

# 16-QAM polarizasyon bölmeli çoğullamalı evre-uyumlu optik OFDM sistemlerde kompleks sabit noktalı BBA kullanarak frekans düzlemi kanal kestirim verimliliğinin artırılması

## Improving the efficiency of frequency domain channel estimation in 16-QAM polarization division multiplexing coherent optical OFDM systems using complex fixed-point ICA

Ahmet GÜNER<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye.  
aguner@bingol.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.01.2019,  
Kabul Tarihi/Accepted: 16.05.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 19.04.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.08504  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Polarizasyon bölmeli çoğullamalı evre-uyumlu optik OFDM (PDM-CO-OFDM) sistemleri uzun mesafeli haberleşmelerde, ışığa ait genlik, faz ve polarizasyon bilgilerinin aynı anda kullanımına imkân vererek yüksek veri hızlarına ulaşılmasını sağlayan bir yöntemdir. Fakat optik kanalın bozucu etkileri, veri iletim performansını düşürmektedir. Bu yüzden alıcıda bozucu etkileri düzeltmek için sinyal işleme tekniklerinden olan kanal denkleştiriciler kullanılmaktadır. Genel olarak kanal denkleştiricilerde, kanal bilgisinin kestirimi için periyodik eğitim sembolleri kullanılır. Fakat eğitim sembollerinin kullanımı, iletilen veri boyutunu artırmakta ve spektral verimliliği azaltmaktadır. Bu çalışmada, PDM-CO-OFDM sistemleri için eğitim sembollerine ihtiyaç duymayan, kompleks sabit noktalı bağımsız bileşen analiz (BBA) temelli kör kanal denkleştirici yöntemi, 16-QAM sinyaller için önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompleks sabit noktalı BBA algoritmasının eğitim sembollerine ihtiyaç duymadan kanal denkleştirici başarımını iyileştirdiği göstermektedir. Bu durum, başlatma gücü ve optik işaret gürültü oranı (OSNR) değerlerinin değişimine göre elde edilen sinyallerin bit hata oranı (BER) değerleri ile gösterilmiştir. Özellikle fiber kablonun doğrusal olmayan bozucu etkisinin etkin olduğu bölgede, önerilen yöntem diğer kanal denkleştiricilerden daha iyi başarıma sahip olduğu benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Polarizasyon bölmeli çoğullamalı evre-uyumlu optik OFDM, Optik haberleşme, Bağımsız bileşen analiz, Kör kanal kestirimi.

### Abstract

Polarization division multiplexing coherent optical OFDM (PDM-CO-OFDM) systems are a method that provides to be achieved high data rate, offering the possibility for the use of information regarding polarization, amplitude and phase simultaneously. However, the impairment affects related to optic channel decrease the data transmission performance. For this reason, in the receiver, the channel equalizer, one of the signal processing techniques, are used for the impairments in order to compensate. Even though the periodic training symbols are generally used for the estimating of channel information in the channel equalizers, the use of training symbols increase system redundancy and decrease spectral efficiency. In this study, a blind channel equalizer based on complex fixed-point ICA without training symbols is suggested for the PDM-CO-OFDM systems with 16-QAM signals. The results show that the complex fixed-point ICA algorithm improves the performance of channel equalizer without the training symbols. This situation is indicated by the BER values of the signals obtained according to the change of the launch power values and optical signal noise ratio (OSNR) values. Simulation results have shown that the suggested channel equalizer has better performance than other channel equalizers, especially in the region where the effect of the fiber nonlinearity is effective.

**Keywords:** Polarization division multiplexing coherent optical OFDM, Optical communication, Independent component analysis, Blind channel estimation.

## 1 Giriş

Optik OFDM sistemler, optik haberleşmelerde yüksek hızlı ve daha fazla veri iletimine imkan sağlamaktadır [1]. Özellikle optik OFDM sistemlerde, spektral verimliliğin artırılması ve yüksek seviyeli modülasyon türlerinin kullanılabilmesi, veri iletimini daha iyi hale getirmektedir.

Yüksek veri hızlarına sahip optik OFDM sistemleriyle ilgili birçok deneysel çalışmalar bulunmaktadır. PDM-CO-OFDM sistemler, uzun mesafe iletimlerde aynı anda ışığa ait genlik, faz ve polarizasyon kullanımı sağlayarak yüksek veri hızlarına ulaşılmasına imkan sağlamaktadır. Ma ve Yang'ın yaptığı çalışmada, 1 Tb/s iletim hızına sahip PDM-CO-OFDM sistemi deneysel olarak gösterilmiştir [2]. Fakat bu sistemlerde

uzun mesafelere veri iletiminin önündeki en önemli engel, iletim ortamındaki bozucu etkilerdir. Alıcıda, alınan sinyallerdeki bozucu etkileri düzeltmek için denkleştiriciler kullanılır ve denkleştiricilerin kullanılabilmesi için alıcıda kanal bilgisinin kestirilmesi gerekmektedir. Genel olarak, bu bilgi vericiden gönderilen eğitim sembolleri (ES) yardımıyla elde edilir ve en küçük ortalama kareler ve özyinelemeli en küçük kareler gibi geleneksel yöntemler yardımıyla kanal kestirimi gerçekleştirilir. Fakat ES (Tablo 1) kullanımı, iletilen veri boyutunu artırmakta ve spektral verimliliği azaltmaktadır [3]. PDM-CO-OFDM sistemlerinde, her iki polarizasyon için ayrı ayrı kanal denkleştirme işlemleri gerçekleştirildiği için işlem yükü iki katına çıkmaktadır.

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

Kör yöntemler, gönderilen bilgi sembollerini alıcı tarafta tekrar elde edebilmek için eğitim sembollerine ihtiyaç duymadan, doğrudan gözlemlenen sinyalleri kullanmaktadırlar ve daha da önemlisi spektral verimliliği bozmamaktadırlar. Eğer iletim kanalı çok girişli çok çıkışlı modelleniyorsa, karışmış olan sinyalleri alıcı tarafta birbirlerinden ayırtmak ve denkleştirmek için en iyi bilinen kör yöntemlerden birisi olan bağımsız bileşen analizi (BBA) algoritmaları kullanılabilir. BBA, kör kaynak ayırma, kör denkleştirme, özellik çıkarma ve sinyal iyileştirme gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Bu çalışmada, frekans düzleminde denkleştirme işleminin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan kanal kestirimi, BBA algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Kısaltmalar, semboller ve tanımlar.

Table 1. Abbreviations, symbols and definitions.

Kısaltmalar	Tanımlar
PBC	Polarizasyon ışın birleştirici
PBS	Polarizasyon ışın ayırıcı
EDFA	Erbiyum katkılı fiber amplifikatör
SSMF	Standart tek modlu fiber
BBA	Bağımsız bileşen analiz
ES	Eğitim sembolü
CD	Kromatik dağılım
PMD	Polarizasyon modu dağılımı
H-BBA	Hızlı bağımsız bileşen analiz
KEBM-BBA	Kompleks entropi bağlı minimizasyon bağımsız bileşen analiz
KSN-BBA	Kompleks sabit noktalı bağımsız bileşen analiz
KD	Kanal denkleştirici
FFT	Hızlı fourier dönüşümü
MIMO	Çok girişli çok çıkışlı
OSNR	Optik işaret gürültü oranı
BER	Bir hata oranı
$X$ ve $Y$	Yatay ve dikey polarizasyon ışınları
$T_x^i$ ve $R_x^i$	$X$ polarizasyonundaki $i$ . alt taşıyıcısında gönderilen ve alınan veriler
$H_{xy}^i$	$X$ polarizasyonunda $Y$ polarizasyonuna $i$ . alt taşıyıcısının etkisini gösteren kanal katsayısı
$ES_x^i$	$X$ polarizasyonundaki $i$ . alt taşıyıcısında gönderilen eğitim sembolü
$W$	Ayrıştırma matrisi
$G(u)$ ve $g(u)$	Amaç fonksiyonu ve birinci türevi

Li ve Zhong yapmış oldukları çalışmada BBA algoritmalarının (Tablo 1), PDM-CO-OFDM sistemlerinde kanal kestirimi için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [3]. Ayrıca optik tek taşıyıcılı sistemlerde [4],[5] ve optik OFDM sistemlerde [6] BBA temelli kanal denkleştiricilerin, kromatik dağılım (CD) ve polarizasyon modu dağılımı (PMD) gibi fiber doğrusal bozulma etkilerini kompanze edebildiği gösterilmiştir.

Çoğu BBA algoritması, amaç fonksiyonu olarak doğrusal olmayan fonksiyonlar kullanarak, en büyük olasılık veya negatif entropinin en büyük yapılması ilkelerini temel almaktadır. Örneğin hızlı BBA (H-BBA) algoritması, negatif entropinin maksimizasyon ilkesine [7],[8] ve kompleks entropi bağlı minimizasyon BBA (KEBM-BBA) algoritması, en büyük olasılık ilkesini temel almaktadır [9],[10].

PDM-CO-OFDM sistemlerinde, her iki polarizasyonda farklı veri iletimi gerçekleştirilmesinden ve optik kanala ait PMD etkisinden dolayı alıcı tarafta sinyaller  $2 \times 2$  çok girişli çok çıkışlı (MIMO) bir karışım matrisi ile modellenmektedir.

Ayrıca optik haberleşme sistemlerinde, spektral verimliliğin ve veri hızının artırılması için yaygın olarak QAM modülasyon türü

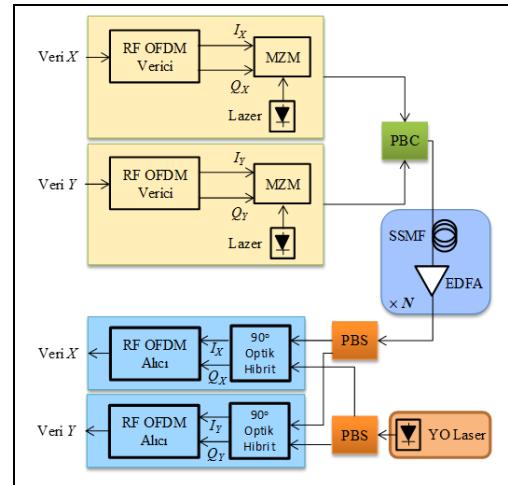
kullanılmaktadır. Bahsi geçen durumlar dikkate alındığında birçok çalışmada [3]-[6], PDM-CO-OFDM sistemlerinin alıcı tarafında karıştırılmış iki farklı QAM sinyalinin ayrıştırılması işlemi gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, 16-QAM PDM-CO-OFDM sistemleri için karıştırılmış iki QAM sinyalinin ayrıştırılmasını sağlayan kompleks sabit noktalı BBA (KSN-BBA) algoritması [11],[12] temelli bir kanal denkleştirici yapısı önerilmiştir. Önerilen yöntem ile eğitim sembollerine ihtiyaç duymadan kanal denkleştirici başarımının artırılması amaçlanmıştır. Önerilen denkleştirici yapısı, performans analizi için H-BBA ve KEKM-BBA temelli kanal denkleştiriciler ile karşılaştırılmıştır.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: PDM-CO-OFDM sisteminin genel yapısı 2. bölümde özetlenmiştir. Kompleks sabit noktalı BBA algoritması ve karşılaşılan problemler 3. bölümde açıklanmıştır. Benzetim sonuçları ve değerlendirmeleri 4. bölüm ve 5. bölümde verilmiştir.

## 2 Polarizasyon bölmeli çoğullamalı evreyumlu optik OFDM sistemi

Şekil 1'de, PDM-CO-OFDM sisteminin genel blok yapısı gösterilmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi vericide ilk olarak OFDM sembolleri hazırlanır, sonra iki IQ modülatör ile elektrikselsinyaller optik sinyallere dönüştürülür ve polarizasyon ışın birleştirici yardımıyla iki optik sinyal birleştirilerek optik hattan iletilir.



Şekil 1. PBC-EO-OFDM sisteminin blok gösterimi. PBC: polarizasyon ışın birleştirici, PBS: polarizasyon ışın ayırıcı, YO: yerel osilatör, EDFA: erbiyum katkılı fiber amplifikatör, SSMF: standart tek modlu fiber.

Figure 1. Block diagram of a PDM-CO-OFDM system. PBC: polarization beam combiner, PBS: polarization beam splitter, LO: local oscillator, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, SSMF: standard single-mode fiber.

Optik hat, birçok standart tek modlu standart fiberlerden oluşmaktadır. Optik zayıflamalara karşı, optik hat boyunca belli aralıklarla sinyalin hat kuvvetlendirilmesi için erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler kullanılır.

Alıcı tarafta, ilk olarak alınan optik sinyaller içerisindeki  $X$  ve  $Y$  polarizasyonlarını ayırtmak için iki polarizasyon ışın ayırıcısı kullanılır. Daha sonra polarize edilen optik sinyaller  $90^\circ$  optik hibritlerden geçirilerek elektrikselsinyaller elde edilir. Her bir polarizasyondaki elektrikselsinyaller, FFT ile zaman düzleminde frekans düzlemine geçirilerek, gönderilen

veri setlerinin tekrar elde edilmesi için gerekli sinyal işleme yöntemlerinin uygulanması sağlanır.

PDM-CO-OFDM sisteminde, PMD etkisinden dolayı gönderilen sinyaller ile alınan sinyaller arasındaki ilişki  $2 \times 2$  MIMO model ile gösterilmektedir. Frekans düzleminde,  $i$ . alt taşıyıcısına ait her iki polarizasyondaki sinyaller, matematiksel olarak (1) eşitliği ile ifade edilmektedir [3].

$$\begin{bmatrix} R_x^i \\ R_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx}^i & H_{xy}^i \\ H_{yx}^i & H_{yy}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x^i \\ T_y^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu denklemde,  $T$  ve  $R$  gönderilen ve alınan verilerdir.  $x$  ve  $y$  polarizasyon indislerini göstermektedir.  $H_{xy}^i$ ,  $i$ . alt taşıyıcısının  $X$  polarizasyonundan  $Y$  polarizasyonuna olan etkisini gösteren kanal katsayısıdır. (1) eşitliğinde, matematiksel modeli basitleştirebilmek için gürültü terimi göz ardı edilmiştir.

ES temelli kanal denkleştiricilerde, kanal bilgisini elde etmek için eğitim sembollerinin dikgenlik özelliği kullanılarak  $H$  matrisine ait tüm katsayılar (2) eşitliği ile hesaplanır.

$$H_{xx}^i = \frac{R_x^i}{ES_x^i}, H_{xy}^i = \frac{R_{xy}^i}{ES_{xy}^i}, H_{yx}^i = \frac{R_{yx}^i}{ES_{yx}^i}, H_{yy}^i = \frac{R_y^i}{ES_y^i} \quad (2)$$

Kanal denkleştirici katsayıları  $\hat{H}_{xy}^i$ ,  $H_{xy}^i$  katsayılarının tersinin hesaplanmasıyla kestirilir. Sonra  $i$ . alt taşıyıcısındaki veriler, (3) eşitliği ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} T_x^i \\ T_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx}^i & H_{xy}^i \\ H_{yx}^i & H_{yy}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_x^i \\ R_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{H}_{xx}^i & \hat{H}_{xy}^i \\ \hat{H}_{yx}^i & \hat{H}_{yy}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x^i \\ R_y^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Bu denklemde,  $\hat{H}_{xy}^i$  katsayılarından oluşan matrisin kestirimi, kompleks BBA algoritmalarının kullanıldığı iki kaynaklı kör ayrıştırma problemi olarak ele alınmaktadır.

### 3 PBÇ-EO-OFDM sistemleri için BBA algoritmaları

BBA algoritmaları, kör kaynak ayrıştırma yapabilen yöntemlerdir. Sadece gözlem verileri kullanılarak, ayrıştırma matrisinin katsayıları kör olarak kestirilmektedir.

Genel BBA algoritmalarında,  $\mathbf{x}=\mathbf{A}\mathbf{s}$  matematiksel modeli kullanılır. Burada  $\mathbf{x}$  ve  $\mathbf{s}$ ,  $n \times 1$  kompleks değerli vektörler,  $\mathbf{A}$  ise  $n \times n$  kompleks değerli karıştırma matrisidir. Kaynak vektörün  $\mathbf{s}$  ( $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ ), gauss olmayan dağılıma sahip oldukları ve istatistiksel olarak bağımsız olduğu kabul edilir. Kestirilen kaynak vektörü  $\mathbf{u}$  ( $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ ),  $\mathbf{u} = \mathbf{W}\mathbf{x}$  ile hesaplanır. Burada  $\mathbf{W}$ , kestirilen ayrıştırma matrisidir.  $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$  matematiksel modelinde  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{s}$  ifadeleri bilinmediğinden dolayı  $\mathbf{W}$  matrisi bir amaç fonksiyonu belirlenerek optimizasyon işlemi ile bulunması gerekmektedir. Optimizasyon sürecinde iterasyon indeksi,  $\mathbf{W}$ 'daki değişime bağlıdır.  $\mathbf{W}$ 'daki değişim, belirlenen hata değerinin altında olduğu zaman iterasyon işlemi sonlandırılmaktadır.

Daha sonra her bir kaynak vektörünün kestirilebilmesi için  $\mathbf{W}$  matrisinin  $k$ . vektörünün ( $w_k$ ) bulunması ve  $u_k = w_k^H x$  işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Optimum çözüme ulaşma sürecinde,  $w_k$  vektörü birkaç kez yenileme sürecinden geçmektedir. Yenileme süreçlerinde, yenileme denklemleri BBA algoritmalarına göre değişim göstermektedir. Yenileme denklemlerinde, doğrusal olmayan amaç fonksiyonu  $G(u)$  ve genellikle türevlerinden  $g(u)$  faydalanılmaktadır.

#### 3.1 Hızlı BBA (H-BBA) algoritması

H-BBA algoritması yalnızca kaynakların Gauss olmayan (non-Gaussianity) özelliğini kullanır. Bunun içinde, doğrusal olmayan fonksiyonlar  $G_1(u) = \sqrt{a_1 + u}$ ,  $G_2(u) = \log(a_2 + u)$ ,  $G_3(u) = u^4$  ve türevlerini  $g_1(u) = 0,5(a_1 + u)^{-\frac{1}{2}}$ ,  $g_2(u) = (a_2 + u)^{-1}$ ,  $g_3(u) = 4u^3$  kullanılmaktadır. Newton yöntemi ile doğrusal olmayan fonksiyonların birinci ve ikinci türevlerinin kullanılmasıyla, H-BBA algoritmasının (4) eşitliği ile gösterilen yenileme denklemi elde edilir.

$$w_{n+1} = w_n + E\{xu^*g(|u|^2)\} - E\{g(|u|^2) + |u|^2g'(|u|^2)\}w_n \quad (4)$$

burada  $g'$  doğrusal olmayan fonksiyonun ikinci türevidir.

#### 3.2 Kompleks entropi bağlı minimizasyon BBA (KEBM-BBA) algoritması

KEBM-BBA algoritmasındaki ilk amaç  $H(u)$  entropiyi kestirebilmektir. Çünkü yenileme denklemi  $H(u)$  ifadesine bağlıdır. KEBM-BBA algoritmasında  $H(u)$  ifadesini direkt kestirmek yerine, kaynakların entropi sınırlarına yaklaşarak kestirilmesi amaçlanmıştır. Kaynakların entropi sınırı, simetrik veya çarpık olasılık yoğunluk fonksiyonlarına sahip dağılımlara bağlı sayısal olarak hesaplanmış en büyük entropi kullanılarak kestirilmektedir. Entropinin üst sınırı (5) eşitliği ile hesaplanmaktadır [9].

$$H(u) = \log|\det(B)| + H(k, l) \leq \log|\det(B)| + H(k) + H(l) = H^{[bound, l]}(u, B) \quad (5)$$

$k$  ve  $l$  rastgele değişkenler, kestirilen kaynağın gerçel ( $u_R$ ) ve sanal ( $u_I$ ) bileşenlerinin  $2 \times 2$  tekil olmayan  $B$  matrisi ile çarpımı sonucu elde edilir.

$$[k, l]^T = B^{-1}[u_R, u_I]^T \quad (6)$$

$H(k)$  ve  $H(l)$  için entropi sınırları, entropileri aşağıdaki gibi en büyük yapan maksimum entropi dağılımları kullanılarak doğru bir şekilde belirlenebilir.

$$H(k) = -V_1^{[l]} \{E[G_1^{[l]}(k)]\}, H(l) = -V_2^{[l]} \{E[G_2^{[l]}(l)]\} \quad (7)$$

Burada,  $G_i^{[l]}(\cdot)$  ölçüm fonksiyonlarıdır.  $V_i^{[l]}(\cdot)$  ifadesi sayısal olarak hesaplanmakta ve  $V_i^{[l]} \{E[G_i^{[l]}(\cdot)]\}$  ifadesi negentropi olarak adlandırılmaktadır.  $k$  ve  $l$  rastgele değişkenler için  $H(k)$  ve  $H(l)$  entropi sınırları, seçilen tüm ölçüm fonksiyonları için hesaplanır. Böylelikle birçok sınır değer içindeki en büyük bulunarak ne iyi sonuca ulaşılmış olunur. Fakat bu süreç algoritmanın karmaşıklığının artmasına sebep olmaktadır.

$H(u)$  kestirildikten sonra, yenileme denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w_{n+1} = w_n - \mu \left( \frac{\partial H(u)}{\partial w_n^*} - \text{Re} \{ w_n^H \frac{\partial H(u)}{\partial w_n^*} \} w_n \right) \quad (8)$$

Burada,  $(\cdot)^H$  bir matrisin Hermisyanini ve  $(\cdot)^*$  karmaşık eşleştiğini göstermektedir.

#### 3.3 Kompleks sabit noktalı (KSN) BBA algoritması

KSN-BBA algoritmasında, çok yaygın kullanım alanına sahip olan QAM sinyalli kaynaklar bağımsız bileşen analizi ile ayrıştırılmaktadır. Ayrıştırma için KSN-BBA algoritmasında Gauss dağılıma sahip karışım QAM yıldız kümesine ait ortak

dağılımla uyumlu doğrusal olmayan fonksiyonlar kullanılmaktadır.

KSN-BBA algoritması, kaynakların Gauss olmayan özelliğinin en büyük olması temellidir. Gauss olmayan özelliğin optimal ölçümü, negentropi ile gerçekleştirilir. Gauss dağılımın birim varyansından dolayı Gauss dağılıma sahip QAM yıldız kümesi noktalarının entropisi sabittir. Gauss dağılıma sahip M-QAM yıldız kümesi noktalarının olasılık yoğunluk dağılımı,

$$p(u) = \frac{1}{M2\pi\sigma^2} \sum_{i=1}^M e^{-\frac{1}{2\sigma^2}((u_R - \vartheta_{Ri})^2 + (u_I - \vartheta_{Ii})^2)} \quad (9)$$

Burada,  $\vartheta$  yıldız kümesi diyagramı üzerindeki karmaşık noktaların kümesini göstermektedir. Kullanılacak olan doğrusal olmayan fonksiyon, (10) eşitliği ile gösterilen entropi ifadesinin türevlerinden elde edilmektedir.

$$J(u) = E\{\log(p(u))\} \quad (10)$$

KSN-BBA algoritmasının uygulanabilmesi için öncelikle gözlem veri vektörüne ( $\mathbf{x}$ ) beyazlatma dönüşümü uygulanır.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{V}\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{a}\mathbf{s} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{s} \quad (11)$$

Lagrange fonksiyonu temelli Newton yöntemi ile KSN-BBA algoritmasının aşağıda görülen yenileme denklemi elde edilir.

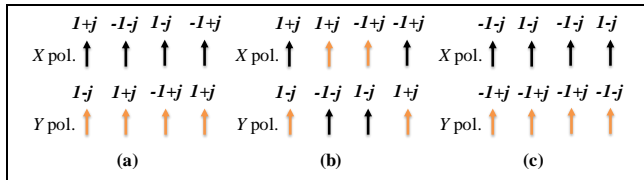
$$w_{n+1} = -\frac{1}{2}E\{zg(u)\} + E\{g'_a(u)\}w_n + E\{zz^T\}E\{g'_b(u)\}w_n^* \quad (12)$$

Burada,  $g(u)$  entropi ifadesinin birinci türevi,  $g'_a(u)$  ve  $g'_b(u)$  ikinci türevlerini göstermektedir.  $\mathbf{W}$  matrisinin hesaplanmasında (12) eşitliği kullanılır ve optimizasyon kararlılığını sağlamak için her yenileme sürecinden sonra  $\mathbf{W}$  matrisi (13) eşitliği ile normalize edilir.

$$W \leftarrow \frac{W}{\|W\|} \quad (13)$$

### 3.4 Permütasyon belirsizliği ve belirsiz kompleks ölçekleme

BBA temelli sinyal işleme yöntemlerinde karşılaşılan iki önemli problem, permütasyon belirsizliği ve belirsiz kompleks ölçeklemedir. Permütasyon belirsizliği, denkleştirme işleminden sonra tekrar elde edilen sinyallerin, Şekil 2(b)'de gösterildiği gibi ters polarizasyondaki sinyallere karşılık gelmesidir.



Şekil 2. PDM-CO-OFDM için, (a): Gönderilen sinyaller, (b): Permütasyon belirsizliği olan alınan sinyaller ve (c): Belirsiz kompleks ölçekleme olan alınan sinyaller [6].

Figure 2. (a): Transmitted signals, (b): Received signals with permutation indeterminacy and (c): Received signals with uncertain complex scaling for PDM-CO-OFDM [6].

Belirsiz kompleks ölçekleme ise, BBA algoritmasında kullanılan doğrusal olmayan amaç fonksiyonundan kaynaklanan, tekrar

elde edilen sinyallerdeki kompleks değerlerin gerçel ve sanal kısımlarındaki işaret değişikliğidir Şekil 2(c). Bu iki problemi çözebilmek için [13]'te önerilen çözüm kullanılmıştır. Önerilen çözümde, frekans düzleminde OFDM sinyaline ait her bir alt taşıyıcının ayrıştırma matrisinin başlangıç katsayılarını rastgele belirlemek yerine, komşu alt taşıyıcılar arasındaki yüksek ilişkiden faydalanarak mevcut alt taşıyıcının ayrıştırma matrisinin başlangıç katsayıları bir önceki alt taşıyıcının kestirilen ayrıştırma matrisine ait katsayılarla eşleştirilir.

## 4 Benzetim çalışmaları

BBA temelli kanal denkleştiricilerin performans analizi için, MATLAB kullanılarak bir PDM-CO-OFDM sisteminin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Fiber optik parametreleri ve temel OFDM parametreleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Her bir polarizasyonda veri iletim hızı 20 Gbps'dır.

Tablo 2. Fiber optik parametreleri.

Table 2. Fiber optic parameters.

Parametre	Değer
Dalga boyu	1550 nm
Işık hızı	200000 km/s
Fiber optik kablo uzunluğu	800-1000 km
Kromatik dağılım parametresi	16 ps/(nm.km)
PMD katsayısı	0.5 ps/km
Doğrusal olmayan katsayı	1.32 (W.km) <sup>-1</sup>
Zayıflama	0.2 dB/km
EDFA'nın kazancı	12 dB
EDFA'nın gürültü figürü	7 dB
Lazer çizgisi	60 kHz
Tekrarlama mesafesi	100 km
Fiber	Standart tek modlu fiber

Tablo 3. OFDM parametreleri.

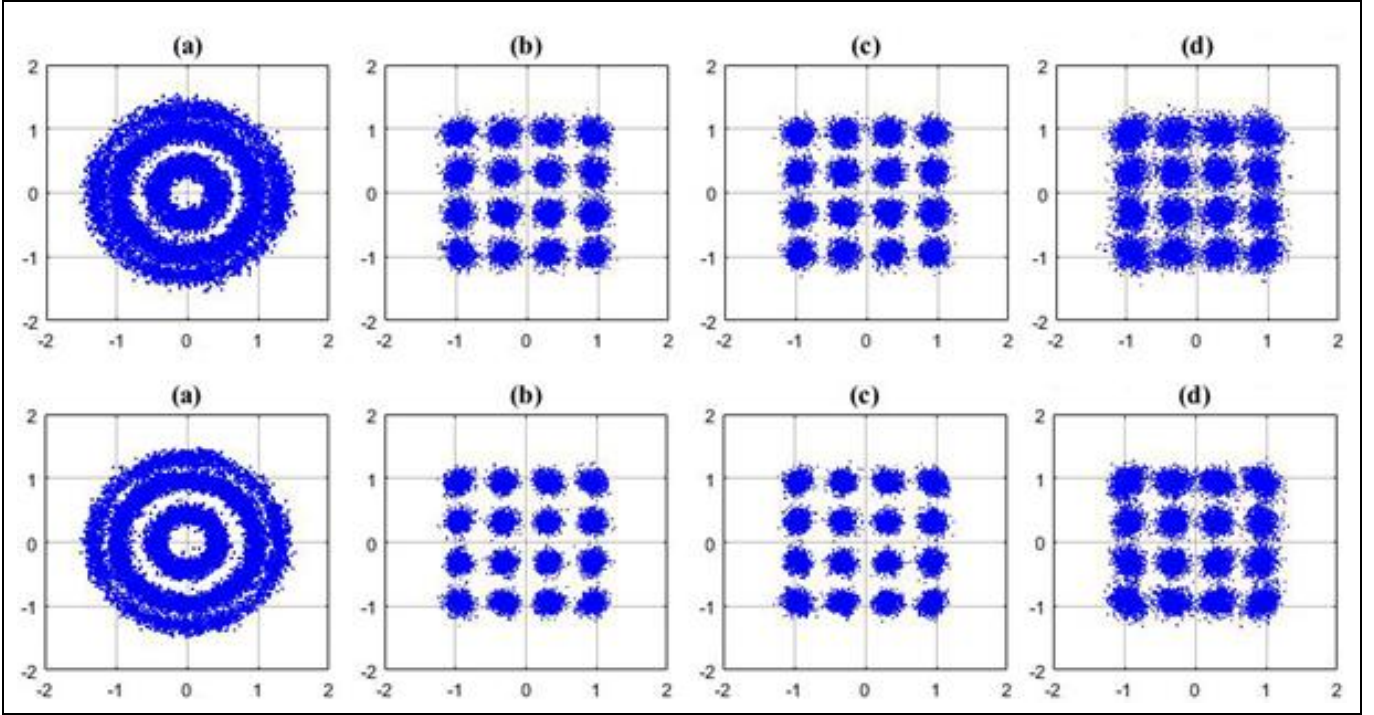
Table 3. OFDM parameters.

Parametre	Değer
FFT/IFFT uzunluğu ( $N_{FFT}$ )	256
Alttaşıyıcı sayısı	128
Çevrimsel önek	% 6.25
Modülasyon türü	16-QAM
OFDM sembol hızı	39.06 MHz
OFDM sembol sayısı	200

Optik kanalın doğrusal ve doğrusal olmayan bozucu etkileri fiber uzunluğunun bir fonksiyonu olarak, yıldız-kümesi diyagramı üzerindeki noktaların dairesel yayılmalarına ve saçılmalarına neden olmaktadır Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi). Şekil 3'te ayrı iki polarizasyondan alınan 16-QAM sinyallerinin, farklı BBA temelli kanal denkleştiricilerin kullanımı öncesi ve sonrasındaki yıldız-kümesi diyagramları gösterilmektedir. Şekil 3'teki değişimler incelendiğinde, doğrusal ve doğrusal olmayan bozucu etkiler her üç BBA temelli kanal denkleştirici tarafından kompanze edilmektedir.

Bingham ve Hyvarinen tarafından önerilen kompleks H-BBA algoritması [14], kaynak dağılımlarının dairesel olduğunu varsaymasından dolayı faz bilgisini koruyamamaktadır. Bu sebeple, kompleks H-BBA temelli kanal denkleştirici çıkışındaki dairesel olmayan dağılıma sahip 16-QAM sinyallerin dağılımı dairesel olarak değişmektedir [6]. Novey ve Adalı tarafından önerilen kompleks H-BBA algoritması [7], kaynakların dairesel olmadığı kabulünü temel almasından dolayı Şekil 3(d)'de gösterildiği gibi) sinyallerin ayrıştırılmasında başarımlı göstermektedir. Fakat doğrusal olmayan bozulma etkisinden dolayı oluşan saçılma etkisini kompanze etme başarımı diğer denkleştiricilere göre daha düşüktür.





Şekil 3. 16-QAM PDM-CO-OFDM sisteminde x (üst) ve y (alt) polarizasyonlarındaki. (a): Kanal denkleştiriciden önceki ve (b): KEBM-BBA, (c): KSN-BBA, (d): H-BBA temelli kanal denkleştirici çıkışındaki yıldız-kümesi diyagramları.

Figure 3. Constellation plots of x (upper) and y (bottom) polarizations for 16QAM in PDM-CO-OFDM. (a): before channel equalizations and after ICA-based channel equalization using the algorithm (b): KEBM-BBA, (c): KSN-BBA, (d): H-BBA.

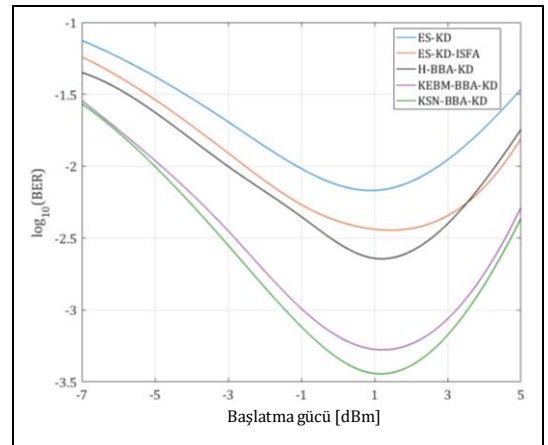
Alıcıda BBA temelli kanal denkleştiricilerin (BBA-KD), sinyal üzerindeki optik kablonun doğrusal olmayan etkisini kompanse etme başarımlarını analiz edebilmek için, başlatma gücü (launch power) değerlerinin değişimine karşılık BBA temelli kanal denkleştiricilerin başarımlarını karşılaştırıldı.

Tablo 2'deki parametrelere göre Şekil 4'te, 16-QAM için BER performans değişimleri gösterilmektedir. Yapılan karşılaştırmalarda, BBA temelli kanal denkleştiriciler (H-BBA-KD, KEBM-BBA-KD ve KSN-BBA-KD) ile eğitim sembolü kullanan iki kanal denkleştirici bulunmaktadır. Birincisi geleneksel ES temelli kanal denkleştirici (ES-KD) ve ikincisi ISFA (semboller-arası frekans bölgesi ortalaması) algoritması [15],[16] kullanan ES temelli kanal denkleştiricidir (ES-KD-ISFA). ISFA algoritması, aynı ES'de bulunan komşu çoklu frekans alt-taşıyıcılarının kestirilen kanal katsayıları matrislerinin ortalamasını almaktadır.

Şekil 4'te gösterilen sonuçlara göre, düşük başlatma gücü seviyelerinde optimum başlatma gücü noktasına yaklaştıkça BER başarımları artmaktadır. Fakat optimum başlatma gücü seviyesinden daha büyük başlatma gücü seviyelerinde BER başarımları azalmaktadır. Bunun sebebi, düşük başlatma gücü seviyelerinde fiber kablo, doğrusal bir filtre olarak modellenmekte ve sadece gürültünün etkisi bulunmaktadır. Fakat başlatma gücü optimum değeri geçtikten sonra doğrusal olmayan bozucu etki güçlenmektedir. Bu nedenden dolayı BER başarımları düşmektedir.

Şekil 4'te gösterilen değişimler incelendiğinde, önerilen kanal denkleştiricisinin (KSN-BBA-KD), ES-KD, ES-KD-ISFA ve H-BBA-KD'den daha iyi performansa sahip olduğu

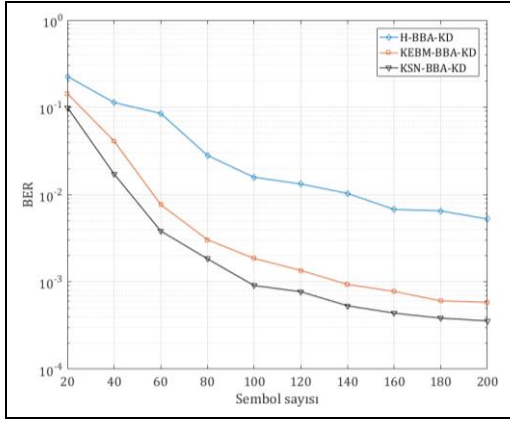
anlaşılmaktadır. Böylelikle PDM-CO-OFDM sistemleri için KSN-BBA temelli kanal denkleştiricisi ile daha yüksek başlatma gücü seviyelerinde, daha düşük BER değerlerine sahip 16-QAM sinyallerin uzun mesafelere iletimi mümkün olabilecektir.



Şekil 4. 800 km iletimden sonra başlatma gücünün değişimine göre BBA temelli kanal denkleştiricilerin BER eğrileri.

Figure 4. BER versus launch power for ICA-based channel equalizers after 800 km transmission.

BBA temelli kanal denkleştiricilerde, kanal katsayıları sadece gözlemlenen sinyallerden kör kestirim yöntemi ile elde edilmektedir. Kör kestirim hızı, kestirim sürecinde kullanılan sembol sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple Şekil 5'te, OFDM sembol sayısının BBA temelli kanal denkleştiricilerin performansına olan etkisi gösterilmektedir.

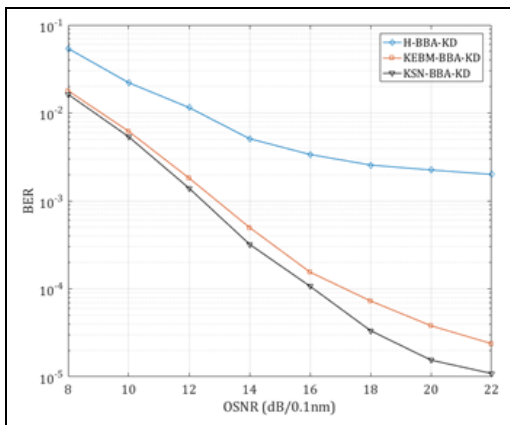


Şekil 5. Sembol sayısı değişimine göre BBA temelli kanal denkleştiricilerin BER eğrileri.

Figure 5. BER versus number of symbols for ICA-based channel equalizers.

İleri hata düzeltme (forward error correction-FEC, BER=10<sup>-3</sup> [17]) sınır değeri referans alındığı zaman, KSN-BBA-KD ve KEBM-BBA-KD için ihtiyaç duyulan OFDM sembol sayısı, 16-QAM sinyaller için sırasıyla 100 ve 140 semboldür. Fakat H-BBA-KD belirlenen BER değerine ulaşamamaktadır. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere kendisine en yakın denkleştirici ile karşılaştırıldığı zaman, KSN-BBA temelli kanal denkleştiricisindeki kanal katsayılarının kestirimi için ihtiyaç duyulan OFDM sembol sayısı yaklaşık %50 daha az olduğu görülmektedir. Optik kanalın doğrusal olmayan bozucu etkisinin en düşük olduğu durumda (başlatma gücü=1dBm), PDM-CO-OFDM sistemlerinde farklı seviyelerdeki optik gürültünün, alıcı tarafta 16-QAM sinyallerine olan etkisini gözlemleyebilmek için BBA temelli kanal denkleştiricilerin BER performansları farklı optik işaret gürültü oranı (OSNR) seviyelerinde karşılaştırılmıştır. Elde edilen BER performans değişimleri Şekil 6'da gösterilmektedir.

Şekil 6'daki değişim eğrilerine göre, önerilen KSN-BBA temelli kanal denkleştiricisi FEC sınır değeri için en yakın kanal denkleştiricisinden yaklaşık 1dB OSNR kazancı sağlamaktadır.



Şekil 6. OSNR değişimine göre BBA temelli kanal denkleştiricilerin BER eğrileri.

Figure 6. BER versus OSNR for ICA-based channel equalizers.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, PDM-CO-OFDM sistemleri için eğitim sembollerine ihtiyaç duymadan, gönderilen sembollerin tekrar

elde edilebilmesi için BBA temelli kanal denkleştiriciler sunulmuştur.

BBA temelli kanal denkleştiricilerin, optik kanala ait doğrusal ve doğrusal olmayan bozucu etkilerini kompanze etmekte başarılı olduğu elde edilen sonuçlarla gösterilmiştir. Fakat bu çalışmadaki asıl hedef PDM-CO-OFDM sistemlerinde 16-QAM OFDM sinyalleri için daha yüksek başlatma gücünde ve daha düşük OSNR seviyelerinde yüksek performansa sahip yeni bir BBA temelli kanal denkleştirici yapısı sunmaktır.

Önerilen KSN-BBA temelli kanal denkleştiricisinin, diğer BBA temelli kanal denkleştiricileriyle karşılaştırıldığında, doğrusal olmayan bozucu etkiye karşı ve değişen OSNR seviyelerinde en iyi performansa sahip olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca İleri hata düzeltme sınır değerinde kanal katsayılarının kestirimi için KSN-BBA algoritmasının 16-QAM sinyaller için diğer BBA algoritmalarıyla karşılaştırıldığında ihtiyaç duyulan sembol sayısının daha az olduğu elde edilen sonuçlarla gösterilmiştir.

Sonuç olarak, daha geniş kapasiteli, daha hızlı ve daha kaliteli sistemlere olan taleplerin artmasıyla ve mikro dalga sistemlerinin maksimum kapasiteye ulaşmasıyla optik haberleşme sistemlerinin, RoF (radio over fiber) gibi yeni teknolojik alt yapılar içerisinde yeri daha da önem kazanmıştır. Bu tür entegre sistemler içerisinde, optik haberleşme sistemlerinin daha uzun mesafelere veri iletimini mümkün kılan etkenlerden biriside alıcıda kullanılan sinyal işleme teknikleridir (DSP). Bu çalışmada farklı sinyal işleme tekniklerini bir araya getiren, kanal denkleştirici yapısı sahip olduğu başarımlarla önem arz etmektedir.

## 6 Kaynaklar

- [1] Shieh W. "OFDM for flexible high-speed optical networks". *Journal of Lightwave Technology*, 29(10), 1560-1577, 2011.
- [2] Ma Y, Yang Q, Chen S, Shieh W. "1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission with orthogonal-band multiplexing and subwavelength bandwidth access". *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 308-315, 2010.
- [3] Li X, Zhong W, Alphones A, Yu C. "Channel equalization using independent component analysis in PDM-CO-OFDM". *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(5),497-500, 2014.
- [4] Nafta A, Johannisson P, Shtaf M. "Blind equalization in optical communications using independent component analysis". *Journal of Lightwave Technology*, 31(12), 2043-2049, 2013.
- [5] Zhang H, Tao Z, Liu L, Oda S, Hoshiba T, Rasmussen JC. "Polarization demultiplexing based on independent component analysis in optical coherent receivers". *34th European Conference on Optical Communications (ECOC)*, Brussels, Belgium, 21-25 September 2008.
- [6] Li X, Zhong W, Alphones A, Yu C, Xu Z. "Channel Equalization in Optical OFDM Systems Using Independent Component Analysis". *Journal of Lightwave Technology*, 32(18), 3206-3214, 2014.
- [7] Novey M, Adali T. "On extending the complex FastICA algorithm to noncircular sources". *IEEE Transactions on Signal Processing*, 56(5), 2148-2154, 2008.
- [8] Zhao W, Shen Y, Xu P, Yuan Z, Wei Y, Jian W. "Efficient Optimization of Reference-Based Negentropy for Noncircular Sources in Complex ICA". *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 35(2), 4390-4412, 2016.

- [9] Li XL, Adali T. "Complex independent component analysis by entropy bound minimization". *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 57(7), 1417-1430, 2010.
- [10] Fu S, Phlypo R, Anderson M, Adali T. "Complex Independent Component Analysis Using Three Types of Diversity: Non-Gaussianity, Nonwhiteness, and Noncircularity". *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(3), 794-805, 2015.
- [11] Novey M, Adali T. "Complex fixed-point ICA algorithm for separation of QAM sources using Gaussian mixture model". *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Honolulu, Hawaii, 15-20 April 2007.
- [12] Adali T, Haykin S. *Adaptive Signal Processing: Next Generation Solutions*. New York, USA, Wiley-IEEE Press, 2010.
- [13] Wong CS, Obradovic D, Madhu N. "Independent component analysis (ICA) for blind equalization of frequency selective channels". *13<sup>th</sup> IEEE Workshop Neural Networks Signal Processing*, Toulouse, France, 17-19 September 2003.
- [14] Bingham E, Hyvarinen A. "A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals". *International Journal of Neural Systems*, 10(1), 1-8, 2000.
- [15] Liu X, Buchali F. "Intra-symbol frequency-domain averaging based channel estimation for coherent optical OFDM". *Optics Express*, 16 (26), 21944-21957, 2008.
- [16] Fang X, Wang Y, Zhang L, Ding D, Wang J, Gao X. "Intra symbol frequency domain averaging channel estimation for coherent optical OFDM/OQAM system". *17<sup>th</sup> International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, Zhuhai, China, 16-19 November 2018.
- [17] Giacoumidis E, Mhatli S, Stephens MFC, Tsokanos A, Wei J, McCarthy ME, Doran NJ, Ellis AE. "Reduction of nonlinear inter-subcarrier intermixing in coherent optical OFDM by a fast newton-based support vector machine nonlinear equalizer". *Journal of Lightwave Technology*, 35(12), 2391-2397, 2017.