

Kapalı Ortam Görünür Işık Kanallarının Modellenmesi ve Denkleştirilmesi

Modeling and Equalization of Indoor Visible Light Channels

Atilla Mamus, Anil Yesilkaya, Erdal Panayirci

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: { atilla.mamus, anil.yesilkaya, eepanay }@khas.edu.tr

Özetçe—Bu bildiri kapalı ortam görünür ışıkla haberleşme kanallarının ardışıl olmayan ışın izleme tekniğiyle modellenmesi için hesaplama karmaşıklığı düşük bir yöntem önerilmektedir. Gerçekçi bir üç boyutlu bilgisayar benzetim ortamı yaratılarak, geometrisi belirli bir odanın içerisine yerleştirilmiş nesnelerin yansıma katsayıları ile bu kapalı ortamda çalışacak bir görünür ışıkla haberleşme (VLC) sisteminin verici ve alıcılarının karakteristikleri tanımlanmaktadır. Bu özellik ve parametre değerlerine sahip optik kanal üzerinden gerçekleştirilen haberleşme için, sistemin alıcısında oluşan optik güç ve sinyal gecikme değerleri hesaplanarak buradan kanalın dürtü yanıtı elde edilmektedir. Elde edilen kanal dürtü yanıtı, VLC alıcı sistemlerinin en önemli birimlerinden biri olan kanal denkleştirici yapısı için kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan, iteratif yapıdaki LMS (en küçük ortalama kareler) ve RLS (rekürsif en küçük kareler) algoritmaları ile denkleştirilmiştir. Görünür ışık kanallarına uygulanan bu denkleştiricilerin bit hata oranı (BER) ve yakınsama hızlarının en uygun değerler için incelenmesiyle birlikte bu algoritmaların özellikle sistemin görüş açısına (field of view, FOV) çok duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler—Görünür ışıkla haberleşme, görünür ışık kanal modellemesi, iteratif kanal denkleştirme, RLS, LMS.

Abstract—In this paper, a computationally efficient method is proposed for modeling the indoor visible light communications (VLC) channels using a non-sequential ray tracing technique. We created three dimensional realistic simulation environment to depict indoor scenarios specifying the geometry of the indoor environment, the objects inside, the reflection characteristics of the surface materials as well as the characteristics of the transmitter and receiver. We then compute the received optical power and the delay of direct/indirect rays which are used to obtain the channel impulse response (CIR). Finally, LMS (least mean squares) and RLS (recursive least squares) iterative channel equalization techniques which are widely employed in traditional electrical wireless communications are tested at the receiver of the VLC system. Their convergence rates as well as impacts on the BER performances are investigated by determining the optimal control parameters of these algorithms. It is concluded that for the equalizer operating with its optimal parameters, the BER performances of the VLC systems are very sensitive to the field of view (FOV) values.

Keywords—Visible light communication, visible light channel modeling, iterative channel equalization, RLS, LMS.

I. GİRİŞ

Kablosuz optik haberleşme (optical wireless communications, OWC) sistemi görünür ışık ya da kızılötesi ışık frekanslarını kullanarak kablosuz veri iletimini sağlayan yeni

Bu çalışma 113E307 numaralı COST-TUBITAK projesi kapsamında desteklenmektedir.

bir teknolojidir. Özellikle, son yıllarda görünür ışıkla haberleşme (visible light communications, VLC) konusunda büyük gelişmeler yaşanmakta olup, ayrıca lisans kullanımı gerektirmeyen bir frekans bandında çalışabilme üstünlüğü VLC sistemlerini diğer haberleşme sistemlerine karşı güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkarmaktadır. Kapalı ortamlarda LED (light emitting diode)'ler kullanılarak gerçekleştirilen VLC sistemiyle ilgili bir çalışma [1]'de önerilmiştir. Araçlarla trafik ışıkları arasında ve evlerde var olan elektriksel güç hatlarını kullanarak optik iletişimin gerçekleştirilmesi [2] ve [3]'te önerilmiştir. Ayrıca, VLC sistemi kablosuz su altı haberleşmesinde de kullanılmaya başlanmıştır [4]. VLC tabanlı diğer bir çalışmada da verilen optik kanal ortamında LOS (direct görüş çizgisi) ve yansımalarından kaynaklanan simgelerarası girişim (ISI) durumu incelenmiş bunun için uyumlu denkleştiriciyle sistemin başarımın iyileştirilmesi sağlanmıştır [5]. LED'lerle ilgili önerilen diğer bir çalışmada ise, LED'in konum açısına göre veri iletimi değerlendirilmesi yapılmış ve karar geribeslemeli uyumlu süzgeç kullanılarak simgelerarası girişim en aza indirilmiştir [6].

Bu bildirinin temel amacı ve katkıları şöyle özetlenebilir. Öncelikle, fiziksel boyutları verilmiş dikdörtgen prizma şeklindeki içi boş bir oda ortamına yerleştirilmiş sayıları ve konumları belli LED'lerle alıcı tarafa yerleştirilen fotodetektör arasında oluşan optik kanalın modeli, ışın izleme (ray tracing) tekniğine dayalı bir kanal benzetim yazılımıyla elde edilmiştir. Daha sonra, bu kanal modeli üzerinden haberleşen bir VLC sisteminin alıcısının yüksek başarımla çalışabilmesi için en uygun denkleştirici (equalizer) tasarımı gerçekleştirilmektedir. Her ne kadar denkleştiriciler klasik elektriksel sayısal haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılamamakta iseler de, bunların optik ve özellikle VLC sistemlerine uygulamaları yenidir ve optik kanalların kendine has özellikleri nedeniyle tasarımlarında farklılıklar bulunmaktadır. Son olarak, tasarlanan denkleştirici ile çalışan bir VLC sisteminin bit hata başarımı, sinyal-gürültü oranına bağlı olarak incelenmekte ve özellikle LMS ve RLS algoritma tabanlı denkleştiricilerle çalışan VLC sistemleri için sistemin görüş açısına çok duyarlı olduğu ve iletişim hızlarının Gbit/s düzeylerine ulaşabildiği görülmektedir.

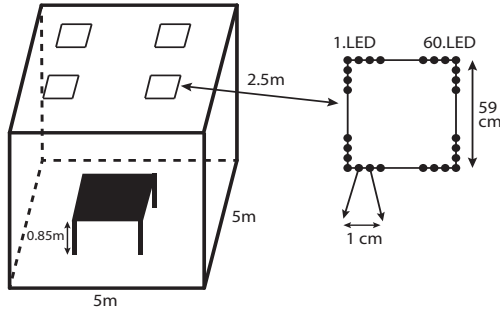
II. GÖRÜNÜR IŞIKLA HABERLEŞME VE KANAL MODELLERİNİN ÜRETİLMESİ

Görünür ışıkla haberleşme diğer optik haberleşme tekniklerine benzer şekilde, yoğunluk modülasyonlu ve doğrudan sezimli (IM/DD) iletim tekniğiyle çalışır. LED'ler tarafından üretilen anlık görünür ışık yoğunluğu, $I(t)$, bilgiyi taşıyan $x(t)$ sinyali ile doğru orantılı olarak modüle edilip, optik kanal ortamından iletilmektedir. Alıcıdaki fotodiyot ise gelen optik yoğunluklu sinyali algıladıktan sonra $y(t)$ ile gösterilen bir elektriksel akıma dönüştürür.

Tablo I: Simülasyon Parametreleri

Özellikler	Değerler
İletilen optik güç (P_t)	20 [mW]
Yarı-güç yarım açısı ($\Phi_{1/2}$)	70 [derece]
Merkezi ışık şiddeti ($I(0)$)	0.73 [cd]
LED sayısı	3600 (60x60)
LED aralığı	1 [cm]
LED aydınlatma boyutu	59x59 [cm]
Duvar yansımaya katsayısı (ρ)	0.8
Alıcı koordinatları	(0.1,0.1,0.85)
O/E yansımaya katsayısı (γ)	0.53
Alıcı FOV değeri	60 [derece]
Foto detektör yüzey alanı	1 [cm ²]
Süzgecin optik kazancı	1
Yansıtma katsayısı	1.5
Benzetim çözünürlüğü	0.2 [m]

Böyle bir VLC sisteminin başarımının incelenebilmesi için önce bir kapalı ortam görünür ışık kanalının modeli elde edilecektir. Bu amaçla 2.5 m yüksekliğe ve $5 \times 5 m^2$ alana sahip dikdörtgen prizma şeklinde bir oda göz önüne alınmış ve içerisinde sadece zeminin ortasına yerleştirilmiş 0.85 m yüksekliğinde bir masa olduğu varsayılmıştır. Odanın tavanına ise 4 grup LED paneli yerleştirilmiş olup her LED gurubu 3600 LED'den oluşmaktadır. Ayrıca, LED'ler aralarında 1 cm uzaklık olacak şekilde 60×60 tanesi karesel bir alan üzerine dizilmiş ve tavana simetrik olarak dağıtılmıştır. LED panellerinin merkezlerinin odanın R referans noktasına göre koordinatları (1.25, 1.25, 2.5), (3.75, 1.25, 2.5), (1.25, 3.75, 2.5), (3.75, 3.75, 2.5) metre olacak belirlenmiştir. Bilgisayar benzetim ortamı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Benzetim Ortamı

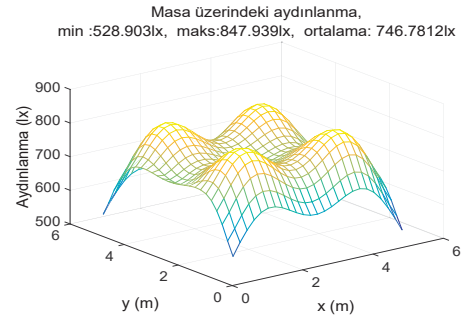
Kullanılan LED'lerin ve fotodiyotun özellikleri ile ortam parametreleri Tablo I'de özetlenmiştir. Odanın tavanındaki LED'lerden yayılan ışığın bilgisayarla benzetimini yapabilmek için odanın tabanı ve dört duvarını 0.2 m kenar uzunluğuna sahip karelere bölünmüş ve her bir kare benzetimi yapılan en küçük birim olarak değerlendirilmiştir. Böylece, odanın tabanı 25×25 tane ve her bir duvarı ise 13×25 tane kareden oluşmaktadır. Toplamda ise tüm hesaplamalar 1925 kare için yapılmıştır.

A. Parlaklığın hesaplanması

Birden fazla aydınlatma kaynağı tarafından oluşturulan ve odadaki masanın üzerine düşen direkt aydınlanma miktarı,

$$E_0 = \sum_{i=1}^{n_s} I(0) \cos^m(\phi_i) \cos(\psi) / d_i^2, \quad \text{Lux (lx)}$$

ilişkisinden hesaplanmıştır. Bu ilişkide n_s , toplam LED sayısını göstermektedir. Denklemden tüm ışık kaynaklarının belirli bir merkezi aydınlatma şiddetine ($I(0)$) sahip olduğu varsayılmaktadır. Masa üzerine düşen direkt aydınlanmayı hesaplamak için, taban yüzeyini oluşturan $25 \times 25 = 625$ adet kare alana düşen 14400 ışın için hesap yapılmış ve bu durumda masa üzerindeki direkt aydınlanma için 9×10^6 işlem gerçekleştirilmiştir. Dört duvara düşen direkt aydınlanma için ise $4 \times 13 \times 25 = 1300$ karesel alana düşen 14400 ışın için hesap yapılmış olup, bu da 181720000 sayıda işlem anlamına gelmektedir. Toplamda ise tüm yüzeye düşen direkt aydınlanma miktarı için 27720000 işlem yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda masa üzerinde oluşan toplam aydınlanma miktarının dağılımı Şekil 2'deki gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 2: Direkt ve birinci dereceden aydınlanma miktarları (lx)

Şekil 2'den görüleceği gibi, odanın en az aydınlanan bölümü 589.93 lx (lx)'lük ve en fazla aydınlanan bölümü ise 1023.48 lx 'lük bir aydınlanma düzeyine sahip olup, benzetim ortamının, ISO (International Organization for Standardization)'nun ofis ortamı için belirlediği, 300 lx - 1500 lx sınırları içinde olması koşulunu rahatlıkla sağladığı anlaşılmaktadır.

B. Alınan Işık Gücünün Hesaplanması

Masanın herhangi bir noktasına yerleştirilen ve özellikleri Tablo I'de verilen bir fotodiyot'a direkt olarak düşecek ışık gücü, H_0 , aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$H_0 = \begin{cases} \frac{A(m+1) \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi)}{(2\pi d^2)} & \text{eğer } 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{eğer } \psi > \psi_c. \end{cases}$$

Bu nedenle, masanın herhangi bir noktasına yerleştirilen ve alıcıya gelen direkt ışığın toplam gücü, $P_d = \sum_{i=1}^{n_{LED}} P_t H_{0,i}$ olmaktadır.

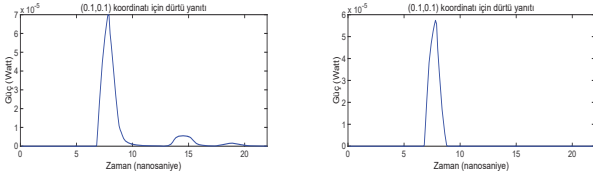
C. Görünür Işık Kanal Dürtü Yanıtının Hesaplanması

Görünür ışık kanalının dürtü yanıtının hesaplanması için, alıcının yerleştirildiği noktaya bütün LED'lerden gelen direkt ve birinci dereceden yansımalar ile tüm ışınların bu noktaya erişme süreleri ve alıcıya erişen güçler belirlenmelidir. Bu çalışmamızda, tavanın ortasına yerleştirilen 14400 LED'den yayılan direkt ışınlar toplam 1300 küçük kareye bölünmüş olup, masa üzerinden ve dört duvardan yansıldıktan sonra alıcıya yönelmektedir. Dolayısıyla, $1300 \times 14400 = 18720000$ sayıda ışın yansımaya yoluyla alıcıya ulaşmaktadır. Bu durumda her bir vericinin gönderdiği toplam 18734400

ışın demetinin oluşturduğu ışık gücü kanal dürtü yanıtına katkı sağlamaktadır. Bu katkılardan yararlanarak kanal dürtü yanıtı,

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

ilişkisinden bulunur. Masa üzerinde (0.10.10.85) metre koordinatına yerleştirilen 60°'lik görüş açısına sahip bir fotodiyot ile elde edilen görünür ışık kanalının kanal dürtü yanıtı Şekil 3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3: 60° FOV için sırasıyla, yansımalarından oluşan kanal dürtü yanıtı ve 1. dereceden yansısız kanal dürtü yanıtı

III. VLC İÇİN UYUMLU KANAL DENKLEŞTİRİCİ TASARIMI

Görünür ışıkla haberleşme sistemlerinin tasarımında, alıcılardaki kanal denkleştirme sürecinin yüksek doğrulukla gerçekleşmesi büyük önem taşımaktadır. Kanal denkleştirme işlemi, esas olarak alınan verinin bir takım özelliklerinden faydalanılarak kanalın tersinin elde edilmesiyle kanalın sinyale ve sinyalin frekans spektrumuna uyumlu bir hale getirilmesi sürecidir. Bu amaçla, kablolu elektriksel haberleşme sistemlerinde kanal denkleştirici tasarımı için literatürde çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu algoritmalarından hangisinin VLC sistemi için daha uygun olduğu araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Literatürde kanal denkleştirme amacıyla kullanılan en etkili yöntem 'karar geri beslemeli' denkleştiricidir (Decision Feedback Equalizer, DFE). DFE, önce iletilen ve alıcın bildiği bir takım eğitim simgelerinden (training symbols) yararlanarak, gelecekteki simgelerin oluşturacağı girişimin kestirilmesi prensibine dayanmaktadır. Daha sonra, iletilen veri simgelerinin sezimleri (detection) sırasında, alıcı sinyalini etkileyen bu girişimler çıkartılarak iletilen veri simgesinin daha doğru sezilmesi sağlanmaktadır. Girişime y_k gürültülü giriş sinyalinin uygulandığı ileri yönlü beslemeli süzgeç, genellikle bir doğrusal transversal denkleştirici (Linear Transversal Equalizer, LTE) yapısıdır. Geri beslemeli süzgeç ise, girişine daha önce karar verilmiş olan ve d_k ile gösterilen simgelerin uygulandığı ve karar verilecek olan simge üzerinde oluşturdukları girişimi ortadan kaldırmakla görevli yine bir transversal süzgeç yapısıdır. Bu süzgeçlerin, N_{FB} adet geri besleme ve $N_{FF} + 1$ adet ileri besleme katsayısı vardır. Böyle bir denkleştiricinin giriş-çıkış ilişkisini gösteren denklem aşağıdaki şekildedir,

$$\hat{d}_k = \sum_{i=0}^{N_{FF}} y_{k-i} c_i + \sum_{i=1}^{N_{FB}} d_{k-i} F_i$$

Bu denklemde c_i ve F_i katsayıları, denkleştirme hatasını en küçükleyecek biçimde belirlenir. En küçükleme aşaması uygulamada eğitim tabanlı ve en küçük kareler tabanlı algoritmalar olarak iki farklı yaklaşımla belirlenir. DFE süzgecinde kullanılan ileri yönlü ve geri yönlü süzgeç katsayıları $\mathbf{w} = [c_0, c_1, \dots, c_{N_{FF}}, F_1, F_2, \dots, F_{N_{FB}}]^T$

vektörleriyle ve yine ileri ve geri yönlü girişler $\mathbf{Y}_k = [y_k, y_{k-1}, \dots, y_{k-N_{FF}}, d_{k-1}, d_{k-2}, \dots, d_{k-N_{FB}}]^T$ vektörleriyle gösterilirse, n . iterasyon adımında *enküçük ortalama kareler* (Least-mean square, LMS) algoritması kullanıldığında süzgeç katsayıları aşağıdaki ilişkilerden hesaplanır.

$$\begin{aligned} \hat{d}_k &= \mathbf{w}(n)^T \mathbf{Y}_k, \\ e_k(n) &= d_k(n) - \hat{d}_k, \\ \mathbf{w}(n+1) &= \mathbf{w}(n) + \mu e_k(n) \mathbf{Y}_k. \end{aligned} \quad (1)$$

LMS algoritmasının optimum parametre değerlerine daha kararlı yakınsayabilmesi için μ adım parametresi $0 < \mu < 2/\lambda_{max}$ aralığında seçilmelidir. Burada λ_{max} korelasyon matrisinin en büyük özdeğeridir.

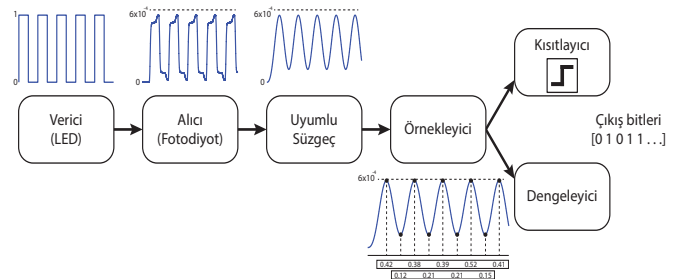
Diğer taraftan, *Rekürsif Enküçük Kareler* (recursive least squares, RLS) algoritması, katsayılarının iteratif olarak belirlendiği uyumlu bir denkleştirme yöntemidir. Algoritma çok hızlı bir yakınsama sağlarken bunun bedelini algoritmanın hesaplama karmaşıklığındaki büyük artışla ödemektedir. RLS algoritmasını gerçekleştiren iteratif denklemler aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(n) &= \mathbf{P}(n-1) \mathbf{Y}_k \\ \mathbf{k}(n) &= \frac{\mathbf{S}(n)}{\beta + \mathbf{Y}_k^T \mathbf{S}(n)} \\ \xi(n) &= d(n) - \mathbf{w}^T(n) \mathbf{Y}_k \\ \mathbf{w}(n) &= \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n) \xi(n) \\ \mathbf{P}(n) &= \beta^{-1} \mathbf{P}(n-1) - \beta^{-1} \mathbf{k}(n) \mathbf{Y}_k^T \mathbf{P}(n-1). \end{aligned} \quad (2)$$

Bu rekürsif algoritmanın çalışabilmesi için \mathbf{w} ve \mathbf{P} değişkenlerinin başlangıç değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Genellikle, $\mathbf{w}(0) = \mathbf{0}$ ve $\mathbf{P}(0)$ ise köşegen ve elemanları sıfırdan farklı bir matris şeklinde alınarak iterasyona başlanır. Denklemde geçen β *unutma katsayısı* (forgetting factor), RLS algoritmasının bir parametresi olup, hesaplama karmaşıklığı ile sistemin stabilite ve doğruluk değerleri arasında ödünleşim oluşturmaktadır.

IV. BILGISAYAR BENZETİMLERİ

Bu bölümde blok şeması Şekil 4'te verilen bilgisayar benzetimlerinde var-yok anahtarlama (on-off keying, OOK) modülasyonu ile iletilen bilgi simgeleri önceden elde edilen kanal dürtü tepkisine sahip gerçek bir görünür ışık kanalından geçirildikten sonra VLC sisteminin alıcısına ulaşır. Alıcıda, optik/elektrik sinyal dönüşümü, demodülasyon, denkleştirme



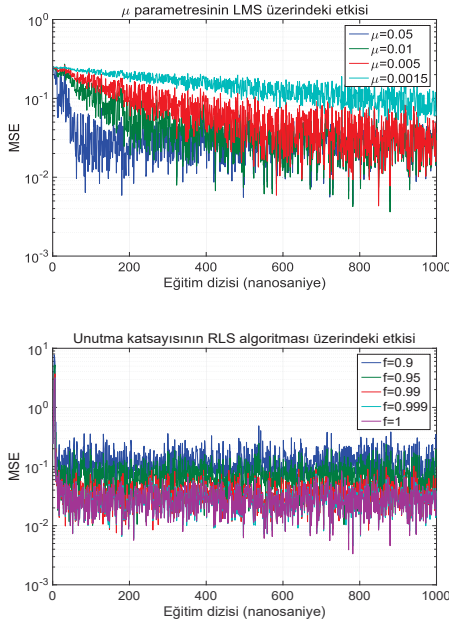
Şekil 4: Sistem Blok Diyagramı

ve veri sezimi işlemlerinden sonra iletilen bilgi simgeleri ortamın sinyal-gürültü oranına bağlı olarak belli bir hata olasılığıyla sezilir. Alıcıda kullanılan uyumlu denkleştiricide, önce vericiden iletilen eğitim örnekleri (training samples) yardımıyla süzgeç parametreleri kestirilir. Daha sonra,

denkleştirici çıkışında sezilen simgeler kullanılarak süzgeç parametrelerinin güncellenmesine sürekli olarak devam edilir.

A. LMS ve RLS Algoritmalarında parametrelerin etkisi

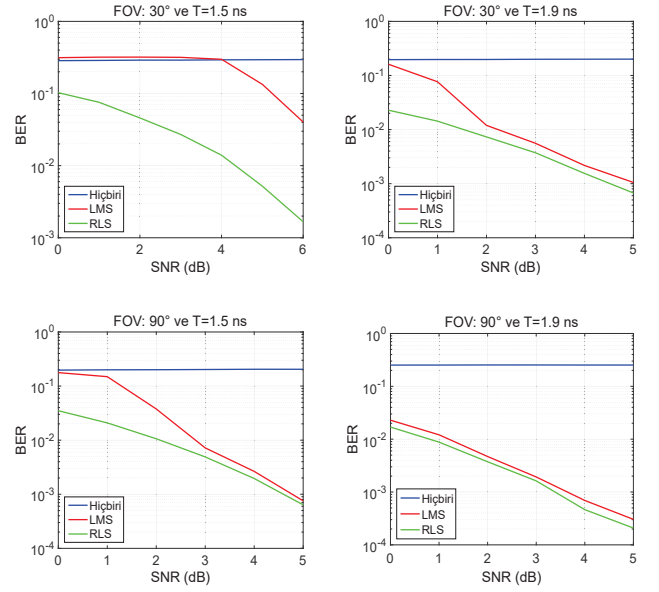
Bilgisayar benzetimlerimizde LMS'in μ katsayısı ampirik olarak farklı değerler için test edilmiş ve en uygun değerinin 0.05 olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde RLS algoritması için bilgisayar benzetim çalışmalarımızda unutma katsayısı (β)'nin optimal değeri 1 olarak belirlenmiştir. Şekil 5 ve 6'da bu iki algoritmanın yakınsaklık hızları farklı parametre değerleri için elde edilmiştir. Benzetimler, $T = 10$ ns, $SNR = 0$ dB ve $FOV = 60^\circ$ değerleri seçilerek yapılmıştır. Şekil 5'te LMS algoritmasının Şekil 6'da ise RLS algoritmasının yakınsaklığı başarımları görülmektedir. Şekillerden açık olarak RLS'nin LMS'ye göre çok daha hızlı yakınsadığı ve yaklaşık 20 nano-saniyede yakınsama sürecinin başarılı olduğu görülmekte olup, LMS yönteminin ise yakınsama için en iyi μ değerinde bile yaklaşık 100 nano-saniyelik bir eğitim dizisine gereksinim duyduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5: Kontrol parametreleri μ ve β 'nin LMS/RLS üzerindeki etkisi

B. SNR'a göre BER'in farklı FOV ve T değerleri için incelenmesi

Bu bölümde yapılan bilgisayar benzetim çalışmaları, VLC sistemine ilişkin alıcının 30° ve 90° FOV değerlerine göre çalıştığı ve iletilen veri simgelerinin sürelerinin $T = 1.3$ ve 1.9 nano-saniye değerlerini aldığı varsayılmıştır. Sinyaller 0.5 dB aralıklarla 0 ile 5 dB arasında bir SNR oluşturacak şekilde gürültü eklenmiştir. Benzetimlerde gürültü sinyalleri üretilirken darbe (shot) ve ısı gürültüleri aynı biçimde Gauss dağılımı ile modellenmiştir. Üretilen sinyaller, herhangi bir denkleştirici olmadan, LMS ile ve RLS ile ayrı ayrı süzülerek VLC sisteminin bit hata başarımları (BER) elde edilmiştir ve sonuçlar Şekil 6'da özetlenmiştir. Bu şekillerden, alıcıda kullanılan denkleştiricinin ve dolayısıyla sistemin BER başarımının alıcı ve verici arasındaki FOV değerlerine çok duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6: LMS, RLS ve denkleştirici olmadan elde edilen BER başarımları

V. SONUÇLAR

Bu bildiride kapalı ortam görünür ışıkla haberleşme kanallarının ardışıl olmayan ışın izleme tekniğiyle modellenmesi için hesaplama karmaşıklığı düşük bir yöntem teklif edilmektedir. Sistemin alıcısında oluşan optik güç ve sinyal gecikme değerleri hesaplanarak buradan kanalın kanal dürtü yanıtı elde edilmektedir. Alıcının FOV açısının dar olması ile yansımaların gelen ışıkları alamamasından dolayı daha iyi bir dürtü tepkisi oluşturduğu, ancak dik gelen ışığın yeterince güçlü olamaması durumunda kanal dürtü tepkisinin kötü yönde etkilendiği sonucuna varılmaktadır. Diğer taraftan VLC sisteminin alıcı tarafında kullanılan iteratif yapıdaki iki kanal denkleştirme algoritması olan LMS ve RLS, gerek sistemin bit hata oranı (BER) ve gerekse algoritmaların yakınsama hızları açısından incelenmekte ve bu algoritmaların sistem parametrelerine göre ne kadar duyarlı olduğu belirlenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 100–107, Feb. 2004.
- [2] S. Iwasaki, C. Premachandra, T. Endo, T. Fujii, M. Tanimoto, and Y. Kimura, "Visible light road-to-vehicle communication using high-speed camera," in *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pp. 13–18, June 2008.
- [3] I. Rust and H. Asada, "A dual-use visible light approach to integrated communication and localization of underwater robots with application to non-destructive nuclear reactor inspection," in *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 2445–2450, May 2012.
- [4] T. Komiyama, K. Kobayashi, K. Watanabe, T. Ohkubo, and Y. Kurihara, "Study of visible light communication system using rgb led lights," in *SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings of*, pp. 1926–1928, Sept. 2011.
- [5] D. Tronghop, J. Hwang, S. Jung, Y. Shin, and M. Yoo, "Modeling and analysis of the wireless channel formed by led angle in visible light communication," in *Information Networking (ICOIN), 2012 International Conference on*, pp. 354–357, Feb. 2012.
- [6] D. Rawat, C. Mukesh, A. Kumar, and J. Sumit, "Comparison and simulation of adaptive equalizer of lms, rls algorithm using matlab," *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, vol. 2, pp. 67–79, Mar.-Apr. 2013.