

Görünür Işık Kanallarının Modellenmesi ve ACO-OFDM için Başarım Analizi

Modeling of Visible Light Channels and Performance Analysis of ACO-OFDM

Anil Yesilkaya*, Huseyin Fuat Alsan*, Farshad Miramirkhani†, Erdal Panayirci*, Habib Senol* ve Murat Uysal†

*Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: { anil.yesilkaya, huseyin.alsan, eepanay, hsenol }@khas.edu.tr

†Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Özyeğin Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: farshad.miramirkhani@ozu.edu.tr, murat.uysal@ozyegin.edu.tr

Özetçe — Geleneksel radyo haberleşmesinde, frekans spektrumunun doluluk oranlarındaki aşırı artışlar nedeniyle son zamanlarda elektriksel kablosuz haberleşme teknolojilerinde büyük sorunlar yaşanmaya başlanmıştır. Buna çözüm olarak bir alternatif de görünür ışıkla haberleşmedir. Geniş ve regüle edilmemiş bir frekans spektrumuna sahip görünür ışık bandında haberleşme konusu özellikle son yıllarda yoğun araştırma ve geliştirme çalışmalarına sahne olmaktadır. Bununla beraber, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda görünür ışık kanallarının modellenmesiyle ilgili yeterli düzeyde bir çalışma yoktur ve bu kanallar üzerinden çalışan haberleşme sistemlerinin başarımları sadece kanalda toplamsal Gauss gürültüsü varsayımı altında incelenebilmektedir. Bu çalışmada, Zemax yazılımı yardımıyla ilk kez kapalı alan görünür ışık kanallarının kanal dürtü yanıtları gerçekçi bir biçimde modellenmektedir. Daha sonra, bu modeller kullanılarak OFDM tabanlı asimetrik kırılmış optik sistemlerin başarımları incelenmekte ve elde edilen sonuçlar, sadece toplamsal Gauss gürültülü kanallarda varılan başarımlarla karşılaştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler— *Görünür Işıkla Haberleşme (GİH), Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM), Asimetrik Kırılmış Optik OFDM (ACO-OFDM), Kapalı Alan Kanal Modelleme*

Abstract— Spectrum scarcity of traditional radio communication has led communication engineers to find new alternatives. Indoor visible light communication is one alternative to solve this problem since its spectrum is not regulated and it has much wider bandwidth than traditional communication systems. This increased the research done in the field of visible light communications. However a proper indoor channel model is lacking and all previous studies assumes that only additive white Gaussian noise (AWGN) is present. Lack of proper channel model has motivated us to model a realistic indoor visible light channel. After modeling the indoor visible light channel, the performance of an asymmetrically clipped optical OFDM (ACO-OFDM) system which is suitable for optical communications is investigated and compared to that of the AWGN optical channels.

Keywords— *Visible Light Communication, OFDM, ACO-OFDM, Indoor Channel Modeling*

Bu çalışma COST-TUBITAK No. 113E307 kapsamında desteklenmektedir.

I. GİRİŞ

Dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM), optik güç verimliliği açısından alışlagelmiş modülasyon yöntemlerinden daha iyi sonuç vermesi nedeniyle, özellikle görünür ışıkla haberleşme sistemlerde yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır [1], [2]. Alışlagelmiş OFDM sistemlerde iletilen sinyaller genel olarak çift kutupludur ve karmaşık değerlidir. Ancak, ışık şiddeti (light intensity) negatif değer alamadığından çift kutuplu zaman sinyalleri Yoğunluklu Kiplenim / Doğrudan Sezim (Intensity Modulation / Direct Detection, IM/DD) tekniğine göre çalışan optik kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılamazlar. Diğer taraftan, asimetrik kırılmış optik OFDM (asymmetrically clipped optical OFDM) (ACO-OFDM), IM/DD OFDM sistemlerinin bir türüdür. ACO-OFDM’de çift kutuplu OFDM sinyalinin negatif kısmı kırılarak atılmakta ve sadece pozitif kısmı iletilmektedir. Bu nedenle söz konusu teknikte OFDM’in tek indisli alt taşıyıcıları bilgi taşırken, çift indisli alt taşıyıcıları sıfıra eşitlenmektedir. Bu nedenle de ACO-OFDM sistemlerin spektral verimliliği geleneksel OFDM sistemlerinden daha düşüktür.

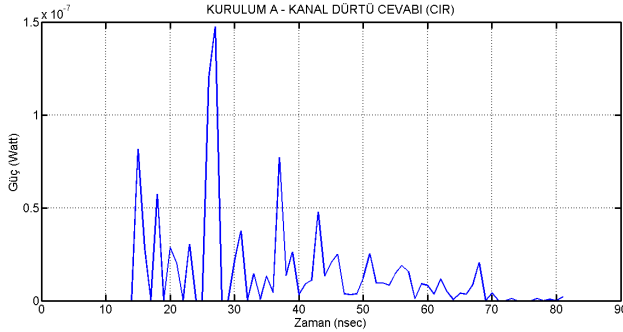
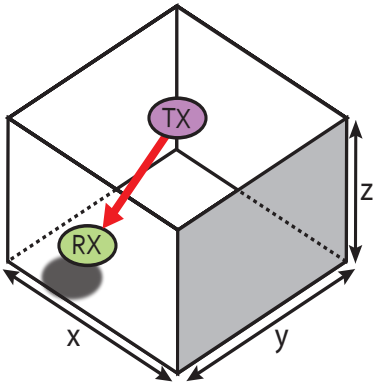
ACO-OFDM yapısının başarımları birçok çalışmada ele alınmıştır [3], [4]. Bu çalışmalarda, optik kablosuz haberleşme kanalı olarak tekil katsayılı düz kanal ile birlikte toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) kullanılmıştır. Bu bildiride hedeflenen ise, ACO-OFDM sistemlerin hata oranı başarımlarını daha gerçekçi bir kanal modeli ile incelemektir. Bu amaçla, çalışmamızda [5], [6] ışın izleme temeline dayanan bir optik tasarım yazılımı Zemax® [7] kullanılarak kapalı ortamlarda görünür ışık kanallarının modellenmesi gerçekleştirilmekte ve bu yaklaşımla elde edilen gerçekçi kanalların dürtü yanıtları kullanılarak bir ACO-OFDM sisteminin başarımları, kapalı ortamın boyutları, kapalı ortamda kullanılan malzemelerin türleri, alıcı ve vericilerin konumları ve özellikleri de göz önüne alınarak incelenmektedir. Bilgisayar benzetimleri yardımıyla sistemin bit hata başarımları (BER) elde edilmekte ve sistemin sadece toplamsal beyaz Gauss gürültüsü etkisi altında verdiği BER başarımlarıyla karşılaştırılmaktadır.

II. VLC KANAL DÜRTÜ YANITININ MODELLENMESİ

Bu çalışmada VLC kanallarının modellenmesi, ardışıl (sequential) ve ardışıl olmayan (non-sequential) ışın izleme yön-

temini kullanan Zemax[®] yazılımına dayanmaktadır [7]. Bu sayede, verilen kapalı bir alana yerleştirilmiş bir ışık kaynağı (LED) tarafından yayılan ışınların etkileşimi gözönüne alınarak duyarlı biçimde incelenebilmektedir. Ardışıl olmayan ışın izleme yönteminde, ışınlar bir nesneyle karşılaşana dek fiziksel olarak gerçekleştirilebilen bir yol boyunca izlenmektedir. Kanalin doğrudan görüş (Line-of-Sight, LOS) yanıtı, LOS uzaklığına bağlıdır. LOS bileşenlerine ek olarak tavan, duvarlar ve zemin ile çevredeki nesnelere yansıyan çok sayıda ışın bulunmaktadır. Önce Zemax[®] yazılımı ile kanal dürtü yanıtı belirlenmekte ve daha sonra bilgisayar benzetimleriyle bu kanal modelini kullanarak bir ACO-OFDM sistemi için BER başarımı sinyal-gürültü oranının fonksiyonu olarak belirlenmektedir.

Şekil 1 ve 2 'de A ve B ile gösterilen iki farklı kurulum için farklı konumlara yerleştirilmiş kaynak ve alıcılar görülmektedir.

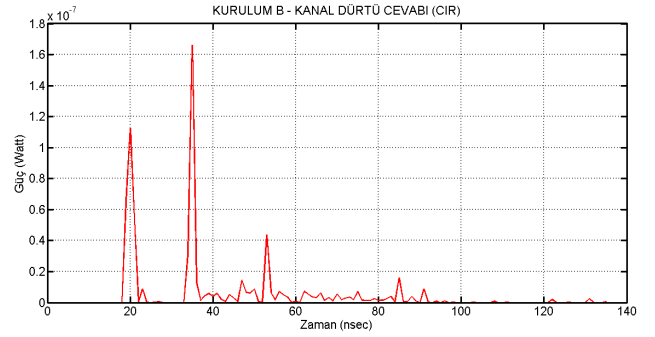
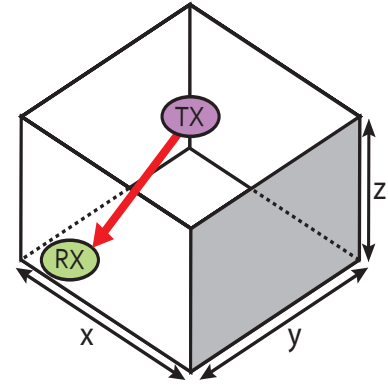


Şekil 1: Kurulum A Yapısı ve Kanal Dürtü Yanıtı

Genel olarak kanal dürtü yanıtı aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$h(t) = \sum_{i=1}^N P_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

Burada P_i ve τ_i , sırasıyla i . ışının gücünü ve yayılma süresini, δ Dirac delta fonksiyonu ve N alıcıda detektöre ulaşan ışın sayısını göstermektedir. Kanalın doğru akım (DC) kazancı (H_0), VLC kanalının en önemli özelliklerinden birisidir ve sabit verici gücü için erişilebilecek sinyal-gürültü oranının (SNR) düzeyini belirlemektedir. Kanal gecikme profili (channel delay profile) ağırlıklı olarak LOS bileşenlerden, daha düşük oranda doğrudan görüşü olmayan (non-line of sight (NLOS)) bileşenlerden oluşur. Güç gecikme profilinin (power-delay profile) dağılımı, ortalama kanal gecikmesi (mean-excess delay) (τ_0) ile kanalın efektif (root-mean-square) gecikme



Şekil 2: Kurulum B Yapısı ve Kanal Dürtü Yanıtı

yayılımı (τ_{RMS}) cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. [5], [6].

$$\int_0^{T_r} h(t) dt = 0.97 \int_0^{\infty} h(t) dt \quad (2)$$

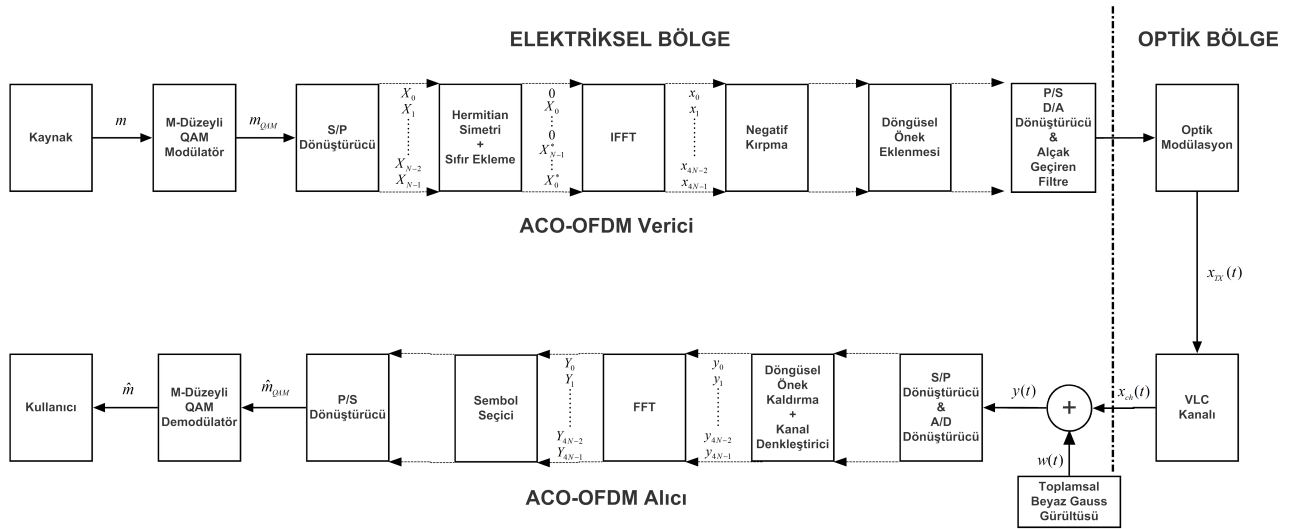
$$\tau_0 = \frac{\int_0^{\infty} t \times h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt}, \quad H_0 = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (3)$$

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (t - \tau_0)^2 h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt}} \quad (4)$$

Tablo 1. Kanal Parametreleri

Kurulum	Oda boyutu (m^3)	Verici Konumu (m)	Alıcı Konumu (m)	Yansıtıcılık
A	$5 \times 5 \times 3$	(0, 0, 3)	(1.7, 1.9, 0.7)	Duvar: 0.8 Tavan: 0.8 Zemin: 0.3
B	$7 \times 7 \times 3$	(0, 0, 3)	(3.3, 3.3, 0)	Duvar: Sıva Tavan: Sıva Zemin: Çam
	$T_{ir}(ns)$	$\tau_0(ns)$	$\tau_{RMS}(ns)$	H_0
A	67	34.43	14.50	$1.06e-6$
B	87	39.51	20.92	$6.97e-7$

Bildiride incelenen A ve B kurulumlarının özellikleri Tablo.1'de ele verilmektedir. Bu kurulumlar, $5m \times 5m \times 3m$ ile $7m \times 7m \times 3m$ boyutlu boş odaların farklı yansıtma değerlerine sahip olduğu durumları göstermektedir. Vericiler oda tavanlarının merkezinde konumlanmış (0, 0, 3) olup alıcılar ise zeminin köşesine farklı yüksekliklerde yerleştirilmiştir.



Şekil 3: ACO-OFDM Blok Şeması

III. ACO-OFDM TABANLI IM/DD OPTİK TELSİZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

ACO-OFDM

Giriş bölümünde de belirtildiği gibi, ACO-OFDM tekniğinde, yalnız tek indisli alt taşıyıcılar bilgi taşımaktadır. Çift indisli alt taşıyıcılar bilgi taşımadığından OFDM sinyalinin sadece pozitif kısmı kullanılmakta, negatif kısmı ise kırpıcı (hard clipper) tarafından atıldığı için iletimde kullanılmamaktadır. T_{sym} süreli bloklar halinde rastlantsal üretilen bitler, dörtlü ve onaltılı dik genlik modülasyonu (4-QAM / 16-QAM) modüle edilerek $T_s = T_{sym}/N$ süreli paralel bloklar halinde işlenmektedir. N toplam aktif taşıyıcı sayısı olup aynı zamanda ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) blok boyutuna eşittir. Frekans bölgesindeki modüle edilmiş sinyal, $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$ yapısında olup Hermisyen simetrik bir yapıya sahiptir ve bu yapı 0. (DC) ve $N/2$. indisli alt taşıyıcıları sıfıra eşitleyerek sağlanmaktadır [8], [9].

$$X[k] = \begin{cases} 0 & , k \text{ çift ise} \\ X_{N-k}^* & , k \text{ tek ise} \end{cases} \quad (5)$$

Burada *, sanal eşlenik simgesini göstermektedir. Bildiri boyunca, zaman bölgesi sinyalleri küçük harflerle ve frekans bölgesi sinyalleri de büyük harflerle gösterilecektir. Sonuç olarak, gerçel, çift kutuplu ve simetrik olmayan bir zaman-bölgesi, IFFT çıkış sinyali, $x = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T$ şeklindedir.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (6)$$

Burada N , IFFT boyutunu belirtmektedir. $X[k]$ ise k . alt taşıyıcı ile iletilen veri simgesini göstermektedir. Hermisyen simetri ve çift indisli alt taşıyıcılara sıfır eklemekten ötürü ACO-OFDM'de bilgi içeren sinyallerin sayısı $N/4$ kadardır. Ayrık zaman örneklerine, N_{CP} uzunluğunda bir önek (cyclic prefix, (CP)) eklenmiştir. Genel olarak N_{CP} uzunluğu en az kanalın en büyük gecikme yayılımına eşittir. Bilgisayar benzetim çalışmalarımızda $N_{CP} = N_{CP} \geq L_h$ olacak şekilde seçilmiştir. L_h , optik kanalın dürtü yanıtının uzunluğudur. Tek kutuplu ve gerçel bir sinyal üretmek için negatif kısımları kırılan sinyal aşağıda gösterilmiştir.

$$[x[n]]_c = \begin{cases} x[n] & , \text{eğer } x[n] \geq 0 \\ 0 & , \text{eğer } x[n] < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Kırpmanın ardından oluşan gürültü yalnız çift indisli alt taşıyıcılar üzerine düşmekte ve dolayısıyla tek indisli alt taşıyıcıları etkilememektedir. Bu nedenle, iletilen sinyale herhangi bir DC öngerilim uygulamak gerekmez. ACO-OFDM sistemi vericide harcanan güç açısından diğer optik OFDM tekniklerinden daha verimlidir [9]. Alt taşıyıcı sayısının yeterince büyük olduğu durumlarda ACO-OFDM sinyali Gauss dağılımı ile modellenilebilir. [10]. Bu sayede kırılan $[x[n]]_c$ sinyal yarım-Gauss dağılımına sahip olacaktır.

$$p_{x_c}(x) = 0.5 \delta(x) + \frac{u(x)}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}}$$

Burada σ_x , kırılmamış Gauss dağılımlı sinyalin standart sapmasını ve $u(\cdot)$ birim basamak fonksiyonunu göstermektedir. Kırılan sinyalin iletimde sahip olduğu ortalama güç ise

$$P_{opt,ACO} = E\{x_c\} = \int_{-\infty}^{\infty} x p_{x_c}(x) dx = \frac{\sigma_x}{\sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

biçiminde ifade edilebilir. Sayısal/Analog (D/A) dönüştürücü ve optik modülatör kusursuz kabul edilmiş ve optik-elektriksel bölge dönüşüm katsayısı ζ ile elektriksel-optik bölge dönüşüm katsayısı R , $\zeta = R = 1$ alınmıştır. Alıcıda sinyaller optik detektör ve Analog/Sayısal (A/D) dönüştürücü yardımıyla elektriksel sinyale geri dönüştürülür. Alıcıya ulaşan sinyal, yükseltilmiş/zayıflatılmış sinyalleri, simgelerarası girişimi ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsü içermektedir.

$$y(t) = x(t) * h(t) + w(t) \quad (9)$$

Burada $*$, doğrusal katlamayı (linear convolution) göstermektedir. $h(t) = [h(0), h(1), \dots, h(L_h - 1)]^T$ ise optik kanalın L yollu dürtü yanıtını, $w(t)$, alıcıdaki ısı ve optik gürültüsüne denk toplam elektriksel gürültüyü göstermektedir. Ortam gürültüsü DC olarak modellenip, uygun bir süzgeçle tamamen yok edilebilmektedir. Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ile modellenen $w(t)$ 'nin varyansı σ_w ile gösterilmiştir. Bu bildiride, kusursuz sıfıra-zorlayıcı (zero forcing, (ZF)) denkleştirici (equalizer) kullanılarak alınan işaretlerdeki

kanal etkisi giderilerek farklı sinyal-gürültü oranları için için BER başarımı elde edilmiştir. Alıcıda, fotodetektör ve A/D dönüştürücü çıkışında elde edilen sayısal örneklerinden önce örnek kaldırılmakta ve daha sonra sinyal $y(t)$ hızlı Fourier dönüşümüyle (fast Fourier transform, FFT) yenido frekans bölgesine döndürülmektedir. Burada son olarak ZF denkleştirici kullanılarak iletilen veri simgeleri yeniden elde edilmektedir.

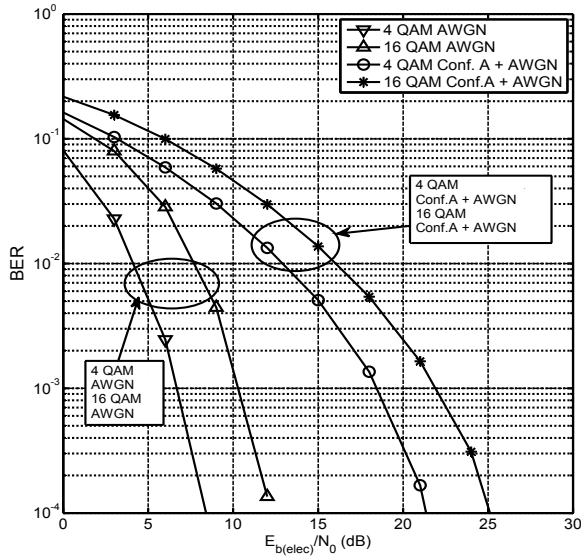
IV. BILGISAYAR BENZETİMLERİ VE SONUÇLARI

Bu bölümde Zemax® yazılımıyla elde edilen gerçekçi kanal modellerini kullanarak bir ACO-OFDM sistemini BER başarımı bilgisayar benzetimleriyle incelenmektedir. Benzetimlerde alt taşıyıcı sayısı 256 olarak ve N_{CP} de CIR uzunluğuna eşit uzunlukta seçilmiştir. ACO-OFDM sistemlerinde optik ve elektriksel güç arasındaki ilişki, $P_{opt,ACO} = \sqrt{P_{elec,ACO}/\pi}$ şeklinde gösterilebilir. Güç normalize edilecek olursa [11],

$$\frac{E_{b,opt,ACO}}{N_0} = \frac{1}{\pi} \frac{E_{b,elec,ACO}}{N_0}. \quad (10)$$

biçiminde ifade edilebilir. Şekil 4 ve 5'te A ve B kurulumları ACO-OFDM sisteminin benzetimi yapılmış ve BER ile $E_{b,elec}/N_0$ arasındaki ilişki grafiklerle verilmiştir. Bu grafiklerden görülebileceği gibi, gerçekçi kanal modelinin var olduğu durumda başarım eğrileri, tekil kanal ve toplamsal Gauss gürültülü kanal için bulunan BER başarım eğrilerine göre daha büyük hataya sahiptir. Buradan çıkan önemli bir sonuç, VLC sistemlerinin gerçekçi biçimde tasarlanması için sadece toplamsal Gauss gürültülerinin etkilerinin göz önüne alınmasının yeterli olamadığı ve muhakkak VLC kanalın dürtü yanıtının da hasaba katılmasının gerektiridir.

Konfigürasyon A

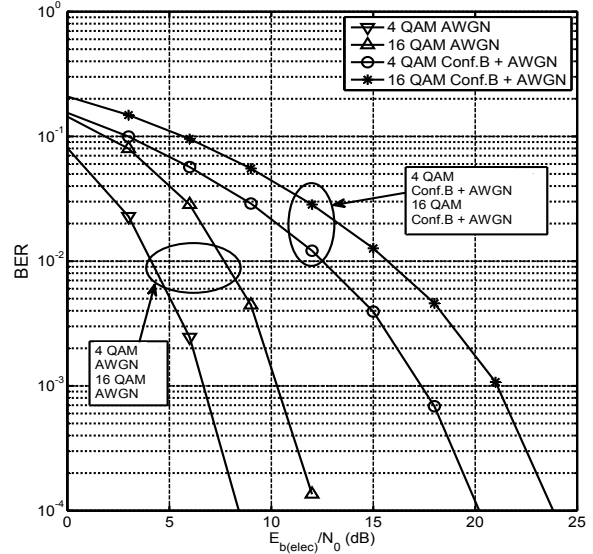


Şekil 4: Kurulum A'nın BER Performansı

V. SONUÇLAR

Bu bildiriye, önce Zemax® yazılımıyla kapalı ortamlarda VLC kanallarının modellenmesi yapılmaktadır. Daha sonra, seçilen iki ayrı kurulumda VLC için elde edilen gerçekçi kanal modelleri kullanılarak bir ACO-OFDM sisteminin BER

Konfigürasyon B



Şekil 5: Kurulum B'nin BER Performansı

başarımı incelenmekte ve elde edilen başarım sonuçları sistemin sadece ortamın toplamsal Gauss gürültüsü etkisi altındaki BER başarımıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kapalı alan optik kanal modellerinin kullanımı ile yalnız toplamsal Gauss gürültülü kanal kullanımı arasında BER başarımı açısından önemli farkların olduğu anlaşılmış olup gerçekçi ACO-OFDM sistem tasarımı için gerçekçi kanalın muhakkak dikkate alınması gerekliliği anlaşılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Armstrong, J., "OFDM for Optical Communications," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.27, no.3, pp.189,204, Feb.1, 2009
- [2] Elgala, H.; Mesleh, R.; Haas, H., "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *Communications Magazine, IEEE*, vol.49, no.9, pp.56,62, September 2011
- [3] Dissanayake, S.D.; Armstrong, J., "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.31, no.7, pp.1063,1072, April1, 2013
- [4] Ranjha, B.; Kavehrad, M., "Hybrid asymmetrically clipped OFDM-based IM/DD optical wireless system," *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol.6, no.4, pp.387,396, April 2014
- [5] Sarbazi, E.; Uysal, M.; Abdallah, M.; Qaraqe, K., "Indoor channel modelling and characterization for visible light communications," *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*, vol., no., pp.1,4, 6-10 July 2014
- [6] F. Miramirkhani, M. Uysal and Erdal Panayirci, "Novel channel models for visible light communications", *SPIE Photonics West, Broadband Access Communication Technologies IX*, February 2015.
- [7] Zemax 13 Release 2, Radiant Zemax LLC," www.radiantzemax.com/zemax.
- [8] Wilson, S.K.; Armstrong, J., "Transmitter and receiver methods for improving asymmetrically-clipped optical OFDM," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.8, no.9, pp.4561,4567, September 2009
- [9] J. Armstrong and A. Lowery, "Power Efficient Optical OFDM," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 370-372, Mar. 16, 2006.
- [10] Chen, Liang; Krongold, Brian; Evans, J., "Performance Analysis for Optical OFDM Transmission in Short-Range IM/DD Systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.30, no.7, pp.974,983, April1, 2012
- [11] Tsonev, D.; Sinanovic, S.; Haas, H., "Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless," *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th*, vol., no., pp.1,5, 6-9 May 2012