

İLİNTİLİ SÖNÜMLEMELİ KANALLARDA DİK UZAY-ZAMAN KODLAMALI OFDM

Ali Emre Pusane¹, Ümit Aygözü¹ ve Erdal Panayırıcı²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
80626 Maslak, İstanbul
{pusane,aygolu}@ehb.itu.edu.tr

²Işık Üniversitesi
Elektronik Mühendisliği Bölümü
80670 Maslak, İstanbul
eepanay@isikun.edu.tr

Özetçe

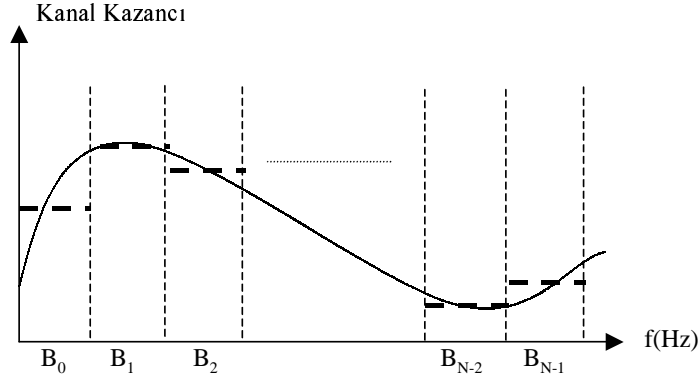
Dik frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) frekans-seçici kanallar üzerinden iletimde sağladığı yüksek başarımdan dolayı çok-taşıyıcı sistemlerin günümüzde önem kazanan bir türüdür. OFDM tekniği ile frekans-seçici kanal N adet frekans-seçici olmayan alt-kanala bölünerek kanalın frekans-seçiciliğinden kurtulur. Sönümlemeli kanallarda hata başarımını yükseltmenin en iyi yollarından biri çeşitlemeden yararlanmaktır. Bilginin kopyalarının bağımsız alt-kanallar üzerinden iletilmesi ilkesine dayanan bu teknik, bu çalışmada¹, OFDM yapısına uygulanmıştır. İletilmek istenen veri önce kafes kodlanmış, daha sonra ise dik uzay-zaman kodlamasından geçirilerek kanala OFDM bloğu üzerinden iletilmiştir. Önerilen bu sistem uzay, zaman ve frekans çeşitlemesi türlerini birlikte içermektedir.

1. Giriş

Genişbandlı iletişim sistemlerinde, özellikle frekans seçici kanallar üzerinden iletimde yüksek başarımlarından dolayı, çok-taşıyıcı sistemler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin OFDM olarak adlandırılan biçimi [2], genişbandlı iletişim kanalını belli sayıda alt kanallara bölerek bilgiyi birbirine dik seçilmiş alt taşıyıcı frekanslarda iletme ilkesine dayanmaktadır. Geleneksel frekans bölmeli çoğullamalı sistemler ile karşılaştırıldığında, dik alt kanalların örtüşmesine izin verildiğinden band verimliliği açısından bir üstünlük sağlanmaktadır. Öte yandan, OFDM tek taşıyıcı iletişim sistemlerine göre oldukça uzun bir işaretleşme periyoduna sahip olduğundan hızlı sönümlemelere karşı daha iyi başarıma sahiptir. Genişbandlı iletişimde karşılaşılabilecek en kötü durumlardan biri ise kanalda sönümlemenin iletilen işaretin her frekans bileşenini aynı miktarda etkilememesidir (frekans-seçicilik). Bu

¹Bu çalışma 100EE006 no.lu proje çerçevesinde Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmektedir.

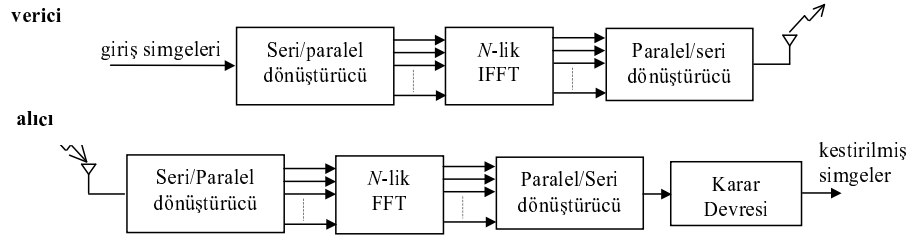
özelliğe sahip bir kanalda OFDM tekniği kanalı N dik alt kanala $\{B_0, B_1, \dots, B_{N-1}\}$ bölerek frekans seçici kanalı N adet frekans seçici olmayan alt kanala dönüştürür (Şekil.1).



Şekil 1: Frekans seçici kanal

Böylece, iletişim tek bir frekans seçici kanal yerine N adet frekans seçici olmayan kanal üzerinden eşzamanlı olarak sağlanır.

Dik frekans bölmeli çoğullama tekniğinin en belirgin özelliği olan dik taşıyıcıları gerçekleştirmek amacıyla, uygulaması kolay ve maliyeti düşük olan hızlı Fourier (FFT) ve ters hızlı Fourier dönüştürücülerinden (IFFT) yararlanılmaktadır (Şekil.2).



Şekil 2: Dik Frekans Bölmeli Çoğullama

Bilgiye ilişkin simge dizisini alt taşıyıcılara ötelemek amacı ile N noktalık IFFT bloğu kullanılır. IFFT ve FFT bloklarının hızlı ve etkin kullanılması için alt kanal sayısı N 'nin ikinin bir kuvveti olarak seçilmesi gerekmektedir. IFFT işlemine uygun biçime getirilmek amacıyla girişteki simge dizisi, 1-giriş N -çıkışlık bir seri/paralel dönüştürücünden geçirilerek veri simgeleri N uzunluklu çerçeveler haline getirilir. IFFT bloğu çıkışında elde edilen simgeler tekrar seri biçime sokularak verici anten üzerinden kanala verilirler. Alıcı tarafta ise peşpeşe alınan her N kanal simgesi paralele dönüştürülüp FFT işlemi gerçekleştirilir. FFT işlemi sonrasında elde edilen, kanaldaki sönmüleme ve gürültü etkileri tarafından bozulmuş simgeler bir karar devresi girişine uygulanarak iletilmiş olan bilgi simgelerinin kestirilmesine çalışılır.

Bu çalışmada, OFDM kullanan iletişim sistemlerinde uzay, zaman ve frekans çeşitleme teknikleri birlikte uygulanarak kanaldaki ilintili sönmüleme ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsüne karşın yüksek hata başarımına sahip bir tümleşik iletişim sistemi önerilmektedir.

2. Kanal Modeli

OFDM tekniği kullanılarak frekans-seçici sönümleme etkisinden kurtarılan iletişim sistemi ortaya çıkan frekans seçici olmayan ancak büyük olasılıkla ilintili sönümlemeye sahip alt kanallar üzerinden bilgiyi iletecektir. Kullanılan iletişim kanalının üstel azalan güç gecikme profiline sahip olduğu varsayılmıştır, [3]. τ_l , çok-yollu iletişim kanalındaki l . yolun gecikmesi, τ_{max} , çok-yollu yapının sahip olduğu en yüksek gecikme miktarı ve C bir sabit olmak üzere böyle bir kanalın güç gecikme profili

$$\theta(\tau_l) = C \exp(-\tau_l/\tau_{max}) \quad (1)$$

ifadesi ile verilir. Bu güç gecikme profiline sahip kanala ait N alt kanalın etkilendikleri sönümleme katsayılarının ilintisini gösteren normalize ilinti matrisi

$$r(k, k') = \frac{1 - \exp[-L(1/\tau_{rms} + j2\pi(k - k')/N)]}{\tau_{rms}(1 - \exp(-L/\tau_{rms}))(1/\tau_{rms} + j2\pi(k - k')/N)} \quad (2)$$

ifadesi yardımıyla hesaplanabilir. $r(k, k')$ terimi normalize ilinti matrisi R 'nin k . satır ($0 \leq k \leq N - 1$), k' . sütun ($0 \leq k' \leq N - 1$) elemanını gösterir ve k . ve k' . alt kanalların sahip olduğu sönümleme katsayıları arasındaki ilinti katsayısını verir. (2) ifadesinde kullanılan τ_{rms} , yol gecikme sürelerinin standart sapması iken, L , OFDM için kullanılacak çevrimsel öneki uzunluğunu göstermektedir.

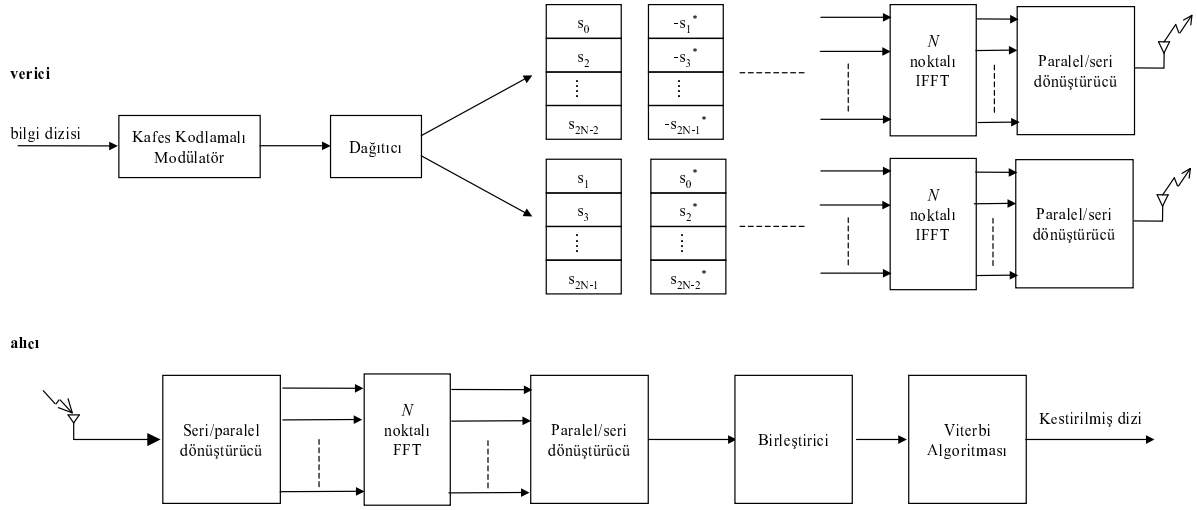
Bu çalışmada kanalın sönümleme etkisinin iki çerçeve süresi boyunca değişmediği, her iki iki çerçevelik zaman aralığı arasında ise istatistiksel bağımsız değiştiği varsayılmıştır.

3. Sistem Modeli

OFDM kullanımıyla oluşan alt kanallarda hata başarımını iyileştirmek için çeşitleme tekniklerinden yararlanır. Uzay, zaman ve frekans çeşitlemesini de içeren çeşitleme tekniklerinin amacı, iletim ortamında bağımsız kanallar ortaya çıkararak aynı bilgiye ilişkin çeşitli işaretlerin alıcıya ulaşmasını sağlamaktır. Böylece, kullanılan bağımsız kanallardan biri üzerinden iletilen işaret derin sönümleme etkisi sonucunda alıcıya çok zayıflamış olarak ulaşsa bile bir diğer kanaldan alıcıya ulaşabilecek daha az zayıflamış bir kopya alıcının hata başarımını arttıracaktır.

Bu çalışmada uzay çeşitlemesi sağlamak amacıyla son zamanlarda uygulamaları sıklıkla karşımıza çıkan dik uzay-zaman kodları kullanılmıştır. Alamouti [1] tarafından ortaya atılan bu yapı iki verici, M alıcı anten kullanarak tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır. İlintili sönümlemeye sahip alt kanallar üzerinde çeşitleme sağlamak amacıyla ise sistemin girişine kafes kodlamalı modülatör eklenmiştir. Böylece, kafes kodlamalı modülasyonun içinde barındırdığı zaman çeşitlemesinden de yararlanılmaktadır. Ancak, kullanılan IFFT işlemi nedeniyle modülatör çıkışındaki simgeler frekans bölgesindeki alt-kanallar üzerinden iletildiği için kafes kodlamalı modülasyonun sahip olduğu bu özellik tasarlanan iletişim sisteminde frekans boyutunda çeşitleme sağlayarak ilintili sönümlemeye karşı hata başarımını iyileştirir.

Önerilen tümleşik yapıda (Şekil 3), her $2N$ adet ikili simgeden oluşan bilgi dizisi kafes kodlamalı modülatör ile kodlanarak $\{s_0, s_1, \dots, s_{2N-2}, s_{2N-1}\}$ kodlanmış simge dizisini oluşturmaktadır. Üretilen $2N$ adet kodlanmış kanal simgesi iki OFDM çerçevesi süresince kanaldan iletilecektir. Bunun için, dağıtıcı, girişine gelen kanal simgelerini iki verici antene ait OFDM çerçevelerine



Şekil 3: Tümüleşik İletişim Sistemi

dağıtmaktadır. $S_0 = \text{diag}\{s_0, s_2, \dots, s_{2N-2}\}$ ve $S_1 = \text{diag}\{s_1, s_3, \dots, s_{2N-1}\}$ köşegen matrislerinin köşegen elemanları birinci çerçeve süresinde, sırasıyla, birinci ve ikinci antenden iletilecek OFDM çerçevelerine yerleştirilir. İkinci çerçeve süresince ise $-S_1^\dagger$ ve S_0^\dagger matrislerinin köşegen elemanları, sırasıyla, ilk ve ikinci antenlerden iletilecek OFDM çerçevesini oluştururlar. Burada \dagger matrisin devrik eşleniğini göstermektedir. Her iki antene ait OFDM bloğunda üretilen çerçevelerin N noktalı IFFT'si alınıp kanala ilişkin verici anten üzerinden seri biçimde iletilmektedir. Kanal sönümlenme katsayılarının iki çerçeve süresi boyunca sabit kaldığı varsayımı kullanılırsa, alıcıda, N noktalı FFT'si alınmış işaret

$$\mathbf{r} = S\mathbf{h} + \mathbf{n} \quad (3)$$

olarak elde edilir. Burada iletim matrisi S

$$S = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 \\ -S_1^\dagger & S_0^\dagger \end{bmatrix}$$

biçimindedir. $\mathbf{r}_0 = [r_0 r_2 \dots r_{2N-2}]^T$ ilk çerçeve süresinde alınan işaretin, $\mathbf{r}_1 = [r_1 r_3 \dots r_{2N-1}]^T$ ise ikinci çerçeve süresince alınan işaretin FFT çıkışını göstermek üzere \mathbf{r} vektörü $\mathbf{r} = [\mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_1^T]^T$ ile gösterilebilir. Burada T matris devriğini göstermektedir. Sönümlenme vektörü \mathbf{h} ise birinci ve ikinci kanallara ilişkin sönümlenme vektörleri cinsinden $\mathbf{h} = [\mathbf{h}_0^T \mathbf{h}_1^T]^T$ olarak ifade edilebilir. $\mathbf{h}_0 = [h_{0,0} h_{0,1} \dots h_{0,N-1}]^T$ ve $\mathbf{h}_1 = [h_{1,0} h_{1,1} \dots h_{1,N-1}]^T$ kanal sönümlenme vektörlerini göstermektedir. Bu vektörlere ilişkin $h_{i,j}$ elemanı i . verici anten ile alıcı anten arasındaki j . alt-kanalın iki çerçeve boyunca sabit kalan sönümlenme katsayısını göstermektedir. $h_{i,j}$ değerleri değişik i değerleri için istatistiksel bağımsız iken j değerleri için (2) ile verilen ilintiye sahiptir. İstatistiksel özellikleri ise sıfır ortalamalı, boyut başına 0.5 varyanslı karmaşık Gauss dağılımı ile modellenilebilmektedir. Alıcıya etkiyen gürültü bileşenleri $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_0^T \mathbf{n}_1^T]^T$ vektörü ile gösterilmiştir. $\mathbf{n}_0 = [n_0 n_2 \dots n_{2N-2}]^T$ ilk çerçeve süresince FFT çıkışında görülen gürültü örneklerini gösterirken $\mathbf{n}_1 = [n_1 n_3 \dots n_{2N-1}]^T$ ikinci çerçeve süresince çıkışta görülecek gürültü örneklerini göstermektedir. Gürültü bileşeni n_i 'ler her i değeri için istatistiksel bağımsız, sıfır ortalamalı, boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss dağılımı ile modellenmiştir. Birleştirici bloğu, dik uzay-zaman kodlarının çözülmesi için gerekli birleştirme işlemi $k = 0, 1, \dots, N-1$

için

$$\begin{aligned}\tilde{s}_{2k} &= h_{0,k}^* r_{2k} + h_{1,k} r_{2k+1}^* \\ \tilde{s}_{2k+1} &= h_{1,k}^* r_{2k} - h_{0,k} r_{2k+1}^*\end{aligned}\quad (4)$$

ifadeleri yardımıyla yapıp $\{\tilde{s}_0, \tilde{s}_1, \dots, \tilde{s}_{2N-1}\}$ kestirim değerlerini oluşturarak kod çözme işleminin gerçekleştirilmesi için Viterbi algoritması bloğuna iletir. Viterbi algoritması kafes üzerinde $M(\mathbf{s}, \bar{\mathbf{s}})$ optimum metriğini minimize eden $\bar{\mathbf{s}}$ dizisini $\hat{\mathbf{s}}$ olarak seçer:

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\bar{\mathbf{s}}} M(\mathbf{s}, \bar{\mathbf{s}}) = \arg \min_{\bar{\mathbf{s}}} \sum_{k=0}^{N-1} m(s_{2k}, \bar{s}_{2k}) + m(s_{2k+1}, \bar{s}_{2k+1}). \quad (5)$$

Viterbi algoritmasının kullandığı dal metrikleri $k = 0, 1, \dots, N - 1$ için

$$\begin{aligned}m(s_{2k}, \bar{s}_{2k}) &= (|h_{0,k}|^2 + |h_{1,k}|^2 - 1) |\bar{s}_{2k}|^2 + d^2(\tilde{s}_{2k}, \bar{s}_{2k}) \\ m(s_{2k+1}, \bar{s}_{2k+1}) &= (|h_{0,k}|^2 + |h_{1,k}|^2 - 1) |\bar{s}_{2k+1}|^2 + d^2(\tilde{s}_{2k+1}, \bar{s}_{2k+1})\end{aligned}\quad (6)$$

olarak verilebilir. Burada, $d^2(.,.)$ operatörü $d^2(x, y) = (x - y)(x - y)^*$ ile tanımlıdır. İşaret enerjilerinin eşit olduğu kümelerin (M-PSK gibi) kullanılması durumunda kullanılan metrikler

$$\begin{aligned}m(s_{2k}, \bar{s}_{2k}) &= d^2(\tilde{s}_{2k}, \bar{s}_{2k}) \\ m(s_{2k+1}, \bar{s}_{2k+1}) &= d^2(\tilde{s}_{2k+1}, \bar{s}_{2k+1})\end{aligned}\quad (7)$$

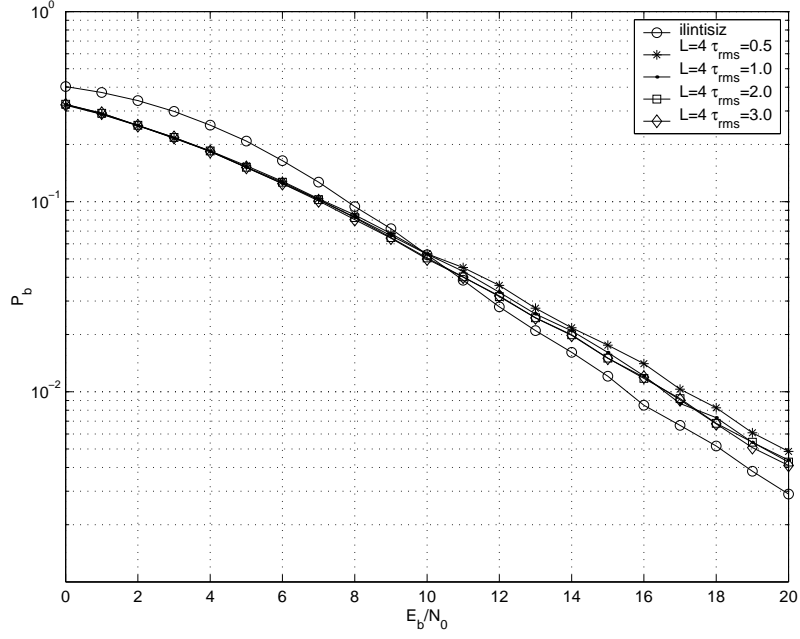
biçimine indirgenir.

4. Benzetim Sonuçları

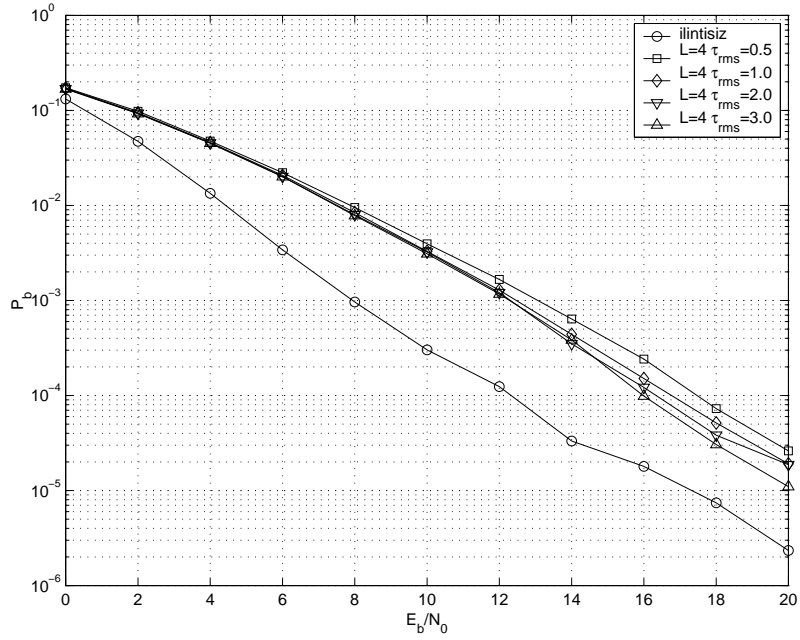
Kafes kodlamalı OFDM ile kafes kodlanmış dik uzay–zaman kodlamalı OFDM iletişim sistemlerinin ilintisiz ve ilintili sönümlenmeli frekans–seçici kanallar üzerinde bit hata olasılıkları çeşitli işaret–gürültü oranlarında bilgisayar benzetimleri yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen hata başarımları Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Bilgisayar benzetimleri sırasında $N = 64$ alt–kanal kullanan OFDM yapıları ele alınmış ve çevrimsel öneki uzunluğu $L = 4$ alınarak çeşitli güç gecikme dağılımı parametresi τ_{rms} değeri için hata başarımları elde edilmiştir. Şekil 4'te hata başarımları verilen referans kafes kodlamalı OFDM yapısında yalnızca zaman ve frekans çeşitlemeleri bulunmakta iken Şekil 5'te hata başarımları verilmiş olan yapıda dik uzay–zaman kodlarının kullanımının getirdiği uzay çeşitlemesi de bulunmaktadır. Benzetim sonuçları incelendiğinde, 10^{-3} 'lük bit hata olasılığına ulaşmak için önerilen yapının ilintisiz kanalda kafes kodlamalı OFDM'den yaklaşık $15dB$ daha az işaret–gürültü oranı gerektirdiği; ilintili kanalda ise bu farkın yaklaşık $13dB$ olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, frekans–seçici kanallar üzerinde yüksek hata başarımına sahip kafes kodlanmış dik uzay–zaman kodlamalı bir OFDM sistemi önerilmiştir. OFDM alt kanallarına ilişkin sönümleme etkilerinin ilintisiz ve ilintili olduğu durumlarda önerilen tümleşik iletişim sistemine ait bilgisayar benzetimleri yapılmış ve çeşitli işaret–gürültü oranları için hata başarımları elde edilmiştir. Benzetim sonuçları önerilen yapının içerisinde barındırdığı uzay çeşitlemesi sayesinde kafes kodlamalı OFDM'e göre büyük miktarda kazanç sağladığını göstermektedir.



Şekil 4: Kafes kodlamalı OFDM sistemin bit hata olasılığı



Şekil 5: Kafes ve uzay-zaman kodlamalı OFDM sistemin bit hata olasılığı

Kaynakça

- [1] Alamouti, S.M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE J. Select. Areas on Commun., vol. 16, s.1451-1458, 1998.
- [2] Cimini, L.J., Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", IEEE Trans. on Commun., vol. 33, s.665-675, 1985.
- [3] Wahlqvist, M., Östberg, C., Van De Beek, J.J., Edfors, O. ve Börjesson, P.O., "A conceptual study of OFDM-based multiple access schemes: part 2", Technical Report Tdoc 116/96, ETSI STC SMG2, vol. 18, 1996.