

OFDM Sistemlerinde Kanal Denkleştiriciler ve Başarım Analizleri

Birol SOYSAL, Ali ÖZEN, İsmail KAYA
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
61080 Trabzon
birsoy@ieee.org, aliozen@ieee.org, ikaya@ieee.org

Özet: *Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM), yüksek hızda veri iletimine olanak sağladığı ve simgelerarası girişime (Intersymbol Interference-ISI) karşı dayanıklı olduğu için, bir çok standartta modülasyon biçimi olarak seçilmiştir. Ancak, çok yollu yayılımın getirdiği enerji çoğullama özelliğini yeterince kullanamadığı için yüksek işaret gürültü oranına (Signal to Noise Ratio-SNR) gereksinim duymaktadır. Bu çalışmada, OFDM sisteminin özellikle yüksek SNR gereksinimi üzerinde durularak, zaman ve frekans bölgesi kanal denkleştiriciler kullanılarak başarımının artırılmasına çalışılmıştır. Ayrıca, anten çeşitlemesi ve kanal denkleştiricilerin vericiye taşınmasıyla elde edilen ön-kanal denkleştirici (pre-equaliser) yöntemleriyle de sistem başarımının nasıl etkilendiği incelenmiş, bilgisayar benzetim sonuçları verilerek karşılaştırılmıştır.*

1. Giriş

İletişim teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler, önce insanlara kaliteli ve hızlı iletişim olanağı sağladı. Ardından insanları kablolu iki ucunda oturma zorunluluğundan kurtardı, hareketlilik kazandı. Daha sonra bir ağ üzerinden kişisel bilgisayarlarındaki belgelere erişmeyi, değiştirmeyi ve yazdırmayı sağladı. Sonrasında insanlar bilgisayarlarını çantalarına koyup seyahat etmeye başladılar. Bürolarından kilometrelerce uzaktayken sekreterlerine belge verip almaya hatta, farklı bir şehirde yapılmakta olan toplantılara katılmaya başladılar. Kısacası, herhangi bir zamanda, dünyanın herhangi bir yerindeki herhangi bir kişiyle iletişim artık saniyeler içinde kurulabilmektedir. Özellikle kablosuz iletişim sistemlerindeki gelişmeler bu olanakları sağlamaktadır.

Çoklu-ortamlı (multimedia) uygulamaların gerektirdiği en önemli özellik yüksek veri hızıdır. Bunun klasik iletişim sistemleri ile sağlanabilmesi için, ya çok geniş frekans bandı kullanılmalı ya da, verici gücü önemli ölçüde artırılmalıdır. Bir diğer seçenek her ikisinin birlikte uygulanması olabilir. Oysa, günümüzde kullanılacak frekans bandı sınırlı olduğu gibi, elektromagnetik yayılımın insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı, verici gücünün de belirli değerlerin altında tutulması zorunluluğu bulunmaktadır.

Tek taşıyıcı sistemlerle çoklu-ortamlı uygulamaların gerektirdiği veri hızlarına çıkmanın mümkün olmadığı anlaşılınca, çok taşıyıcı sistemlerin tasarlanması gündeme gelmiş oldu. HIPERLAN/2 [1] olarak adlandırılan ve ETSI tarafından geliştirilen standart ile IEEE tarafından geliştirilen 802.11a [2] standardı, 54 Mb/s dahil olmak üzere değişik veri hızlarını desteklemektedirler. OFDM, bu standartlarda modülasyon türü olarak seçilmiştir. Yüksek veri hızlarını desteklemesi ve simgelerarası girişime karşı dayanıklı olmasına rağmen, çok yollu yayılımın sağladığı enerji çoğullama özelliğinden yeterince yararlanamadığı için yüksek SNR'ye ihtiyaç duymaktadır [3]. Verici gücünü arttırmadan ve iletişimin kalitesini düşürmeden alıcıda SNR'yi arttırmak için çeşitleme, uyarlanırlar anten dizileri ve kodlama teknikleri ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilirler [4-6]. Kodlamada veri hızını düşürmeden veya kullanılan bant genişliğini arttırmadan SNR'yi arttırmak mümkün değildir. Uyarlanırlar anten dizileri sistemi ise geniş bir alan gerektirmektedir. Çeşitleme teknikleri daha ekonomik ve kullanışlı oldukları için endüstride daha çok tercih edilmektedir [5].

Diğer yandan, modülasyonlu işaretin bant genişliği, radyo kanalının evreuyumlu bant genişliğini (coherent frequency band) aşarsa girişim ortaya çıkar ve bunun sonucu olarak da darbeler zamanda birbiri üzerine yayılır. Bu ise alıcıda sinyalin hatalı algılanmasına neden olur ve başarımı düşürür [7]. OFDM sistemlerde kanalın olumsuz etkilerini gidermek ve başarımı arttırmak için frekans ve zaman bölgesi kanal denkleştiriciler kullanılmaktadır. Bu çalışmada CMF-DFE (Channel Matched Filter-Decision Feedback Equaliser), zaman bölgesi kanal denkleştirici olarak kullanılmıştır. CMF-DFE, özellikle yüksek veri hızına sahip iletişim sistemlerinde kullanılacak başarımı yüksek ve hesaplama karmaşıklığı düşük olan bir kanal denkleştiricidir [8]. Frekans bölgesi kanal denkleştirici, zaman bölgesi kanal denkleştiriciye göre daha basit bir yapıya sahip

olup, denkleştirici katsayıları, paketinin başında gönderilen ve alıcı tarafından bilinen eğitici dizi (training sequence) yardımıyla hesaplanmaktadır [3].

2. Zaman ve Frekans Bölgesi Kanal Denkleştiriciler

Şekil 1’de zaman bölgesi kanal denkleştirici CMF-DFE’nin yapısı görülmektedir. Kanal uyumlu süzgeç (Channel Matched Filter-CMF), kanalın dallı gecikme hat süzgeç modelinin (Tapped Delay Line-TDL) aynadaki aksidir. CMF katsayıları kanal katsayılarının karmaşık eşleniğidir. Kanal uyumlu filtre geniş bantlı iletişim sistemlerinde kanaldaki enerjiyi bir noktaya toplamak için kullanılır. CMF çıkışında en büyük ve gerçek değerli işaret merkez dalda (centre tap) olmakta, diğer dallarda ise karmaşık eşlenik değerli işaretler olmaktadır. Eğer eşzamanlama noktası merkez dala ayarlanırsa optimum örnekleme noktası yakalanmış olur. Diğer dallardaki işaretler girişim bileşenleri olur [8,9]. AWGN (Additive White Gaussian Noise) toplanır beyaz Gauss gürültüsünü, X iletilen veri dizisini, V alıcı girişindeki veri dizisini, Y CMF çıkışındaki veri dizisini, \hat{X} kanal denkleştirici çıkışındaki veri dizisini, \bar{X} detektör çıkışındaki veri dizisini ve η ise toplanır beyaz Gauss gürültüsü vektörünü göstermek üzere;

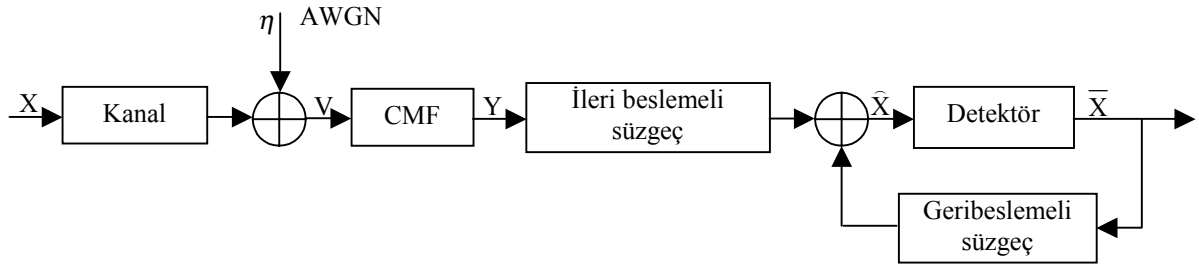
$$v_k = f_0 x_k + f_1 x_{k-1} + f_2 x_{k-2} + \dots + f_{L-1} x_{k-L+1} + f_L x_{k-L} + \eta_k$$

$$v_k = \sum_{i=0}^L f_i x_{k-i} + \eta_k \quad (1)$$

olarak alıcı girişindeki işaret elde edilir. Burada f_i ($i=0,1,\dots,L$) kanal katsayılarını k ise ayrık zaman indisini göstermektedir. Kanal denkleştirici CMF-DFE çıkışındaki işaret ise,

$$\hat{x}_k = \sum_{i=-L_f}^0 c_i y_{k-i} + \sum_{i=1}^{L_b} c_i \bar{x}_{k-i} \quad (2)$$

olarak elde edilir. Burada $L_f + 1$ ileri beslemeli süzgecin dal sayısı, L_b geribeslemeli süzgecin dal sayısı, c_i ($i=-L_f,\dots,0,\dots,L_b$) kanal denkleştirici katsayıları, \hat{x}_k kestirilmiş simge ve \bar{x}_k karar verilmiş simgedir. Eşzamanlama merkezdeki gerçek değerli dala yapılarak, istenilen simge x_k öncesindeki L_b adet girişim bileşeninin ve sonrasındaki $L_f + 1$ adet girişim bileşeninin temizlenmesi için, kanal denkleştirici katsayılarını hesaplamak üzere katsayılar matrisi Toeplitz biçimli olan bir denklem takımı oluşturulur. Bu denklem takımının oluşturulması ve çözümü [8,10]’da verilmektedir. Kanal denkleştirici katsayılarının güncellenmesi, kanal katsayılarının güncellenmesinin hemen ardından yapılır.



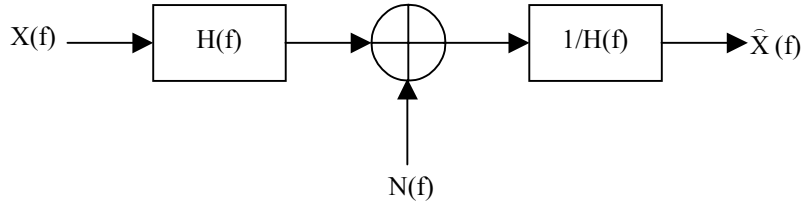
Şekil 1. Zaman bölgesi kanal denkleştirici CMF-DFE’nin blok şeması.

OFDM sisteminde 64 alt-taşıyıcı kullanmanın getirdiği avantajlardan biri de, kanalın frekans seçiciliğinden kurtulmayı sağlamasıdır. Tek taşıyıcılı sistemlerde derin sönümlenmelerin meydana geldiği durumlarda iletişim kesilebildiği halde, OFDM sisteminde birkaç alt-taşıyıcının sönümlenmeye uğraması halinde iletişim sürdürülebilmektedir [13]. Bir iletişim sisteminde meydana gelen sembollerarası girişimi ortadan kaldırmak için yapılan kanal denkleştirme işlemi aslında, zaman veya frekans bölgesinde kanalın tersinin hesaplanmasından başka bir şey değildir [7]. $X(f)$ kanal girişindeki işaretin, $H(f)$ kanalın ve $N(f)$ toplanır beyaz Gauss gürültüsünün Fourier dönüşümleri olmak üzere, Şekil 2’de gösterilen frekans bölgesi kanal denkleştirici çıkışındaki işaret;

$$\hat{X}(f) = [X(f)H(f) + N(f)]/H(f)$$

$$= X(f) + N(f)/H(f) \quad (3)$$

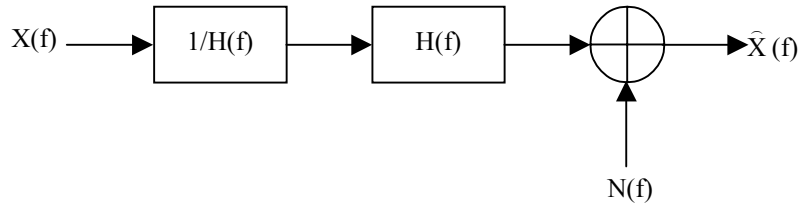
olur. Kanalin frekans bölgesi karşılığı hesaplanırken 64 noktalı FFT kullanılacak olursa, her bir alt-taşıyıcı için bir katsayı bulunmuş olur. Dolayısıyla, frekans bölgesi kanal denkleştirici de, 64 adet bir dallı kanal denkleştiriciden meydana gelmiş olur.



Şekil 2. Frekans bölgesi kanal denkleştirici.

3. Ön-kanal Denkleştirici ve Çeşitleme Tekniği

Gezgin ünitenin yapısını basitleştirmek, enerji tüketimini azaltmak ve karmaşık algoritmaların gerçekleştirildiği bir sistem olmaktan çıkarıp, sadece işaret algılama işini yapan basit bir sistem haline dönüştürmek için, kanal denkleştirici vericiye taşınabilir [11,12]. Bu durumda kanal kestirme ve kanal denkleştirici katsayılarının hesaplanması işlemleri de vericide gerçekleştirilmek zorundadır. Böyle bir sistemin en büyük dezavantajı ise, kanalı vericide kestirebilmek için bir geri-besleme kanalına (Feedback Channel) ihtiyaç duymasındır. Bunun için gerekebilecek ek donanım için fiziksel alan ve enerji vericide fazlasıyla vardır. Böylece, gezgin ünite enerji harcayan ve yer kaplayan donanımın bir kısmı vericiye taşınmış olur.

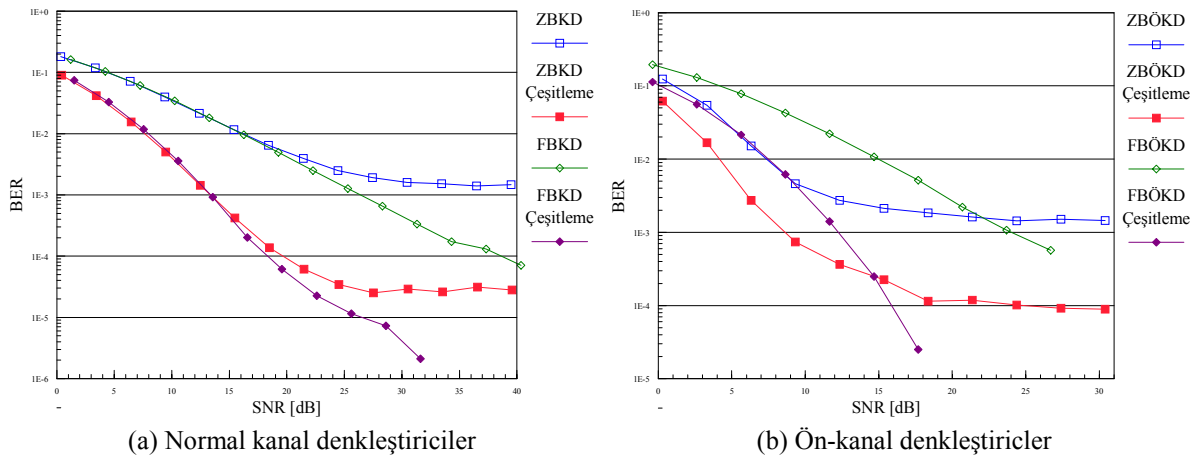


Şekil 3. Frekans bölgesi ön-kanal denkleştirici.

Şekil 3'te verilen ön-kanal denkleştiricili sistemde alıcı girişindeki işaret;

$$\begin{aligned}\hat{X}(f) &= [X(f)/H(f)]H(f) + N(f) \\ &= X(f) + N(f)\end{aligned}\quad (4)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4. Zaman ve frekans bölgesi kanal denkleştiricilerinin BER başarımları.

Günümüz iletişim sistemlerinde değişik çeşitleme teknikleri kullanılmaktadır. Zaman, frekans ve anten çeşitlemesi bunlardan bazılarıdır. Bu çalışmada, vericiden gönderilen işaretin iki farklı antenden alınıp uygun şekilde birleştirilmesiyle elde edilen anten çeşitlemesi incelenmiştir. Gerek zaman bölgesi kanal denkleştiricide ve gerekse frekans bölgesi kanal denkleştiricide anten çeşitlemesinin iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

4. Bilgisayar Benzetim Sonuçları

OFDM sisteminin benzetimi Visual C++6.0TM ortamında gerçekleştirilmiştir. Kanal profili, ortalama dal ağırlık katsayıları (0.227, 0.460, 0.688, 0.460, 0.227) olan, 5 dallı Rayleigh kanal modeli kullanılmıştır. Benzetim her kanaldan 10 OFDM simgesi gönderilmek suretiyle 500 kanal üzerinden yapılmıştır. CMF-DFE benzetiminde 9 dallı ileri beslemeli süzgeç ve 4 dallı geribeslemeli süzgeç kullanılmıştır. Yapılan benzetimlerde kanal katsayılarının bilindiği kabul edilmiştir. Şekil 4-a'da zaman ve frekans bölgesi kanal denkleştiricilerin alıcıda olması durumunda, çeşitleme olması ve olmaması durumunda başarımları verilmektedir. Ön-kanal denkleştirici durumunda gönderilen işaret, verici gücünü sınırlamak için kanaldan önce ortalama değere normalize edilmiştir. Şekil 4-b'de ise zaman ve frekans bölgesi kanal denkleştiricilerin vericiye taşınması durumunda çeşitleme varken ve yokken başarımları verilmektedir.

5. Sonuç

Kanal katsayılarının bilindiği kabul edilerek yapılan benzetim sonuçlarında, Şekil 4-a'da görüldüğü gibi zaman ve frekans bölgesi kanal denkleştiriciler arasında gürültünün etkin olduğu bölgede önemli bir başarımlar farkı yoktur. Girişimin etkin olduğu bölgede ise, zaman bölgesi kanal denkleştiricinin hata eşiğinden dolayı frekans bölgesi kanal denkleştiricinin başarımları daha yüksektir. Ön-kanal denkleştirici durumunda ise, zaman bölgesi kanal denkleştirici Şekil 4-b'de de görüldüğü gibi gürültünün etkin olduğu bölgede frekans bölgesi kanal denkleştiriciden daha yüksek başarımlara sahiptir. Fakat girişimin etkin olduğu bölgede frekans bölgesi kanal denkleştiricinin başarımları daha yüksektir. Bunun nedeni yine zaman bölgesi kanal denkleştiricinin hata eşiğinin olmasıdır. Bu eşik, süzgeç boyu uzatılarak aşağı çekilebilmesine karşın tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Ön-kanal denkleştiricinin ve çeşitlemenin başarımları her iki kanal denkleştirici için de arttırdığı görülmüş, zaman bölgesi ön-kanal denkleştirici kullanılması durumunda başarımların daha fazla arttığı belirlenmiştir.

Teşekkür

Yazarlar bölümümüzde yapılan OFDM çalışmalarına gösterdikleri ilgi ve destek için ProVition Ltd. (UK) firması çalışanlarından Prof.Dr. A.R. Nix, Dr. Y. Baltacı, ve Dr. M.F. Tariq'a teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1]. IEEE Std. 802.11a –1999 Supplement to IEEE Standard for Information Technology-High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band.
- [2]. ETSI Broadband Radio Access Networks; HIPERLAN Type 2 Technical Specifications; Physical Layer.
- [3]. Soysal B, Özen A ve Kaya İ., "OFDM Sistemlerinde Çokyollu Yayılımın Etkileri ve Uyarlanırlık Kanal Denkleştiricileri", 10. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Pamukkale, Denizli, 2002.
- [4]. Proakis J.G., "Digital Communications", McGraw-Hill, Fourth Edition, 2001.
- [5]. Balaban P, Salz J, "Optimum Diversity Combining and Equalisation in Digital Data Transmission with Applications to Cellular Mobile Radio- Part I: Theoretical Considerations and Part II: Numerical Results", *IEEE Transactions on Com.*, Vol.40, No. 5, May 1992, s. 885-907.
- [6]. Adachi F., "Multi-rate Wideband DS-SS: promising radio access technology for wireless multimedia communications", Proceedings of the IRCTR Colloq. on Indoor Comm., s. 17-25, Delft, Netherlands, 24 Oct. 1997.
- [7]. Rappaport T. S., Wireless Communications. Prentice Hall, A.B.D., 1996.
- [8]. Kaya İ., Nix A. R. ve Benjamin R., "Exploiting Multipath Activity Using Low Complexity Equalisation Techniques for High Speed Wireless LANs", VTC'98, IEEE 48st Vehicular Tech. Conference Proceedings, Vol. 2, s.1593-1597, 1998.
- [9]. Baltacı Y., Kaya İ. ve Nix A., "Implementation of a HIPERLAN/1 Compatible CMF-DFE Equaliser", IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings, Vol. 3, s.1884-1888, VTC 2000-Spring, Tokyo.
- [10]. Hayes M.H., Statistical Digital Signal Processing and Modelling. John Wiley and Sons, 1996.
- [11]. Kaya İ., "A Study of High Performance Equalisation and Pre-Equalisation for High Speed Wireless Data Communications", Ph.D. Thesis, Centre for Communications Research, University of Bristol, April 1998.
- [12]. Harashima H., Miyakawa H., "Matched-Transmission Technique for Channels with Inter-Symbol-Interference", IEEE Trans. on Commun., Vol. COM-20, s. 774-780, August 1972.
- [13]. Nee R. V., Prasad R., "OFDM For Wireless Multimedia Communications", Artech House Publishers, Boston, 2000.