

DCO-OFDM Tabanlı VLC Sistemlerde Kırpma Gürültüsü Etkisinde Kanal Kestirimi

Channel Estimation for DCO-OFDM Based VLC Systems in the Presence of Clipping Noise

Ekin Basak Bektas, Erdal Panayirci
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
E-mail: {ekin.bektas, eepanay}@khas.edu.tr

Özetçe —Görünür ışıkla haberleşme (visible light communications (VLC)), radyo frekans (RF) bandında yaşanan sıkışıklığı giderme amacıyla kablosuz haberleşme sistemlerin erişim problemlerine bir alternatif çözüm olarak düşünülmektedir. Bu nedenle, VLC sistemlerinin 6.kuşak (6G) kablosuz haberleşmede çok önemli bir rol oynayacağı anlaşılmaktadır. VLC, bir taraftan aydınlanma işlevini yaparken diğer taraftan kablosuz veri iletimini sağlar. VLC için, uygulamada kolay tasarımı ve optik güç randımanının çok yüksek olması nedeniyle, doğru akımla ön gerilim (DC-bias) sağlanmış ve kırılmış optik OFDM (DCO-OFDM) sistemleri geliştirilmiştir. Bu türden kablosuz haberleşme sistemlerin alıcılarında, iletilen veriyi doğru olarak sezebilme (detection) için, iletim yapılan optik kanalın doğru olarak kestirilmesi ve izlenmesi gerekir. Bu çalışmada, toplamsal Gauss gürültüsü etkisi altında çalışan kırılmış DCO-OFDM sistemine ilişkin optik kanalın etkin bir şekilde kestirilmesi için pilot-tabanlı ve iteratif yapıda yeni bir kanal kestirim tekniği önerilmektedir. Teklif edilen iteratif kanal kestirim tekniği, enterpolasyon tekniğini kullanan pilot simgelerden ve bir önceki OFDM bloğunda elde edilen kanal kestirim değerlerinden yararlanarak, kanalın kestirim başarımında büyük iyileşmeler sağlamaktadır. Her iterasyon adımında kırpma gürültüsü zaman-bölgesinde kestirilmekte ve frekans-bölgesinde etkisi en aza indirilmektedir. Bilgisayar benzetimleri teklif edilen pilot-tabanlı iteratif kanal kestirim algoritmasının sistemin bit hata olasılığının ve ortalama karesel kestirim hatasının önemli düzeyde iyileşme sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—Görünür ışıkla haberleşme (VLC), dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM), DC-öngerilimli optik OFDM (DCO-OFDM), kanal kestirimi, kırpma gürültüsü.

Abstract — Visible Light Communication (VLC) has been considered as a potential access option for 6G wireless systems to solve performance limitation due to bandwidth shortage at radio frequency (RF) band. In VLC system, illumination infrastructure has dual usage at the same time namely illumination and wireless data transmission. DC-Biased optical DCO-OFDM with clipping has been proposed for VLC systems to provide optically power efficient solution and easy implementation. Wireless communication systems generally require estimating and tracking the fading channel in order to detect transmitted data coherently. In this work, we propose a pilot-aided

iterative channel estimation algorithm to efficiently estimate the optical channel coefficients of a clipped DCO-OFDM system operating with additive white Gaussian noise (AWGN). The estimation algorithm is capable of improving the channel estimation by making use of pilot symbols with interpolation or using the channel estimate of previous OFDM block to obtain the next estimate for the iterative algorithm. In each iteration, the clipping noise is estimated and compensated in the frequency domain. Simulation results verify that the proposed channel estimation algorithm reduces the bit error rate (BER) and mean-square error (MSE) of channel estimate can be significantly.

Keywords—Visible light communication (VLC), DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM), clipping noise, pilot-aided iterative channel estimation.

I. GİRİŞ

Kablosuz optik haberleşme (optical wireless communications, OWC) sistemi görünür ışık ya da kızılötesi ışık frekanslarını kullanarak kablosuz veri iletimini sağlayan yeni bir teknolojidir. Özellikle, son yıllarda VLC konusunda yoğun çalışmalar yapılmakta ve bu alanda büyük gelişmeler görülmektedir[1]. Lisans kullanımı gerektirmeyen bir frekans bandında çalışabilme üstünlüğü, kablolu radyo frekasında (RF) çalışan klasik haberleşme sistemlerine oranla çok daha geniş frekans band genişliğine sahip olmasının yanı sıra, ışığın duvarlardan geçememesi nedeniyle, kapalı ortam haberleşmesinde bilgi güvenliğinin büyük ölçüde sağlanması, VLC sistemlerinin RF kablosuz haberleşme sistemlerine karşı güçlü bir alternatif olacağı ve 6.kuşak (6G) kablosuz haberleşme sistemlerinde çok önemli bir rol oynayacağı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM), diğer modülasyon teknikleriyle kıyaslandığında optik güç verimliliği yönünden daha iyi başarımlar göstermesi nedeniyle VLC sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır[2]. Alışılmalı OFDM sistemlerde iletilen sinyaller çift kutuplu ve karmaşık değerlidir. VLC’de ise bilgi ışık şiddeti (light intensity) ile iletildiğinden ve negatif değerler alamadığından, klasik OFDM sistemleri, yoğunluk modülasyonu / doğrudan sezim (Intensity Modulation / Direct Detection, IM/DD) tekniğine göre çalışan optik haberleşme sistemlerinde kullanılamazlar

[3]. Optik OFDM’de, optik sinyallerin sadece pozitif değerli olmasının sağlanması için kullanılan yaygın tekniklerden biri, doğru akım (DC) beslemeli Optiksel ODFM (DC-Biased Optical OFDM)’dir. DCO-OFDM’de vericide ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) işlemi sonrasında oluşan negatif gerçel değerli sinyallere uygun bir DC öngerilim (bias) eklenerek negatif bileşenlerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Bu şekilde tasarlanan DCO-OFDM sisteminin bit hata olasılığı (BER) başarımı birçok çalışmada ele alınmıştır[4],[5]. Ancak tüm bu çalışmalarda sistemin sadece toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN)’den etkilendiği göz önüne alınmıştır. Ancak, OFDM çıkışında üretilen örneklerin tamamen pozitif değerli olabilmesi için gerekli olan DC-öngerilim, sistemin güç randımının büyük ölçüde olumsuz yönde etkilendiğinden, genellikle uygulamada daha düşük bir DC-öngerilim ile sistem çalıştırılarak arta kalan negatif değerli örnekler kırılarak sıfıra eşitlenmektedir. Bu durumda sistemi etkileyen Gauss gürültüsü yanında bir de kırma gürültüsü (clipping noise) adı verilen bir gürültü kaynağı da sistemin hata başarımını ciddi bir şekilde etkileyecektir. Bu nedenle, alıcıda kullanılacak kanal kestirim algoritmasının kırma gürültüsünün de göz önüne alınarak tasarlanması gerekir. Literatürde şu ana kadar VLC sistemleri için kırma gürültüsünün etkisi altında optik kanal kestirimi konusuyla ilgili pek bir çalışmaya rastlanamamıştır. [6]’de asimetrik kırılmış OFDM-VLC sistemlerde pilot-tabanlı bir kanal kestirim tekniği önerilmiştir. Ancak bu kestirim algoritması, kırma gürültüsünü Gauss olasılık dağılımlı varsayarak, sistemi Beyaz Gauss gürültüsü gibi, toplamsal olarak etkilediği varsayılmıştır. [7]’de, RF-tabanlı kablosuz OFDM sistemlerin alıcılarında kırma gürültüsü kestirilerek, veri simgelerinin seziminde etkisinin en aza indirmeye yönelik bir yöntem verilmiş ve gerçek kanal kestiriminin bu yöntem üzerindeki etkileri incelenmiştir. [8]’de ise OFDM haberleşmesinde kırma gürültüsünü de göz önüne alarak bir kanal kestirim tekniği önerilmiştir. Ancak bu yaklaşımların optik DCO-OFDM sistemlerde pozitif değerli genlik kısıtı nedeniyle direkt olarak uygulanması mümkün değildir.

Bu bildiriye, DCO-OFDM tabanlı VLC sistemleri için pilot destekli, hesaplama karmaşıklığı düşük, hızlı ve iteratif yapıda yeni bir kanal kestirim algoritması önerilmektedir. Bilgisayar benzetimleri, pilot simgeleri ve bir önceki iterasyon adımındaki kanal kestirimlerini kullanarak gerçekleştirilen kanal kestiriminin sistemin gerek BER ve gerekse MSE başarımını büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca bu iyileşmenin tamamına yakınının 1. iterasyon sonunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenle önerilen algoritmanın çok hızlı bir yakınsama yeteneği olduğu anlaşılmaktadır.

II. SINYAL MODELİ

Çift kutupluluk problemini bir DC öngerilim yardımıyla çözen DCO-OFDM sisteminin spektral verimliliği, asimetrik kırılmış optik OFDM (asymmetrically clipped optical OFDM, ACO-OFDM) ve tek kutuplu optik OFDM (unipolar OFDM, U-OFDM) yöntemlerin iki katı kadardır [9],[10],[11]. DCO-OFDM sisteminde yalnızca $(N/2) - 1$ tane özgün veri simgesi taşınabilmektedir. DCO-OFDM’de T_{sym} süreli bloklar halinde rastlantısal olarak üretilen bilgi bitleri, M -düzeyli dik genlik modülasyonu (M-QAM) simgelere izdüşürülmekte ve bu simgelerin oluşturduğu $T_s = T_{sym}/N$ süreli simge vektörleri, paralel bloklar halinde işlenmektedir. Frekans bölgesinde modüle edilmiş simgeler $X = [X[0], X[1], \dots, X[N-1]]^T$

biçiminde olup Hermisyen simetrik bir yapıya sahiptir ve bu yapı 0 (DC) ve $N/2$ indisli alt taşıyıcıların sıfıra eşitlenmesiyle sağlanmaktadır. Tipik bir DCO-OFDM sisteminin frekans bölgesindeki yapısı aşağıda verildiği gibidir[5],

$$X(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } k = 0, \\ X^*[N-k], & \text{if } k = 1, 2, \dots, N/2-1, \\ 0, & \text{if } k = N/2. \end{cases}$$

Burada *, karmaşık eşlenik simgesini göstermektedir. Sonuç olarak; gerçel, çift kutuplu ve simetrik olmayan zaman-bölgesi, IFFT çıkışındaki OFDM sinyal örneklerinin oluşturduğu N -boyutlu vektör $\mathbf{x} = [x[0], x[1], \dots, x[N-1]]^T$ biçiminde olup, vektörün n . bileşeni

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi kn/N} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir ve N , IFFT boyutunu belirtmektedir. Hermisyen simetrisi ve $k = 0$, $k = N/2$ alt taşıyıcılarına sıfır yerleştirme işlemi nedeniyle, DCO-OFDM’de bilgi içeren sinyallerin sayısı $N/2 - 1$ kadardır. Ayrık zaman örneklerine, uzunluğu N_{Cp} olan bir örnek (cyclic prefix, CP) eklenmiş olup, N_{Cp} ’nin en büyük kanal gecikme yayılımına eşit veya daha büyük olacak şekilde seçilmesi gereklidir. Bilgisayar benzetim çalışmalarımızda $N_{Cp} \geq L$ olarak varsayılmıştır. Sayısal-analog dönüşümünden sonra, sürekli-zamanlı elektrik sinyali, $x(t)$ analog biçimde üretilir. Merkezi limit teoremi nedeniyle, her t için, $x(t)$, ortalaması sıfır ve varyansı $\sigma_x^2 = E\{x_k^2\}$ olan bir Gauss rastlantı değişkeni olarak modellenmektedir. Daha sonra $x(t)$ ’ye uygun bir DC öngerilim eklenmekte ve negatif tepe noktaları kırılmaktadır, [12]. Zaman-bölgesindeki OFDM örneklerinin en yüksek tepe değeri büyük ölçüde yüksek olduğundan, $x(t)$ ’nin negatif kısmını ortadan kaldırmak için büyük bir DC öngerilimi gereklidir. Bu ise, bit başına düşen optik enerjiyi artırır ve sistemin optik güç randımının büyük ölçüde düşmesine neden olur. Bu nedenle, gerçek uygulamalarda ölçülü bir DC öngerilimi kullanılır ve az sayıda kalan artık negatif değerli OFDM örneklerini de ortadan kaldırmak için bir kırma işlemi gerçekleştirilir. Bu durum, kaçınılmaz olarak bir kırma gürültüsünün oluşmasına neden olacak ve tasarımcı tarafından belirlenen kırma gürültüsünün düzeyine bağlı olarak sistemin BER başarımını etkileyecektir. Genellikle V_{DC} ile gösterilen DC öngerilim seviyesi, $x(t)$ ’nin standart sapması ile şu şekilde belirlenir:

$$V_{DC} = \rho \sqrt{E\{x^2(t)\}}. \quad (2)$$

Burada ρ sabittir ve dB olarak verilen bir bozulma düzeyi için $\text{dB} = 10 \log(\rho^2 + 1)$ ilişkisinden hesaplanır. Bu durumda DCO-OFDM’de IFFT çıkışında doğru akım bileşeni eklenmiş zaman bölgesi örnekleri, $\tilde{x}[n] = x[n] + V_{DC}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, kırma işlemi sonucunda

$$x_c[n] = \begin{cases} \tilde{x}[n] & \text{if } \tilde{x}[n] \geq 0 \\ 0 & \text{if } \tilde{x}[n] < 0 \end{cases} \quad (3)$$

biçimine dönüşecek ve aşikar olarak $e_c[n] = x_c[n] - \tilde{x}[n]$ şeklinde bir kırma gürültüsü ortaya çıkacaktır. Buradan $x_c = x_c[n]\tilde{x}[n] + e_c$ olup, kırma gürültüsü vericide IFFT işleminden sonra sistemi etkilediği için, frekans bölgesinde buna ilişkin bozulmuş örnekler aşağıdaki ilişkilerden hesaplanacaktır.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_c &= \mathcal{F}\mathcal{F}\mathcal{T}\{\mathbf{x}_c\} \\ &= \mathcal{F}\mathcal{F}\mathcal{T}\{\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{e}_c\} \\ &= \tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{E}_c \end{aligned}$$

şeklinde elde edilip \mathbf{E}_c , kırpma gürültüsünün frekans bölgesinde neden olduğu bozulmayı göstermektedir. Diğer taraftan alıcıda, DCO-OFDM zaman bölgesi örneklerinden önce dögüsel örnekler (C_p) kaldırılır daha sonra seriden paralele dönüştürülerek elde edilen N uzunluğundaki OFDM bloğunun hızlı FFT dönüşümü alınarak alıcıda sinyalin frekans bölgesindeki örnek değerleri

$$R[k] = X[k]H[k] + E_c[k]H[k] + W[k] \quad (4)$$

biçiminde elde edilir. $H[k]$, ayrık kanal transfer fonksiyonunu göstermekte olup, $h[n]$ ile gösterilen ayrık kanal dürtü yanıtı yardımıyla

$$H[k] = \sum_{k=0}^{N-1} h[n] e^{-j2\pi kn/N} \quad (5)$$

ilişkisinden hesaplanır. $N_c[k] \equiv E_c[k]H[k]$ ve $W[k]$ 'da sırasıyla sistemi etkileyen kırpma gürültüsü ve beyaz Gauss gürültüsünü simgelemektedir. Frekans bölgesinde bir OFDM çerçevesi süresince alınan sinyal vektörel biçimde şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}(\mathbf{H} + \mathbf{E}_c) + \mathbf{W} \quad (6)$$

burada, \mathbf{R} , \mathbf{H} , \mathbf{E}_c , \mathbf{W} N -boyutlu vektörleri, ve \mathbf{X} elemanları $X[k]$, olan bir $N \times N$ köşegen matrisi göstermektedir.

III. DCO-OFDM SİSTEMLERDE KIRPMA GÜRÜLTÜSÜ ETKİSİ ALTINDA KANAL KESTİRİMİ

VLC sistemlerinde, modüle edilmiş veri simgelerinin alıcıda uygun şekilde sezilmesi için kanal durumu bilgisine (CSI) gereksinim vardır. Bu nedenle, kanal kestirimi, DCO-OFDM sistemleri için alıcı tasarımının önemli bir parçasını oluşturur. Bu bölümde kırpma gürültüsü etkisi altında elde edilen gözlem vektöründen ayrık kanal transfer fonksiyonunun OFDM altaşıyıcılara karşı düşen bileşenlerinin kestirimi için iteratif bir algoritma önerilecektir. Sistemde öngörülen Hermisyan simetriden dolayı kanalın sadece $k = 1, 2, \dots, N/2 - 1$ altaşıyıcılarda kestirilmesi yeterli olacaktır. Önerilen iteratif algoritmada, başlangıç kanal kestirimi, birbirinden eşit aralıklarla ayrılmış altaşıyıcılarda taşınan pilot simgelerle gerçekleştirilir. $I_p, p = 1, 2, \dots, P$ altaşıyıcılardaki DCO-OFDM simgelerinden oluşan P tane pilot simgeler yardımıyla ilk iterasyon adımıdaki pilot altaşıyıcılarda kanal kestirimi:

$$R[I_p] = (X[I_p] + E_c[I_p])H[I_p] + W[I_p] \quad (7)$$

gözlem örneklerinden En Küçük Kareler Methodu (Least Square, (LS)) yöntemiyle:

$$\hat{H}[I_p] = R[I_p] / (X[I_p] + E_c[I_p]), \quad (8)$$

ilişkisinden bulunur. Daha sonra, veri altaşıyıcılarındaki kanal katsayılarının kestirimi için uygun bir enterpolasyon tekniği kullanılarak, $\mathbf{H}^{(1)}$ ile gösterilen, tüm altaşıyıcılarda başlangıç kanal kestirimi elde edilmiş olur. Bunu izleyen iterasyon adımıda, başlangıç kanal kestiriminden yararlanarak OFDM alıcısında altaşıyıcılarda taşınan verilerin sezimi aşağıdaki gibi gerçekleşir.

$$\begin{aligned} X^{(1)}[k] &= \mathcal{SEZIM} \left\{ \frac{R[k]}{H[k]} \right\}, k = 1, 2, \dots, N/2 - 1 \\ \mathbf{x}^{(1)} &= \mathcal{IFFT} \{ \mathbf{X}^{(1)} \} \end{aligned}$$

Burada $\mathcal{SEZIM}\{s\}$ operatörü gürültüyle karışmış s sinyalinin ona en yakın veri simgesine yuvarlanması olarak tanımlanmıştır. Bunu izleyen iterasyon adımıda ise, aşağıdaki gibi, kırpma gürültüsünün bir kestirimi yapılmaktadır:

$$\mathbf{E}_c^{(1)} = \mathcal{FFT} \left\{ \mathbf{x}_c^{(1)} - \hat{\mathbf{x}}^{(1)} \right\}.$$

Eğer $\mathbf{X}_c^{(1)} \approx \mathbf{X}_c$ ise BER yeterli derecede küçük olacağından $\mathbf{E}_c^{(1)} \approx \mathbf{E}_c$ dir. Bu koşul altında, i 'inci iterasyonda elde edilen kanal katsayılarının ve kırpma gürültüsünün kestirimleri yardımıyla $(i + 1)$ 'inci iterasyon adımıda bu büyüklüklerin kestirimleri yine en küçük kareler kestirimleri ile aşağıdaki gibi kolayca elde edilir.

$$\hat{H}^{(i+1)}[k] = \frac{R[k] - \hat{H}^{(i)}[k]\hat{E}_c^{(i)}[k]}{X^{(i)}[k]} \quad (9)$$

$$\hat{X}^{(i+1)}[k] = \mathcal{SEZIM} \left\{ \frac{R[k]}{\hat{H}^{(i)}[k]} \right\} \quad (10)$$

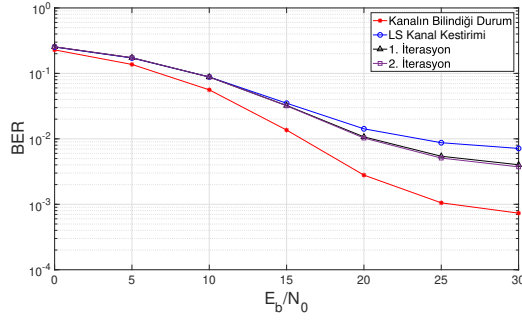
$$\mathbf{x}^{(i+1)} = \mathcal{IFFT} \{ \mathbf{X}^{(i+1)} \} \quad (11)$$

$$\mathbf{E}_c^{(i+1)} = \mathcal{FFT} \left\{ \mathbf{x}_c^{(i+1)} - \hat{\mathbf{x}}^{(i+1)} \right\}. \quad (12)$$

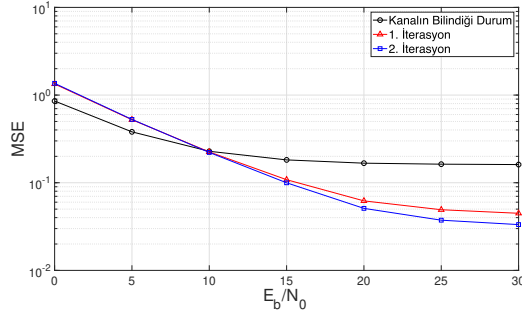
Bunu izleyen bölümde bilgisayar benzetimleriyle yukarıda ayrıntıları verilen iteratif kanal kestirimi algoritması uygulanarak görünür ışık kanalları üzerinden iletim yapan bir DCO-OFDM sisteminin BER ve MSE başarımları türlü kırpma gürültü düzeylerine bağlı olarak incelenecektir.

IV. BILGISAYAR BENZETİMLERİ

Bu bölümde, geliştirdiğimiz pilot tabanlı ve iteratif yapıdaki kanal kestirim algoritmasının farklı kırpma gürültüsü düzeylerinde çalışan DCO-OFDM tabanlı VLC sistemlerin BER ve MSE başarımlarına etkileri incelenmektedir. $N = 256$ altaşıyıcıdan oluşan OFDM sinyali, 1 GHz bant genişliği ($T_s = 1$ nsec) içinde üretilmiş olup dögüsel örnek uzunluğu $N_{Cp} = 5$ olarak seçilmiştir. Pilot simgelerinin aralığı ise 4 olarak ayarlanmıştır. Kanal parametrelerinin kestirimi sürecinde sistemin alıcı ve verici arasında eşzamanlamanın (senkronizasyon) mükemmel olduğu varsayılmaktadır. Veri simgeleri, ilintisiz ve 4-QAM (QPSK) modülasyon formatında üretilmektedir. Şekil 1-2'de bu çalışmada teklif edilen iteratif kanal kestirim algoritmasının BER ve MSE başarımları eğrileri, kırpma gürültüsü düzeyi $B = 2$ dB için sinyal gürültü oranının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. İteratif algoritmanın olumlu etkisi bu iki grafikten görülmektedir. Bununla beraber, elde edilen BER başarımları eğrisinin kanalın tam olarak bilinmesi durumundaki BER eğrisine yakınsamadığı ve ayrıca MSE başarımlarının da, kanaldan iletilen tüm veri simgelerinin bilinmesi durumundaki MSE eğrisine yakınsamadığı görülmektedir. Bunun temel nedeninin, vericide OFDM çıkışıdaki zaman-bölgesi örneklerin doğrusal olmayan bir işlem sonucunda kırpılmalarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu benzetim eğrilerinden çıkarılan diğer önemli bir sonuç da, gerek BER ve gerekse MSE başarımlarındaki kazanımların hemen hemen tamamen 1. iterasyon sonucunda elde edildiğidir. 2. iterasyon BER başarımlarında çok küçük bir artış sağlarken, MSE başarımlarında sağlanan iyileşme ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu grafiklerden, kırpma gürültüsünün neden olduğu doğrusal olmayan bozucu etkilerin, teklif edilen algoritmayla en fazla iki iterasyon adımıda büyük ölçüde azaltıldığı önemli sonucuna varmaktayız. Benzer olarak, Şekil 3 ve 4'te teklif edilen iteratif kanal kestirim algoritmasının



Şekil 1: $B = 2\text{dB}$ için bit hata oranı(BER)

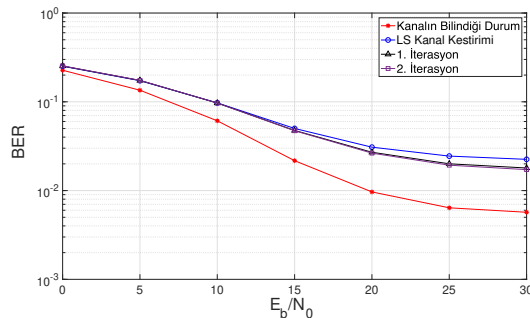


Şekil 2: $B = 2\text{dB}$ için kanalın ortalama karesel hata başa-rımı(MSE)

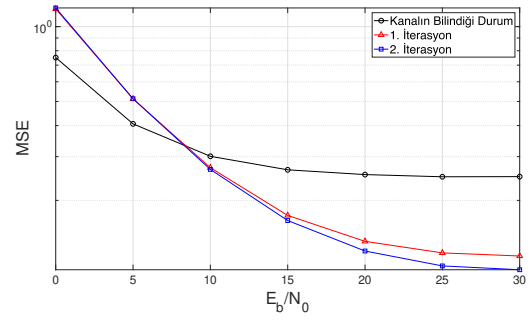
BER ve MSE başarımları kırpma gürültüsünün $B = 1\text{ dB}$ olması durumunda elde edilmiştir. Bu grafiklerden de bir önceki benzetim sonuçlarına benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir ve benzer sonuçlara varılmaktadır.

V. SONUÇLAR

Bu bildiriye DCO-OFDM-tabanlı VLC sistemleri için pilot düzenlemesine dayalı ve iteratif yapıda yeni bir kanal kestirim algoritması teklif edilmektedir. Teklif edilen algoritmanın, özellikle bu sistemlerde kaçınılmaz olarak ortaya çıkan, kırpma gürültüsünün etkisinin en aza indirilmesinde çok etkili olduğu yapılan ayrıntılı bilgisayar benzetimleriyle gösterilmektedir. Çalışmada, VLC kanalları üzerinden DCO-OFDM sistemleri için farklı kırpma gürültü düzeyleri için sistemin BER ve MSE başarımları bilgisayar benzetimleriyle incelenmiş, sistemin en büyük başarımına algoritmanın en fazla iki iterasyon sonucunda varıldığı görülmüştür. Ayrıca, sistemin düşük kırpma gürültüsü seviyelerinde küçük SNR değerleri için daha iyi BER



Şekil 3: $B = 1\text{dB}$ için bit hata oranı(BER)



Şekil 4: $B = 1\text{dB}$ için kanalın ortalama karesel hata başa-rımı(MSE)

başarımına sahip olduğu, ancak büyük SNR değerlerinde, daha büyük kırpma gürültüsü düzeylerinin net bir şekilde daha iyi BER başarımları gösterdiği sonucuna varılmıştır.

VI. BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1003 Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı No:218E034 kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Yesilkaya, "SISO-MIMO Applications and Analysis of Visible Light Communications Systems", Master's thesis, Kadir Has University, 2016. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [2] Jean Armstrong, "OFDM for Optical Communications," J. Lightwave Technol. 27, 189-204 (2009)
- [3] I. F.Miramirkhani, M. Uysal, "Channel modelling and characterization for visible light communications," IEEE Photon. J., vol. 7, no. 6, Dec.2015. F-81-F-85 vol.2.
- [4] R. Mesleh, H. Elgala and H. Haas, "Performance analysis of indoor OFDM optical wireless communication systems," 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, 2012, pp. 1005-1010.
- [5] S. D. Dissanayake and J. Armstrong, "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems," in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 7, pp. 1063-1072, April, 2013.
- [6] E.Panayirci, H.Dogan, O.Sayli, "Pilot Assisted Channel Estimation for Asymmetrically Clipped Optical OFDM over Visible Light Channels", in 2016 IEEE Int. Black Sea Conf. on Communications and Networking (BlackSeaCom), Sochi, Russia, 2016.
- [7] D. Kim and G. L. Stüber, "Clipping noise mitigation for OFDM by decision-aided reconstruction." IEEE Communications Letters 3 (1999): 4-6.
- [8] S.C. Schwartz, J. Zhang, D. Gu, "Iterative channel estimation for OFDM with clipping", The 5th Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 27-30 Oct. 2002.
- [9] S. D. Dissanayake and J. Armstrong, "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems," in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 7, pp. 1063-1072, April, 2013.
- [10] F. Miramirkhani, M. Uysal, and E. Panayirci. (2015). Novel channel models for visible light communications. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9387. 10.1117/12.2077565.
- [11] E. Sarbazi, M. Uysal, M. Abdallah and K. Qaraqe, "Indoor channel modelling and characterization for visible light communications," 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, 2014, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2014.6876576
- [12] J.-b. Wang, Y. Jiao, X.-y. Dang, M. Chen, X.-x. Xie, and L.-l. Cao, "Training sequence based channel estimation for indoor visible light communication system," Optoelectronics Letters, vol. 7, pp. 213-216, 2011.