



OFDM SİSTEMLERİNDE KANAL KESTİRİMİ İÇİN YENİ BİR UYARLAMALI PİLOT YERLEŞİM ALGORİTMASI

¹Fatih AYVENLİ^{ID}, ²Çetin KURNAZ^{ID}

^{1,2}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

¹fatih.ayvenli@omu.edu.tr, ²ckurnaz@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 21.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.09.2021)

ÖZ: Çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerinden biri olan dikgen frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) sistemi, bant genişliğini etkin kullanarak yüksek hızlı veri haberleşmesine olanak sağlaması ve yankı gecikmelerine karşı dayanıklılığı nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. OFDM sisteminde gezgin iletim kanalının bozucu etkileri alıcıda kanal kestirimi yapılarak azaltılabilir. Bu çalışmada OFDM sistemi için kanalın yapısına göre uyarlamalı olarak değişebilen yeni bir pilot yerleşimli kanal kestirim algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma kanalın derin sönümlenmelerinin olduğu bölgelere daha sık pilot yerleştirilmesi temeline dayanmaktadır. Benzetim sonuçlarından, önerilen uyarlamalı kanal kestirim algoritmasının klasik kanal kestirim algoritmalarına göre daha iyi sonuç verdiği ve bit hata oranı (BHO) başarımında 11.6 dB'e varan bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Ayrıca literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada frekans düzleminde pilot sıklığının artırılacağı bölgelerin eşik seviyesini belirlemek için yeni bir matematiksel ifade önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: OFDM, Kanal kestirimi, Düzensiz pilot yerleşimi, Gezgin iletim kanalı.

A Novel Adaptive Pilot Placement Algorithm for Channel Estimation in OFDM Based Systems

ABSTRACT: The orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, which is one of the multi-carrier communication systems, has been widely used due to its ability to provide high-speed data communication using bandwidth effectively and its resistance to echo delays. In OFDM system, the disturbing effects of the wireless communication channel can be reduced by estimating the channel in the receiver. In this study, a novel channel estimation method with a pilot placement algorithm which can adaptively change according to the structure of the channel is proposed for the OFDM system. The proposed algorithm is based on placing the pilot signals more frequently in the regions with deep fading of the channel. From the simulation results, it is seen that the proposed adaptive channel estimation algorithm gives better results than the classical channel estimation algorithms, and provides an improvement of up to 11.6 dB in bit error rate (BHO) performance. In addition, unlike the studies in the literature, a new mathematical expression is proposed in the last part of the study to determine the threshold level of the regions where the pilot frequency will be increased in the frequency domain of channel.

Key Words: OFDM, Channel estimation, Irregular pilot placement, Mobile radio channel

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerinden biri olan dikgen frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) sistemi bant genişliğini etkin kullanması yüksek hızlı veri

haberleşmesine olanak sağlaması ve yankı gecikmelerine karşı dayanıklılığundan dolayı pek çok kablosuz haberleşme sisteminde kullanılmaktadır. OFDM sisteminde, yüksek bit hızlı veri daha düşük hızlı veriye dönüştürülerek sembol süresi uzatılır. Paralel veriye dönüştürülen her bir veri/sembol farklı bir alt taşıyıcı kullanılarak iletim kanalına iletilir. Alt taşıyıcı sayısı arttıkça sembol süresi en yüksek yankı gecikmesinden daha büyük olacağından semboller arası girişim (inter symbol interference, ISI) azaltılmış olur (Nee ve Prasad, 2000). Gezgin iletim kanalı zaman ve frekansta seçicilikli olduğundan kanaldan geçen veri alıcıya bozulmuş olarak ulaşır (Tang ve dig., 2007). Kanalin zaman ve frekans karakteristikleri bilindiğinde kanalın bozucu etkisi alıcıda düzeltilip verinin hatalı algılanma olasılığı azaltılır (Nee ve Prasad, 2000). OFDM sistemlerinde bit hata oranını (BHO) düşürmek için alıcıda demodülasyon aşamasından önce kanal kestirimini gerçekleştirilir. OFDM sisteminde kanal kestirim yöntemleri temel olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar; pilot tabanlı, kör ve yarı-kör kanal kestirim yöntemleridir. Pilot tabanlı kanal kestirim yöntemlerinde değeri bilinen bitler (pilot işaretler) iletilen sinyalin içine belirli aralıklarla yerleştirilir ve alıcıda bilinen değerleri ile karşılaştırılarak kanalın frekans karakteristiği elde edilir. Vericiden gezgin iletim kanalına gönderilen sinyal kanaldan geçerken pilot ve veri işaretlerini taşıyan bazı alt taşıyıcılar derin sönümlenmeye maruz kalırlar. Bu durumda derin sönümlenme aralıkları iyi kestirilemez ve bitlerin hatalı algılanma olasılığı yani BHO artar. Kanal kestirim doğruluğunu artırmak için pilot sembollere (bitlere) karşılık gelen alt taşıyıcılar yeterli sıklıkta konumlandırılır. Diğer bir ifadeyle, pilot sembol sıklığı, iletim bandını etkin kullanacak ve aynı zamanda hatalı kanal kestiriminden kaynaklı BHO artışını en aza indirecek şekilde seçilir. Pilot tabanlı yöntemlerde bant genişliğinin belirli bir kısmı pilot işaretlere ayrıldığı için tayfsal verimlilikte azalma olmaktadır. Bu azalmanın önüne geçebilmek adına yalnızca alınan veri sembollerinden yararlanılarak kanal tahmini yapabilen kör kanal kestirim yöntemleri geliştirilmiştir (Leus ve Van der Veen, 2005). Tayfsal verimliliği artırmasına karşın kör kanal kestiriminde kestirim doğruluğu pilot tabanlı yöntemlerden daha düşüktür. Ayrıca, kör kanal kestiriminde pilot yöntemlere göre işlem yükü daha fazladır (Petropulu ve dig., 2004). Kör kanal kestiriminde kestirim yapılabilmesi için birkaç veri bloğunun alıcıya ulaşmış olması da gerekmektedir (Shin ve dig., 2007). Yarı-kör kanal kestiriminde, sadece pilot dizileri kullanmak yerine, bilinmeyen veri sembollerindeki bilgi de kullanılır. Bu yaklaşımla, kanal kestirim doğruluğunu artırma ya da kestirimi aynı doğrulukla elde etmek için daha az sayıda pilot işaret kullanma olanağı vardır. Bunun yanında az sayıda eğitim dizisi kullanmak kanal kestirim kalitesini kör kanal kestirim yöntemine göre artırmaktadır.

Literatürde OFDM sistemleri için kanal kestirimi üzerine yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir: (Song ve Lim, 2003)'de OFDM sistemlerinde hızlı değişen bir kanal durumu için kanal ara değerlendirmesini kullanan yeni bir pilot tabanlı tahmin şeması önerilmiştir. (Simeone ve dig., 2004)'de OFDM sistemi için hızlı sönümlenmeli kanallar için alt boşluğa dayalı (subspace-based) yeni bir kanal tahmin yöntemi önerilmiştir. (Raghavendra ve dig., 2007)'de OFDM sistemleri için düzensiz yerleştirilmiş pilotlara uygulanabilen parametrik bir kanal kestirim yöntemi önerilmiştir. (Zhao ve dig., 2008)'de OFDM sistemlerinin yukarı hat (uplink) kanalı için düzensiz pilot yerleşimi kullanarak parametrik kanal kestirimi yapılmıştır. (Panah ve dig., 2008)'de kapalı döngü OFDM sistemleri için düzensiz pilot tabanlı, geri beslemeli kanal kestirim yöntemi önerilmiştir. (Panah ve dig., 2008)'de önerilen yöntem ile kanal kazancının alıcıda bilinmesi gerekmez, pilot sembollerin konumları optimize edilmiştir. (Han ve dig., 2010)'da OFDM sistemlerinde kanal tahmini için Doppler frekans kayması tahminine dayalı uyarlamalı olarak pilot sinyalleri gönderen düşük karmaşıklığa sahip uyarlanabilir bir pilot sistem yapısı önerilmiştir. (Fertl ve Matz, 2010)'de düzensiz pilot yerleşiminin kanal kestirim başarımına etkisini incelemek amacıyla düşük hesaplama karmaşıklığına sahip eşlenik gradyan yinelemeli kanal kestirimcisi önerilmiştir. (Vithanage ve dig. 2010)'da OFDM sistemlerinde iletimden önce pilot yerleştirme için modifiyeli ayrık stokastik yaklaşım kullanılmıştır. (Sung ve dig, 2010)'da OFDM AF (amplify and forward, güçlendir ve ilet) röle bağlantıları için geri beslemeli pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde her pilot sembolü ile en kötü veri sembolü arasında yinelemeli değişim yapılmıştır. (Sung ve dig, 2011)'de (Sung ve dig, 2010)'daki çalışmaya ek olarak alt taşıyıcı eşlemesi yapılmıştır. (Wu ve dig, 2011)'de iki yönlü OFDM röle bağlantıları için geri beslemeli pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. Yinelemeli pilot yerleştirme ile pilot sembollerle en kötü veri alt taşıyıcıları arasında

değişim yapılmıştır. (Kurnaz ve dig., 2012)'de tarak tipi kanal kestiriminde pilot sembol yerleşiminin OFDM sistem başarımına etkisi incelenmiş ve pilot alt taşıyıcılar arasındaki mesafe ile kanalın frekans seçiciliği ilişkilendirilmiştir. (Sung ve dig., 2012)'de OFDM AF röle kanalları için geri beslemeli pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. Pilot alt taşıyıcılarının, minimum efektif sinyal gürültü oranına (signal to noise ratio) sahip veri alt taşıyıcılarıyla değiştirilme esasına dayanan IterPR yöntemi önerilmiştir. (Cheng ve dig., 2013)'de en iyi pilot yerleşimini belirlemek için çapraz entropi optimizasyonu önerilmiştir. (Engiz ve dig., 2013)'de OFDM sistemlerinde farklı zaman ve frekans seçicilikli kanallar için kanal kestirim ortalama karesel hatasını en küçük yapan en uygun pilot aralığı belirlenmiştir. (Steendam, 2013)'de düşük MSE'ye (mean squared error) sahip pilot yerleşiminin bulunması için iki adet sezgisel algoritma önerilmiştir. (Jency ve Gladwin, 2014)'de pilot yerleşiminin kanal kestirimi üzerindeki etkisini incelenmiştir. Tırmanma algoritması kullanılarak optimize edilmiş pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. (Engiz ve dig., 2015)'de OFDM sistemlerinde kanal kestirim kalitesini ve bant genişliği etkinliğini artırmak amacıyla uyarlamalı (adaptif) pilot yerleşimi ve optimum pilot aralığı için matematiksel bir ifade önerilmiştir. (Nan ve dig., 2015)'de optimum pilot yerleşimine ulaşmak için blok bağdaşımı tabanlı iki yöntem önerilmiştir. (Kurnaz ve dig., 2017)'de OFDM sistemlerinde düzensiz pilot yerleşiminin kanal kestirimi başarımına etkisini BHO cinsinden incelenmiştir. (Lee ve dig., 2018)'de derin sinir ağları tabanlı kapalı döngü düzensiz pilot yerleştirme yöntemi önerilmiştir. (Li ve dig., 2018)'de tayfsal verimliliği artırmak amacıyla pilot pozisyonlarının ekstra bilgi işaretlerine göre seçildiği bir yöntem önerilmiştir. (Gu ve dig., 2019)'da sanal alt taşıyıcılar düşünülerek ayrık Fourier dönüşümü yumuşatma filtrelemesinin kullanıldığı OFDM sistemlerinde kullanılacak evrensel bir kanal tahmin algoritması önerilmiştir. (Cho ve Ko, 2020)'de sualtı akustik iletişimi OFDM sistemleri için uyarlamalı gürültü azaltmaya dayalı yeni bir kanal tahmincisi önerilmiştir.

Literatürdeki bu çalışmaların büyük bir kısmı ortalama kare hatasını (mean square error, MSE) hatasını en aza indirmeyi amaçlamıştır. Kanal tahmininin ortalama kare hatasını (OKH) düşük olması BHO'nun azaltılması için her zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada OKH'ye bakılmaksızın BHO iyileştirilmeye çalışılmış ve üç tür kanal kestirim algoritması üzerinde durulmuştur. Birinci algoritma pilot semboller frekans bandında eşit aralıklarla yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır (düzenli pilot yerleşimi). İkinci algoritma pilotların frekans bandına düzensiz olarak yerleştirilmesidir. Bu yöntemde pilotlar kanalın frekans yanıtındaki yerel maksimum ve minimum noktalarına yerleştirilmektedir (düzensiz pilot yerleşimi). Üçüncü ve bu çalışmada önerilen algoritma ise geri beslemeli uyarlamalı bir yapı kullanılarak kanalın derin sönümlemeye uğradığı kısımlarda pilot sıklığının artırılmasıdır. Kanalın yüksek kazançlı alt taşıyıcılarının olduğu noktalar mümkün olduğunca veri işaretlerine ayrılarak iletim kanalının etkin bir şekilde kullanılması ve derin sönümlenmelerin olduğu noktalara daha sık pilot semboller yerleştirilerek veri işaretlerinin hatalı algılanma olasılığının azaltılması amaçlanmıştır.

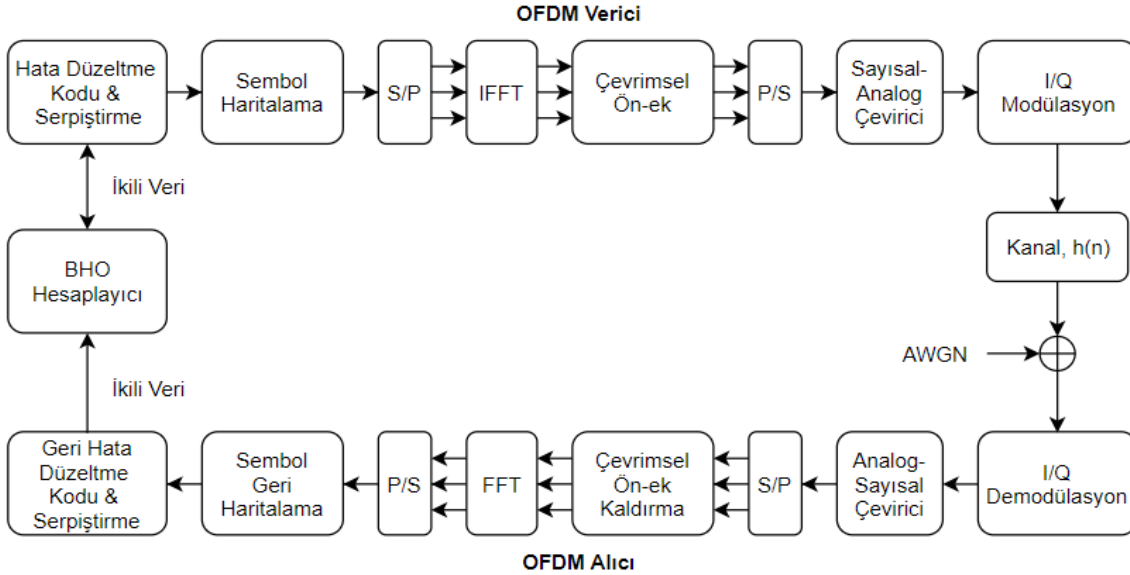
MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada önerilen geri beslemeli uyarlamalı kanal kestirim algoritması ile düzenli ve düzensiz pilot tabanlı algoritmaların sistem başarımlarını incelemek için MATLAB programlama dili kullanılarak bir OFDM benzetimcisi oluşturulmuştur. OFDM sistem modeli, pilot tabanlı kanal kestirim algoritmaları, önerilen OFDM sistem modeli, pilot konumlarının belirlenmesi, benzetimlerde kullanılan kanal profilleri ve benzetim parametrelerine ait ayrıntılı açıklamalar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

OFDM Sistem Modeli (OFDM System Model)

Benzetimlerde kullanılan OFDM sistem modeli Şekil 1'de verilmiştir. Sistemin çalışması kısaca şu şekildedir: ilk adımda ikili giriş verisine hata kodlaması ve serpiştirme uygulanarak sistemin hatalara karşı dayanıklılığı artırılır. Daha sonra veri bitleri BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) vb. modülasyon şemalarına göre sembolere haritalanır. Seri paralel dönüşümü (S/P) yapılan veriye Ters Fourier Dönüşümü (IFFT)

uygulanarak her bir sembol bir alt taşıyıcı üzerine modüle edilir. Semboller arası girişimi azaltmak amacıyla sinyale tampon zamanı (guard interval) süresince çevrimsel ön-ek (cyclic prefix) eklenir. Sayısal-analog çevrimi yapılan sinyal kanala gönderilmek üzere yüksek frekansa modüle edilir. Verici kısmında yapılan bütün işlemlerin alıcıda tersi yapılarak ikili veri tekrardan elde edilir. Verici kısmında iletilen veri ile alıcıda alınan veri karşılaştırılarak BHO değeri hesaplanır.



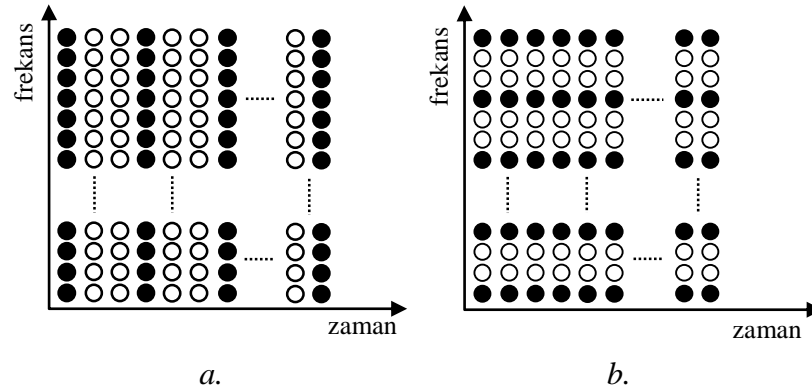
Şekil 1. OFDM sistem modeli

Figure 1. OFDM system model

OFDM Sisteminde Pilot Tabanlı Kanal Kestirimi (Pilot Based Channel Estimation in OFDM System)

Pilot tabanlı kanal kestirimi, pilot işaretlerin tüm alt taşıyıcılara belirli bir aralık (periyot) ile (blok tip, block type) veya her bir OFDM sembolüne yerleştirilmesiyle (tarak tip, comb type) gerçekleştirilir. Alternatif bir yöntem olarak (dikdörtgensel, rectangular) pilot işaretler hem zamanda hem de frekans düzleminde belirli aralıklarla yerleştirilebilir. Blok-tip ve tarak-tip pilot yerleşimine örnek Şekil 2'de verilmiştir. Blok tip kanal kestirimi daha çok yüksek frekans seçicilikli kanallarda kullanılırken, tarak tip kanal kestirimi ise daha çok zamanda hızlı sönümlenmeli kanal durumlarında kullanılır. Bu kestirim yöntemlerinde pilot ve veri alt taşıyıcılarındaki değerinin kestirilmesi gerekir. N_p pilot sinyalleri $[X_p(m), m=0, 1, \dots, N_p-1]$ $X(k)$ 'nin içine düzenli bir biçimde yerleştirilir (Hsieh ve dig., 1998). Bu işlemle N alt taşıyıcı her biri ardışık $L=N/N_p$ tane alt taşıyıcı içeren N_p tane gruba bölünür. Her bir grupta ilk alt taşıyıcı pilot sinyali iletmek için kullanılır. OFDM sinyalinin k . alt taşıyıcıdaki değeri (1) eşitliğindeki gibi tanımlanır [2].

$$X(k) = X(mL + \ell) = \begin{cases} X_p(m), & \ell = 0 \\ X_v(m), & \ell = 1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (1)$$



Şekil 2. (a) Blok tip, (b) Tarak tip pilot yerleşimi (● pilot, ○ veri)
Figure 2. (a) Block, (b) Comb type pilot placement (● pilot, ○ data)

Her bir alt kanal (taşıyıcı) veri işaretlerini veya pilot işaretleri iletir. H_p pilot alt kanalı, H_v veri alt kanalı olmak üzere kanalın tepkisi (2) eşitliğindeki gibi yazılır.

$$H(k) = H(mL + \ell) = \begin{cases} H_p(m), & \ell = 0 \\ H_v(m), & \ell = 1, 2, \dots, L - 1 \end{cases} \quad (2)$$

Bu durumda alınan pilot işaretler ile veri işaretleri sırasıyla (3) ve (4) eşitliklerindeki gibidir.

$$Y_p(m) = H_p(m) X_p(m) + W(m) \quad (3)$$

$$Y_v(mL + \ell) = H_v(mL + \ell) X_v(mL + \ell) + U(mL + \ell) \quad (4)$$

Burada $W(m)$ ve $U(mL + \ell)$, sırasıyla pilot ve veri alt taşıyıcılardaki Gauss gürültüsünü göstermektedir.

Pilot tabanlı kanal kestiriminde pilot alt taşıyıcılardaki değerler en küçük kareler (least squares, LS) veya en düşük ortalama kare (minimum mean square, MMSE) algoritmaları ile belirlenebilir. LS kanal kestirim tekniği, uygulamadaki basitliği ve kanalın herhangi bir istatistiksel bilgisine ihtiyaç duymaması nedeniyle sıklıkla kullanılır. MMSE kanal kestirim algoritması, kanal istatistikleri ile gürültü varyansı hakkında önceden bilgiye ihtiyaç duymasına ve LS kanal tahmin tekniğinden daha karmaşık olmasına rağmen, özellikle düşük SGO değerleri için BHO ve OKH başarımları açısından LS kanal tahmin algoritmasından çok daha iyidir (Patil ve Jadhav, 2014; Singh ve Bansal, 2016; Souleymane ve dig., 2016; Ami Munshi ve Unnikrishnan, 2021).

Kanalın pilot frekanslardaki değeri LS algoritmasıyla (5) eşitliğindeki gibi hesaplanır (Hsieh ve dig., 1998).

$$\hat{H}_p^{LS}(m) = \frac{Y_p(m)}{X_p(m)}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N_p - 1) \quad (5)$$

Burada X_p iletilen pilot işaretleri, Y_p alınan pilot işaretleri, N_p pilot işaret sayısını, m pilot alt taşıyıcının indisini göstermektedir.

OFDM sisteminde alıcı kısmında tampon zamanı kaldırıldıktan sonra alınan sinyal matris formunda aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$Y = XFh + W \quad (6)$$

Burada,

$$X = \text{diag}\{X(0), X(1), \dots, X(N-1)\}$$

$$Y = [Y(0) Y(1) \dots Y(N-1)]^T$$

$$W = [W(0) W(1) \dots W(N-1)]^T$$

$$H = [H(0) H(1) \dots H(N-1)]^T = \text{DFT}_N\{h\}$$

$$F = \begin{bmatrix} W_N^{00} & \dots & W_N^{0(N-1)} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ W_N^{(N-1)0} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}$$

$$W_N^{nk} = \frac{1}{N} e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}$$

Eğer zaman düzlemi kanal vektörü (h) Gaussian ve kanal gürültüsü (W) ile ilişkisiz ise MMSE kanal kestirim ifadesi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir (Edfors ve dig., 1998).

$$\hat{H}_{\text{MMSE}} = FR_{hY}R_{yy}^{-1}Y \quad (7)$$

$$R_{hY} = E\{hY\} = R_{hh}F^HX^H \quad (8)$$

$$R_{YY} = E\{YY\} = XFR_{hh}F^HX^H + \sigma^2I_N \quad (9)$$

Burada, R_{hY} h ve Y arasındaki çapraz kovaryans matrisi, R_{YY} Y 'nin oto-kovaryans matrisi, R_{hh} h 'nin oto-kovaryans matrisi, σ^2 gürültünün varyansını ($E\{|W(k)|^2\}$) göstermektedir.

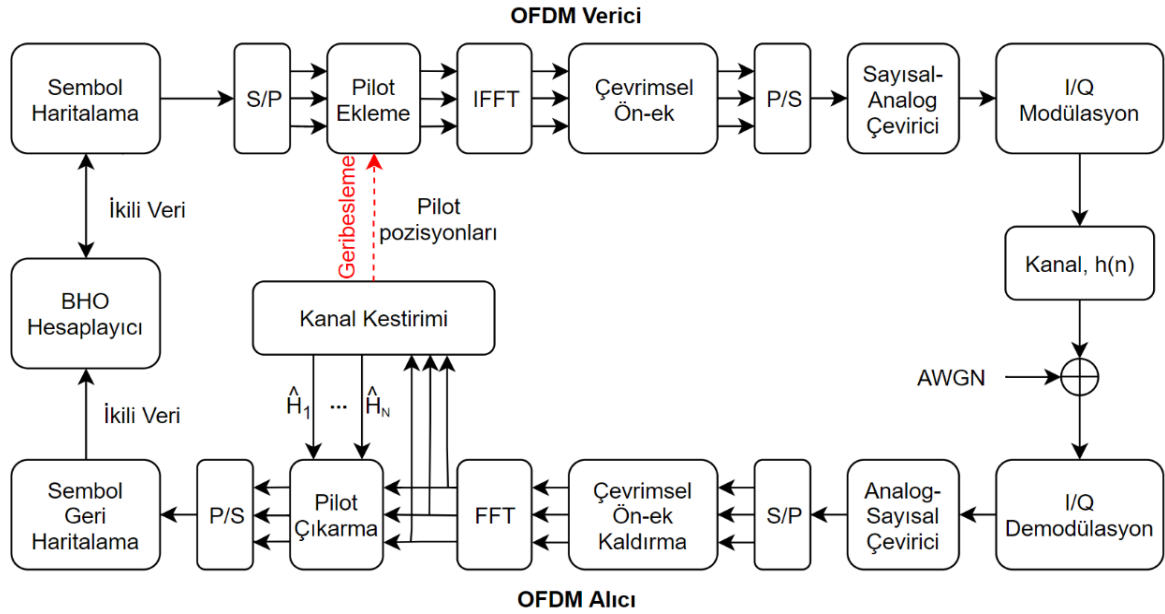
Kanalın veri alt taşıyıcılarındaki değerini kestirmek için lineer, spline, kübik, alçak geçiren gibi pek çok farklı ara değerlendirme algoritmaları kullanılabilir (Coleri ve dig., 2002). Literatürde OFDM sisteminde ara değerlendirme algoritması başarımını artırmak için geliştirilmiş birçok çalışma da bulunmaktadır (Acar ve dig., 2016; Acar ve dig., 2017; Acar ve dig., 2019).

Önerilen OFDM Sistem Modeli (Proposed OFDM System Model)

OFDM sistemlerinde BHO'nu en aza indirmek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Örneğin; güç yükleme tekniği ile kanal hakkında önceden bilgi sahibi olduğu durumda, derin sönümlenmelere karşı iletilen sembollere ön eşitleme uygulanabilir (Petrovlu ve dig., 2004). Bu, basitçe derin sönümlenmelere uğrayan sembollerin belirli oranlarda güçlendirilerek kanala yollanmasıdır. Diğer bir yöntem ise derin sönümlenmelere uğrayan alt taşıyıcı noktalarına daha sık pilot yerleştirmektir. Böylece yüksek kazançla sahip alt taşıyıcılardan çoğunlukla veri iletilerek frekans spektrumunu etkin bir şekilde kullanılmış olur. Hatalı bitler ağırlıklı olarak derin sönümlenmelere uğrayan alt taşıyıcılarda meydana geleceği için bu noktaları pilot işaret olarak atamak BHO'yu düşürecektir.

Bu çalışmada önerilen geri beslemeli düzensiz pilot tabanlı kanal kestirim yönteminin blok diyagramı Şekil 3'de verilmiştir. Başlangıçta ikili veri BPSK vb. modülasyon şemalarıyla sembollere haritalanır. İlk zaman anında alıcıda, pilot işaret konumları bilinmediğinden pilotlar düzenli aralıklarla yerleştirilir. Daha sonra pilot eklenmiş verinin ters FFT'si alınarak tampon zamanı süresince çevrimsel ön-ek eklenir. Paralel-seri dönüşümü (P/S) yapılan sinyal analog sinyale çevrilip yüksek frekansa modüle edilerek kablosuz kanala iletilir. Alıcıda bu işlemlerin tersi yapılarak FFT aşamasından sonra kanal kestirimi yapılır. Alıcı kendisine gelen sinyale göre en fazla sönümlenmeye uğrayan alt taşıyıcıları tespit ederek bir sonraki zaman anındaki pilot konumlarını belirler ve geri besleme hattıyla bu konumları vericiye iletir. Bir sonraki zaman anında verici, alıcının belirlediği pilot konumlarına pilot semboller yerleştirir ve aynı işlem adımlarından geçen sinyal alıcıya ulaşır. Alıcı, pilot konumlarını bildiğinden pilot noktalarında

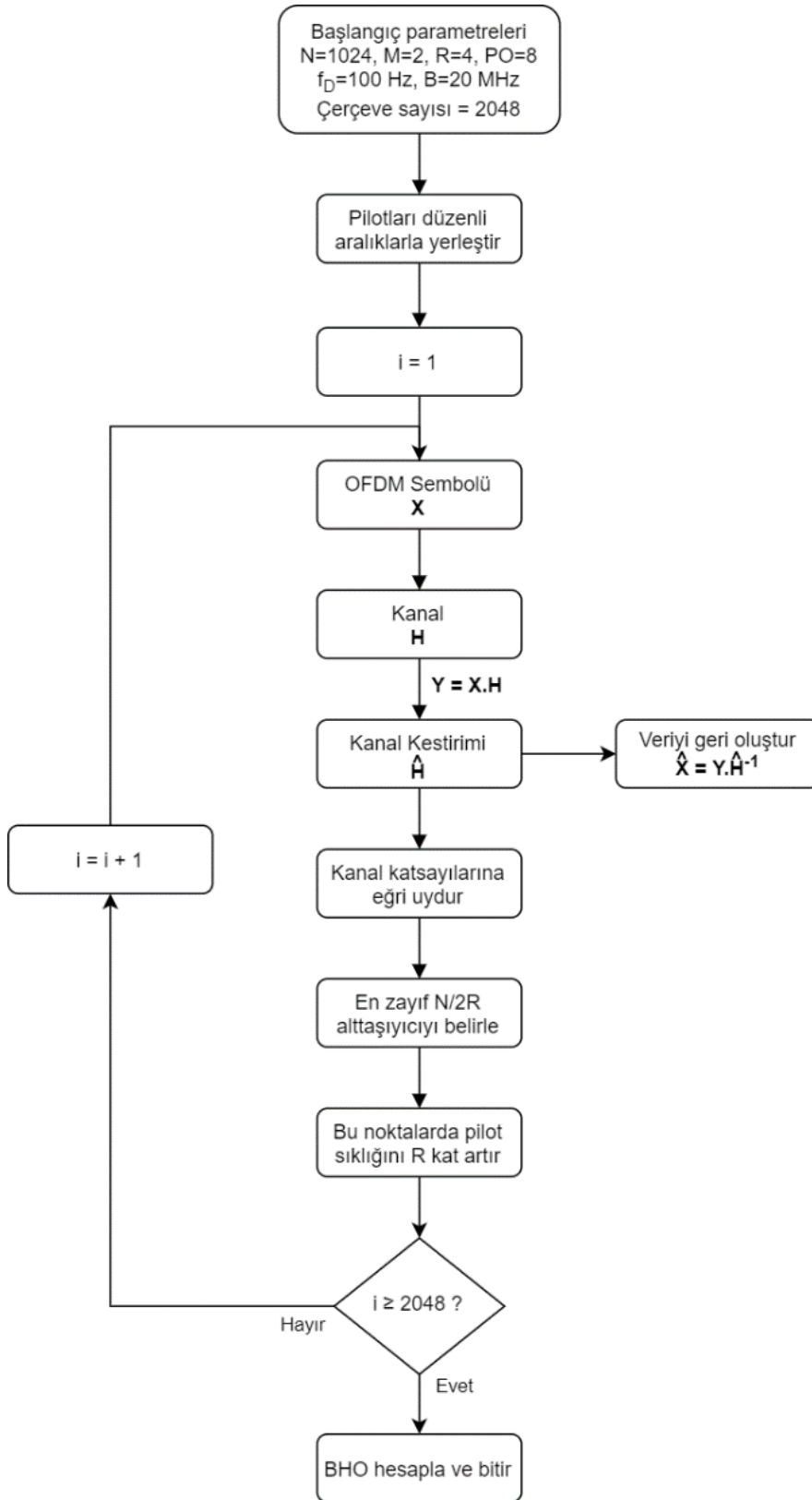
kanal kestirimini yaparak veriyi geri oluşturur. Veri noktalarında kanalın kazanç değerinin bulunması amacıyla pilot noktalarındaki değerlere doğrusal ara değerlendirme yöntemi uygulanır.



Şekil 3. Geri beslemeli OFDM sistem modeli

Figure 3. OFDM system model with feedback

Şekil 4'te önerilen uyarlamalı pilot yerleşim algoritmasının akış şeması verilmiştir. Başlangıç parametreleri olarak alt taşıyıcı sayısı $N=1024$, BPSK modülasyonu ($M=2$), pilot sıkıştırma oranı $R=4$, pilot oranı (PO) 8, Doppler frekansı $f_D=100$ Hz, bant genişliği $B=20$ MHz ve çerçeve sayısı 2048 seçilmiştir. Şekil 4'den de görüldüğü gibi önerilen uyarlamalı kanal kestirim algoritmasında başlangıçta kanalın frekans karakteristiği bilinmediğinden pilotlar düzenli aralıklarla yerleştirilir. OFDM sembolü kanala gönderildikten sonra mevcut pilotların yardımıyla kanal kestirimi yapılır ve veri geri oluşturulur. Daha sonra kanal katsayılarına eğri uydurulur. Kanalın en zayıf $N/2R$ alt taşıyıcısı belirlenir ve bu noktalarda pilot sıklığı R (pilot sıkıştırma oranı) kat artırılır. Bu işlemler çerçeve sayısı (2048) kadar tekrarlanır ve son olarak BHO hesaplanır.

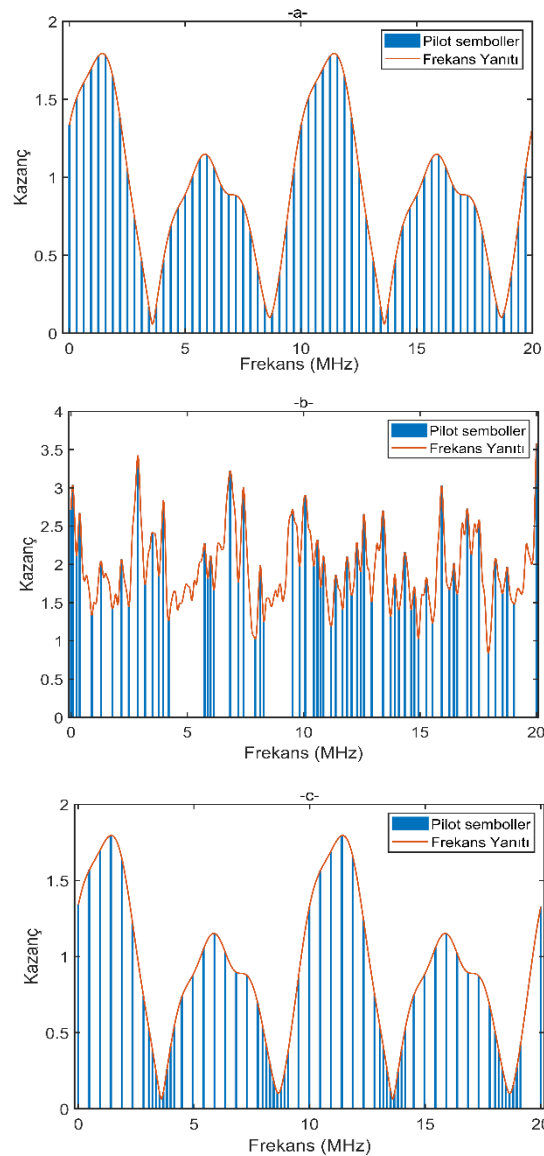


Şekil 4. Uyarlamalı kanal kestirim algoritma akış şeması

Figure 4. Flowchart of adaptive channel estimation algorithm

Pilot Konumlarının Belirlenmesi (Determination of Pilot Locations)

Şekil 5'te benzetimlerde kullanılan düzenli, düzensiz ve önerilen olmak üzere üç pilot yerleşim algoritmasının frekans düzlemindeki yerleşimleri gösterilmiştir. Düzenli pilot yerleşiminde pilotlar arası mesafe (frekans aralığı) eşittir. Bir OFDM kanalında toplam alt taşıyıcı sayısının, pilot alt taşıyıcı sayısına oranı, pilot oranı ile ifade edilir. Örneğin 8 pilot oranı pilot sembollerin frekans düzleminde her 8 alt taşıyıcıda bir yerleşeceğini ifade etmektedir. Düzensiz pilot yerleşiminde pilot semboller kanalın frekans düzlemindeki kazanç ifadesinin yerel maksimum ve minimum noktalara yerleştirilir. Önerilen pilot yerleşiminde ise pilot semboller kanal kazancının minimum olduğu bölgelerde daha sık yerleştirilerek pilot sıklığı artırılır. Geri kalan bölgelerdeki pilot sıklığı, toplam pilot sayısı sabit kalacak şekilde yerleştirilir.



Şekil 5. (a) Düzenli, (b) Düzensiz, (c) Önerilen pilot sembol yerleşimi

Figure 5. (a) Regular, (b) Irregular, (c) Proposed pilot symbol placement

Düzensiz ve önerilen pilot yerleşiminde pilot konumları belirlenirken ilk önce alıcıya gelen sinyalin mutlak değeri alınır. Derin sönmlemeye uğramamış olan alt taşıyıcılardaki semboller, üzerine binen gürültü nedeniyle alıcıya düşük güçlü olarak ulaşmış olabileceğinden, bu alt taşıyıcılara pilot atamamak için sinyale "smoothing spline" yöntemiyle eğri uydurulur. Bu yöntemle yumuşatma parametresine bağlı

olarak sinyal yumuşak geçişlere sahip olur. Yumuşatma parametresi 0 ile 1 arasında değişmektedir. Yumuşatma parametresi 1 iken eğri sinyali takip eder. Yumuşatma parametresi azaldıkça sinyal daha yumuşak geçişlere sahip olur. Yumuşatma parametresinin değeri kanaldan kanala değişkenlik göstermektedir.

ITU Kanal Profilleri (ITU Channel Profiles)

Bu çalışmada kullanılan frekans seçicilikleri birbirinden farklı beş ITU kanallarına ait yankı gecikme ve ortalama güç değerleri Çizelge 1’de, kanallara ait etkin yankı gecikme değerleri ise Çizelge 2’de verilmiştir (Kurnaz ve Gökçalp, 2008). Ayrıca çalışmada kullanılan kanallara ait 20 MHz’lik spektral güç yoğunlukları (power spectral density, PSD) Şekil 6’da verilmiştir.

Çizelge 1. ITU kanal profilleri için gecikme yayılımları (Jain, 2007)

Table 1. Delay spreads for ITU channel profiles

Yankı	Indoor Office-A		Indoor Office-B	
	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)
1	0	0	0	0
2	50	-3,0	100	-3,6
3	110	-10,0	200	-7,2
4	170	-18,0	300	-10,8
5	290	-26,0	500	-18,0
6	310	-32,0	700	-25,2

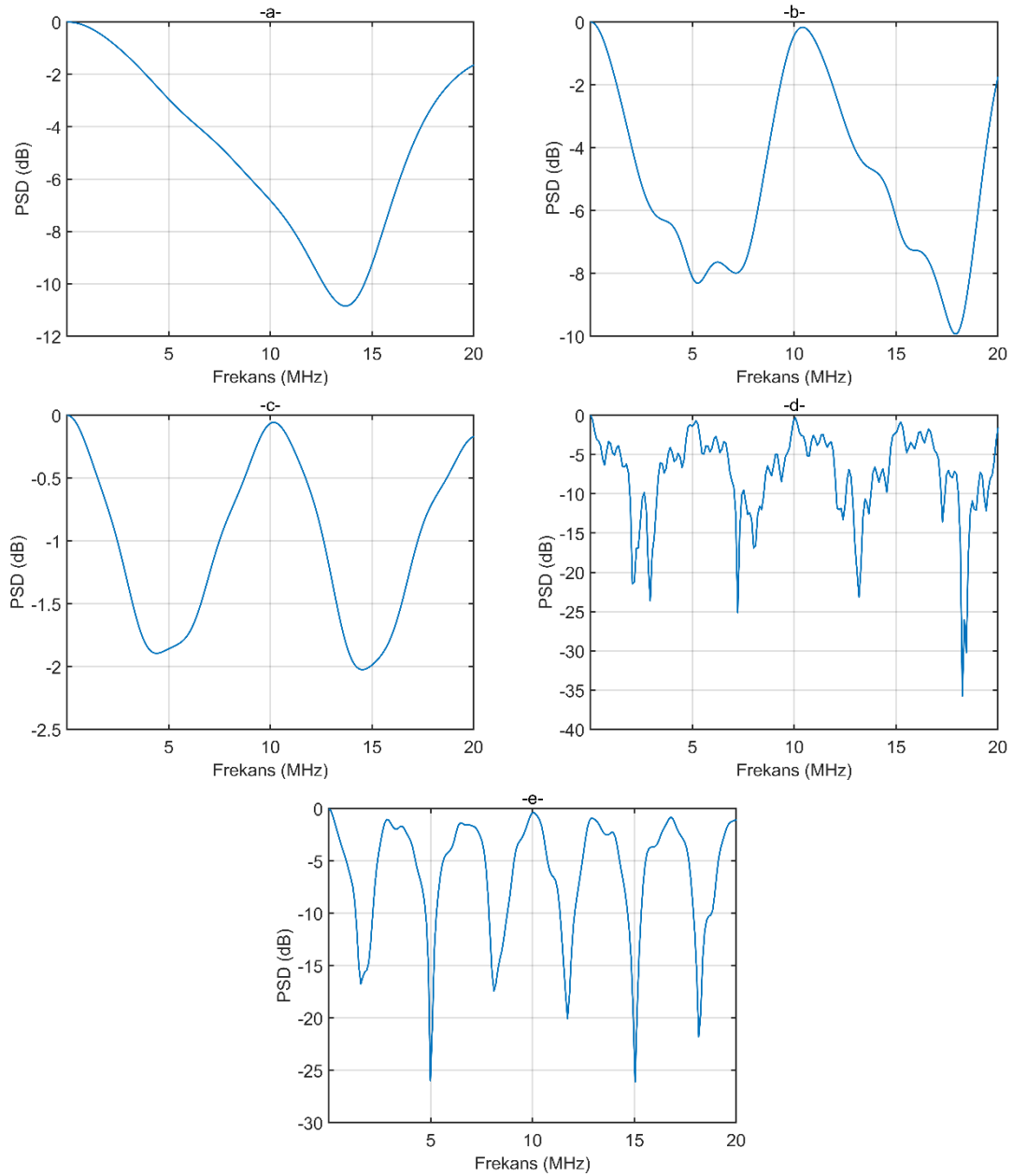
Yankı	Indoor Pedestrian-A		Indoor Pedestrian-B	
	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)
1	0	0	0	0
2	110	-9,7	200	-0,9
3	190	-19,2	800	-4,9
4	410	-22,8	1200	-8,0
5	-	-	2300	-7,8
6	-	-	3700	-23,9

Yankı	Vehicular-A	
	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)
1	0	0
2	310	-1,0
3	710	-9,0
4	1090	-10,0
5	1730	-15,0
6	2510	-20,0

Çizelge 2. Kanallara ait etkin yankı gecikme değerleri

Table 2. RMS delay spread of channels

Kanal modeli	Indoor Office A	Indoor Office B	Indoor Pedestrian A	Indoor Pedestrian B	Vehicular A
Etkin yankı gecikmesi, τ_{etkin} , μs	0.0370	0.0992	0.0460	0.633	0.370



Şekil 6. a) ITU Indoor Office-A, **b)** ITU Indoor Office-B, **c)** ITU Indoor Pedestrian-A, **d)** ITU Indoor Pedestrian-B, **e)** ITU Vehicular-A kanalı için PSD değeri

Figure 6. PSD value of a) ITU Indoor Office-A, b) ITU Indoor Office-B, c) ITU Indoor Pedestrian-A, d) ITU Indoor Pedestrian-B, e) ITU Vehicular-A channel

Benzetim Parametreleri (Simulation Parameters)

Bu çalışmada MATLAB programlama dili kullanılarak detayları Şekil 3'deki gibi verilen bir OFDM sistem benzetimcisi oluşturularak düzenli, düzensiz ve çalışmada önerilen pilot sembol yerleşim algoritmalarının sistem başarımlarına etkisi incelenmiştir. Benzetimcide kanalın pilot alt taşıyıcılardaki değeri en küçük kareler (least square, LS), veri alt taşıyıcılardaki değeri ise doğrusal ara değerlendirme algoritmasıyla (MATLAB'da interp1 fonksiyonu) elde edilmiştir. Kablosuz iletim kanalı olarak farklı frekans seçiciliğe sahip olan ITU'nun beş adet kanalı kullanılmıştır. Kanalın zamanla değişimi ise Rayleigh sönümlenme modeli ile ifade edilmiştir. Benzetimlerde kullanılan parametreler Çizelge 3'de verilmiştir. Benzetimlerde her bir yöntem (düzenli, düzensiz, önerilen pilot yerleşimi) için 4, 8 ve 16 pilot oranı, 10 Hz

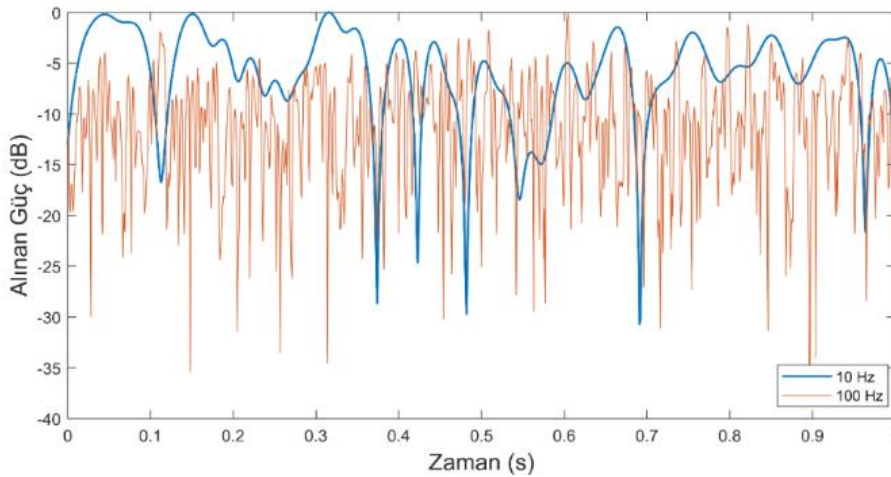
ve 100 Hz Doppler frekansı kullanılmıştır. Benzetimlerde 20 MHz'lik iletim bant genişliği, sembol süresi 51.2 μ s olan 1024 alt taşıyıcı, 256 çevrimsel ön-ek ilaveli tampon zamanı (12.8 μ s), toplam 2048 OFDM sembolü (çerçevesi), temel bant BPSK modülasyonu (her bir veri ve pilot için) kullanılmıştır. Benzetimlerde kanalın bir OFDM sembolü boyunca değişmediği, mükemmel eş zamanlama yapıldığı ve doğrusal güç yükseltmesi (kanala iletilen veri ve pilot sembol güçleri eşittir) olduğu varsayılmıştır. Benzetimlerde 0-30 dB aralığındaki sinyal gürültü oranı (SGO) değerleri için BHO grafikleri elde edilmiştir. BHO, 2048 çerçeve boyunca hatalı algılanan bit sayısının toplam alınan bit sayısına oranı hesaplanarak bulunmuştur.

Çizelge 3. Benzetim parametreleri

Table 3. Simulation parameters

Kullanıcı sayısı	Tek kullanıcı
Aşağı/yukarı hat	Aşağı hat
Çerçeve sayısı	2048
Modülasyon (veri ve pilot için)	BPSK
İletim bant genişliği	20 MHz
Alt taşıyıcı sayısı	1024, (51.2 μ s)
Tampon zamanı	256, (12.8 μ s)
Doppler frekansı	10 Hz, 100 Hz
Pilot oranları	4, 8, 16
Ara değerlendirme komutu	MATLAB interp1
Pilot işaretlerin tahmini	Least Square (LS)
Sinyal gürültü oranı (SGO)	0-30 dB

Kanalın zaman düzlemindeki sönümlenme düzeyi, alıcının veya vericinin hareket hızına bağlıdır. Alıcı/vericinin hareket etmesi alıcıdaki sinyal bileşenlerinde Doppler kaymasına neden olur. Şekil 7'de 10 Hz ve 100 Hz'lik Doppler frekanslı Rayleigh kanalından geçen sabit bir sinyalin 1 saniyelik güç değişimi gösterilmiştir. Bu çalışmada 10 Hz'lik Doppler frekansı 6 km/h'lik hareket hızına denk gelirken, 100 Hz'lik Doppler frekansı ise 60 km/h'lik hareket hızına denk gelmektedir. Şekil 7'den de görüldüğü gibi aratan Doppler frekansına bağlı olarak alınan sinyal gücündeki değişimler daha sık ve daha derin olmaktadır.

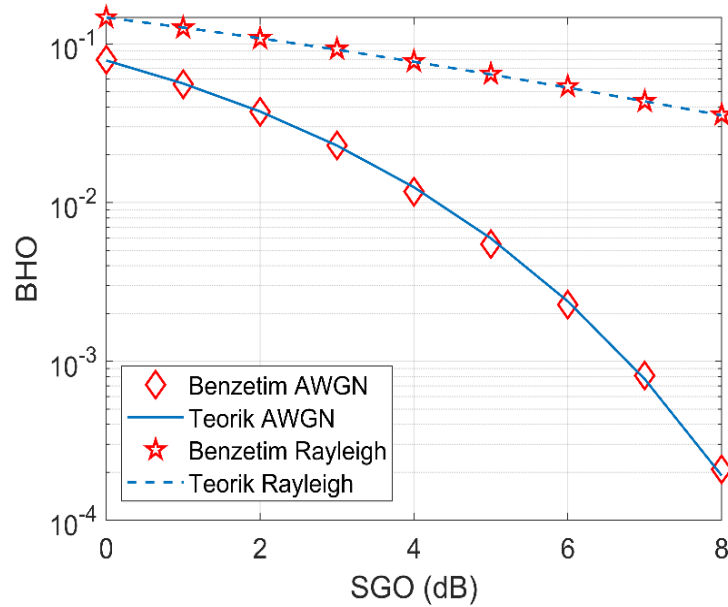


Şekil 7. 10 Hz ve 100 Hz'lik Rayleigh sönümlenme zarfı

Figure 7. Rayleigh envelope for 10 Hz and 100 Hz

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

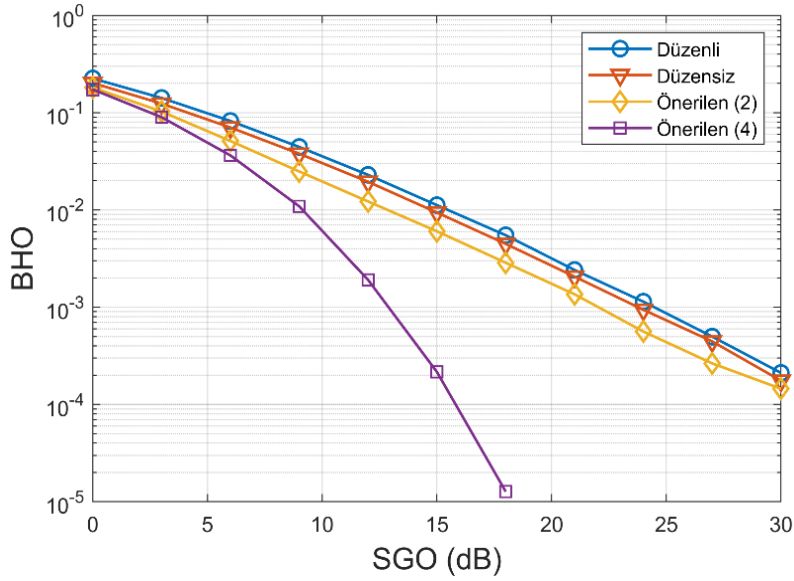
Çalışmanın ilk aşamasında oluşturulan OFDM benzetimcisinin doğruluğu AWGN ve Rayleigh kanallarının için test edilerek sınanmıştır. Benzetimler Intel Core i7 6700HQ 2.6 GHz işlemcili ve 16 GB RAM'li bir dizüstü bilgisayar ile alınmıştır. OFDM benzetimcisine ait teorik ve benzetim sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. AWGN ve Rayleigh kanallar için OFDM benzetimcisinin sınanması

Figure 8. Testing of OFDM simulator for AWGN and Rayleigh channel

Şekil 9'da Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı (pilot sayısı 192) ve 10 Hz'lik Doppler frekansı için düzenli, düzensiz ve önerilen pilot yerleşim algoritmaları kanal kestirim sonuçları verilmiştir. Şekilde Önerilen (2), kanalın belirlenen kısımlarında pilot sıklığının 2 kat artırılacağını, Önerilen (4) ise kanalın belirlenen kısımlarında pilot sıklığının 4 kat artırılacağını ifade etmektedir. Önerilen algoritmaların düzenli ve düzensiz pilot yerleşimine göre daha iyi performans gösterdiği Şekil 9'da görülmektedir. Önerilen (4) pilot sembol yerleşimi ile BHO başarımında düzenli pilot sembol yerleşim yöntemine göre yaklaşık 11.6 dB'e varan bir iyileşme sağlanabilmektedir (BHO'nun yaklaşık 10^{-3} değeri için). Önerilen (2) pilot sembol yerleşimi ile BHO başarımındaki iyileşme düzenli ve düzensiz yöntemlere göre 2-3 dB arasında olabilmektedir (BHO'nun yaklaşık 10^{-3} değeri için).



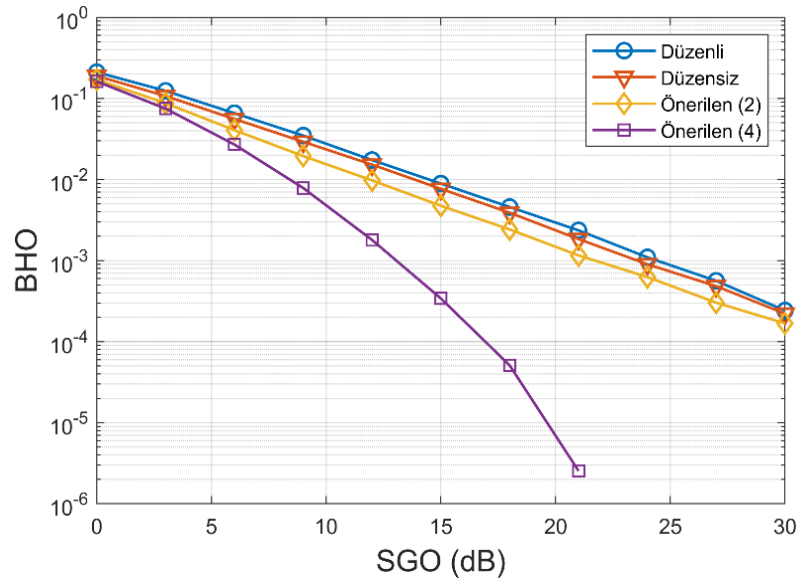
Şekil 9. Indoor Office-A, 10 Hz, 4 pilot oranı için BHO değerleri

Figure 9. BER values for Indoor Office-A, 10 Hz, 4 pilot ratio

Indoor Office-A kanalı 10 Hz, 4 pilot oranı için BHO değerleri analizi yanında ortalama kare hatası (MSE) analizleri de yapılmıştır. 12 dB SGO değeri için MSE hatası Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritması için -16.52 dB'dir. Bu değerler Önerilen (2), Düzensiz ve Düzenli pilot sembol yerleşim algoritmaları için sırasıyla -13.76 dB, -12.81 dB ve -12.59 dB'dir.

Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı, 10 Hz Doppler frekansı için Düzenli pilot sembol yerleşim algoritması için benzetim süresi 4.22 sn'dir. Düzensiz pilot sembol yerleşim algoritması için bu süre 56.45 sn'dir. Önerilen (2) algoritması için benzetim süresi 28.47 sn iken Önerilen (4) algoritması için ise 30.52 sn'dir.

Şekil 10'da Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı (pilot sayısı 192) ve 100 Hz'lik Doppler frekansı için benzetim sonuçları verilmiştir. 10 Hz'lik Doppler frekansında olduğu gibi Önerilen (2) ve Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritmalarının başarımları düzenli ve düzensiz pilot sembol yerleşim algoritmalarına göre daha iyidir. Önerilen (4) için BHO başarımı düzenli pilot yerleşim algoritmasına göre 11.3 dB'e kadar iyileşebilmektedir (BHO'nun yaklaşık 10^{-3} değeri için). Önerilen (2) algoritmasının BHO başarımı ise düzenli ve düzensiz pilot yerleşim algoritmalarına göre 2-3 dB daha iyidir (BHO'nun yaklaşık 10^{-3} değeri için).

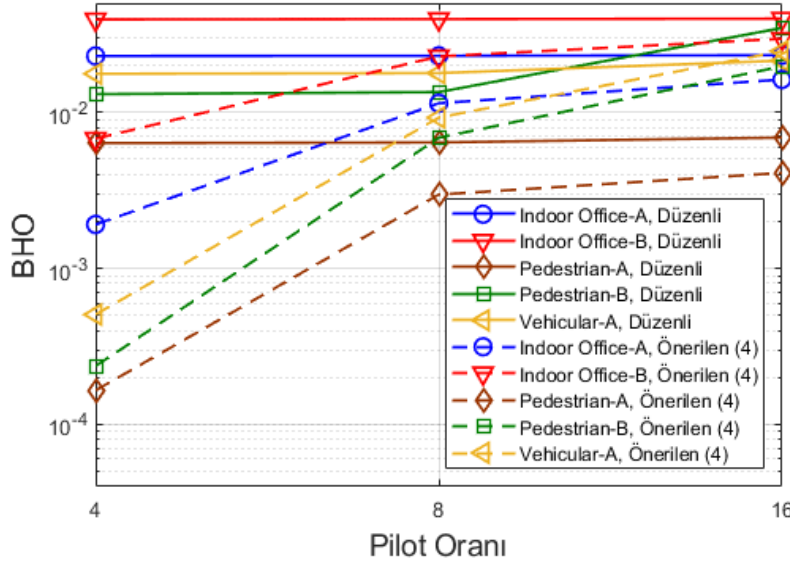


Şekil 10. Indoor Office-A, 100 Hz, 4 pilot oranı için BHO değerleri

Figure 10. BER values for Indoor Office-A, 100 Hz, 4 pilot ratio

Şekil 9 ve Şekil 10 bir bütün olarak değerlendirildiğinde Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı ve 10/100 Hz Doppler frekansı için en iyi OFDM sistem başarımı Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritması için elde edilmiştir. Benzer değerlendirmeler tüm kanal profili, 4, 8, 16 pilot oranları ve 10/100 Hz Doppler frekansları için de yapılmıştır. Sonuçlardan Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritmasının Indoor Office-A, Indoor Office-B, Indoor Pedestrian-A, Indoor Pedestrian-B kanal profilleri, 4, 8, 16 pilot oranları ve 10/100 Hz Doppler frekansları için en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Vehicular-A kanal profili için de 10 Hz ve 4/8/16 pilot oranları için en iyi sistem başarımını Önerilen (4) algoritması vermiştir. Vehicular-A, 100 Hz için 4 pilot oranı için Önerilen (4) algoritması en iyi sonucu verirken, 8/16 pilot oranları için en iyi başarımı Önerilen (2) algoritması vermiştir. Bunun temel nedeni frekans seçiciliği yüksek Vehicular-A kanalı için 8/16 pilot oranları için pilotlar minimum noktalara daha sık yerleştirildikçe diğer noktadaki pilot sıklığı gittikçe azalmaktadır. Düşük pilot oranları için bu durum sorun teşkil etmese de pilot oranı arttıkça zaman zaman başarım kaybına yol açabilmektedir. Sonuçlar ile ilgili olarak daha detaylı grafik ve açıklamalar (Ayvenli, 2019)'da bulunabilir.

4, 8 ve 16 pilot oranı, 10 Hz Doppler frekansı, 12 dB SGO ve düzenli ve Önerilen (4) algoritmaları için tüm kanalların BHO değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm kanallar için Önerilen (4) algoritması düzenli pilot yerleşimine göre daha iyi başarım göstermektedir. Özellikle düşük pilot oranları için Önerilen (4) algoritması kanal kestirim başarımında oldukça yüksek bir iyileşme sağlamaktadır.



Şekil 11. 10 Hz ve farklı pilot oranları için önerilen yöntemin başarımları

Figure 11. The performances of the proposed method for 10 Hz and different pilot rates

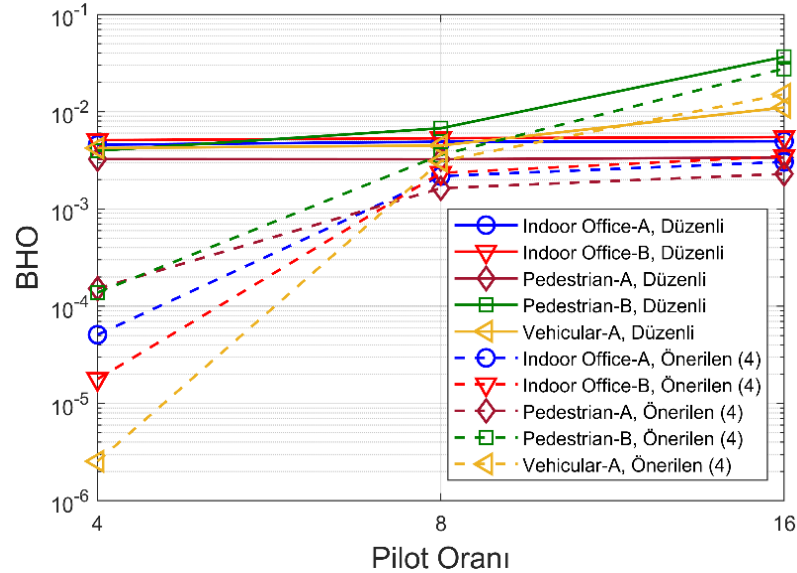
Şekil 11’de artan pilot oranına bağlı olarak BHO değerlerinin düştüğü de görülmektedir. Pilot oranının artması aslında kanal tahmininde kullanılacak pilot sembollerin sayısının azalması, başka bir deyişle bir çerçevede gönderilen veri bitlerinin sayısının artmasıdır. Pilot oranına bağlı BHO değerleri ile sistem verimi arasında bir ödünleşim (trade-off) vardır. Toplam bit sayısı (pilot sembolü ile veri biti toplamı) aynı olduğundan kanal kestiriminde kullanılan pilot sembol sayısının azalması kanal tahmin başarımında düşüşe ve dolayısıyla BHO değerinde artışa neden olur. Pilot oranı, pilot sembol sayısı, veri bitleri sayısı ve sistem verimine ait değerlendirmeler Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4’den de görüldüğü gibi 16 pilot oranı için her ne kadar BHO değeri düşük olsa bile sistem verimi %93,75 ile en yüksektir.

Çizelge 4. Pilot oranına bağlı olarak sistem verimin değerlendirilmesi

Table 4. Evaluation of system efficiency depending on the pilot rate

Pilot Oranı	Bir OFDM çerçevesindeki toplam sembol sayısı (TSS)	Pilot sembol sayısı (PSS)	Bir OFDM çerçevesinde iletilen veri sembolü sayısı (VSS)	Sistem verimi (%) $100 \times \frac{VSS}{TSS}$
4	768	192	576	75
8	768	96	672	87,5
16	768	48	720	93,75
TSS=1024 – 256 =768, 256: Tampon zamanı sembol sayısı				

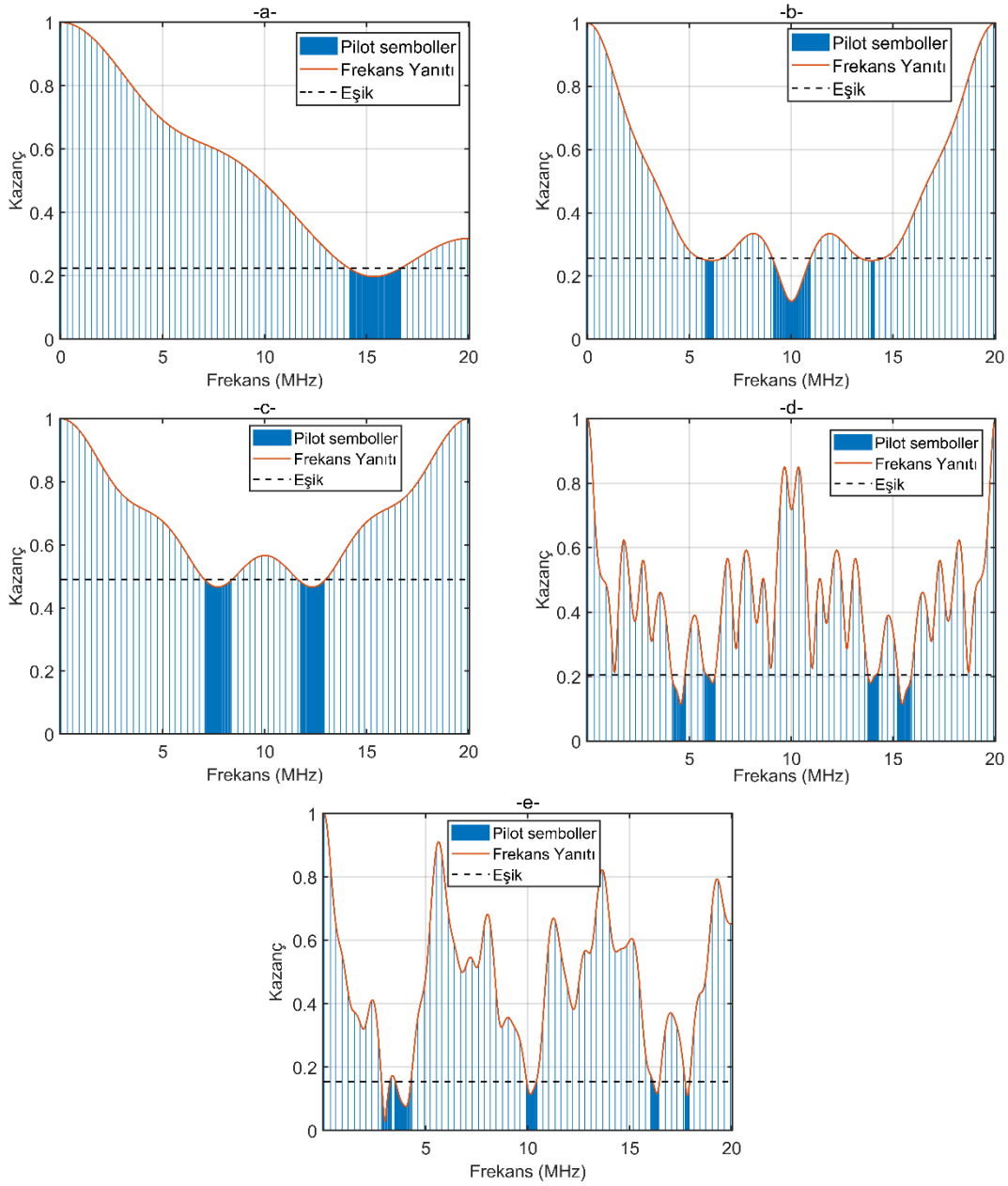
Şekil 12'de 4, 8 ve 16 pilot oranları, 100 Hz Doppler frekansı, 18 dB SGO, düzenli ve Önerilen (4) algoritmaları için tüm kanalların BHO değerleri verilmiştir. Önerilen (4) algoritmasının özellikle düşük pilot oranlarında (4 ve 8) BHO değerinde kayda değer bir iyileşme sağladığı şekilden görülmektedir.



Şekil 12. 100 Hz ve farklı pilot oranları için önerilen yöntemin başarımları

Figure 12. The performances of the proposed method for 100 Hz and different pilot rates

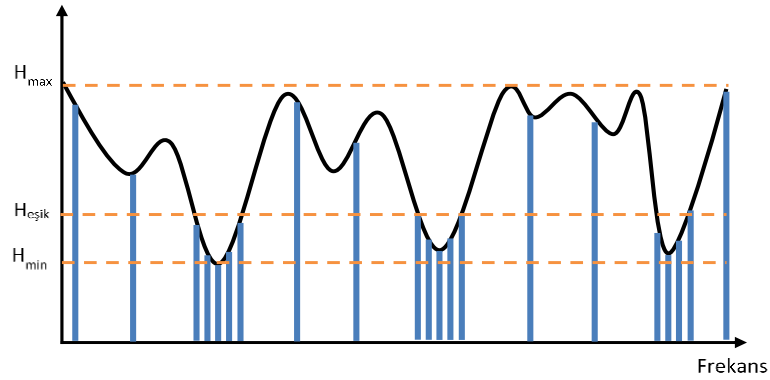
Beş farklı kanal profili, 16 pilot oranı, 30 dB SGO, 10 Hz Doppler frekansı için Önerilen (4) algoritmasında frekans düzleminde pilot aralıkları Şekil 13'de verilmiştir. Şekillerde eşik seviyesinin altında kalan bölgelerde pilotlar frekans düzlemine 4 kat daha sık yerleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi frekans düzleminde bu sık yerleşim bölgeleri (2, 3, 4) kanal yapısına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 13. Beş farklı kanal için önerilen yöntemde frekans düzleminde pilot işaretlerin yerleşimi; (a) Indoor Office-A, (b) Indoor Office-B, (c) Indoor Pedestrian-A, (d) Indoor Pedestrian-B, (e) Vehicular-A

Figure 13. Pilot arrangement in the frequency domain in the method proposed for five different channels; (a) Indoor Office-A, (b) Indoor Office-B, (c) Indoor Pedestrian-A, (d) Indoor Pedestrian-B, (e) Vehicular-A

Şekil 13'de görüldüğü gibi Önerilen (4)'de daha sık yerleştirilecek pilot sembollerin kanalın frekans düzlemindeki kazanç değeri (eşik seviyesi) değişebilmektedir (Şekil 13'de kesikli çizgilerle gösterilmiştir). Değişen bu eşik seviyelerini belirleyebilmek için Şekil 14'de verilen tanımlamalar yapılmıştır. Burada H_{\max} kanalın en yüksek genlik değerini, H_{\min} kanalın en düşük genlik değerini, $H_{\text{eşik}}$ ise pilotların daha sık yerleştirileceği, kanalın en düşük genlik seviyesini göstermektedir.



Şekil 14. Eşik seviyesini belirlemek için yapılan tanımlamalar

Figure 14. Definitions made to determine the threshold level

Beş farklı kanal için H_{min} , H_{max} ve H_{eshik} değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelgede tüm kanal genlikleri normalize edilerek maksimum değeri 1 yapılmıştır. Çizelge 5’de görüldüğü gibi H_{min} değerleri 0,08 ile 0,46 arasında değişmektedir. H_{eshik} ’in ise değişim aralığı 0,15 ile 0,49 arasındadır.

Çizelge 5. Beş farklı kanal için H_{min} , H_{max} , H_{eshik} ve K değerleri

Table 5. H_{min} , H_{max} , H_{eshik} and K values for five different channels

Kanal	H_{min}	H_{max}	H_{eshik}	K
Indoor Office-A	0,19	1	0,22	0,037
Indoor Office-B	0,14	1	0,25	0,127
Indoor Pedestrian-A	0,46	1	0,49	0,055
Indoor Pedestrian-B	0,12	1	0,20	0,090
Vehicular-A	0,08	1	0,15	0,076

H_{eshik} , (10) eşitliği kullanılarak H_{min} ve H_{max} ile ilişkilendirilmiştir. Burada K katsayısı eşik seviyesi, kanalın H_{min} ve H_{max} değerine bağlı olarak değişebilen bir büyüklüktür. Beş farklı kanal için Çizelge 5’de verildiği gibi K değeri 0,037 ile 0,127 aralığında değişmektedir. Beş farklı kanal için K’nın ortalama değeri 0,077’dir. Dolayısıyla farklı kanal profilleri için K değeri 0,077 seçilerek sık yerleşimin yapılacağı pilot işaretler için eşik seviyesi (10) eşitliği kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir.

$$H_{eshik} = H_{min} + (H_{max} - H_{min}) \times K \quad (10)$$

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada OFDM sistemleri için kablosuz iletim kanalın yapısına bağlı olarak değişebilen yeni bir pilot sembol yerleşimli kanal kestirim algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma düzenli/düzensiz pilot sembol yerleşimi algoritmaları ve 10/100 Hz Doppler frekansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan Önerilen (4) algoritması toplamda 30 senaryodan (5 kanal, 3 farklı pilot oranı, 2 farklı Doppler frekansı) 28 tanesinde en iyi sonucu vermiştir. Kalan 2 senaryo için ise yine Önerilen (2) algoritması en iyi başarıyı vermiştir. Düzensiz pilot yerleşimi benzetimlerin çoğunda en kötü performansı sergilemiştir. Önerilen (4) algoritması özellikle düşük pilot oranlarında (örn. 4) çok yüksek bir başarıyı sergilemektedir. Pilot oranı arttıkça Önerilen (4) algoritmasının başarıyı düzenli/düzensiz yöntemlere yaklaşmaktadır. Yüksek frekans seçicilikli kanallarda (örn Vehicular-A) ve yüksek pilot oranlarında (örn. 16) zaman zaman Önerilen (2) algoritması Önerilen (4) algoritmasına göre daha iyi başarıyı gösterebilmektedir. Çalışmanın

son aşamasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak Önerilen (4) algoritması için frekans düzleminde pilot sıklığının artırılacağı bölgelerin eşik değerini belirlemek için yeni bir matematiksel ifade önerilmiştir.

Bu çalışmada yalnızca tarak-tip pilot yerleşimi ile kanal kestirimi için analizler yapılmıştır. Gelecekte blok-tip, elmas-tip, dikdörtgen-tip kanal kestirim yöntemleri için de çalışma genişletilebilir. Böylece zaman düzleminde Doppler etkisi daha iyi incelenebilir. LS algoritması yerine MMSE algoritması ve farklı ara değerlendirme yöntemleri kullanılarak sistem başarımı artırılabilir. Ayrıca H_{eşik} seviyesi farklı kanal profilleri için de hesaplanarak önerilen (10) eşitliği güncellenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Acar, Y., Aldırmaz, S. Ç., Basar, E., 2019, "Channel estimation for OFDM-IM systems", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Cilt 27, Sayı 3, ss.1908-1921.
- Acar, Y., Dogan, H., Panayırıcı E., 2017, "Pilot symbol aided channel estimation for spatial modulation-OFDM systems and its performance analysis with different types of interpolations", *Wireless Personal Communications*, Cilt 94, Sayı 3, ss.1387-1404.
- Acar, Y., Dogan H., Başar E., Panayırıcı, E., 2016, "Interpolation based pilot-aided channel estimation for STBC spatial modulation and performance analysis under imperfect CSI", *IET Communications* Cilt 10, Sayı 14, ss.1820-1828.
- Ami Munshi, A., Unnikrishnan, S., 2021, "Performance Analysis of Compressive Sensing based LS and MMSE Channel Estimation Algorithm", *Journal of Communications Software and Systems*, Cilt 17, Sayı 1, ss.13-19.
- Ayvenli, F., 2019, "Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama Sistemleri İçin Kanal Kestirim Yöntemlerinin Başarımının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chen, J. C., Wen, C. K., Ting, P., 2013, "An efficient pilot design scheme for sparse channel estimation in OFDM systems", *IEEE Communications Letters*, Cilt 17, Sayı 7, ss. 1352-1355.
- Cho, Y. H., Ko, H. L., 2020, "Channel Estimation Based on Adaptive Denoising for Underwater Acoustic OFDM Systems", *IEEE Access*, Cilt 8, ss. 157197-157210.
- Coleri, S., Ergen, M., Puri, A. Bahai, A., 2002, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Cilt 48, Sayı 3, ss. 223-229.
- Edfors, O., Sandell, M., van de Beek, J.J., Wilson, S.K., Brjesson, P.O. 1998, "OFDM channel estimation by singular value decomposition", *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 46, Sayı 7, ss. 931-939.
- Engiz, B.K., Kurnaz, Ç., Sezgin, H., "Determining the Optimum Pilot Density in OFDM Systems over Propagation Measurement Based Channels", 55th International Symposium ELMAR-2013, Zadar, Croatia, 25-27 September 2013.
- Engiz, B. K., Kurnaz, Ç., Sezgin, H., 2015, "Approach for determining the optimum pilot placement in orthogonal frequency division multiplexing systems", *IET Communications*, Cilt 9, Sayı 15, ss. 1915-1923.
- Fertl, P., Matz, G., 2010, "Channel estimation in wireless OFDM systems with irregular pilot distribution", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Cilt 58, Sayı 6, ss. 3180-3194.
- Gu, F., Fan, Y., Wang L., Tan, X., Wei, J., 2019, "A Universal Channel Estimation Algorithm Based on DFT Smoothing Filtering", *IEEE Access*, Cilt 7, ss. 129883-129891.
- Han, P., Wang J., Xu, P., "Adaptive pilot design based on Doppler frequency shift estimation for OFDM system", *International Conference on Computer Design and Applications*, Qinhuangdao, Çin, 25-27 Temmuz 2010.
- Hsieh, M. H., Wei, C. H., 1998, "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Cilt 44, Sayı 1, ss. 217-225.
- Jain, R., 2007, "Channel models: A tutorial", WiMAX forum AATG (Vol. 10), Washington Univ. St. Louis, Dept. CSE.

- Jency, G. B., Gladwin, S. J., "Channel estimation using optimized pilot placement in OFDM system", *International Conference on Communication and Signal Processing*, Bangkok, Tayland, 10-12 Ekim 2014.
- Kurnaz, C., Gökalp H., "Investigating MC-CDMA System Performance Using Measurement-Based Channel Models" 14th European Wireless Conference, Prague, Czech Republic, 22-25 June 2008.
- Kurnaz, C., Engiz, B. K., Gökalp, H., Sezgin, H., 2012, "Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama Sisteminde En Uygun Pilot Aralığının Kanal Değişkenleri ile İlişkilendirilmesi", *Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 17, Sayı 1, ss. 79-92.
- Kurnaz, Ç., Engiz, B.K., Ayvenli, F., "Performance Comparison of Regular and Irregular Pilot Placements in OFDM Systems", *5th International Conference on Advanced Technologies (ICAT)*, İstanbul, Türkiye, 9-12 Mayıs 2017.
- Lee, S., Ju, H., Shim, B., "Pilot Assignment and Channel Estimation via Deep Neural Network", *24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Ningbo, Çin, 12-14 Kasım 2018.,
- Leus, G. Van der Veen, A., 2005, Channel estimation. Smart Antennas-State of the Art, Hindawi Publishing Corporation, 293-319.
- Li, Q., Wen, M., Zhang, Y., Li, J., Chen, F., Ji, F., 2018, "Information-guided pilot insertion for OFDM-based vehicular communications systems", *IEEE Internet of Things Journal*, Cilt 6, Sayı 1, ss. 26-37.
- Nan, Y., Sun, X., Zhang, L., "Near-optimal pilot allocation in sparse channel estimation for massive MIMO OFDM systems", *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Brüksel, Belçika, 25-28 Ağustos 2015.
- Nee, R.V., Prasad, R., 2000, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House, Inc. 280.
- Panah, A. Y., Nosrat-Makouei, B., Vaughan, R. G., 2008, "Non-uniform pilot-symbol allocation for closed-loop OFDM", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 7, Sayı 7, ss. 2723-2731.
- Patil, S., Jadhav A.N., 2014, "Channel Estimation Using LS and MMSE Estimators", *KIET International Journal of Communications & Electronics*, Cilt 2, Sayı 1, ss. 51-55.
- Petropulu, A., Zhang, R. Lin, R., 2004, "Blind OFDM channel estimation through simple linear precoding", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 3, Sayı 2, ss. 647-655.
- Raghavendra, M. R., Lior, E., Bhashyam, S. Giridhar, K., 2007, "Parametric channel estimation for pseudo-random tile-allocation in uplink OFDMA", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Cilt 55, Sayı 11, ss. 5370-5381.
- Shin, C., Heath, R. W. Powers, E. J., 2007, "Blind channel estimation for MIMO-OFDM systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Cilt 56, Sayı 2, ss. 670-685.
- Singh, H., Bansal, S., 2016, "Comparison of Channel Estimators for OFDM Channel Estimation", *International Journal of Computer Applications*, Cilt ICAET 2016, Sayı 7, ss.41-44.
- Simeone, O., Bar-Ness Y., Spagnolini, U., 2004, "Pilot-based channel estimation for OFDM systems by tracking the delay-subspace", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 3, Sayı 1, ss. 315-325.
- Song, W.G., Lim, J. T., 2003, "Pilot-symbol aided channel estimation for OFDM with fast fading channels", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Cilt 49, Sayı 4, ss. 398-402.
- Souleymane, B., Mondol, S.R., Wei, Z., 2016, "Comparative Performance Study of LS and MMSE Channel Estimation over Time Varying Channel in OFDM System", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Cilt 5, Sayı 3, ss.847-850.
- Steendam, H., "How to select the pilot carrier positions in CP-OFDM?", *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapeşte, Macaristan, 9-13 Haziran 2013.
- Sung, K. Y., Hong, Y. W. P., Chao, C. C., "Feedback-aided pilot placement for amplify-and-forward OFDM relay links", *IEEE 11th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Taichung, Tayvan, 17-20 Ekim 2010.
- Sung, K. Y., Hong, Y. W. P., Chao, C. C., "Feedback-aided pilot placement for OFDM relay links with subcarrier pairing", *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kyoto, Japonya, 5-9 Haziran 2011.

- Sung, K. Y., Hong, Y. W. P., Chao, C. C., 2012, "Feedback-aided pilot placement and subcarrier pairing for AF OFDM relay channels", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Cilt 62, Sayı 2, ss. 704-720.
- Tang, Z., Cannizzaro, R.C., Leus, G., Banelli, P., 2007, "Pilot-Assisted Time-Varying Channel Estimation for OFDM Systems", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Cilt 55, Sayı 5, ss. 2226-2238.
- Vithanage, C., Cepeda, R., Coon, J, McGeehan, J., 2010, "MIMO-OFDM pilot placement algorithms for wideband indoor communications", *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 59 Sayı 2, ss. 466-476.
- Wu, W., Jia, X., Cai, Y., Hu, H., "Feedback-aided pilot placement for two-way cooperative-OFDM", *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, Çin, 9-11 Kasım 2011.
- Zhao, X., Peng, T. Wang, W., "Parametric channel estimation by exploiting hopping pilots in uplink OFDMA", *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes, Fransa, 15-18 Eylül 2008.