodları, PMD ölçümlerinde en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmada, uzak mesafe iletişim sistemlerindeki PMD'nin, sabit çözümleyici ve Jones matrisi metodlarıyla ölçülmesi ele alınmıştır. Bu amaçla, 1600 km uzunluklu bir EDFA (Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici) sisteminde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen PMD değerleri, sabit çözümleyici yönteminde 5.11 ps ve Jones matrisi yönteminde 3.12 ps'dir. Bu değerler, sistemin tipik değerleri kullanılarak hesaplanan teorik değer (4.07ps) ile büyük ölçüde uyumaktadır. Sonuçlar, uzak mesafe iletişim sistemlerindeki PMD'nin ölçülmesinde, her iki yöntemin de güvenilir olduğunu göstermektedir.

1. GİRİŞ

Optik fiberde iletim kapasitesini sınırlayan temel etken dispersiyondur. Dispersiyon nedeniyle oluşan darbe genişlemesi, iletişim sisteminde semboller arası girişimin (ISI) meydana gelmesine ve bit hata oranının artmasına sebep olur. Yüksek bit hızlı ve optik kuvvetlendiricili uzak mesafe iletişim sistemlerinde, kromatik dispersiyon etkilerini en aza indiren kompanzasyon teknikleri mevcuttur [1-3]. Bu nedenle, yüksek optik iletim hızlarında, tek modlu fiberdeki darbe genişlemesinin ve alıcıda elde edilen güç seviyesindeki azalmaların temel sebebi polarizasyon mod dispersiyonudur. Ayrıca, sistemdeki kuvvetlendiricilerde optik işaretin yanısıra PMD'den kaynaklanan optik gürültünün de kuvvetlendirildiği düşünülecek olursa, optik kuvvetlendiricili uzak mesafe iletişim sistemlerindeki PMD'nin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Optik fiberli sistemlerdeki PMD miktarının belirlenmesini amaçlayan çok sayıda ölçüm metodu

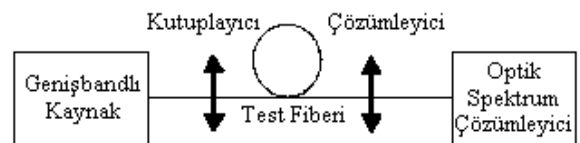
geliştirilmiştir. Bir polarimetre kullanarak çıkış polarizasyon durumunu ölçen yöntemler, hem ayrıntılı teorik yorumlamalar için gerekli hem de PMD'nin dalgaboyunun bir fonksiyonu şeklinde belirlenmesi için uygundur. Bu metodlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar Poincaré küresi yöntemi [4,5] ve Jones matrisi yöntemidir [6,7]. Doğrudan polarimetreye bağlı olmayan ve polarizasyon vektörünün sadece bir bileşenini belirlemeye yönelik daha basit bir teknik ise sabit çözümleyici tekniğidir [8].

Önceki çalışmalarda, fiber uzunluğunun ve dalgaboyunun sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi yöntemleriyle yapılan ölçümlere etkisi incelenmişti [9]. Bu çalışmadaki amaç, [9]'da elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, optik kuvvetlendiricili bir uzak mesafe haberleşme sisteminde, sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemlerini karşılaştırmaktır. Bu amaçla, 1600 km uzunluklu bir EDFA sisteminde simülasyonlar gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar sistemin tipik değerleri kullanılarak yapılan teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

İkinci ve üçüncü bölümlerde, sırasıyla sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi yöntemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, kullanılan iletişim sistemi modeli ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Beşinci bölümde ise, teorik hesaplamalar simülasyonlarla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. SABİT ÇÖZÜMLEYİCİ TEKNİĞİ

Optik fiberlerde diferansiyel grup gecikmesini (DGD) ölçmek için en basit ve en çok kullanılan teknik sabit çözümleyici tekniğidir. Bu yöntemin ölçme düzeneği Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Sabit çözümleyici tekniği ölçme düzeneği

Bu yöntemde, genişbandlı polarize ışık test fiberinden geçirilir ve çıkıştaki optik spektrum çözümleyiciden iletim spektrumu elde edilir. Fiber boyunca farklı dalgalı boyu için farklı polarizasyon durumları (SOP) oluşacağından, çıkıştaki SOP'ye bağlı olarak her dalgalı boyu değişik bir iletim karakteristiğine sahip olacaktır. Dolayısıyla, iletim spektrumunda çeşitli maksimum ve minimum noktaları bulunacaktır. Bu ekstremum noktalarının sayısından (N_e) ya da ortalama değer geçişlerinin sayısından (N_m), ortalama DGD (PMD) hesaplanabilir. Test fiberinin, kuplaj uzunluğu L_C 'den daha kısa olduğu durumlarda

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\pi N_e}{\Delta\omega} = \frac{\pi N_m}{\Delta\omega}, \quad L < L_C \quad (1)$$

test fiberinin, kuplaj uzunluğu L_C 'den daha uzun olduğu durumlarda ise

$$\begin{cases} \langle \Delta\tau \rangle = 0.824\pi \frac{N_e}{\Delta\omega} \\ \langle \Delta\tau \rangle = 4 \frac{N_m}{\Delta\omega} \end{cases}, \quad L \gg L_C \quad (2)$$

formülleri kullanılarak ortalama DGD bulunabilir. Buradaki 0.824 katsayısı Monte Carlo benzetimleriyle elde edilmiştir.

(1) ve (2) formüllerindeki kuplaj uzunluğu L_C , DGD'nin sabit olarak kabul edilebileceği maksimum uzunluktur. Kuplaj uzunluğunun tipik değeri fiber üretim parametrelerine bağlı olup genelde birkaç yüz metre civarındadır. Pratikte, fiber uzunluğu kuplaj uzunluğundan daha büyüktür.

3. JONES MATRİSİ METODU

Doğrusal bir optik elemanın polarizasyona etkisi, matematiksel olarak 2×2 boyutlu kompleks bir Jones matrisi (A) kullanılarak açıklanabilir. A matrisi, (3)'te verilen eşitliğe göre, giriş polarizasyon durumunu çıkış polarizasyon durumuna dönüştürür.

$$j_{\text{çıkış}} = A \cdot j_{\text{giriş}} \quad (3)$$

Polarizasyona bağlı kayıpların olmadığı çiftkırılmalı ortamda, frekansa bağlı Jones matrisi

$$A(\omega) = \begin{pmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ -b^*(\omega) & a^*(\omega) \end{pmatrix} \quad (4)$$

ile ifade edilir. Burada, $a(\omega)$ ve $b(\omega)$ ışığın açılal frekansının kompleks fonksiyonları, a^* a 'nın kompleks eşleniği olup $|a|^2 + |b|^2 = 1$ eşitliği mevcuttur.

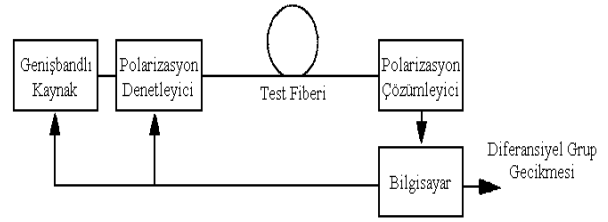
Çıkış SOP'sinin dalgalı boyuna göre ölçüldüğü Jones matrisi yönteminde (JMM) [6,7], farklı dalgalı boylarında fiberin Jones matrisini hesaplamak için, önceden belirlenmiş giriş SOP'leri kümesi

kullanılır. DGD, Jones matrisindeki bileşenlerin frekansa göre türevlerinden,

$$\Delta\tau(\omega) = 2\sqrt{|a'(\omega)|^2 + |b'(\omega)|^2} \quad (5)$$

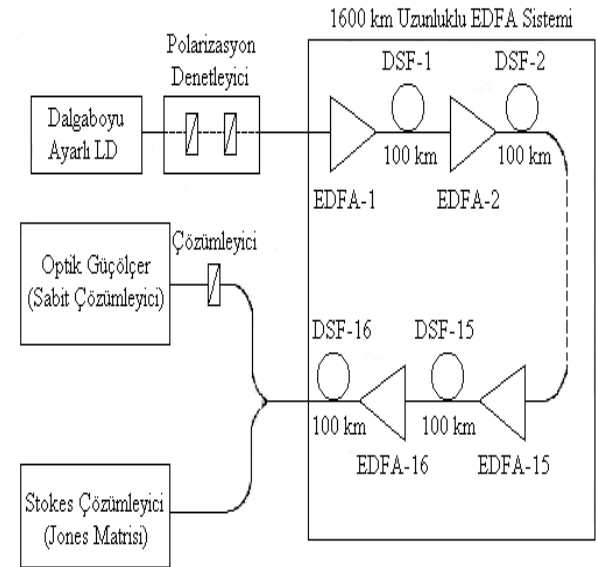
formülüyle hesaplanır. Burada, a ve b (4) formülündeki Jones matrisi bileşenleri olup türevleri, $a'(\omega) \approx [a(\omega) - a(\omega + \Delta\omega)] / \Delta\omega$ ve b' için de benzeri biçimde yaklaşık olarak hesaplanır.

Doğrusal iletim özellikleri frekansa bağlı Jones matrisi tarafından tamamen belirlenebildiği için, bu teknik, fiberin karakterizasyonunu tam olarak gerçekleştirir. Jones matrisi metodunu kullanan ölçme düzeneği Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Jones matrisi metodu ölçme düzeneği

Şekil 2'de görüldüğü gibi, ölçme düzeneğinde ayarlı bir genişbandlı kaynak (lazer), polarizasyon denetleyici ve polarizasyon çözümleyici kullanılır. Her dalgalı boyunda polarizasyon denetleyicisi taranır ve Jones matrisi metodu kullanılarak matematiksel hesaplamalar yapılır. Böylece bütün dalgalı boylarındaki diferansiyel grup gecikmeleri elde edilir.

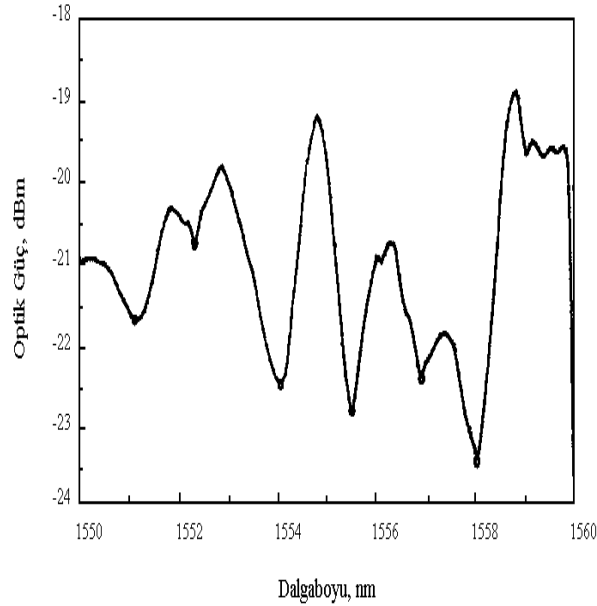


Şekil 3. Simülasyonlarda kullanılan uzak mesafe iletişim sistemi modeli

4. İLETİŞİM SİSTEMİ MODELİ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

Simülasyonlarda kullanılan uzak mesafe iletişim sistemi modeli, Şekil-3'te gösterilmiştir. Toplam iletim uzunluğu 1600 km olan sistemde, 16 adet erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici (EDFA) bulunmaktadır. Kuvvetlendiriciler arasındaki 16 adet fiber parçası, herbiri 100 km uzunluklu kaydırılmış dispersiyonlu fiberdir (DSF). Optik kaynak olarak, 1550 nm dalgaboyu bölgesindeki lazer diyot kullanılmıştır. Dalgaboyu ayarlı lazerden çıkan optik işaret 1600 km uzunluklu EDFA sisteminden geçirilmektedir. Sistemdeki EDFA'lar, optik izolator, WDM fiber kuplör ve erbiyum katkılı fiber (EDF) gibi optik bileşenlerden oluşmaktadır.

Yukarıda açıklanan EDFA sisteminde, sabit çözümleyici yöntemi ve Jones matrisi metodu kullanarak elde edilen PMD benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

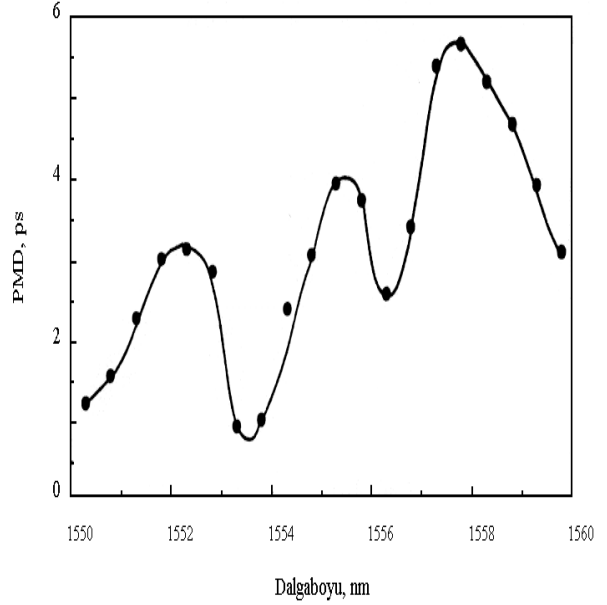


Şekil 4. 1600 km'lik EDFA sisteminde sabit çözümleyici yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları

Sabit çözümleyici yöntemi ve Jones matrisi metoduyla elde edilen sistemin ortalama PMD değerleri ($\Delta\tau_{sis}$) sırasıyla 5.11 ps ve 3.12 ps'dir.

5. TEORİK HESAPLAMALAR

EDFA'da kullanılan optik izolatorün, 1480/1550 nm WDM fiber kuplörün ve EDF'nin uygulamadaki tipik PMD değerleri ($\Delta\tau_{ISO}$, $\Delta\tau_{WDM}$ ve $\Delta\tau_{EDF}$) sırasıyla, 0.003 ps, 0.008 ps ve 0.182 ps'dir. Görüldüğü gibi, optik izolatorün ve WDM kuplörün PMD değerleri EDF'nin PMD değerlerine göre ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Dolayısıyla, bir EDFA'nın PMD değerini belirleyen bileşen EDF'dir.



Şekil 5. 1600 km'lik EDFA sisteminde Jones matrisi yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları

Sistemdeki tüm EDFA'lardan kaynaklanan toplam PMD ($\Delta\tau_{EDFA}$),

$$\Delta\tau_{EDFA} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left\{ \Delta\tau_{ISO_i}^2 + \Delta\tau_{WDM_i}^2 + \Delta\tau_{EDF_i}^2 \right\}} \cong \Delta\tau_{EDF} \sqrt{N} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

İletişim sistemindeki toplam PMD ($\Delta\tau_{sis}$) ise,

$$\Delta\tau_{sis} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta\tau_{EDFA_i}^2 + \sum_{j=1}^N \left(\Delta\tau_{f_j} \sqrt{L_j} \right)^2} \cong \sqrt{\left(\Delta\tau_{EDF} \sqrt{N} \right)^2 + \left(\Delta\tau_f \sqrt{L} \right)^2} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanabilir.

(6) ve (7) formüllerinde $\Delta\tau_{EDFA_i}$, i. EDFA'nın PMD değeri; $\Delta\tau_{f_j}$ [ps/(km)^{1/2}] ve L_j [km], sırasıyla, j. optik fiber parçasının PMD değeri ve uzunluğudur. Ayrıca, $\Delta\tau_{EDFA} = \Delta\tau_{EDFA1} = \Delta\tau_{EDFA2} = \dots = \Delta\tau_{EDFA_N}$ ve $\Delta\tau_f = \Delta\tau_{f_1} = \Delta\tau_{f_2} = \dots = \Delta\tau_{f_N}$ kabul edilmiştir. $N (=16)$ ve $L (=1600 \text{ km})$, sistemdeki toplam EDFA sayısı ve toplam optik fiber uzunluğudur.

EDFA'lardan kaynaklanan toplam PMD, (6) formülünden ~ 0.728 ps bulunur. DSF'lerde $\Delta\tau_f$ 'in uygulamadaki tipik değeri 0.1 ps/(km)^{1/2} olduğuna göre, sistemin toplam PMD'si, (7) formülünden ~ 4.07 ps olarak hesaplanır. Tipik değerler kullanılarak yapılan bu hesaplamada, sistemdeki toplam PMD değerini belirleyen temel etkenin optik fiber olduğu açıkça görülmektedir ($4\text{ps} = 0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{1/2} \times (1600\text{km})^{1/2}$).

Simülasyonlarda elde edilen PMD değerleri, sabit çözümleyici yönteminde 5.11 ps ve Jones matrisi yönteminde 3.12 ps'dir. Bu değerler, uygulamadaki tipik değerler kullanılarak hesaplanan teorik değer (4.07ps) ile büyük ölçüde uyumludur. İncelenen 1600 km'lik iletişim sisteminin uzunluğu dikkate alındığında, ± 1 ps'lik farkın çok önemli olmadığı görülmektedir. Teorik değerler ile simülasyonda bulunan değerler arasındaki bu farkın nedeni, teorik hesaplamalarda tipik değerlerin kullanılmış olması ve sabit çözümleyici yöntemiyle PMD değeri belirlenirken, Şekil 4'te de görüldüğü gibi, bazı dalgaboylarında hangi noktaların maksimum veya minimum seçilmesi gerektiği konusundaki belirsizliklerdir [9].

6. SONUÇ

Bu çalışmada, optik kuvvetlendiricili uzak mesafe iletişim sistemlerindeki toplam polarizasyon mod dispersiyonunun belirlenmesinde sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemlerinin etkinliği incelenmiştir. 1600 km uzunluklu EDFA sistemi model alınarak yapılan simülasyonlarda sabit çözümleyici yöntemi ve Jones matrisi metoduyla elde edilen PMD değerleri, uygulamadaki tipik değerler kullanılarak elde edilen teorik değer ile büyük ölçüde uyumludur. Bu durum, her iki yöntemin uzak mesafe iletişim sistemlerindeki toplam PMD değerinin belirlenmesinde güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca, EDFA sistemindeki toplam PMD değerini belirleyen temel bileşenin optik fiber olduğu da görülmüştür.

KISALTMALAR

DGD	-	Differential Group Delay
DSF	-	Dispersion Shifted Fiber
EDF	-	Erbium Doped Fiber
EDFA	-	Erbium Doped Fiber Amplifier
ISI	-	Inter-symbol Interference
JMM	-	Jones Matrix Method
PMD	-	Polarization Mode Dispersion
SOP	-	State of Polarization
WDM	-	Wavelength Division Multiplexing

KAYNAKLAR

- [1] Kashyap R., Chernikov S.V. ve McKee P.F., "30ps chromatic dispersion compensation of 400fs pulses at 100 gbits/s in optical fibers using an all-fiber photoinduced chirped reflection grating", *Electronics Lett.*, c. 30, s. 1078-1080, 1994.
- [2] Quetel L., Rivoallan L. ve Morvan M., "Chromatic dispersion compensation by apodised Bragg gratings within controlled tapered fibers", *Optical Fiber Technol.*, c. 3, s. 267-271, 1997.
- [3] Pan Z., Song Y.W. ve Yu C., "Tunable chromatic dispersion compensation in 40-Gb/s systems using nonlinearly chirped fiber Bragg gratings", *J. Lightwave Technol.*, c. 20, s. 2239-2246, 2002.
- [4] Andresciani D., Curti F., Matera F. ve Daino B., "Measurement of the group-delay difference between the principal states of polarization on a low-birefringence terrestrial fiber cable", *Optics Lett.*, c. 12, s. 844-846, 1987.
- [5] Poole C.D., Bergano N.S., Wagner R.E. ve Schulte H.J., "Polarization dispersion and principal states in a 147-km undersea lightwave cable", *J. Lightwave Technol.*, c. 6, s. 1185-1190, 1988.
- [6] Heffner B.L., "Automated measurement of polarization-mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, c. 4, s. 1066-1069, 1992.
- [7] Heffner B. L., "Accurate automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones matrix eigenanalysis," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, c. 5, s. 814-817, 1993.
- [8] Poole C.D. ve Favin D.L., "Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer", *J. Lightwave Technol.*, c. 12, s. 917-929, 1994.
- [9] Karlık S.E., Yılmaz G. ve Geren K., "Optik fiberlerdeki polarizasyon mod dispersiyonunun sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleriyle ölçülmesi", *ELECO'2002 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, c. 2, s. 275-279, 2002.