



Çoklu Vericili Görünür Işık Haberleşmesinde Kanal

¹Merve Kimyacı, ^{*2}Selva Muratoğlu Çürük

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, merve.kimyaci.mfbe16@iste.edu.tr, 

²İskenderun Teknik Üniversitesi, selva.curuk@iste.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 12.08.2020

Kabul Tarihi: 30.09.2020

Öz

Aydınlatma için kullanılan ışık kaynaklarını veri iletiminde kullanma fikrine dayanan Görünür Işık Haberleşmesinin (Visible Light Communication, VLC) geleceğin haberleşme teknolojileri arasında yer alması beklenmektedir. Ancak güvenilir iletişim için çokyollu yapıya sahip olduğu bilinen bina içi VLC kanallarının bilinmesi ve kestirilmesi önemlidir. Bu nedenle olası kanal karakteristiklerini incelemek amacıyla, çalışmada farklı boyutlarda çeşitli düzende yerleştirilmiş çoklu vericili odalar ele alınmıştır. Mobil kullanıcılar göz önünde bulundurularak farklı alıcı konumları için Kanal Dürtü Yanıtları ve Kanal Frekans Yanıtları hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, çoklu vericilerin kanalın özelliklerini değiştiren güçlü bir etken olduğu, kaynakların dağılımı ve alıcı konumu ile ilişkili frekans seçici kanallar oluştuğu gösterilmiştir. Aynı odada alıcı konumuna bağlı olarak frekans bandında tamamen farklı bir dalgalanma olabileceği, bazı frekanslarda ciddi zayıflamalar yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç özellikle mobil alıcılar için çözüm bekleyen bir durum olarak dikkat çekmiştir. Çalışmanın sonunda çözüm önerisi olarak sunulan yönlü aydınlatma veya dar görüş açılı detektör kullanılmalarının kanalın frekans seçiciliğini azaltılabileceği simülasyonlarla gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Görünür ışık haberleşmesi, bina içi, kanal dürtü yanıtı, kanal frekans yanıtı

Channel in Multiple Transmitter Visible Light Communication

¹Merve Kimyacı, ^{*2}Selva Muratoğlu Çürük

¹Iskenderun Technical University, merve.kimyaci.mfbe16@iste.edu.tr

²Iskenderun Technical University, selva.curuk@iste.edu.tr

Abstract

Visible Light Communication (VLC), which is based on the idea of using the light sources used for lighting in data transmission, is expected to be among the communication technologies of the future. However, for reliable communication, it is important to know and predict indoor VLC channels that are known to have a multipath structure. Therefore, in order to examine the possible channel characteristics, multiple transmitter rooms with different sizes are arranged in the study. Channel Impulse Responses and Channel Frequency Responses were calculated for different receiver locations taking into account mobile users. As a result of the study, it has been shown that multiple transmitters are a powerful factor that changes the characteristics of the channel and frequency selective channels are formed related to the distribution of the sources and the receiver location. In the same room, depending on the receiver location, there may be a completely different fluctuation in the frequency band and some serious fading is observed in some frequencies. This result has attracted attention especially as a problem with pending solution for mobile users. At the end of the study, it was shown by using simulations that using directed illumination or detector with narrow field of view may reduce the frequency selectivity of the channel.

Keywords: Visible Light Communication, indoor, channel impulse response, channel frequency response

1. GİRİŞ

Günümüzde yaygın şekilde kullanılan radyo frekansı kablosuz haberleşme sistemleri yüksek performans ile hizmet vermektedir. Ancak özellikle kişisel cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte hızla artan mobil kullanıcı sayısı spektrumda doluluğa sebep olmuş, radyo frekansı sistemleri talepleri karşılayamaz hale gelmeye başlamıştır. Buna ek olarak, aşırı enerji tüketimi konusu çözüm bekleyen küresel bir sorundur. Kaliteli servis hizmeti sunmak adına kablosuz ağlar iletim için aşırı derecede enerji tüketmektedir. İşletme giderlerinin düşürülmesinden çok, karbon yayılımı azaltılmış, çevreye duyarlı haberleşme sistemleri geliştirmek akademik dünya ve servis sağlayıcıları için bir hedef haline gelmiştir.

Araştırmacılar, mevcut haberleşme sistemlerinin yerini alacak veya destek olacak sistemler üzerine çalışmalarına devam etmektedirler. Geleceğin haberleşme teknolojilerinden biri olmaya aday Görünür Işık Haberleşmesinin (Visible Light Communication, VLC); bazı uygulamalarda radyo frekansı teknolojisine alternatif olması, bazılarında ise tamamlayıcı rol alması beklenmektedir [1]. VLC teknolojisi, vericide bulunan Işık Yayan Diyotların (Light Emitting Diodes, LEDs) ışık şiddetini veya rengini fark edilemeyecek hızda değiştirerek ortam aydınlatması etkilenmeden kablosuz bilgi iletimini yapmayı amaçlamaktadır. Sağlığa zararı olmayan yeşil bir haberleşme olan VLC, radyo frekansı spektrumuna kıyasla çok daha geniş bir spektrumda, veriyi yüksek hızda az güç harcayarak iletebilmektedir. Ayrıca, elektromanyetik ışımaya ve girişime neden olmadığı gibi radyo frekans girişiminden de etkilenmemektedir. VLC'nin diğer bir üstünlüğü görünür ışık dalgalarının duvarlar ve yüzeylerden geçememesi nedeniyle veri güvenliğini sağlamasıdır [2].

Günümüzde işlevsel ve yüksek performanslı VLC sistemler için çalışmalar hız kazanmıştır. Bilindiği üzere bina içi VLC uygulamalarında, vericiden gönderilen sinyal Görüş Hattı (Line of Sight, LOS) ile direkt alıcıya ulaşabileceği gibi, Görüş Hattı Olmayan (Non Line of Sight, NLOS) yansımalarından sonra da alıcıya ulaşacaktır. Bu durumda alınan optik sinyal, farklı zaman gecikmelere sahip olan işaretlerin toplamından oluşacaktır ve iletilen sinyal çokyollu kanalın etkilerini yaşayacaktır [3]. Buna ek olarak, çoklu ışık kaynakları daha homojen aydınlatma sağlayabilmesi ve gölgelemeyi engellemesi açısından avantajları nedeniyle özellikle büyük odalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Veri iletimi açısından bakıldığında, çoklu vericili sistemler gölgelemenin önüne geçbilse de, özellikle yüksek veri hızlarında simgeler arası girişime nedeniyle sinyaller daha yoğun çokyollu kanalın etkilerini yaşayacaklardır [4]. Çokyollu yapı iletişimi sınırlayan etkidir, bu nedenle bina içi VLC haberleşme sistemlerinin sağlıklı şekilde çalışabilmesi ve başarımını artırabilmek amacıyla kanalın kestirilmesi ve etkisinin denkleştirilmesi öncelikli araştırma konularından biridir.

Literatürde tekli vericilerin kanalını inceleyen çalışmalar nispeten daha fazladır, ama çoklu vericili durumlarda kanalın frekans seçiciliğini inceleyen çalışmalar sınırlıdır [5-12]: Örneğin verici sayısı arttıkça kanalın dc kazancının azaldığı [5]'te gösterilmiştir. Çoklu kaynak durumunda güçlü LOS bileşenleri nedeniyle kanal bant genişliğinin sınırlı olduğunu [6]'nın yazarları kanıtlamıştır. [7]'nin yazarları ise çoklu kaynak kanalı frekans tepkisini belli bir durum için araştırmıştır. Çoklu verici yapının kanal frekans karakteristiğini etkileyen en kritik faktör olduğu ve dalgalanmanın kaynakların yerleşimi ve alıcının konumu ile ilgili olduğu [8]'de gösterilmiştir. Çoklu kaynaklı sistemlerde, kanalın dürtü ve frekans tepkisi, [9]'da kanıtlandığı gibi alıcının konumuna göre değişmektedir. Ancak bu değişim literatürde belirli durumlar için incelenmiştir. Örneğin [10]'da, kanal simetrik yerleşimli vericileri olan tipik bir ofiste araştırılmaktadır. [11]'in yazarları, simetrik olarak yerleştirilmiş dört verici sistem ve iki farklı alıcı konum için kanal dürtü tepkisini vermektedir. [12]'nin yazarları, kanalın frekansı seçiciliğini belirleyen ana faktörün baskın LOS hatlarının olduklarını belirtmiştir. Çalışmada LOS bileşeninin etkisiyle frekans tepkisinde salınım davranışı görüldüğü, belirli frekanslarda şiddetli zayıflamaların olduğu ifade edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı çoklu vericili bina içi VLC sistemleri için olası farklı kanal karakteristiklerini belirlemek, ardından iyi bir aydınlatma ve hızlı, sağlıklı bir iletim için öneriler sunmaktır. Bu amaçla farklı aydınlatma düzeneklerine sahip odalar için VLC kanallarının Kanal Dürtü Tepkisi (Channel Impulse Response, CIR) ve Kanal Frekans Tepkisi (Channel Frequency Response, CFR) incelenmiştir. Ardından simülasyon bulguları yorumlanarak kanalın frekans seçiciliğini gidermek üzerine çözümler önerilmiştir. Aydınlatma düzeneklerini değiştirmenin, yönlü aydınlatma kullanmanın ve detektörün görüş açısını azaltmanın sorunun çözümündeki etkisi araştırılmıştır. Böylece VLC amaçlı kullanılacak olan aydınlatma sistemlerinin planlaması için alt yapı oluşturulmuştur.

2. BİNA İÇİ VLC KANALI

Tipik bir VLC sisteminde, verici modülatör, optik kaynak ve sürücü devresi, alıcı ise optik detektör, yükseltec ve demodülatörden oluşur [2]. VLC, sürücü devresinin LED'lerden geçen akımı iletilecek işarete göre kontrol ederek yayılan ışığın parlaklığını modüle etmesi, alıcıda ise detektörün gelen modüleli ışığın gücüyle ilişkili akım üreterek demodülasyonu gerçekleştirmesi mantığına dayanmaktadır. Böyle bir sistemde verici ile alıcı arasındaki boşluk kanal olarak modellenir. Tipik bir çokyollu VLC kanalının her bir yolunun bir gücü ve bir gecikmesi olacaktır, bu durumda CIR [4]

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

olarak ifade edilir. P_i i -inci yolun gücünü, τ_i ise bu yolun gecikme zamanını göstermektedir. $\delta(t)$ Dirac delta fonksiyonudur. Çoklu vericili bir sistemde, her bir vericiden alıcıya ulaşan güç, matematiksel olarak, o vericinin LOS yolu gücü ile çokyollu yayılımdan sonra alıcıya gelen tüm NLOS yollarının güçleri toplanarak hesaplanır [4]:

$$h_n(t) = h_{LOS,n}(t) + \sum_{k=1}^{\infty} h_{NLOS,kn}(t). \quad (2)$$

Burada k yansıma numarası, n ise verici indisidir. Teorik olarak sonsuz sayıda yansıma olacaktır, ancak her yansımada zayıflayan güç ilk birkaç yansımadan sonra ihmal edilecek seviyeye düşecektir. Çoklu kaynak durumunda alıcıdaki güç, aşağıda belirtildiği gibi, bütün vericilerden alınan LOS ve NLOS hatlarının güçlerinin toplamı olacaktır. Sonuç olarak N_{LED} adet çoklu vericili bir sistemde kanalın CIR

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N_{LED}} \left(h_{LOS,n}(t) + \sum_{k=1}^{\infty} h_{NLOS,kn}(t) \right). \quad (3)$$

şeklinde olacaktır.

Verici ile alıcı arasındaki mesafenin LED boyutundan çok daha büyük olması nedeniyle kaynakların tek renkli noktasal kaynak oldukları varsayımı doğru bir yaklaşımdır. LED Lambert radyasyon yapısına sahip ise, yaydığı ışık yüzey normalinin etrafında silindirik simetriye sahip olacaktır. Bu durumda, n -inci kaynağın radyasyon yoğunluğu paterninin açısız dağılımı, genelleştirilmiş bir Lambert radyant yoğunluğu kullanılarak modellenir [4],

$$R_n(\phi_0) = \frac{(m+1)}{2\pi} \cdot P_t \cdot \cos^m(\phi_0). \quad (4)$$

İfadedeki optik güç P_t LED'den yayılan toplam enerjiyi gösterirken, $\frac{(m+1)}{2\pi}$ katsayısı yarıküre yüzeyi üzerindeki toplam radyasyon yoğunluğunun verici gücüne eşit olmasını sağlamaktadır. Lambert emisyon numarası m ışın huzmesinin enini, dolayısıyla ışığın yönlülüğünü ifade eder. $m = 1$ durumu klasik Lambert kaynak olduğunu belirtirken daha büyük m değeri yönlülük anlamına gelir. ϕ_0 verici yüzeyinin normal eksenine göre ışıma açısıdır. Işıma açısı $\phi_0 < 90^\circ$ dir ve $\phi_0 = 0$ için maksimum güçte ışıma görülür.

Alıcıda optik detektör, detektörün Görüş Alanı (Field of View, FOV) açısı ψ_c 'den ($\psi_c \leq \pi/2$) daha küçük olay açılarla (ψ_0) gelen radyasyonu toplayan aktif alan A_r olarak modellenmektedir. Sonuç olarak bir VLC sistemi ele alındığında, d_0 mesafesindeki ($d_0 \gg \sqrt{A_r}$) bir alıcı için n -inci vericiden gelen LOS hattının kazancı [4],

$$H_{LOS,n} = \frac{(m+1)}{2\pi} \cdot P_t \cdot \cos^m(\phi_0) \cdot \frac{A_r \cdot \cos(\psi_0)}{d_0^2} \cdot \text{rect}\left(\frac{\psi_0}{\psi_c}\right) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Alıcıda optik detektörün sadece FOV'dan daha küçük açılarla gelen radyasyonu topladığını ifade etmek için dikdörtgen darbe kullanılmıştır:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad (6)$$

LOS bağlantısının dürtü yanıtı ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$h_{LOS,n}(t) = \frac{A_r \cdot (m+1)}{2\pi \cdot d_0^2} \cdot P_t \cdot \cos^m(\phi_0) \cdot \cos(\psi_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{\psi_0}{\psi_c}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{d_0}{c}\right) \quad (7)$$

Burada c boş alandaki ışığın hızıdır ve d_0/c yayılma gecikmesini temsil eder. VLC sistemlerinde optik detektör ile daha fazla radyasyon toplamak amacıyla yoğunlaştırıcı kullanmak ve optik bant geçiren filtre ile alıcının performansını artırmak tercih edilen tekniklerdir. Bu durumda bunların kazançları (7)'e eklenmelidir.

Yansımaların CIR'a katkısının hesaplanmasında literatürde geçen deterministik Barry metodu [13] yüksek doğruluğa sahip iken, Modifiye Monte Carlo (MMC) algoritması [14] yüksek hıza sahiptir. Bu çalışmada iki metodun iyi yönlerini birleştiren, ilk yansımaların katkısını Barry metoduyla, ikinci ve diğer yansımaların katkısını ise MMC tekniğiyle bulan teknik [15] kullanılmaktadır.

Oda yüzeylerinde yaygın olarak kullanılan boya, ahşap, tekstil, sıva gibi malzemeler difüzyon yansımaları neden olduğundan, ışınlar yüzeylere çarptığında çarpma noktasında yeni nokta kaynaklar oluşacaktır. Bu yeni kaynaklar orijinal kaynağa benzer şekilde Lambert radyasyon paternlerine ($m = 1$) sahip olacaktırlar, ancak yayılan ışınların gücü gelen ışınların zayıflamış hali olacaktır. Yansıyan ışınlar, bir başka yüzeye veya detektöre ulaşana kadar yollarına devam edeceklerdir. MMC algoritmasında, her yansıma sonrası, yansıyan noktadan alıcıya LOS hattı olduğu varsayılır. Bu durumda n -inci vericiden oluşan k -yıncı NLOS yolunun CIR'e katkısı

$$h_{NLOS,kn}(t) = \frac{A_r}{\pi \cdot d_k^2} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \dots \gamma_k \cdot P_t \cdot \cos(\phi_k) \cdot \cos(\psi_k) \cdot \text{rect}\left(\frac{\psi_k}{\psi_c}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{d_0 + \dots + d_k}{c}\right) \quad (8)$$

kullanılarak bulunur. ϕ_k yansımanın ışıma açısı, ψ_k yansımanın olay açısı, γ_k yansıma katsayısı ve d_k alıcı ile son yansıma noktası arasındaki mesafedir.

CIR kanalı tamamen karakterize eder, ancak çokyollu kanalların zaman yayılım özelliklerini belirlemek için sıkça kullanılan anahtar parametre τ_{rms} , rms gecikme yayılımıdır. Gecikme yayılımı, çokyollu bir kanalda alıcıya ulaşan ilk bileşen ile son bileşenin varış zamanları arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Rms gecikme yayılımı ise yansımaların gecikme değerlerinin enerjileriyle orantılı olarak standart sapmasıdır. VLC kanalları için τ_{rms} aşağıdaki şekilde olacaktır [16]:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2}, \quad (9)$$

Aşırı gecikme $\bar{\tau}$ ve τ^2 aşağıda tanımlanmıştır:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{LED}} \left(P_{LOS,n} \cdot t_{LOS,n} + \sum_{k=1}^{\infty} P_{NLOS,kn} \cdot t_{NLOS,kn} \right)}{P_{rT}}, \quad (10)$$

$$\tau^2 = \frac{\sum_{n=1}^{N_{LED}} \left(P_{LOS,n} \cdot t_{LOS,n}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} P_{NLOS,kn} \cdot t_{NLOS,kn}^2 \right)}{P_{rT}}. \quad (11)$$

$P_{LOS,n}$ n -inci LOS hattının gücü, $t_{LOS,n}$ ise aynı LOS hattının zaman gecikmesidir. $P_{NLOS,kn}$ ve $t_{NLOS,kn}$, ise sırasıyla n -inci vericiden gelen yansımaların güçleri ve zaman gecikmeleridir. Alınan toplam güç

$$P_{rT} = \sum_{n=1}^{N_{LED}} \left(P_{LOS,n} + \sum_{k=1}^{\infty} P_{NLOS,kn} \right). \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. CIR ve τ_{rms} deterministik parametrelerdir, şartlar değişmedikçe sabit kalırlar. Ancak farklı oda şartları, verici konfigürasyonu, alıcının konumu gibi değişimlerde farklı değerler gözlemlenecektir.

Çokyollu bir kanalda iletişimi optimize etmek için zaman karakteristiğinin (dürtü tepkisi) yanında bant karakteristiği de (frekans tepkisi) ele alınmalıdır. Özellikle çoklu verici yapı kanalın bantını büyük ölçüde etkileyecektir. CFR kanal dürtü tepkisinin Fourier dönüşümü ile elde edilir (Δt zaman dilimi genişliği) [2]:

$$H(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n, \Delta t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t} \quad (13)$$

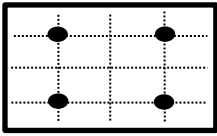
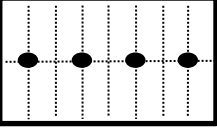
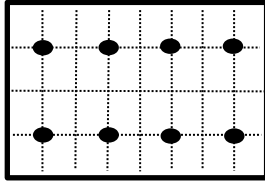
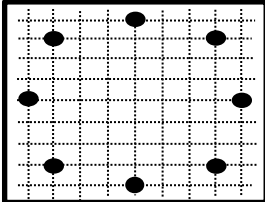
3. SİMÜLASYON BULGULARI

Bu çalışmada Matlab simülasyonları ile çoklu vericili kanallarda frekans tepkisinin durum tespiti ve problemlerin çözümleri üzerine odaklanılmıştır. Simülasyonlarda alıcı ve verici birbirlerine bakacak şekilde, aydınlatmanın (vericiler) tavanda sabit olduğu, alıcının ise bir kişinin elinde zeminden 85 cm yükseklikte olduğu varsayılarak konumlandırılmıştır. LED'lerden yayılan güç 1 watt olarak alınmış ve 10 000 adet

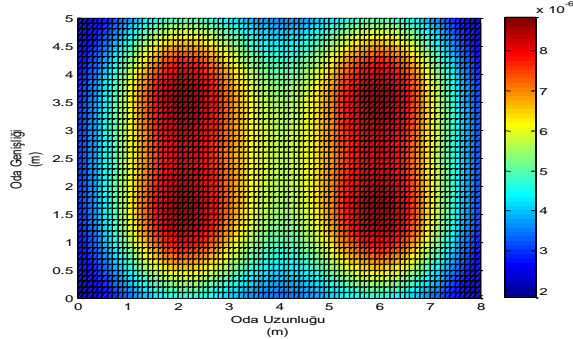
ışın üretilmiştir. Alıcıdaki fotodetektörün alanı 1 cm² dir. Simülasyonlarda, etkisinin az olduğu düşünülen eşyalardan oluşabilecek yansımalar ihmal edilmiş, odaların boş olduğu varsayılmıştır. Yansımaların oluşacağı tüm yüzeylerin (zemin, tavan ve duvarlar) yansıma katsayısı ortalama değer 0,5 olarak alınmıştır. Teorik olarak, kapalı bir ortamda her vericiden kaynaklanan doğrudan bir yol ve sonsuz sayıda duvarlardan, tavadan ve zeminden yansımalar oluşacaktır. Ancak her yansımada zayıflayan ışınların gücü ilk beş yansımadan sonra ihmal edilebilir seviyede olacaktır [2]. Bu nedenle çalışmada yansıma sayısı 5 olarak alınmıştır.

Tek vericili sistemlerde yapılan çalışmalar kanalların frekans seçici olmadığı, frekans düzleminde alıcının konumuna bağlı zayıflama olduğu, sadece yüksek yansımali ortamlarda, NLOS bileşenlerinin etkisinin artmasıyla duvarlara yakın konumda frekans düzleminde hafif bir hareketlenme gözlemlendiği belirtilmiştir [2]. Bu nedenle tek vericili sistemlerde alıcı hareketliliğinin bir sorun yaratmayacağı açıktır. Ancak çok vericili sistemlerde durum farklıdır. Bu nedenle bu çalışmada çoklu vericili VLC sistemleri için kanal yapısını incelemek, konfigürasyonunun CIR ve CFR üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla olası düzenekler göz önünde bulundurularak tanımlanan iki farklı boyutta ve farklı verici yerleşimine sahip odalar ele alınmıştır. Odalarda birim alana düşen güç eşit (1 LED / 10 m²) olacak şekilde seçilmiştir. Odaların yükseklikleri 3 m olarak belirlenmiştir. Kıyaslanacak dört farklı oda ve verici yerleşimi Tablo 1'de verilmiştir.

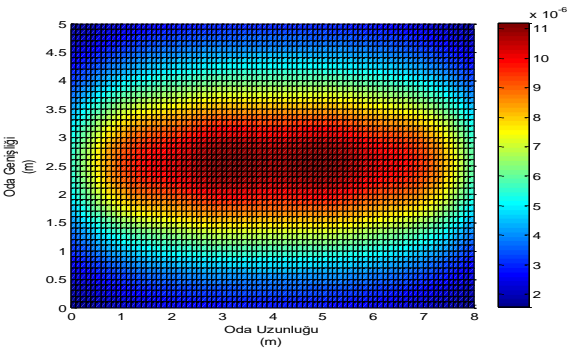
Tablo 1. Oda boyutu ve verici yerleşimi.

Oda no	Verici yerleşimi görseli
Oda 1 (8m x 5m)	
Oda 2 (8m x 5m)	
Oda 3 (10m x 8m)	
Oda 4 (10m x 8m)	

Dört vericili 40 m²'lik aydınlatma düzeneğine sahip Oda 1 ve Oda 2'ye ait aydınlatma grafikleri sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Oda 1'de aydınlatmanın daha homojen olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 1. Aydınlatma grafiği, Oda 1, $m = 1$

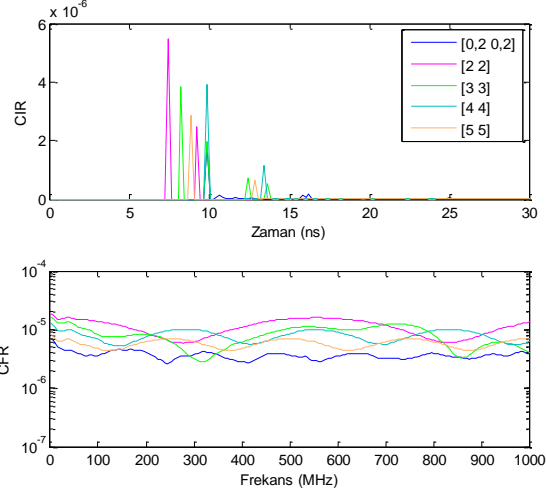


Şekil 2. Aydınlatma grafiği, Oda 2, $m = 1$

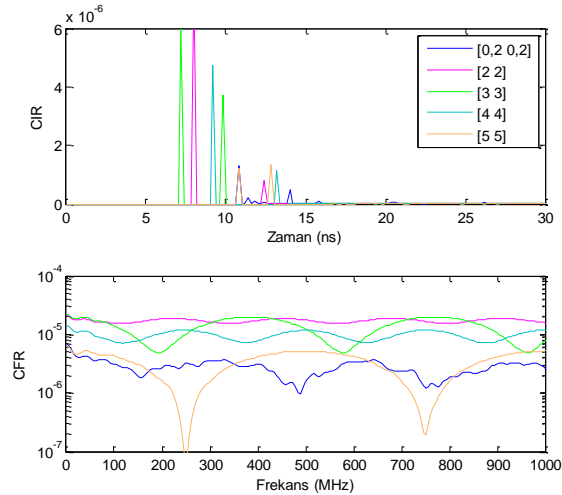
Alıcının mobil olduğu düşünülerek vericilerle farklı açıda bulunacak şekilde alıcı konumları belirlenmiştir: [0,2 0,2] m, [2 2] m, [3 3] m, [4 4] m ve [5 5] m. Oda 1 ve Oda 2 için bu alıcı konumlarında oluşan CIR ve CFR grafikleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Şekillerde her konum için farklı renk kullanılmıştır. CIR grafiklerinde verici sayısı kadar LOS hatları olması beklenmektedir, ancak alıcı konumuna bağlı olarak bazı vericilerden gelen LOS detektör açısı kapsamına girememekte veya çok küçük genlikli olmaktadır. Bu nedenle CIR grafiklerinde her konum için dört güçlü LOS bileşeni görülmemektedir. Ama alıcı vericilere yaklaştıkça LOS yollarındaki artan kazançlar açıkça görülmektedir.

CFR grafiklerinde ise her iki oda için farklı alıcı konumlarında ciddi bir dalgalanma görülmektedir. Bu dalgalanma LOS bileşenleri boyut olarak birbirine yaklaştıkça belirginleşmektedir. Dalgalanma periyodiktir ve periyot LOS hatları arasındaki zaman farkıyla ilişkilidir. Her iki odada çoklu kaynak önemli bir frekans seçiciliğine neden olmaktadır. Ancak Oda 2 için [5,5] konumunda bu çok daha belirgindir, bazı frekanslarda çok ciddi ani zayıflamalar mevcuttur. [0,2,0,2] konumunda ise LOS lar çok zayıf olduğu için bir titreme görülmektedir. Odalar kıyaslandığında, Oda 2, [2 2] alıcı konumu haricinde, Oda 1'e göre daha kötü kanal yapısı oluşturmuştur.

Bu sonuçlar kanal frekans karakteristiğini etkileyen en kritik faktörün çoklu verici yapının olduğunu belirten ve kaynakların yerleşimi ve alıcının konumu ile ilgili dalgalanma olduğu gösteren [8] ve [9] ile uyumludur. Yine [12]'nin yazarlarının ifade ettiği gibi, kanalın frekans seçiciliğini alıcı konumuna bağlı olarak oluşan baskın LOS hatları belirlemektedir.



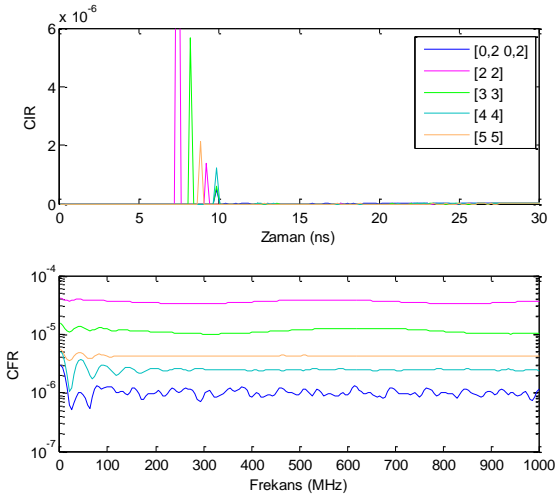
Şekil 3. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $m = 1$, FOV = 60°



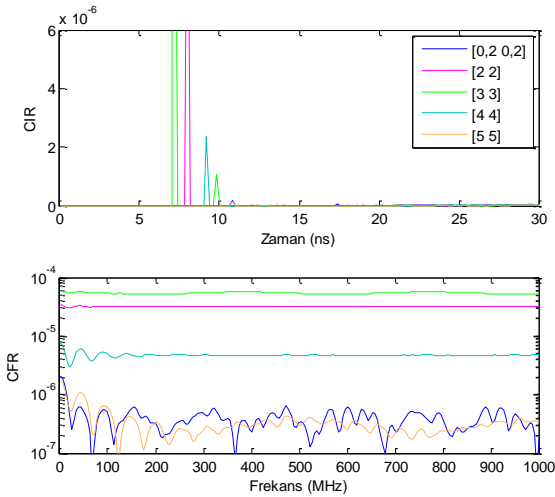
Şekil 4. CIR ve CFR grafikleri, Oda 2, $m = 1$, FOV = 60°

Yönlü aydınlatma kullanmanın problemin çözümündeki etkisini incelemek amacıyla ışın huzmesi dar ($m = 10$) olan vericilerin kullanıldığı varsayımıyla Oda 1 ve Oda 2 için CIR ve CFR grafikleri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde Oda 1 için her alıcı konumunda problemin çözüldüğü, frekans seçici olmayan kanal oluştuğu, Oda 2 için ise bazı alıcı konumlarında sorun yaşandığı görülmektedir. Aydınlatma yönlü yapıldığında, alıcı konumuna bağlı olarak detektörün görüş alanına sadece en yakın LOS hattı denk geldiği durumda sistemin tek vericili gibi davranacağı, frekans seçiciliğin görülmeceği ortaya çıkmıştır. Ancak Oda 2'deki bazı konumlarda olduğu gibi, detektör LOS hattı yakalayamaz ise kanal sadece NLOS

hatlardan oluşacaktır. Bu durumda da beklenildiği üzere ciddi bir zayıflama ve frekans seçicilik görülmektedir.



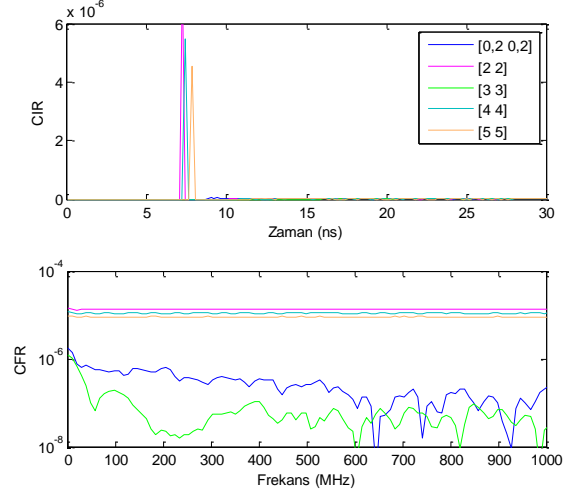
Şekil 5. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



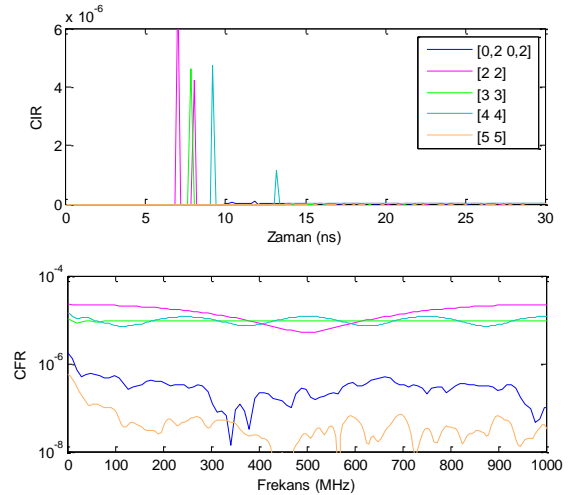
Şekil 6. CIR ve CFR grafikleri, Oda 2, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$

Konuma göre değişen frekans seçici kanaldan kurtulmanın diğer bir çözümü dar görüş alanı açılı detektör kullanarak tek bir LOS hattı yakalamaktır. Oda 1 ve Oda 2'de dar FOV açılı detektör kullanıldığı durumda çıkan sonuçlar Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Oda 1 için bazı alıcı konumlarında çok iyi sonuç alınırken, bazı alıcı konumlarında LOS gözlenmemektedir. Bu da kanalın sadece NLOS hatlarından oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu konumlarında kanaldaki zayıflama da, rasgele oluşan frekans seçicilik de ciddi

boyuttur. Oda 2'de ise durum daha ciddidir. Bazı alıcı konumları için frekans seçicilik azalmış olsa da hala bulunmaktadır, diğer alıcı konumlarında ise LOS hattı yakalanamamıştır. Bu sonuçlara göre, FOV açısı oda boyutu, vericilerin yerleşimi ve ışık huzmesinin eni dikkate alınarak belirlenmelidir. Gerekirse NLOS kanallarla iletim yapmaktansa frekans düzleminde hafif bir dalgalanma tercih edilebilir.



Şekil 7. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$



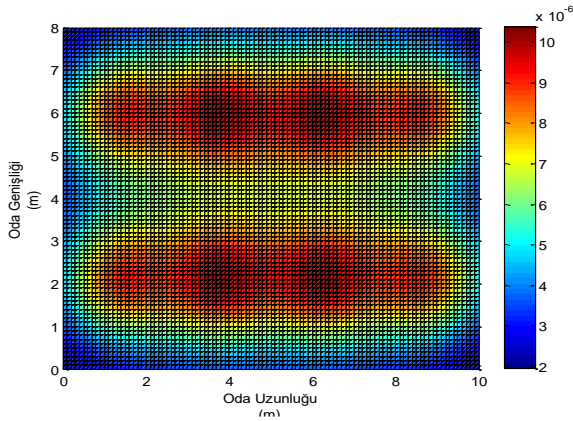
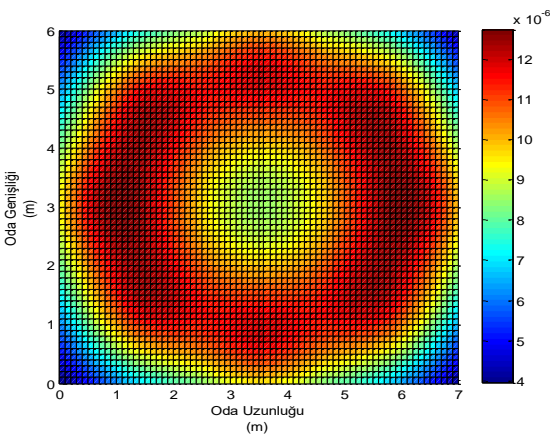
Şekil 8. CIR ve CFR grafikleri, Oda 2, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$

Oda 1 ve Oda 2 τ_{ms} değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu parametre değerinin çoklu vericili kanallar için yeterli bilgi vermediği görülmektedir. CFR grafikleri ancak kanalın frekans düzleminde nasıl davrandığını tamamen gösterir.

Tablo 2. Oda 1 ve Oda 2 τ_{rms} değerleri

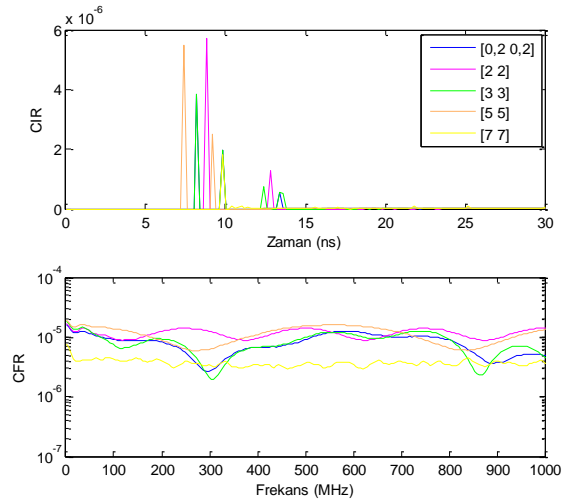
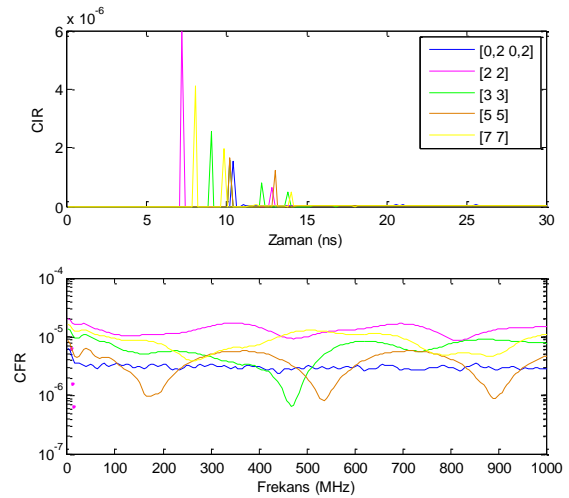
		τ_{rms} (ns)				
Alıcı konumu		(0,2; 0,2)	(2; 2)	(3; 3)	(4;4)	(5; 5)
Oda 1	$m = 1, FOV = 60^\circ$	12,502	10,650	10,850	11,415	11,025
	$m = 1, FOV = 30^\circ$	8,959	3,419	4,204	5,486	7,871
	$m = 10, FOV = 60^\circ$	10,029	4,885	7,843	11,002	9,005
Oda 2	$m = 1, FOV = 60^\circ$	12,057	10,013	10,061	11,195	11,465
	$m = 1, FOV = 30^\circ$	8,603	6,371	12,106	10,699	7,970
	$m = 10, FOV = 60^\circ$	13,027	7,908	6,739	14,449	14,071

Sekiz vericili farklı aydınlatma düzeneklerine sahip 80 m²'lik Oda 3 ve Oda 4'e ait aydınlatma grafikleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Her iki aydınlatma da yeterli olsa da Oda 4 ün aydınlatması biraz daha homojen dağılmış görünmektedir.

**Şekil 9.** Aydınlatma grafiği, Oda 3, $m = 1$ **Şekil 10.** Aydınlatma grafiği, Oda 4, $m = 1$

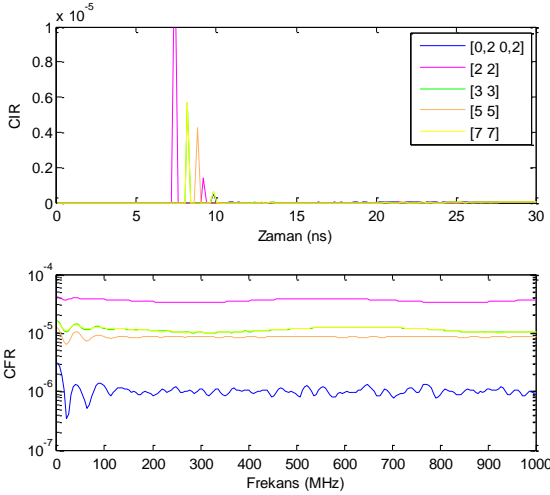
Oda 3 ve Oda 4 için CIR ve CFR grafikleri Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir. Bu odalar için alıcı konumları [0,2 0,2] m, [2 2] m, [3 3] m, [5 5] m ve [7 7] m olarak belirlenmiştir. Şekiller incelendiğinde, diğer dört vericili kanallarda olduğu gibi, sekiz vericili iki farklı konfigürasyonda da çoklu kaynağın önemli bir frekans seçiciliğine neden olduğu

görülmektedir. Bu sonuçlar da [8, 9, 12] ile uyumludur. Oda 4 için bu frekans seçicilik özellikle [3 3] ve [5 5] konumlarında daha belirgindir.

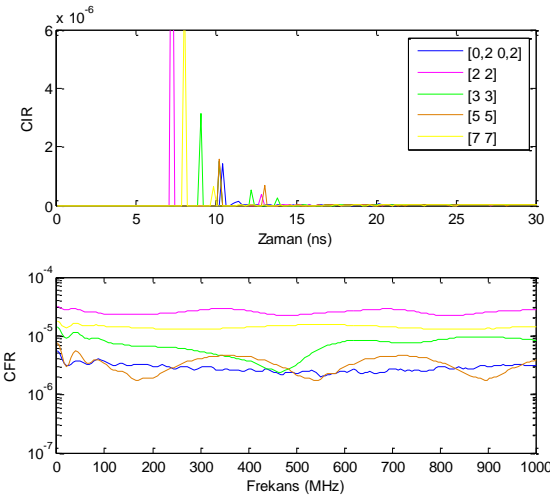
**Şekil 11.** CIR ve CFR grafikleri, Oda 3, $m = 1, FOV = 60^\circ$ **Şekil 12.** CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $m = 1, FOV = 60^\circ$

Yönlü aydınlatma kullanıldığında Oda 3 ve Oda 4 için CIR ve CFR grafikleri Şekil 13 ve Şekil 14'te, dar açılı detektör

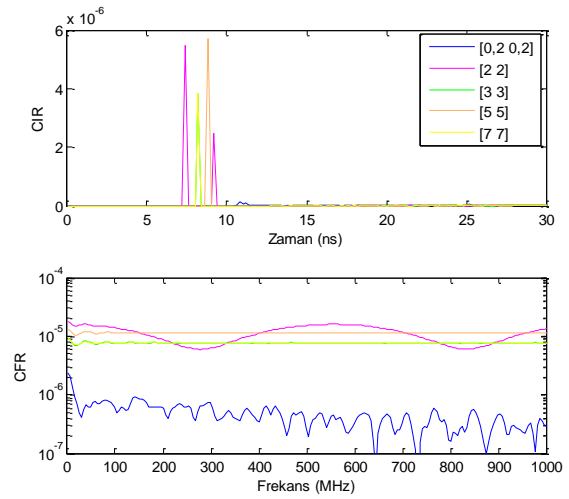
kullanıldığında CIR ve CFR grafikleri Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir. Oda 3 ve Oda 4 için τ_{rms} değerleri ise Tablo 3'te verilmiştir. Şekillerde kanalın frekans seçiciliğinin bazı alıcı konumları için azalmış olduğu görülmektedir. Ancak bazı alıcı konumlarında azalmış olsa da frekans seçiciliğinin devam ettiği, bazı konumlarda ise LOS kaybı yaşandığı görülmektedir.



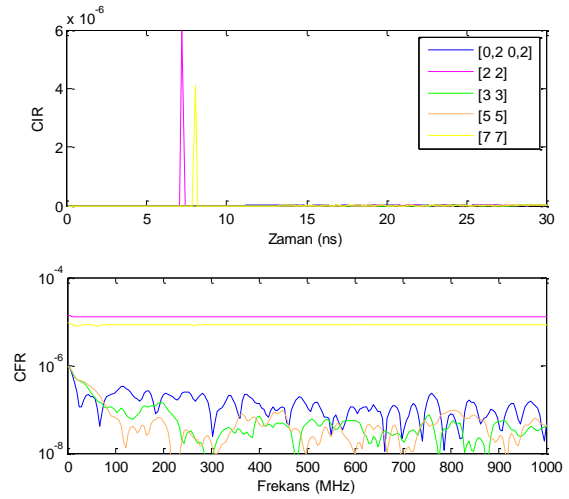
Şekil 13. CIR ve CFR grafikleri, Oda 3, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 14. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 15. CIR ve CFR grafikleri, Oda 3, $m = 1$, $FOV = 40^\circ$



Şekil 16. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$

Çoklu vericili VLC uygulamalarında frekans seçici kanal yapısı çözüm bekleyen bir sorundur. Dört vericili ve sekiz vericili odalar kıyaslandığında, dörtlü vericili sistemlerde yönlü aydınlatma veya dar görüş açılı detektör çözüm olabilirken, verici sayısı artıka detektörün tek bir LOS görmesini sağlamak zorlaşmaktadır. Bu da problemin çözümünde önerilen tekniklerin yetersiz kalabileceği alıcı konumlarıyla sonuçlanmaktadır.

Tablo 3. Oda 3 ve Oda 4 τ_{rms} değerleri

Alıcı konumu		τ_{rms} (ns)				
		(0,2; 0,2)	(2; 2)	(3; 3)	(5; 5)	(7; 7)
Oda 3	$m = 1$, $FOV = 60^\circ$	15,623	13,003	13,092	13,818	13,402
	$m = 1$, $FOV = 30^\circ$	16,467	9,495	14,193	13,179	14,005
	$m = 10$, $FOV = 60^\circ$	11,485	5,700	9,341	10,754	8,669
Oda 4	$m = 1$, $FOV = 60^\circ$	17,877	10,472	15,633	16,396	12,923
	$m = 1$, $FOV = 30^\circ$	16,900	9,204	13,927	13,553	10,224
	$m = 10$, $FOV = 60^\circ$	16,008	7,001	17,086	16,166	16,970

4. SONUÇLAR

VLC teknolojisi, ışık şiddetini veya rengini insan gözünün fark edemeyeceği hızda değiştirerek ortam aydınlatması ve kablosuz bilgi iletimini birlikte yapar. Bu özelliğiyle gelecek vadede haberleşme teknikleri arasında yerini alan VLC sistemlerinin performansını geliştirmek için çalışmalar hızlanmıştır. Bu çalışmada, çok elemanlı aydınlatma düzeneklerinin VLC kanalı üzerine etkisi incelemek amacıyla, farklı boyut ve farklı aydınlatma düzeneğine sahip dört odada farklı alıcı konumları için kanal yapısı Matlab simülasyonları ile incelenmiştir. Aydınlatma açısından bakıldığında tavana yayılmış şekilde yerleşen düzenekler ile daha homojen bir aydınlatma sağlanabilmektedir. Ancak iletişim açısından bakıldığında; çokyollu olan bu kanallar her bir vericiden gelen çoklu LOS hatları nedeniyle frekans seçicidir ve bu frekans seçicilik alıcı konumuyla ilişkili olarak tamamen değişmektedir. Bu durum özellikle mobil kullanıcılar için problem teşkil edeceği için kanal kestiriminin ve denkleştirmenin sürekli yapılmasını gerektirir. Yönlü aydınlatma kullanarak veya alıcının görüş alanını daraltarak bir vericiden tek bir LOS yakalanmasını sağlayarak frekans seçiciliği ciddi oranda hafifletmek mümkündür. Ancak ışık huzmesinin eni ve detektör görüş alanı oda boyutu ve verici yerleşimi ile uyumlu seçilmelidir, aksi halde kanal sadece NLOS bileşenleri içerecektir.

KAYNAKÇA

- [1].Z. Ghassemlooy, W. Popoola and S. Rajbhandari, "Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB", 1st Edition, CRC Press, 2017.
- [2].M. Kimyacı, "Bina içi Görünür Işık Haberleşmesinde konfigürasyonun kanal karakteristiği üzerine etkisi", İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay, 2019.
- [3].J. Lian, Z. Vatansever, M. Noshad, M. Brandt-Pearce, "Indoor visible light communications, networking, and applications", Journal of Physics: Photonics, vol. 1, no. 1, pp. 1-28, 2019.
- [4].Y. Qiu, H.H. Chen and W.X. Meng, "Channel modeling for visible light communications - a survey", Wireless Communications and Mobile Computing; vol. 16, pp. 2016-2034, 2016.
- [5].F. Miramirkhani, M. Uysal, "Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications", IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 6, pp. 7905616, 2015.
- [6].K. Lee, H. Park, and J.R. Barry, "Indoor channel characteristics for visible light communications", IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 2, pp. 217-219, 2011.
- [7].D. Ding, X. Ke, "A new indoor VLC channel model based on reflection", Optoelectronics Letters, vol. 6, no. 4, pp. 295-298, 2010.
- [8].S.M. Çürük, M. Kimyacı, "The Impact of Configuration on Channel Characteristics in Visible Light Communication", IEEE Global Power, Energy and Communication Conference- GPECOM2019, 12-15 Haziran, Nevşehir, 2019.
- [9].J.J. Tana, C.Q. Zoua, S.H. Dua, J.T. Tan, "Simulation of MIMO channel characteristics for indoor visible light communication with LEDs", Optik, vol. 125, pp. 44-49, 2014.
- [10].J. Ding, K. Wang, Z. Xu, "Impact of LED Array Simplification on Indoor Visible Light Communication Channel Modeling", 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP), 2014.
- [11].M. Kowalczyk, J. Siuzdak, "Channel modeling and characterization for VLC indoor transmission systems based on MMC ray tracing method", Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments, 2018.
- [12].S. Long, M.A. Khalighi, M. Wolf, S. Bourenane, Z. Ghassemlooy, "Investigating channel frequency selectivity in indoor visible-light communication systems", IET Optoelectronics, vol. 10, no.3, pp. 80-88, 2016.
- [13].J.R. Barry, J.M. Kahn, W.J. Krause, E.A. Lee, and D.G. Messerschmitt, "Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, no.3, pp. 367-379, 1993.
- [14].F.J. Lopez-Hernandez, R. Perez-Jimenez, A. Santamaria, "Modified Monte Carlo scheme for high-efficiency simulation of the impulse response on diffuse IR wireless indoor channels", Electronics Letters, vol. 34, no. 19, pp. 1819-1820, 1998.
- [15].M.I.S. Chowdhury, W. Zhang, M. Kavehrad, "Combined Deterministic and Modified Monte Carlo Method for Calculating Impulse Responses of Indoor Optical Wireless Channels", Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 18, pp. 3132-3148, 2014.
- [16].S.S. Muhammad, "Delay profiles for indoor diffused visible light communication", 13th International Conference on Telecommunications, pp. 1-5, 2015.