

40 Gbit/s HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE ÖZ FAZ MODÜLASYONU KULLANILARAK POLARİZASYON MOD DISPERSİYONU ETKİLERİNİN AZALTILMASI

Sait Eser KARLIK¹

Güneş YILMAZ²

Ayşe KARTALTEPE³

^{1,2,3} Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü,
16059, Görükle, BURSA

¹e-mail: ekarlik@uludag.edu.tr

²e-mail: gunesy@uludag.edu.tr

³e-mail: kartaltep@myynet.com

Anahtar Sözcükler: Öz Faz Modülasyonu, Polarizasyon Mod Dispersiyonu, Haberleşme Sistemleri, Optik Fiber

ÖZET

Yüksek bit hızlı haberleşme sistemlerinde iletim kapasitesini sınırlayan ve semboller arası girişime (ISI) neden olarak bit hata oranını (BER) arttıran temel etkenlerden biri polarizasyon mod dispersiyonudur (PMD). Bu nedenle 40 Gbit/s iletim hızında çalışan haberleşme sistemlerinde PMD etkilerinin azaltılması, sistem güvenilirliği açısından gereklidir. Bu çalışmada, 40 Gbit/s haberleşme sistemlerinde öz faz modülasyonu (SPM) ve dalgaboyu filtreleme yardımıyla PMD etkisinin azaltılmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir. 8 ps'lik darbeler şeklinde gönderilen 40 Gbit/s hızlı veri üzerinde gerçekleştirilen benzetimler, veri 10 ps PMD bozunmasına maruz kaldığında darbe genişliğinin 15 ps seviyesine yükseldiğini, bozunmaya uğramış veriye önerilen yöntem uygulandığında darbe genişliğinin 10 ps seviyesine düştüğünü göstermiştir. Ayrıca önerilen yöntemin uygulandığı 40 Gbit/s hızlı veri yeni bir PMD bozunmasına maruz kaldığında, göz diyagramlarındaki açıklığın bozunmaya rağmen belirgin olduğu tespit edilmiştir.

1. GİRİŞ

Optik fiberde iletim kapasitesini sınırlayan temel etkenlerden biri dispersiyondur. 2.5 Gbit/s sistemlerde lazer vericideki modülasyon, dispersiyonu kontrol edebilecek şekilde spektral genişliği belirler. Ancak 10 Gbit/s sistemler birkaç yüz kilometrenin ötesindeki uzaklıklarda dispersiyon kompanzasyonuna ihtiyaç duyarlar. 40 Gbit/s sistemlerde ise kompanzasyon ihtiyacı çok daha kısa mesafelerde ortaya çıkar. Örneğin, 2.5 Gbit/s hızındaki işaretleri kompanzasyon olmaksızın 1000 km'ye kadar iletebilen bir fiber, 40 Gbit/s hızında ancak 4 km'ye kadar kompanzasyonsuz iletim yapabilir [1].

Tek modlu fiberde kromatik dispersiyon ve polarizasyon mod dispersiyonu (PMD) olmak üzere iki tip dispersiyon mevcuttur.

Kromatik dispersiyon, optik fiberde iletilen ışığın hızının dalgaboyu bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Kromatik dispersiyon, malzeme dispersiyonu ve dalga kılavuzu dispersiyonu bileşenlerinden oluşur. Malzeme dispersiyonu, kırılma indisinin dalgaboyuyla değişmesinden meydana gelir. Dalga kılavuzu dispersiyonu ise ışığın fiber çekirdeği ile fiber kılıfı arasında dağılmasıyla ortaya çıkar. Kromatik, malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonu pozitif veya negatif işaretli olabileceği gibi, kromatik dispersiyon bileşenlerinin birbirlerini sıfırlaması da mümkündür. Ayrıca, yüksek bit hızlı ve optik kuvvetlendiricili uzak mesafe iletişim sistemlerinde kromatik dispersiyon etkilerini en aza indiren kompanzasyon teknikleri de mevcuttur [2, 3, 4]. Dolayısıyla kromatik dispersiyon PMD'ye göre daha büyük değerlerde olmasına rağmen daha kolaylıkla kompanze edilebilir.

PMD, tek modlu dairesel simetrik fiberin aslında ortogonal iki mod iletmesinden kaynaklanan istatistiksel bir etki olup 5 Gbit/s'den yüksek optik iletim hızlarında, darbe genişlemesinin ve alıcıda elde edilen güç seviyesindeki azalmaların temel sebebidir. Ayrıca, PMD, kromatik dispersiyona göre daha küçük değerlerde olmasına rağmen kompanzasyonu çok daha zordur [1].

Bu çalışmanın amacı 40 Gbit/s haberleşme sistemlerinde PMD'nin etkilerinin azaltılmasıdır. Bu amaçla öz faz modülasyonu (SPM) ve dalgaboyu filtrelemeyi temel alan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemdeki ana fikir SPM kullanılarak spektrumun belirgin şekilde genişletilmesi ve ardından optik bir band geçiren filtre yardımıyla çıkış darbe genişliği belirlenecek biçimde spektrumun bölünmesidir.

İkinci kısımda, optik fiberdeki PMD olayı açıklanmıştır. Üçüncü kısımda, 40 Gbit/s haberleşme sistemlerinde PMD etkilerinin azaltılması için önerilen yöntem ve bu yöntemin uygulandığı sistem modeli verilmiştir. Dördüncü kısımda, sistem modeli üzerinde gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen sonuçlar sunulmuş ve yorumlanmıştır.

2. OPTİK FİBERDEKİ PMD OLAYI

Fiberin dairesel geometrisindeki bozulmalar ve kırılma indisinde anizotropi oluşturan iç gerilmeler PMD'ye katkıda bulunan iki ana faktördür. Diğer faktörler, kıvrılmalar, bükülmeler ve üretim süreci olarak sıralanabilir. Bu etmenler, bölgesel anlamda çiftkırılmaya da sebebiyet verirler. Çiftkırılma, polarizasyon mod kuplajı ile de bağlantılıdır. Polarizasyon mod kuplajı, tek modlu fiberlerde sürekli ve rasgele biçimde meydana gelir. Sabit kuplaj koşulları altında iki polarizasyon modu oluşur. Bu modlar ortogonal olup polarizasyonun temel durumları (PSP) veya öz durumlar şeklinde adlandırılırlar. PMD'nin optik fiberdeki oluşumunu anlamak için, başlangıç olarak uzun bir fiberin homojen çiftkırılmalı kısa bir parçasını incelemek gerekir. Tek modlu fiber, birçok rastgele çiftkırılmalı elemanın oluşturduğu bir bütün şeklinde modellenebilir.

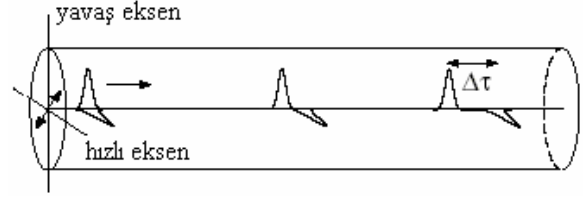
Optik fiberlerdeki çiftkırılma, kırılma indislerindeki farklılık biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda, ortogonal polarizasyon modları için yayılım sabiti β

$$\Delta\beta = \beta_s - \beta_f = \frac{\omega n_s}{c} - \frac{\omega n_f}{c} = \frac{\omega \Delta n}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \quad (1)$$

şekindedir. Burada ω ışığın açısal frekansını, c boşluktaki ışık hızını, $\Delta n = n_s - n_f > 0$ yavaş ve hızlı eksenler arasındaki kırılma indisi farkını, λ ise ışığın boşluktaki dalga boyunu göstermektedir. Çiftkırılma, fiber boyunca ilerleyen ışığın polarizasyon durumunu (SOP) da değiştirebilir. Herhangi bir polarizasyon durumu, çiftkırılmadan etkilenmeyen PSP'lere (öz durumlar) ayrıştırılabilir. PSP'ler, homojen çiftkırılmalı fiber parçası için çiftkırılma eksenlerini (hızlı ve yavaş eksenler) oluştururlar. İki ortogonal mod arasında çiftkırılmadan kaynaklanan faz gecikmesi, polarizasyonun periyodik biçimde değişmesine sebep olur. Faz hızındaki farka, genellikle bölgesel grup hızındaki bir fark eşlik eder ve fiber boyunca yayılan darbelerde bölünmeler meydana gelir. Grup hızları arasındaki bu farka, diferansiyel grup gecikmesi (DGD) $\Delta\tau$ denir. DGD, (1) formülündeki yayılım sabitlerinin frekansa göre türevinin alınması ile

$$\Delta\tau = \frac{L}{\Delta v_g} = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} L = \left(\frac{\Delta n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{d\Delta n}{d\omega} \right) L \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Burada, Δv_g ortogonal modlar arasındaki grup hızı farkıdır. $\Delta\tau/L$ değeri, kısa bir fiber parçasında ps/km ile ifade edilirken, uzun fiberlerde fiber uzunluğunun karekökü ile orantılıdır. Şekil 1'de çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi görülmektedir.



Şekil 1. Çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi

Çok sayıda rasgele çiftkırılmalı elemandan oluşan tek modlu bir fiberin $\Delta\tau$ diferansiyel grup gecikmesi, teorik olarak Maxwell dağılımına sahiptir [5, 6].

Yani, normalize DGD'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu, $x = \Delta\tau / \langle \Delta\tau \rangle$ olmak üzere,

$$f(x, \langle \Delta\tau \rangle) = \frac{32 \cdot x^2}{\pi^2 \langle \Delta\tau \rangle^3} \exp\left(-\frac{4 \cdot x^2}{\pi \langle \Delta\tau \rangle^2}\right) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. (3) formülündeki $\langle \Delta\tau \rangle$, ortalama diferansiyel grup gecikmesi olup (4) formülüyle hesaplanır.

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L_{link}} \quad (4)$$

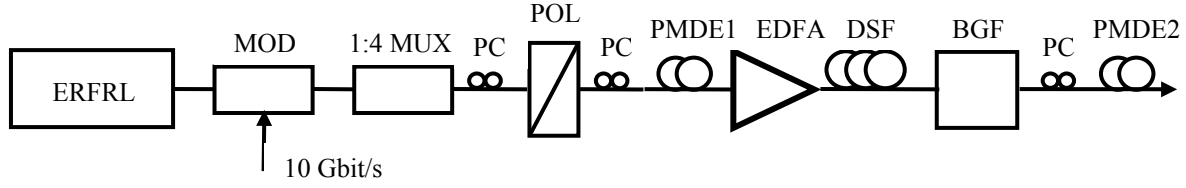
Burada, D_{PMD} ps / \sqrt{km} birimli PMD parametresidir.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM VE UYGULANDIĞI SİSTEM MODELİ

Optik fiberde, lineer olmayan Kerr etkisi nedeniyle, iletilen darbelerin yoğunluğu fiberin kırılma indisinde değişimler meydana getirir. Bu durum, darbelerin fazını da değiştirir. Fazdaki farklılık frekansta da farklılık oluşturur ve darbenin frekans spektrumu genişler. Bu olay öz faz modülasyonu (SPM) olarak adlandırılır.

Önerilen yöntemin ana fikri, SPM kullanılarak spektrumun belirgin şekilde genişletilmesi ve ardından optik bir band geçiren filtre yardımıyla çıkış darbe genişliği belirlenecek biçimde spektrumun bölünmesidir. PMD etkisi altındaki bir haberleşme sisteminde, DGD, PSP'ler ve gönderilen işaretin polarizasyon durumundaki değişimler nedeniyle, etkin darbe genişliği zamanla değişecektir. Önerilen yöntem, PMD etkisiyle oluşacak darbe genişliği ne olursa olsun, çıkışta elde edilecek darbe genişliğinin PMD etkisiyle oluşan darbe genişliğinden bağımsız olması ilkesi üzerine kurulmuştur.

Önerilen yöntemin uygulandığı sistem modeli Şekil 2'de verilmiştir. Sistem modelinde, 10 Gbit/s hızındaki veri, 1547 nm dalga boylu aktif mod kenetlemeli erbiyum katkılı fiber ring lazerin (ERFRL) ürettiği 8 ps süreli darbelerle kodlanmıştır.

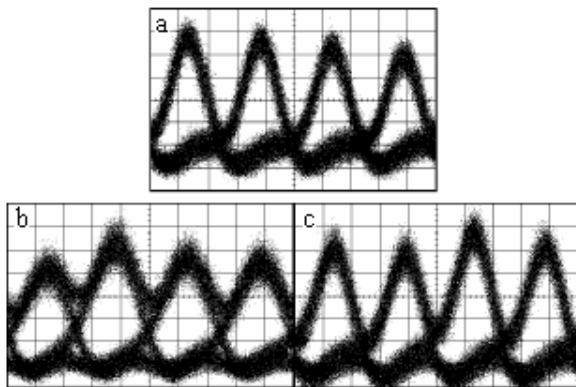


Şekil 2. Önerilen yöntemin uygulandığı sistem modeli

Daha sonra 10 Gbit/s hızındaki veri 1:4 çoğullayıcı (MUX) ile 40 Gbit/s'ye çoğullanmıştır. Çoğullayıcı çıkışındaki polarizör (POL), 40 Gbit/s hızındaki veri akışında eşit polarizasyon durumları oluşturarak her veri kanalının aynı PMD etkisine maruz kalmasını sağlamak için kullanılmıştır. Daha sonra 40 Gbit/s'lik veri, 1547 nm dalgaboyunda toplam DGD'si 10 ps olan bir PMD emülatöründen (PMDE1) geçirilmiştir. Emülatörde bozunuma uğratılan veri, PMD etkisini azaltmak için önerilen yapıdan geçirilmiştir. Bu kısımda veri öncelikle ortalama çıkış gücü 1 W olan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciyle (EDFA) kuvvetlendirilmiş ve istenilen SPM'nin oluşması için 850 m uzunluklu kaydırılmış dispersiyonlu fiberden (DSF) geçirilmiştir. Daha sonra ise 0.7 nm band genişlikli optik band geçiren filtre (BGF) kullanılarak SPM nedeniyle genişleyen spektrum bölünmüştür. En son olarak BGF çıkışındaki darbeler 1547 nm dalgaboyunda toplam DGD'si 6 ps olan bir PMD emülatöründen (PMDE2) geçirilmiştir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

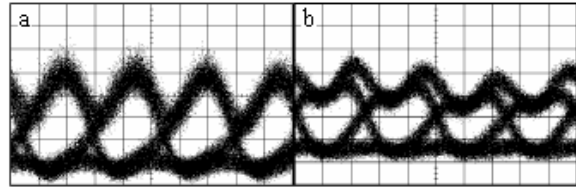
Sistem modelinin 40 Gbit/s'lik giriş verisi Şekil 3a'da gösterilmiştir. Şekil 3b'de bu verinin PMDE1 etkisi nedeniyle aldığı biçim görülmektedir. Şekil 3c'de ise PMD etkisini azaltmak için önerilen yapı çıkışındaki durum verilmiştir.



Şekil 3. (a) 40 Gbit/s'lik giriş verisi (b) PMDE1 etkisi altındaki veri (c) Önerilen yapı çıkışındaki veri

Şekil 3'ten görüldüğü gibi 8 ps'lik giriş darbe genişliği, 10 ps DGD uygulayan PMDE1 etkisiyle 15 ps seviyelerine çıkmış, önerilen yöntemin uygulanmasıyla darbe genişliği 10 ps seviyesine düşürülmüştür:

Şekil 4a'da PMD etkisini azaltmak için önerilen yapıdan geçirilmiş veriye PMDE2 uygulandığında elde edilen sonuç verilmiştir. Şekil 4b'de ise önerilen yapı sisteme uygulanmadığında PMDE2 çıkışında elde edilen veri görülmektedir.



Şekil 4. (a) Önerilen yapıdan geçirilmiş veriye PMDE2 uygulandığında elde edilen sonuç (b) Sisteme önerilen yapı uygulanmadığında PMDE2 çıkışında elde edilen sonuç

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi önerilen yapıdan geçirilmiş veriye PMDE2 uygulandığında, göz diyagramları belgin biçimde açık kalmayı sürdürmektedir. Önerilen yapının sisteme uygulanmadığı durumda ise, PMDE2 çıkışında göz diyagramlarında yoğun bozunmalar görülmektedir.

Önerilen yöntemin bir dezavantajı, giriş ve çıkış işaretleri arasında küçük bir dalgaboyu kaymasının oluşmasıdır. Bu problem kaskat bağlı iki katlı bir yapı kullanılarak çözülebilir. Bu durumda, PMD'den kaynaklanan darbe genişlemesi, yapıdaki ikinci BGF çıkışında giriş ve çıkış işaretleri arasında herhangi bir dalgaboyu kayması olmaksızın azaltılabilir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, 40 Gbit/s haberleşme sistemlerinde PMD nedeniyle oluşan darbe genişlemesinin azaltılması için öz faz modülasyonun kullanıldığı bir yöntem önerilmiştir. 8 ps'lik darbeler şeklinde gönderilen 40 Gbit/s hızlı veri üzerinde gerçekleştirilen benzetimler, veri 10 ps PMD bozunmasına maruz kaldığında darbe genişliğinin 15 ps seviyesine yükseldiğini, bozunmaya uğramış veriye önerilen yöntem uygulandığında darbe genişliğinin 10 ps seviyesine düştüğünü göstermiştir. Ayrıca önerilen yöntemin uygulandığı 40 Gbit/s hızlı veri yeni bir PMD bozunmasına maruz kaldığında, göz diyagramlarındaki açıklığın bozunmaya rağmen belgin olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] H.J.R. Dutton, "Understanding optical communications", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 613 s., 1998.
- [2] R. Kashyap, S.V. Chernikov, P.F. McKee, "30 ps chromatic dispersion compensation of 400 fs pulses at 100 Gbits/s in optical fibers using an all-fiber photoinduced chirped reflection grating", Electronics Letters, 30(13):1078-1080, 1994.
- [3] L. Quetel, L. Rivoallan, M. Morvan, "Chromatic dispersion compensation by apodised Bragg gratings within controlled tapered fibers", Optical Fiber Technology, 3(3):267-271, 1997.
- [4] Z. Pan, Y.W. Song, C. Yu, "Tunable chromatic dispersion compensation in 40 Gb/s systems using nonlinearly chirped fiber Bragg gratings" J. Lightwave Tech. 20(12):2239-2246, 2002.
- [5] D. Andresciani, F. Curti, F. Matera, B. Daino, "Measurement of the group-delay difference between the principal states of polarization on a low-birefringence terrestrial fiber cable", Optics Letters, 12(10):844-846, 1987.
- [6] C.D. Poole, J.H. Winters, J.A. Nagel, "Dynamical equation for polarization dispersion", Optics Letters, 16(6):372-374, 1991.