



A novel optical OFDM waveform design for visible light communication systems

Meryem Maraş^{1*}, Ali Özen²

¹Remay Metal and Plastic Industry Trade. A. Ş., 38040, Kayseri, Türkiye

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye

Highlights:

- Multipath optical channel modeling
- Optical OFDM waveforms
- Spread optical OFDM waveform design

Keywords:

- Spreading technique
- Optical channel models
- Optical OFDM waveform
- IM/DD
- s-Flip-OFDM waveform

Article Info:

Research Article

Received: 27.07.2022

Accepted: 05.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1149582

Correspondence:

Author: Meryem Maraş

e-mail:

mrymmas@gmail.com

phone: +90 554 323 3534

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a new spread-based optical OFDM waveform is proposed for IM/DD communication systems. The proposed waveform is a combination of the spreading technique and the Flip OFDM waveform. Simulation studies are carried out to evaluate the performance of the proposed s-Flip-OFDM waveform and compare it with optical OFDM waveforms such as Flip OFDM, DCO-OFDM and VLC-OFDM.

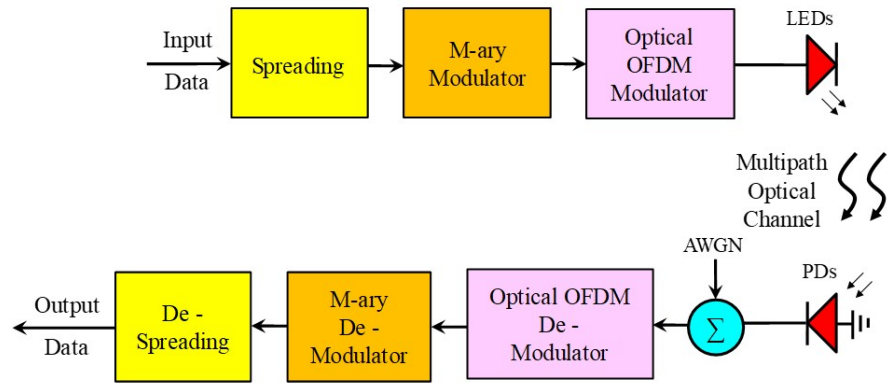


Figure A. The block diagram of the proposed spread optical OFDM waveform

Purpose: The aim of this study is to combine optical OFDM waveforms with the spreading technique previously used in RF systems. The use of the spreading technique in the Flip-OFDM waveform, one of the multi-carrier optical wireless communication schemes, and in other optical OFDM waveforms such as DCO-OFDM and VLC-OFDM is proposed this study for the first time in the literature.

Theory and Methods: The transmitter-receiver block diagram of the optical OFDM system using the proposed spreading method is shown in Figure A. In the transmitter side of the optical OFDM system shown in Figure A, randomly generated serial input data is subjected to propagation in the Spreading Block. The spreaded data is then modulated with BPSK modulation in the M-ary Modulator Block. The desired optical OFDM data packets are then generated in the Optical OFDM Modulator Block. In this study, Flip-OFDM waveform, one of the most important optical OFDM waveforms in the literature, is used. The generated flip OFDM data packets are transmitted via LEDs over a multipath fading optical channel and reach to the receiver after being corrupted by additive white Gaussian noise (AWGN). After the distorted signals reaching the receiver are restored with appropriate time domain or frequency domain equalizers, the reverse process is applied at the transmitter to obtain the signals decided at the output of the M-ary De-Modulator Block. Finally, the desired performance metrics such as BER and PAPR are calculated using the de-spreading data.

Results: When the obtained simulation results are analyzed, from the numerical results, it is observed that the spreading technique provides SNR gains in the range of 5 to 10 dB to the performance of optical OFDM waveforms. It is found that the proposed s-Flip-OFDM waveform is approximately 10 dB better than the s-DCO-OFDM waveform and 15 dB better than the s-VLC-OFDM waveform in AWGN channel environment and diffuse multipath optical channel environments.

Conclusion: In this article, significant gains were obtained in BER performances in all optical channel environments thanks to the proposed method. The hardware complexity of the proposed waveform is negligible compared to other waveforms. It can be concluded that the proposed s-Flip OFDM waveform may be one of the best waveform schemes for optical wireless communication systems for future 6G and beyond applications.



Görünür ışık haberleşme sistemleri için yeni bir optik OFDM dalga formu tasarımı

Meryem Maraş^{1*}, Ali Özen²

¹Remay Metal ve Plastik Sanayi Tic. A. Ş., 38040, Kayseri, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çok yönlü optik kanal modelleme
- Optik OFDM dalga formları
- Yayılı optik OFDM dalga formu tasarımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.07.2022

Kabul: 05.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1149582

Anahtar Kelimeler:

Yayma tekniği,
tavan sıçrama optik kanal
modeli,
dağınık çok yönlü optik
kanal,
optik OFDM dalga formu,
IM/DD,
s-Flip OFDM dalga formu

Ö Z

Bu çalışmada, yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (IM/DD) haberleşme sistemleri için yayma tabanlı yeni bir optik OFDM dalga formu önerilmektedir. Önerilen dalga formu yayma tekniği ile Flip OFDM dalga formunun birleşiminden oluşmaktadır (Spread Flip OFDM, s-Flip OFDM). Önerilen dalga formunun performansını değerlendirmek ve Flip OFDM, DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi optik OFDM dalga formları ile karşılaştırmak için benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Ayrıca sunulan çalışmada, önerilen yayma tekniğinin diğer optik OFDM dalga formlarına etkisi analiz edilmektedir. AWGN kanal, tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinin kullanıldığı dağınık optik kablosuz kanal ortamlarında, önerilen yayma tekniğinin optik OFDM dalga formlarının performansına 5 ila 10 dB SNR aralığında kazanç sağladığı anlaşılmaktadır. Elde edilen nümerik sonuçlardan hem AWGN kanal ortamında hem de dağınık çok yönlü optik kanal ortamlarında, önerilen s-Flip OFDM dalga formunun s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 10 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi olduğu görülmektedir.

A novel optical OFDM waveform design for visible light communication systems

H I G H L I G H T S

- Multipath optical channel modeling
- Optical OFDM waveforms
- Spread optical OFDM waveform design

Article Info

Research Article

Received: 27.07.2022

Accepted: 05.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1149582

Keywords:

Spread technique,
ceiling bounce optical
channel model,
diffused multipath optical
channel,
optical OFDM waveform,
IM/DD,
s-Flip OFDM waveform

ABSTRACT

In this study, a new spread-based optical OFDM waveform is proposed for intensity modulation/direct detection (IM/DD) communication systems. The proposed waveform is a combination of the spreading technique and the Flip OFDM waveform (Spread Flip OFDM, s-Flip OFDM). Simulation studies are carried out to evaluate the performance of the proposed waveform and compare it with optical OFDM waveforms such as Flip OFDM, DCO-OFDM and VLC-OFDM. In addition, the effect of the proposed spreading technique on other optical OFDM waveforms is analyzed in the presented study. It is understood that the proposed spreading technique provides a gain in the range of 5 to 10 dB SNR to the performance of optical OFDM waveforms in AWGN channel and diffused optical wireless channel environments, where ceiling bounce, exponential decay and exponential risen channel models are used. From the obtained numerical results, it is seen that the proposed s-Flip OFDM waveform is approximately 10 dB superior than the s-DCO-OFDM waveform and 15 dB superior than the s-VLC-OFDM waveform in both AWGN channel and diffused multipath optical channel environments.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *mrymmaras@gmail.com, aliozen@tarsus.edu.tr / Tel: +90 554 323 3534

1. Giriş (Introduction)

Gelişen teknolojilere ve kablosuz mobil iletişime atanan Radyo Frekans (RF) bantları hızla dolmaya devam ediyor. Dolayısıyla 6. Nesil (6G) için tanımlanacak frekans bantlarının ötesinde daha yüksek frekans bantlarında çalışmanın son derece imkansız hale gelebileceği anlaşılmaktadır. Bu soruna en alternatif çözüm görünür ışık iletişim (VLC) sistemleridir. Işık yayan diyot (LED) teknolojilerinin artan popüleritesi ile LED'leri kullanan VLC, geniş bant kablosuz iletişim alanında büyüleyici bir araştırma alanı haline geldi. Bazı şemalarda, radyo frekansı için ek bir çalışma alanı olması ve diğer çalışmalarda ayrılmaz bir rol alması beklenmektedir. VLC sistemleri, RF tabanlı iletişim şemalarına alternatif bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. VLC, görünür ışık bantındaki dalgaların duvarlardan ve yüzeylerden geçememesi nedeniyle radyo dalgalarında olduğu gibi geniş bir bağlantı ağı oluşturmasa da veri güvenliğinde güçlü bir avantaj sağlar. VLC, çok yüksek frekans bant genişliğine, iyi iletim kapasitesine, daha ucuz maliyete, elektromanyetik girişime karşı yüksek bağışıklığa ve daha geniş spektrum aralığına sahiptir [1, 2]. Bu sistemler görünür ışık spektrumunu kullanmayı amaçlar. Görünür ışık bantının (380-750 nm) haberleşme amaçlı kullanılması esasına dayanan bu sistemler, RF sistemlerindeki gibi karmaşık, sınırlı ve pahalı bir teknoloji olmaması ve aynı zamanda RF haberleşmesine de alternatif olması nedeniyle RF haberleşmesine bir alternatif oluşturmaktadır. VLC teknolojisi, vericideki LED'in yoğunluğunu veya rengini görünmez bir hızda değiştirerek ortam aydınlatmasını etkilemeden kablosuz iletişim sağlamayı amaçlar. RF iletişimi ile karşılaştırıldığında VLC, çevre dostu olma, zengin spektrum ve yüksek güvenlik gibi ciddi faydalar önermektedir. Gelecekteki geniş bant kablosuz iletişim için teşvik edici bir sistem olarak büyük ölçüde kabul görmüştür [3-5]. Sağlığa hiçbir etkisi olmayan VLC, radyo frekans spektrumuna göre çok daha geniş bir bantta, yüksek hızda, daha az enerji tüketimi ile veri iletebilmektedir. Ayrıca elektromanyetik radyasyondan ve radyo frekansı girişiminden etkilenmez. VLC'nin en önemli avantajlarından biri, ışık dalgaları yüzeylerden ve binalardan geçemediği için en iyi veri güvenliğini sağlamasıdır [6, 7].

Optik iletişimde pozitif ve gerçek sinyallerin kullanılması, bu sistemler için kullanılabilir olacak modülasyon şemalarını büyük ölçüde kısıtlar. Gerçek sinyaller üretmek için en yaygın teknik, mevcut bant genişliğinin yarısını kaybetme pahasına OFDM alt taşıyıcılarının Hermityen simetrisini korumaktır. Bu yöntem gerçek bir sinyal üretse de bu sinyal iki kutupludur ve iletimden önce tek kutuplu bir sinyale dönüştürülmelidir. İki kutuplu bir OFDM sinyalini tek kutuplu bir sinyale dönüştürmenin geleneksel şeması, bir DC ön-gerilim voltajı eklemektir. Bu, DC ön-gerilim katkılı OFDM (DCO-OFDM) olarak bilinir [8, 9]. Büyük DC ön-gerilim ilavesi, DCO OFDM'nin optik gücünü verimsiz hale getirir. Öte yandan, daha düşük DC ön-gerilim voltajının eklenmesi, büyük negatif zaman örneklerinin kırılmasına neden olur, bu da önemli taşıyıcılar arası girişime ve bant dışı optik güce neden olabilir [10].

[11]'da önerilen Asimetrik Olarak Kırılmış Optik OFDM (ACO-OFDM), DC ön-gerilim voltajı eklemeye ihtiyacı önleyebilir. ACO OFDM'de, yalnızca tek alt taşıyıcılar veri bitlerini taşır ve tüm negatif değerler göndericiden kırılır. ACO-OFDM, DCO-OFDM'ye optik güç verimli bir alternatif olarak önerildi. ACO-OFDM'de, yalnızca tek alt taşıyıcılar modüle edilir, bu da IFFT çıkışında simetrik olmayan bir zaman sembolü ile sonuçlanır [12]. IFFT çıkışındaki iki kutuplu sinyal daha sonra tüm negatif dizinin kırılmasıyla pozitif hale getirilir. Yalnızca anti-simetrik sinyalin pozitif parçası gönderildiğinden ve ek DC ön-gerilim gerekmediğinden, ACO-OFDM şeması yüksek optik güç verimliliği sunar. Ancak, ACO-OFDM şeması, DCO-OFDM'den spektral olarak daha az üretkendir,

çünkü kırılma gürültüsünden kaynaklanan bozulmaları önlemek için alt taşıyıcıların yarısı kapatılır.

[13]'te Wang vd. frekans bölgesi yayımlı ACO-OFDM tekniğini önerdi. Ayrıca, önerilen planın başarısını artırmak için etkili veri algılama ve kod kanalı tahsis planlarını geliştirmeyi amaçladı. [14]'te Wu vd. RF sistemlerinde çalışılan DFT yayımlı OFDM dalga biçimini ve serpiştirilmiş DFT yayımlı OFDM dalga biçimini VLC iletişim sistemlerine uyguladı.

[10]'da önerilen alternatif bir tek kutuplu OFDM şeması, Flip-OFDM şemasıdır. Flip-OFDM'de, pozitif ve negatif bölümler iki kutuplu OFDM gerçek zamanlı bölge sinyalinin çıkarılır ve iki sıralı OFDM çerçevesinde gönderilir. Negatif kısım iletimden önce mutlak değeri alınarak pozitive dönüştürüldüğü için her iki alt çerçevenin de pozitif örnekleri vardır [15]. Literatürde ACO-OFDM ve DCO-OFDM ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, Flip-OFDM'nin başarısı neredeyse hiç çalışılmamıştır.

Bu çalışmada, optik OFDM dalga formlarının daha önce RF sistemlerinde kullanılan ve referans [16]'dan esinlenen yayma tekniği ile birleştirilmesi amaçlanmıştır. Yayma tekniğinin çok taşıyıcılı optik kablosuz iletişim şemalarından biri olan Flip-OFDM dalga formunda ve DCO-OFDM ile VLC-OFDM gibi diğer optik OFDM dalga formlarında kullanılması literatürde ilk kez bu çalışma ile önerilmektedir. Literatürde optik OFDM şemalarının başarısını artırmak için farklı yayma teknikleri hakkında birkaç çalışma olmasına rağmen [13, 14], yazarların bildiği kadarıyla, önerilen yayma tekniğini Flip OFDM ve diğer optik OFDM dalga formları ile birleştirerek yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (IM/DD) haberleşme sistemlerinde inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Monte-Carlo simülasyon sonuçlarından, önerilen yayma yöntemi kullanılarak optik telsiz iletişim sistemlerinde hem Flip-OFDM dalga formunun performanslarında hem de diğer optik OFDM dalga formlarının performanslarında önemli gelişmeler elde edildiği görülmektedir.

Makalenin devamı şu şekilde planlanmıştır; Bölüm 2'de kullanılması önerilen yayma şemasının genel yapısı ayrıntılı olarak verilmiştir. Bölüm 3'te önerilen yayılı optik OFDM yapısı ve kullanılan optik kanal hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır. Son olarak, sayısal simülasyon sonuçları ve tartışmalar Bölüm 4 ve 5'te paylaşılmıştır.

2. VLC Sistemleri için Önerilen Yayma Tekniği (The Proposed Spread Technique for VLC Systems)

Önerilen yayma biriminin blok şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.

Şekil 1, yayılma faktörü F_s ile yayılma verilerinin üretimini göstermektedir [17]. Şekil 1'de gösterilen yayma ünitesinin girişine rastgele üretilen veri bitleri uygulanmaktadır. Her bir giriş biti, sembol hızında çalışan bir PN dizisi üreticinin F_s ardışıl çıkışları ile XOR'landığından, F_s sembol saatleri için tutulmalıdır. Setten yayılma faktörleri $F_s = 2^n$, $0 \leq n \leq n_{max}$ olarak yazılabilir. Burada, $n_{max} = 3$ (aşağı bağlantı için), 4 (yukarı bağlantı için) kullanılabilir [17]. Bu çalışmada n_{max} parametresi 3'e eşittir. XOR çıkışı, yayılmış bitler, istenen herhangi bir modülasyon tipine eşlenebilir.

Yayımla PN dizisi üretici, Şekil 2'de gösterilen doğrusal geri beslemeli kaydırılmalı kaydediciden (LFSR) oluşturulmalıdır. Bu LFSR için karakteristik polinom $1 + x^{21} + x^{22}$ ile verilebilir. PN dizisi üretici, referans [17]'deki Tablo 184'te listelenen değerlerden biriyle bir yayma birimi tahsisinin başlangıcında önceden ayarlanabilir. Yayma için paket profili ayarı, belirlenecek değeri seçmek için kullanılır.

Seed 0 varsayılan ayardır. Seed 0 dışındaki herhangi bir değerin seçimi, yayma parametreleri için paket profili kodlamasının kullanılmasını gerektirir.

Yayıncının çıkışında alınan sinyal, Şekil 1’den görülebileceği gibi, X_{spread} , aşağıdaki Eş. 1’deki gibi verilebilir.

$$X_{spread}(k * F_s + i) = \sum_{i=0}^{F_s} PN_{spread}(k * F_s + i) \oplus X(k) \quad (1)$$

Burada, PN_{spread} , yayılan PN dizi üreticinin çıktısıdır, X , rastgele data üreticinin çıkışıdır, F_s yayılma faktörüdür, \oplus mantıksal XOR operatörüdür ve k , zaman indeksidir. Ters-Yayıncı çıkışında alınan sinyal, $Y_{de-spread}$ aşağıdaki Eş. 2’deki gibi verilebilir:

$$Y_{de-spread}(k) = \sum_{i=0}^{F_s} PN_{spread}(k * F_s + i) \oplus xu(k * F_s + i) \quad (2)$$

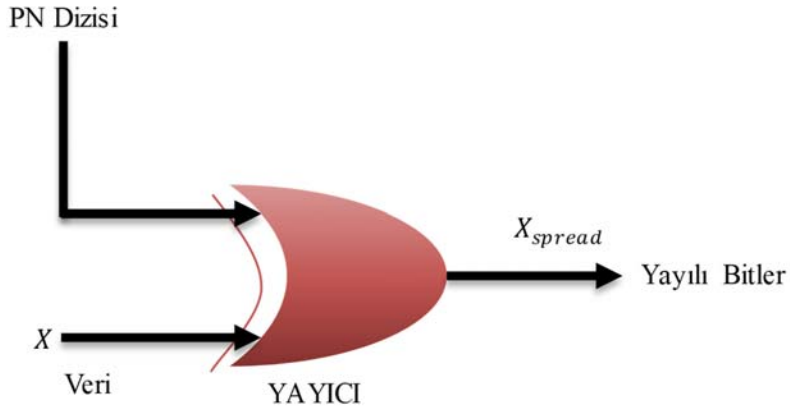
Burada, xu de-modüle edilen sinyali göstermektedir.

Yayılcı bloğunun çıkışı işaret yıldız diyagramındaki kümelerden herhangi birisine eşlenerek istenilen modülasyon kullanılabilir.

3. Önerilen Yayılı Optik OFDM Dalga Formu (The Proposed Spread Optical OFDM Waveform)

Önerilen yayma yöntemini kullanan optik OFDM sisteminin verici alıcı blok diyagramı Şekil 3’te gösterilmektedir [18].

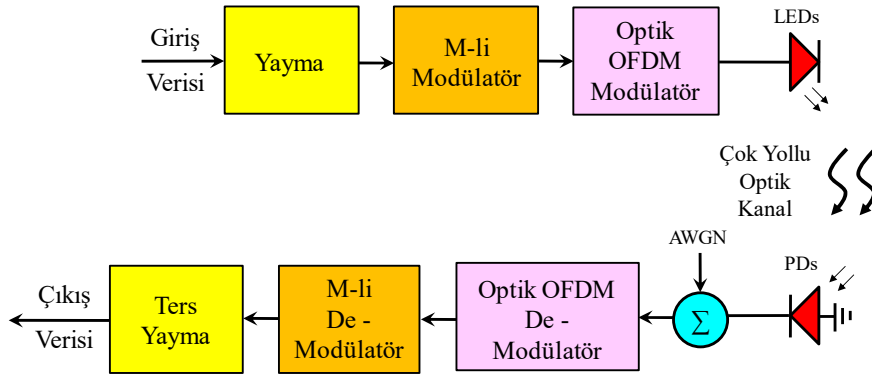
Şekil 3’te verilen optik OFDM sisteminin verici tarafında rastgele üretilen seri giriş dataları bir önceki bölümde ayrıntılı bir şekilde



Şekil 1. Yayma işlem birimi (The unit of the spreading process)



Şekil 2. Yayma PN dizisi üreticinin blok şeması (The block scheme of the spreading PN sequence generator)



Şekil 3. Önerilen yayılı optik OFDM dalga formunun blok diyagramı (The block diagram of the proposed spread optical OFDM waveform) [18].

açıklandığı gibi Yayma Bloğunda yayılmaya tabi tutulur. Ardından yayılan veriler M-li Modülatör Bloğunda BPSK modülasyonu ile modüle edilir. Daha sonra Optik OFDM Modülatör Bloğunda istenen optik OFDM veri paketleri üretilir. Bu çalışmada, literatürdeki en önemli optik OFDM yöntemlerinden Flip-OFDM şeması kullanılmaktadır.

Flip-OFDM şemasında, modüle edilen bilgi bitleri IFFT bloğu çıkışında gerçel sayılar elde edilmesi için Hermityen simetri işlemine tabi tutulur. Hermityen simetri oluşturulabilmesi için modüle edilen dataların 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 Hermityen simetrik bir yapıya sahiptir ve bu yapı 0 (DC) ve $N/2$ indisli alt taşıyıcıların sifıra eşitlenmesiyle sağlanmaktadır. Tipik bir Hermityen simetrik yapısının frekans bölgesindeki eşdeğeri Eş. 3'teki gibi verilebilir:

$$X[k] = \begin{cases} 0, & \text{if } k = 0 \\ X[k], & \text{if } k = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2}\right) - 1 \\ X^*[N - k], & \text{if } k = \left(\frac{N}{2}\right) + 1, \left(\frac{N}{2}\right) + 2, \dots, N \\ 0, & \text{if } k = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Burada (*), karmaşık eşlenik işlemi göstermektedir. Ardından IFFT bloğu çıkışında zaman bölgesinde aşağıdaki Eş. 4'te verildiği gibi çift kutuplu sinyal elde edilir.

$$x(k) = x^+(k) + x^-(k) \quad (4)$$

Burada, $x^+(k)$ sinyalin pozitif kısmını ve $x^-(k)$ da negatif kısmını göstermektedir. Buradan tek kutuplu sinyali elde etmek için aşağıdaki Eş. 5 ve Eş. 6'da gösterildiği gibi sinyalin pozitif ve negatif kısmı ayrıştırılır.

$$x^+(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) \geq 0 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

$$x^-(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) < 0 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

Flip-OFDM şemasında, gerçek zamanlı iki kutuplu sinyalin ayrışması bir Polarite Ayırıcı kullanılarak yapılır. Negatif kısım $x^-(k)$ 'nin polaritesi tersine çevrilmiş sinyali elde etmek için bir polarite invertörü kullanılır, yani mutlak değeri alınır, $-x^-(k)$. Pozitif kısım $x^+(k)$ ve polaritesi ters çevrilmiş negatif kısım $-x^-(k)$ birbirini takip eden iki Flip-OFDM çerçevesi üzerinden ayrı ayrı iletilir. Pozitif sinyal Flip-OFDM'nin birinci alt çerçevesinde (pozitif alt çerçeve) iletilir ve polarite ters çevrilmiş negatif sinyal Flip-OFDM'in ikinci alt çerçevesinde (negatif alt çerçeve) iletilir. Her bir Flip-OFDM alt çerçevesine periyodik önek (CP) eklenerek zaman bölmeli çoğullama yapıp Flip-OFDM veri paketleri elde edilir. Üretilen Flip-OFDM veri paketleri LED'ler vasıtasıyla çok yollu sönümlenmeli optik kanal üzerinden iletilip toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) ile bozulduktan sonra alıcıya ulaşır. Alıcıya ulaşan bozulmuş sinyaller uygun zaman bölgesi ya da frekans bölgesi denkleştiricileri ile onarıldıktan sonra verici kısmında yapılan işlemlerin tersi uygulanarak M-li De-Modülatör Bloğu çıkışında karar verilen sinyaller elde edilir. Son olarak ters-yayma işlemine tabi tutulan verilerden yararlanarak BER ve PAPR gibi istenen performans ölçütleri hesaplanır.

3.1. Optik Kanal Modelleri (Optical Channel Models)

Bu çalışmada, dağınık (diffused) optik kablosuz kanalın dürtü yanıtını (CIR) modellemek için tavan sıçrama (ceiling bounce), üstel azalan

(exponential decay) ve üstel artan (exponential risen) kanal modelleri kullanılmaktadır.

İç mekan optik kablosuz kanalının dürtü yanıtı, bağımsız bir LOS bağlantısı, dağınık bağlantı veya bağlantı konfigürasyonuna bağlı olarak LOS ve dağınık bağlantı kombinasyonu olarak modellenebilir. Dirac Delta fonksiyonları, $\delta(t)$, LOS bağlantılarının CIR'sini modellemek için temel fonksiyon olarak kullanılırken, yansıyan optik sinyal dağınık bir yapıya sahip olduğundan, birim basamak fonksiyonları dağınık bağlantıları modellemek için kullanılır. LOS bağlantısının CIR'si, $h_{LOS}(t)$, aşağıdaki Eş. 7'deki gibi modellenebilir [19].

$$h_{LOS}(t) = g_{LOS}\delta(t) \quad (7)$$

Burada, g_{LOS} , yönlendirilmiş LOS bağlantısının optik yol kazancıdır.

Dağınık bağlantı için, dağınık bağlantının CIR'sinin ortak etkisi olan $h'_{dif}(t)$, $h_{dif}(t)$ ve dağınık bağlantı optik yol kazancı, g_{dif} , aşağıdaki Eş. 8'deki gibi yazılabilir [19].

$$h'_{dif}(t) = g_{dif}h_{dif}(t) \quad (8)$$

Üstel azalan ve tavan sıçrama modelleri, iyi bir doğrulukla dağınık bağlantıların CIR'sini modellemek için iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan iki tekniktir [19]. Üstel bozulma modeli, iletilen optik dalgalar alıcıya ulaşmadan önce birden fazla yansıma yaşadığında en uygundur. Bu nedenle, $h_{exp_dec}(t)$, üstel bozulma modelinden dağınık bağlantının CIR'si aşağıdaki Eş. 9'daki gibi yazılabilir [10, 19-21].

$$h_{exp_dec}(t) = H(0) \frac{1}{D_{RMS}} e^{\frac{-t}{D_{RMS}}} u(t) \quad (9)$$

Burada, $H(0)$, D_{RMS} , ve $u(t)$ sırasıyla DC optik yol kazancı, kanalın RMS gecikmesi ve birim basamak fonksiyonudur. Tavandan yansıma modeli, alınan optik dalgaların çoğu tek yansıma yaşadığında daha doğrudur. Bu nedenle, $h(t)$, tavan sıçrama modelinden dağınık bağlantının CIR'si Eş. 10'daki gibi yazılabilir [10, 19-21].

$$h(t) = H(0) \frac{6a^6}{(t+a)^7} u(t) \quad (10)$$

Burada, $a = 12(\sqrt{11/13})D_{RMS}$ olarak alınır.

Yansıyan optik sinyallerin optik yol kaybını açıklayan Eş. 10'daki optik yol kazancı $H(0)$ aşağıdaki Eş. 11'deki gibi yazılabilir [19].

$$H(0) \approx \int_0^\infty |h(t)| dt \quad (11)$$

Eş. 8'deki $h_{dif}(t)$ terimi, sırasıyla üstel azalma $\frac{-t}{D_{RMS}}$ terimi ve tavan sıçrama $\frac{6a^6}{(t+a)^7}$ terimi modellerine eşdeğerdir ve bu modeller için geçerlidir. Eş. 8'deki g_{dif} terimi aynı zamanda hem tavan sıçraması hem de üstel azalma modelleri için $H(0)$ terimine eşdeğerdir. Hem LOS hem de dağınık bileşenlere sahip yönlendirilmemiş LOS (N-LOS) bağlantı konfigürasyonu durumunda, CIR, $h_{N-LOS}(t)$, aşağıdaki Eş. 12'deki gibi verilebilir:

$$h_{N-LOS}(t) = h_{LOS}(t) + h'_{dif}(t) = g_{LOS}\delta(t) + g_{dif}h_{dif}(t - \Delta T) \quad (12)$$

Üstel artan optik kanal modeli ise Eş. 13'teki gibi yazılabilir.

$$h_{\text{exp_risen}}(t) = H(0) \frac{1}{D_{RMS}} e^{t/D_{RMS}} u(t) \quad (13)$$

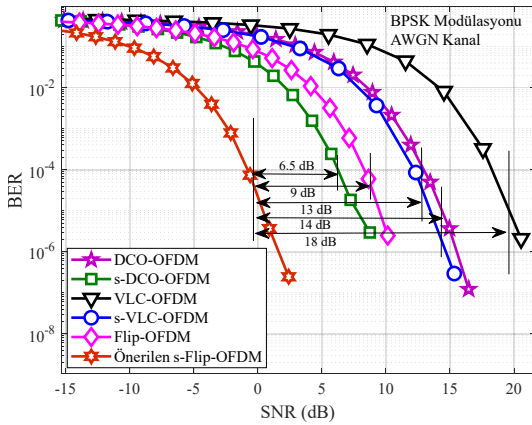
4. Sayısal Sonuçlar ve Değerlendirmeler (Numerical Results and Evaluations)

Sayısal sonuçların elde edilmesi iki bölüm halinde yapılmaktadır. Birinci bölümde AWGN kanal sayısal benzetimleri ve ikinci bölümde tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinin kullanıldığı 5 dallı dağınk çok yollu optik kanal sayısal benzetimleri sunulmuştur. Tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinde $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ ve $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için benzetimler yapılmıştır. Tüm simülasyonlarda BPSK modülasyonunun kullanıldığı DCO-OFDM, Flip-OFDM ve VLC-OFDM sistemleri karşılaştırılmaktadır. DCO-OFDM ve Flip OFDM sistemlerinde 63 alt taşıyıcı ve 128 noktalı FFT kullanılmaktadır. VLC-OFDM sisteminde ise 64 noktalı FFT kullanılmaktadır. Ayrıca, DCO-OFDM şemasında 7 dB'lik DC ön-gerilim ekleme kullanılmaktadır.

4.1. AWGN Kanal Sayısal Sonuçları (Numerical Results of AWGN Channel)

Paylaşılan sayısal sonuçların ilk aşamasında, VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga formlarının AWGN kanal ortamında BER-SNR performansları karşılaştırılmaktadır. Nümerik sonuçlar 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden ilgili haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi ile BPSK modülasyonu kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 4'te VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga formlarının AWGN kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 4. AWGN kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga formlarının BER-SNR başarımlarının karşılaştırması (BER-SNR accomplishment confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the proposed s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in AWGN channel environment)

AWGN kanal ortamında BER-SNR nümerik sonuçlarının verildiği Şekil 4 analiz edildiğinde, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen yöntemin bütün dalga formlarına 5 dB ile 9 dB arasında SNR kazancı sağladığı anlaşılmaktadır. Bu kazanç, önerilen yayma tekniğinin daha fazla spektrum kullanmasıyla açıklanabilir. Ancak, elde edilen bu kazançlara karşılık spektral verimlilikten ödün verilebilir. Önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın diğer dalga formları ile elde edilen performansları gerilerde bıraktığı

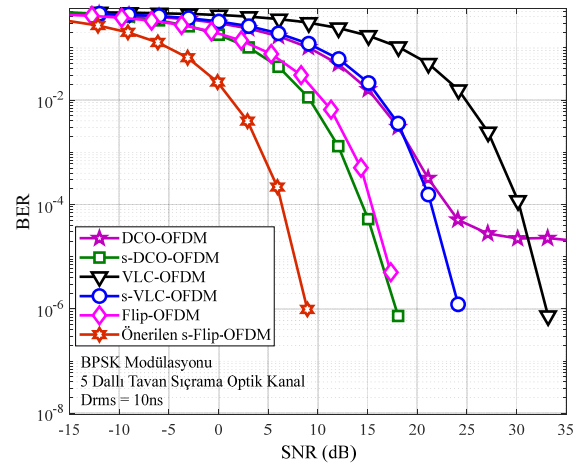
anlaşılmaktadır. Ayrıca, önerilen dalga formu ile $1E-4$ BER değeri için VLC-OFDM'den yaklaşık olarak 18 dB, s-VLC-OFDM'den 13 dB, 7 dB'lik DC ön-gerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM'den 14 dB, s-DCO-OFDM'den 6.5 dB ve Flip OFDM'den de 9 dB daha iyi olduğu görülmektedir.

4.2. Dağınk Çok Yollu Optik Kanal Sayısal Sonuçları (Numerical Results of Diffused Multipath Optical Channel)

Paylaşılan sayısal sonuçların ikinci evresinde, 3. Bölümde ayrıntılı bir şekilde verilen tavan sıçrama, üstel azalan ve üstel artan kanal modellerinin kullanıldığı dağınk çok yollu optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ve önerilen s-Flip OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga formlarının BER-SNR performansları karşılaştırılmaktadır. Nümerik sonuçlar 1000 Monte Carlo döngüsü üzerinden ilgili haberleşme sistemlerinin 1000 veri paketi ile BPSK modülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen tüm haberleşme sistemlerinde, 5 dallı dağınk optik kablosuz kanalı denkleştirmek için frekans bölgesi denkleştirici (FDE) kullanılmaktadır.

4.2.1. Tavan sıçrama dağınk çok yollu optik kanal sayısal sonuçları (Numerical results of ceiling bounce diffused multipath optical channel)

Şekil 5'te VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga formlarının tavan sıçrama kanal modelinde $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ olarak alındığı 5 dallı dağınk optik kablosuz kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmektedir.

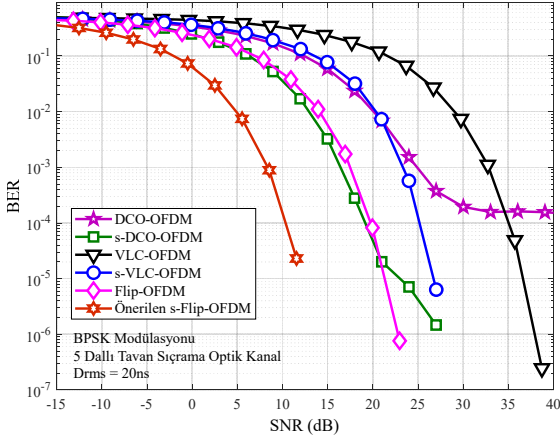


Şekil 5. $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için 5 dallı tavan sıçrama dağınk optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga formlarının BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması (BER-SNR accomplishment confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the proposed s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in 5 taps ceiling bounce diffused optical wireless channel environment for $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$)

Şekil 5 karşılaştırıldığında, çok yollu dağınk optik kanal ortamında $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 8 dB, VLC-OFDM dalga formundan 23 dB, s-VLC-OFDM dalga formundan 14 dB, 7 dB'lik DC ön-gerilim eklemenin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundan 15 dB, s-DCO-OFDM dalga formundan da 7.5 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemin DCO-OFDM dalga formundaki hata tabanını

ortadan kaldırdığı gözlerden kaçmamaktadır. Önerilen yayma tekniği ile optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 5 ila 8 dB arasında SNR kazancı sağlandığı gözlenmektedir.

Şekil 6'da, bu çalışmada kullanılan optik OFDM dalga formlarının tavan sıçrama kanal modelinde $D_{RMS} = 20 ns$ olarak alındığı 5 dallı dağıntık optik kablosuz kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 6. $D_{RMS} = 20 ns$ için 5 dallı tavan sıçrama dağıntık optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması (BER-SNR accomplishment confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the proposed s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in 5 taps ceiling bounce diffused optical wireless channel environment for $D_{RMS} = 20 ns$)

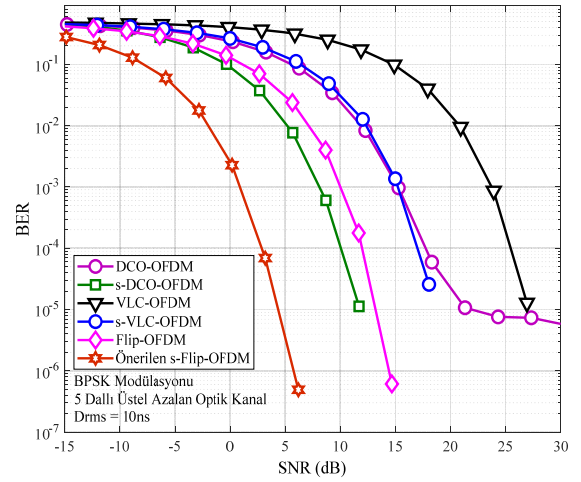
$D_{RMS} = 20 ns$ olarak alınan 5 dallı dağıntık optik kanal ortamında BER-SNR performanslarının verildiği Şekil 6 incelendiğinde, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 10 dB ve VLC-OFDM dalga formundan 25 dB daha iyi olduğu görülmektedir. 7 dB'lik DC ön-gerilim eklemenin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formunun ise 30 dB SNR değerinden sonra $3E-4$ hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan anlaşılmaktadır. Önerilen yayma tekniğinin diğer sonuçlara benzer şekilde tüm optik OFDM dalga formlarının performansını iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Ancak dağıntık optik kanalın bu çalışmada kullanılan optik OFDM dalga formlarının performansları üzerine olumsuz etkileri sonuçlardan görülmektedir. Önerilen yayma tekniği optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 9 ila 10 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 9 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.

4.2.2. Üstel azalan dağıntık çok yollu optik kanal sayısal sonuçları (Numerical results of exponential decay diffused multipath optical channel)

Bu çalışmada değerlendirilen optik OFDM dalga formlarının üstel azalan kanal modelinde $D_{RMS} = 10 ns$ olarak alındığı 5 dallı dağıntık optik kablosuz kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması Şekil 7'de verilmektedir.

Benzetimlerde kullanılan optik OFDM dalga formlarının BER-SNR performanslarının gösterildiği Şekil 7 karşılaştırıldığında, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 10 dB,

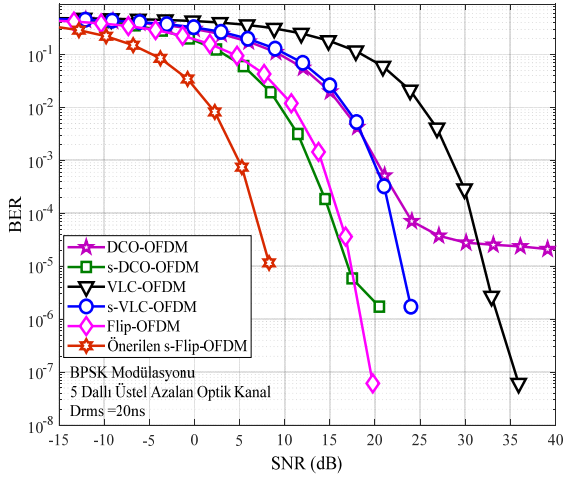
VLC-OFDM dalga formundan 22 dB ve 7 dB'lik DC ön-gerilim eklemenin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, DCO-OFDM dalga formunun 25 dB SNR değerinden sonra hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan gözlenmektedir. Performanslar irdelendiğinde, önceki sonuçlara benzer şekilde önerilen yayma tekniğinin tüm optik OFDM dalga formlarının performanslarına katkı sağladığı tespit edilmektedir. Özellikle, 7 dB'lik DC ön-gerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundaki hata tabanını ortadan kaldırması son derece önemlidir. Önerilen yayma tekniği optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 8 ila 10 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 7 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 14 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.



Şekil 7. $D_{RMS} = 10 ns$ için 5 dallı üstel azalan dağıntık optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması (BER-SNR accomplishment confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the proposed s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in 5 taps exponential decay diffused optical wireless channel environment for $D_{RMS} = 10 ns$)

Şekil 8'de, simülasyonlarda değerlendirilen optik OFDM dalga formlarının üstel azalan kanal modelinde $D_{RMS} = 20 ns$ olarak alındığı 5 dallı dağıntık optik kablosuz kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması sunulmaktadır.

Çok yollu üstel azalan dağıntık optik kanalda BER-SNR performanslarının verildiği Şekil 8 değerlendirildiğinde, $1E-4$ BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 9 dB, VLC-OFDM dalga formundan 23 dB ve 7 dB'lik DC ön-gerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundan da 16 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, DCO-OFDM dalga formunun 30 dB SNR değerinden sonra hata tabanına yakınsadığı sonuçlardan gözlenmektedir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen tekniğin özellikle 7 dB'lik DC ön-gerilim değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundaki hata tabanını ortadan kaldırması, yapılan çalışmanın katkısını açıkça ortaya koymaktadır. Önerilen yayma tekniği optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 8 ila 10 dB arasında SNR kazancı sağlamaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun $1E-4$ BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 8 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir.



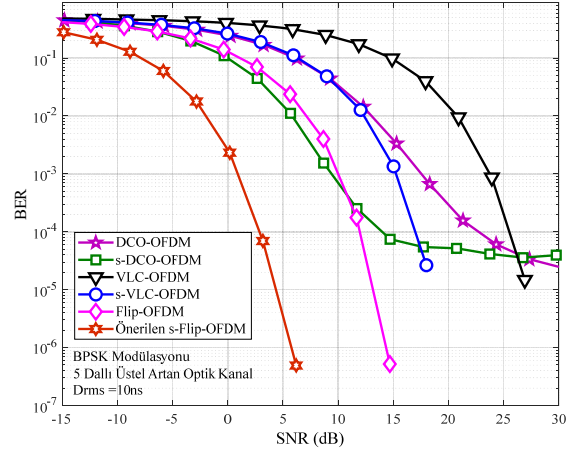
Şekil 8. $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için 5 dallı üstel azalan dağılık optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması (BER-SNR accomplishment confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the proposed s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in 5 taps exponential decay diffused optical wireless channel environment for $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$)

4.2.3. Üstel artan dağılık çok yollu optik kanal sayısal sonuçları (Numerical results of exponential risen diffused multipath optical channel)

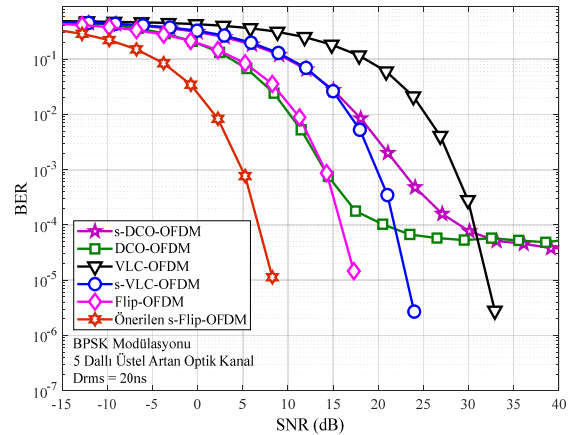
Benzetimlerde değerlendirilen optik OFDM dalga formlarının üstel artan kanal modelinde $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ olarak alındığı 5 dallı dağılık optik kablosuz kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması Şekil 9'da verilmektedir.

Şekil 9 irdelendiğinde, önceki başarımlara benzer sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır. 10^{-4} BER seviyesi için önerilen s-Flip OFDM dalga formu ile elde edilen performansın Flip OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 9 dB, VLC-OFDM dalga formundan 22 dB ve 7 dB'lik DC-bias değerinin kullanıldığı DCO-OFDM dalga formundan da 20 dB daha iyi olduğu gözlenmektedir. Önceki sonuçlara benzer şekilde önerilen yayma tekniğinin optik OFDM dalga formlarına yaklaşık olarak 8 ila 9 dB arasında SNR kazancı sağladığı görülmektedir. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun 10^{-4} BER seviyesinde s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 11 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 14 dB daha iyi olduğu tespit edilmektedir.

Şekil 10'da, simülasyonlarda kullanılan optik OFDM dalga formlarının üstel artan kanal modelinde $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ olarak alındığı 5 dallı dağılık optik kablosuz kanal ortamında elde edilen BER-SNR performanslarının karşılaştırılması sunulmaktadır.



Şekil 9. $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$ için 5 dallı üstel artan dağılık optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması (BER-SNR achievement confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the recommended s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in 5 taps exponential risen diffused optical wireless channel environment for $D_{RMS} = 10 \text{ ns}$)



Şekil 10. $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$ için 5 dallı üstel artan dağılık optik kablosuz kanal ortamında VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM ile önerilen s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM ve s-VLC-OFDM dalga biçimlerinin BER-SNR başarımlarının karşılaştırılması (BER-SNR achievement confrontation of VLC-OFDM, DCO-OFDM, Flip OFDM and the recommended s-Flip-OFDM, s-DCO-OFDM, s-VLC-OFDM waveforms in 5 taps exponential risen diffused optical wireless channel environment for $D_{RMS} = 20 \text{ ns}$)

Tablo 1. D_{RMS} kanal gecikme yayılmasının O-OFDM dalga formlarının BER performansları üzerine etkileri
(Effects of D_{RMS} channel delay spread on the BER performances of O-OFDM waveforms).

SNR (dB)	VLC-OFDM		s-VLC-OFDM		DCO-OFDM		s-DCO-OFDM		Flip-OFDM		s-Flip-OFDM	
	$D_{RMS} = 10 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 20 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 10 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 20 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 10 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 20 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 10 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 20 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 10 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 20 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 10 \text{ ns}$	$D_{RMS} = 20 \text{ ns}$
5	0.372055	0.394252	0.213803	0.274877	0.223468	0.274579	0.089871	0.164763	0.081352	0.140042	0.000561	0.009445
10	0.285261	0.325611	0.099701	0.169409	0.111519	0.176256	0.014471	0.058858	0.013756	0.050506	0.00	0.000189
15	0.174495	0.230648	0.021573	0.075223	0.028305	0.080316	0.000231	0.007426	0.000226	0.005984	0.00	0.00
20	0.068531	0.131049	0.000581	0.012149	0.001664	0.017778	0.00	0.000127	0.00	0.000072	0.00	0.00
25	0.009826	0.046409	0.00	0.000145	0.000093	0.001618	0.00	0.000007	0.00	0.000001	0.00	0.00
30	0.000125	0.005931	0.00	0.00	0.000056	0.000316	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

BER-SNR performanslarının değerlendirildiği Şekil 10 incelendiğinde, önceki sonuçlara benzer şekilde önerilen yayma tekniğinin tüm optik OFDM dalga formlarının performanslarına katkı sağladığı ve benzer kazançların elde edildiği anlaşılmaktadır.

Tavan sıçrama dağılık çok yollu kablosuz optik kanalda kanal gecikme yayılması D_{RMS} değerinin bu çalışmada incelenen O-OFDM dalga formlarının BER performansları üzerine etkilerinin analizi Tablo 1’de verilmektedir.

Tavan sıçrama dağılık çok yollu kablosuz optik kanal ortamında farklı D_{RMS} değerlerinin kullanıldığı O-OFDM dalga formlarının BER performanslarının verildiği Tablo 1 incelendiğinde, D_{RMS} değerinin $10ns$ ’den $20ns$ ’ye yükseltilmesinin O-OFDM dalga formlarının BER performanslarını zayıflattığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi, kanalın gecikme yayılması $D_{RMS} = 20ns$ olduğunda O-OFDM dalga formlarına eklenen CP sürelerinin yetersiz kalması ile açıklanabilir. Çünkü ister RF ister VLC haberleşme sistemlerinde, OFDM dalga formlarına eklenecek CP sürelerinin kanalın gecikme yayılmasından büyük olacak şekilde seçilmesi gerekir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, optik telsiz iletişim sistemlerinin en önemli dalga formlarından Flip OFDM dalga formunun performansını arttırmak için yayma tekniği ile Flip OFDM dalga formunun birleştirilmesi önerilmektedir. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun performansını test etmek ve Flip OFDM, DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi optik OFDM dalga formları ile kıyaslamak için benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Ayrıca, önerilen yayma tekniğinin DCO-OFDM ve VLC-OFDM gibi diğer optik OFDM dalga formları üzerine etkileri incelenmektedir. Sayısal sonuçlardan yayma tekniğinin optik OFDM dalga formlarının performansına 5 ile 10 dB aralığında SNR kazancı sağladığı gözlenmektedir. AWGN kanal ortamında ve dağılık çok yollu optik kanal ortamlarında önerilen s-Flip-OFDM dalga formunun s-DCO-OFDM dalga formundan yaklaşık olarak 10 dB ve s-VLC-OFDM dalga formundan da 15 dB daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Önerilen s-Flip OFDM dalga formunun donanım karmaşıklığı diğer dalga formlarına kıyasla göze alınabilir boyuttadır. Bu haliyle önerilen s-Flip OFDM dalga formunun, gelecekteki 6G ve ötesi uygulamaları için kullanılabilecek optik telsiz iletişim sistemleri için en iyi dalga formu şemalarından biri olabileceği anlaşılmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. IEEE 802.15.7TM-2011, IEEE standard for local and metropolitan area networks – Part 15.7: Short – Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE, 2011.
2. Fişne A., Analysis of clipping noise in visible light communication, Ms.C. Thesis, Hacettepe University, Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, January 2015.
3. Komine T., Tanaka Y., Haruyama S. and Nakagawa M., Basic study on visible-light communication using light emitting diode illumination, Proc. of 8th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2001), Montreal, Canada, 45-48, 2001.
4. Komine T. and Nakagawa M., Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 50 (1), 100-107, 2004.
5. Güler N.F., Navruz İ., The optical grating based solutions for dispersion compensation in optical communication systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 21 (1), 129-136, 2006.
6. Tsonev D., Islim M.S. and Haas H., OFDM-based visible light communications, In: Uysal M., Capsoni C., Ghassemlooy Z., Boucouvalas A., Udvary E. (eds) Optical Wireless Communications, Signals and Communication Technology, Springer, Cham, 255-298, 2016.
7. Sun Y., Yang F. and Cheng L., An overview of OFDM-based visible light communication systems from the perspective of energy efficiency versus spectral efficiency, IEEE Access, 6, 60824-60833, 2018.
8. Armstrong J., OFDM for optical communications, J. Lightwave Technol, 27 (3), 189–204, 2009.
9. Armstrong J. and Schmidt B., Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-Biased optical OFDM in AWGN, IEEE Communications Letters, 12 (5), 343–345, 2008.
10. Fernando N., Hong Yi and Viterbo E., Flip-OFDM for optical wireless communications, 2011 IEEE Information Theory Workshop, Paraty, Brazil, 2011.
11. Armstrong J. and Lowery A., Power efficient optical OFDM, Electronics Letters, 42 (6), 370–372, 2006.
12. Yong J., Modulation and demodulation apparatuses and methods for wired/wireless communication, Korea Patent WO2007/064 165 A, 07, 2007.
13. Wang J. -B., Jiang P., Wang J., Chen M. and Wang J. -Y., Data detection and code channel allocation for frequency-domain spread ACO-OFDM systems over indoor diffuse wireless channels, IEEE Photonics Journal, 6 (1), 1-16, 2014.
14. Wu C., Zhang H. and Xu W., On visible light communication using LED array with DFT-Spread OFDM, IEEE International Conference on Communications (ICC 2014), 3325-3330, 2014.
15. Tekin M., Savaşçihabeş A., Ertuğ Ö., M-CSK moduled flip-OFDM communication systems in visible light communications, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (4), 2301-2310, 2023.
16. Özen A., A novel QAM technique for high order QAM signaling, Radioengineering Journal, 20 (3), 683-691, 2011.
17. Standard IEEE 802.16-2004 local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems, 2004.
18. Maraş M., A novel M-level modulation technique built on the spreading method for visible light communication, Ms.C. Dissertation, Graduate School of Natural and Applied Sciences/Department of Electrical and Electronics Engineering, Nuh Naci Yazgan University, Kayseri, 2023.
19. Gebeyehu Z. H., Signal transmission and detection scheme for energy and spectrally efficient indoor optical wireless communications, Ph.D. Thesis, Pan African University Institute for Basic Sciences, Technology and Innovation, 2018.
20. Gebeyehu Z. H., Langat P. K. and Maina C. W., BER performance of stratified ACO-OFDM for optical wireless communications over multipath channel, Journal of Computer Networks and Communications, 1-14, 2018.
21. Panta J., Saengudomlert P. and Sripimanwat K., Performance analysis of partial pre-equalization for ACO-OFDM indoor optical wireless transmissions, 9th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Sign (CSNDSP), 1029–1033, 2014.

