

Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim (CDMA) İletişiminde Gauss Olmayan Sönümlü Kanal Kestirimi İçin Pearson Sistemi'ne Dayalı Gözü Kapalı Kaynak Ayırıştırma Yöntemi

Pearson System-Based Blind Source Separation For Estimating Non-Gaussian Fading Channels In CDMA Communication

Olca Kalkan, Mustafa A. Altinkaya

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

{olcaykalkan, mustafaaltinkaya}@iyte.edu.tr

Özetçe

Gözü kapalı kaynak ayırıştırma için yeni bir yaklaşım olan Pearson Sistemi, vericiden gezgin alıcıya kod bölüşümlü çoklu erişim (CDMA) iletişiminde kullanıcının sinyalinin diğer kullanıcıların girişim oluşturan sinyallerinden ayrıştırılması için kullanılmıştır. Sönümlenmeli kanalın dürtün özellikler taşıdığını gösteren bazı kanal ölçümleri dikkate alınarak, sönümlenmeli kanalın katsayıları Gauss dağılımına yakın olmakla birlikte 1,8 ile 1,9 arasındaki alfa değeri ile daha dürtün nitelikli alfa-kararlı bir dağılımla modellenmiştir. Benzetim çalışmaları geleneksel bir CDMA alıcısı olan en küçük ortalama karesel hata alıcısı kanalı kestiremezken bağımsız bileşen analizine (BBA) dayalı yöntemlerin başarılı olduğunu, önerdiğimiz Pearson Sistemi'ne dayalı BBA yönteminin ise yalnızca hiperbolik tanjant değer işlevi kullanan BBA yönteminden daha hızlı olması nedeniyle öne çıktığını göstermektedir.

Abstract

In this work, a Pearson System based-blind source separation method is used for detecting the signal coming to a mobile user which is subject to multiple access interference in a CDMA downlink communication. Considering some fading channel measurements showing that the fading channel coefficients may have an impulsive nature, these coefficients are modeled with an α -stable distribution whose shape parameter α takes values between 1.8 and 1.9. These α values show that the distribution resembles a Gaussian distribution but has a more impulsive nature. Simulation studies show that the conventional MMSE receiver fails in this impulsive fading scenario. Both the independent component analysis (ICA) method using the conventional hyperbolic tangent score function and the Pearson System-based ICA are successful in estimating the channel coefficients and the proposed Pearson System-based ICA method performs faster.

1. Giriş

Kod bölüşümlü çoklu erişim (CDMA), yayılı izge (spread spectrum) yöntemine dayalı bir veri iletişim tekniğidir. Yüksek kanal kapasitesi ve eş-zamanlı olmayan birden fazla kullanıcıya izin verdiği için CDMA, yeni nesil gezgin iletişimde benimsenen çoklu erişim tekniği olmuştur. Tüm sistemlerde olduğu gibi iletilen sembelleri yüksek performansla kestirmek için alıcının, kanal bilgisine sahip olması gerekir. Bu yüzden pratik eş-zamanlamasız bir CDMA sisteminde kanal kestirimini de başarıyla yapan yöntemler üzerinde çalışılmaktadır.

Gezgin iletişim sistemlerinde, çok yollu sönümlenmeli kanal genellikle Gauss dağılımı ile modellenmektedir. Alınan sinyalin eşvreli ve dikevreli bileşenleri için yapılan Gauss kabulü ile sinyalin zarfı için Rayleigh ve Rice dağılımı, fazı için de düzgün

dağılım kullanılmış olur [1]. Gauss dağılımı kabulünün altında, kanalın merkezi limit teoremini sağlaması yatar [1,2]. Ancak görgül sonuçlar, bazı sönümlenmeli kanalların Gauss dağılımına uymadığını göstermektedir [2]. Avrupa'da GSM sistemi üzerinde yapılan ölçümler alıcıdaki sinyalin dikevreli ve eşvreli bileşenlerinin çoğu zaman Gauss dağılımından saptığını ve böylece zarfın her zaman Rayleigh veya Rice dağılımlı olmayacağını göstermiştir [3]. Çoğu iletişim sistemi, Rayleigh veya Rice sönümlenmeli kanal için tasarlandığından, kanal istatistiklerinin Gauss'dan sapsması sistemin performansını olumsuz etkilemektedir [4]. Literatürde kanal katsayıları için dürtün (impulsive) niteliği Gauss dağılımından fazla olan Middleton Class A ve Gauss-Laplace modelleri ile SIRP (spherically invariant random process) gibi dağılımlar da kullanılmıştır [1,2,3,5]. Bu çalışmada kanalın katsayılarının dağılımı alfa kararlı dağılımlarla modellenmiştir. Alfa parametresi dağılımın dürtünlüğünü kontrol etmekte ve alfa=2 değeri için Gauss olan alfa kararlı dağılım alfa küçüldükçe daha dürtün ya da başka bir deyişle etekleri daha dolu bir nitelik kazanmaktadır [6]. Bu çalışmada kullanılan 1,8 ve 1,9 alfa değerleri Gauss'a yakın olmakla birlikte dürtün örneklerle daha sık rastlanan bir alfa kararlı dağılımı belirlemektedir.

CDMA iletişiminde istasyondan kullanıcıya iletimde, kullanıcının kendisi dışındaki kullanıcıların yayma dizisini bilmemesi yüzünden kendisine gelen sinyali bütün kullanıcıların sinyalleri arasından ayırıştırması bir gözü kapalı kaynak ayırıştırma problemidir. Bu yüzden son yıllarda CDMA sistemlerinde bağımsız bileşen analizi (BBA) ile simge sezimi yapılan çok sayıda uygulamaya teknik yazında rastlanmaktadır [7,8,9,10]. Bu çalışmalarda ele alınan CDMA sistemlerinde bazı farklılıklar vardır. [7]'deki iletişim kanalı idealdir ve simge sezimi için düzenlenmiş BBA'ya dayalı bir gözü kapalı uyarlanabilir sezici kullanılmaktadır. [8] ve [9]'da kanal sönümlenmeli olmakla birlikte sönümleme katsayısı tüm benzetim süresince aynı kalmaktadır. Bu çalışmalardan [2]'de eş-zamanlamasız bir CDMA sisteminde hızlı BBA ile kanal gecikmesi kestirilmektedir. Bazı çalışmalarda ise, BBA, CDMA sistemine geleneksel alıcı yapılarına eklenerek uygulanmıştır. Bunlardan biri olan [9]'da, BBA, Rake alıcısına ve en küçük ortalama karesel hata (MMSE) alıcısına eklenerek, BBA-Rake ve BBA-MMSE alıcıları oluşturulmuştur. Böylece daha iyi performanslı simge kestirimi yapılmıştır. [10] ise daha gerçekçi bir kanal modeli olan seçici sönümlenmeli kanalın katsayılarının kestirildiği bir CDMA-BBA uygulamasıdır. Kanalın dikevreli ve eşvreli bileşenlerinin zaman ilintili Gauss olduğu kabul edilmiştir. Zaman ilintisi kullanılarak karmaşıklığı en küçültme (complexity minimization) yöntemiyle kanal kestirilmeye çalışılmıştır. Bizim çalışmamızda, CDMA iletişiminde, Gauss'a çok yakın dağılımlara sahip kanalın katsayıları, bilinen kaynak ayırıştırma yöntemlerinden hızlı olan Pearson Sistemi'ne dayalı kaynak ayırıştırma yöntemi ile kestirilmiştir.

Pearson Sistemi gözü kapalı kaynak ayrıştırma için kullanılan yeni bir yaklaşım olup kaynak dağılımlarını modellemek için kullanılır. Bu sistemin önemli bir avantajı, dağılımın yamukluğunu (skewness) da dikkate almasıdır. Ayrıca normal dağılıma yakın dağılımları modellemede de başarılı olduğu için bu yöntem Gauss dağılımı aynı savrukluğu (kurtosis) olan kaynakları da ayırabilir [11,12].

Bildirinin 2. bölümünde Pearson Sistemi'ne dayalı kaynak ayrıştırma yönteminden bahsedilecek, 3. bölümde, kullanılan CDMA modeli anlatılacak, 4. ve 5. bölümde ise kanal kestirimi anlatılacak ve benzetim sonuçları incelenecektir. Son olarak 6. bölümde vargılar bildirilecektir.

2. Pearson Sistemi'ne Dayalı Gözü Kapalı Kaynak Ayrıştırma

BBA, birbirlerine doğrusal olarak karışmış bağımsız sinyal kaynaklarının kestirimi için kullanılan bir yöntemdir. Klasik bir BBA modeli şu şekildedir:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}. \quad (1)$$

Burada \mathbf{A} karışım matrisi, s bağımsız kaynaklardan oluşan kaynak vektörü ve \mathbf{x} gözlem vektörüdür. Eldeki tek bilgi kaynakların bağımsız olması ve Gauss olmamalarıdır. Amaç \mathbf{x} gözlem vektörünü kullanarak \mathbf{W} matrisini bulmaktır. Bu matris kullanılarak

$$\tilde{\mathbf{s}} = \mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (2)$$

eşitliğiyle kaynaklar tekrar elde edilmeye çalışılır.

Kaynak dağılımları biliniyorsa, değer işlevi (score function), karşılık işlevi (contrast function) için en iyi seçimdir. Eğer bilinmiyorsa kaynak dağılımları, parametrik model ile en büyük olasılırlık (ML) yönteminde olduğu gibi kestirilebilir. Böylece BBA için ML yaklaşımı kullanıldığında, karşılık işlevi olarak öngörülen kaynak dağılımının değer işlevi kullanılabilir. Pearson Sistemi, birçok kaynak dağılımını modelleyebilir ve farklı yamukluk (skewness) ile savrukluk (kurtosis) değerlerinin olduğu geniş bir aralığı kapsar [11,12].

Pearson Sistemi bir türevsel denklem ile

$$f'(x) = \frac{(x-a)f(x)}{b_0 - b_1x + b_2x^2} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanabilir [11]. a , b_0 , b_1 ve b_2 dağılımın parametreleridir. (3) kullanılarak değer işlevi,

$$\Psi(x) = \frac{-f'(x)}{f(x)} = \frac{(x-a)}{b_0 - b_1x + b_2x^2} \quad (4)$$

elde edilir. Buradaki parametreler, momentler yöntemi ile μ_2 ikinci, μ_3 üçüncü, μ_4 dördüncü momentler olmak üzere;

$$b_1 = a = -\frac{\mu_3(\mu_4 + 3\mu_2^2)}{C}, \quad (5)$$

$$b_0 = -\frac{\mu_2(4\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2)}{C}, \quad (6)$$

$$b_2 = -\frac{(2\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2 - 6\mu_2^3)}{C} \quad (7)$$

şeklinde kestirilebilir. Burada $C = 10\mu_4\mu_2 - 12\mu_2^3 - 18\mu_3^2$ olarak bulunur.

Momentler yönteminde, teorik momentler, örneklem momentler ile veriden yararlanarak

$$\hat{\mu}_1 = \bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad \hat{\mu}_2 = \hat{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}$$

$$\hat{\mu}_3 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{n\hat{\sigma}^3}, \quad \hat{\mu}_4 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{n\hat{\sigma}^4}$$

olarak kestirilebilir [11,12]. Kestirilen parametreler (4)'de kullanılarak değer işlevi bulunmuş olur. Elde edilen değer işlevi BBA'da olduğu gibi doğal gradyan veya görelî gradyan algoritmasında

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \eta(I - \Psi(\bar{\mathbf{y}})\bar{\mathbf{y}}^T) \mathbf{W}_k, \quad (8)$$

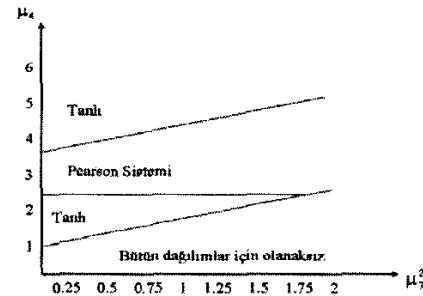
sabit nokta algoritmasında ise

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + D\{E\{\Psi(\bar{\mathbf{y}})\bar{\mathbf{y}}^T\} - \text{diag}\{E\{\Psi(y_i)y_i\}\}\} \mathbf{W}_k$$

$$D = \text{diag}\{1/(E\{\Psi(y_i)y_i\} - E\{\Psi''(y_i)\})\} \quad (9)$$

şeklinde kullanılır.

Pearson Sistemi, normal dağılıma yakın, savrukluğu normal dağılımı aynı olan dağılımları modellemekte başarılıdır. Normal dağılımdan farklı dağılımları modellemek önemli bir avantaj sağlamadığı için, savrukluğu normal dağılımın savrukluğundan farklı olan dağılımlarda, tanh(.) gibi doğrusal olmayan bilinen karşılık işlevleri kullanılır. Bu sayede hesaplama hızı da artmış olur. Hangi karşılık işlevinin kullanılacağı μ_3 ve μ_4 momentlerinin Şekil 1'de gösterilen bölgelerden hangisine dahil olduğuna göre belirlenir [11,12].



Şekil 1: Pearson Sistemi kaynak ayrıştırmasında kullanılacak karşılık işlevinin μ_3 ve μ_4 'e göre belirlenmesi.

3. CDMA Modeli

CDMA, yayılı izge yöntemine dayalı, bir veri iletişimi tekniğidir. Böyle bir sistemde alıcadaki asıl amaç iletilen sembeleri kestirmektir. Ancak bunun için öncelikle kanal kestirimi ve kod eş zamanlaması yapılmalıdır. Pratik bir eş-zamanlamasız CDMA sisteminde farklı kullanıcıların yayma kod dizileri birbirlerine dik olmadığı için ve aynı anda birden fazla kullanıcı iletişimde olduğu için sistem daha karmaşıktır. Fakat yüksek kanal kapasitesi ve eş-zamanlı olmayan birden fazla kullanıcıya izin

vermesi yüzünden CDMA 3. nesil gezgin iletişim sistemlerinde benimsenen çoklu erişim tekniği olmuştur. Bu çalışmada kullanılan sönmülemeli kanalda çokyollu (baz istasyonu-gezinici) iletim modeli şöyledir [10]:

$$r(t) = \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^K b_{km} \sum_{l=1}^L a_{lm} s_k(t - mT - d_l) + n(t) \quad (10)$$

Burada a_{lm} , m . simgeye bağlı l . yolun sönmüleme katsayısını, $b_{km} \in \{+1, -1\}$ k . kullanıcının m . simgesini, $s_k(t) \in \{+1, -1\}$ k . kullanıcının yayma kod dizisini, d_l l . yolun gecikmesini belirtmektedir. $n(t)$ gürültüdür. Sistemde K kullanıcı ve L bağımsız yol vardır. N gözlenen simge sayısıdır. Kod dizisi uzunluğu ise C 'dir.

Gelen işaret örneklerinden C uzunluğunda vektörler oluşturup

$$\mathbf{r}_m = [r(mC) \quad r(mC+1) \quad \dots \quad r((m+1)C)]^T$$

şeklinde (10)'u tekrar yazarsak;

$$\mathbf{r}_m = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L [a_{l,m-1} b_{k,m-1} \mathbf{g}_{kl} + a_{l,m} b_{k,m} \bar{\mathbf{g}}_{kl}] + \mathbf{n}_m \quad (11)$$

olur. Burada

$$\mathbf{g}_{kl} = [s_k(C-d_l+1) \quad \dots \quad s_k(C) \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{g}}_{kl} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad s_k(1) \quad \dots \quad s_k(C-d_l)]^T \quad (13)$$

olarak gösterilen "erken" ve "geç" kod dizileri olup (10)'daki modeli matrislerden oluşan gösterimiyle şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\mathbf{R} = \mathbf{GF} + \mathbf{N}. \quad (14)$$

Bu eşitlikte \mathbf{G} matrisi kodları ve gecikmeleri içerirken, \mathbf{F} matrisi simgeleri ve sönmüleme katsayılarını içermektedir:

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_{11} \quad \bar{\mathbf{g}}_{11} \quad \dots \quad \mathbf{g}_{KL} \quad \bar{\mathbf{g}}_{KL}]_{C \times 2KL}, \quad \mathbf{F} = [f_1 \quad \dots \quad f_N]_{2KL \times N}$$

Burada

$$f_m = [a_{1,m-1} b_{1,m-1} \quad a_{1,m} b_{1,m} \quad \dots \quad a_{L,m-1} b_{L,m-1} \quad a_{L,m} b_{L,m}]^T \text{dir.}$$

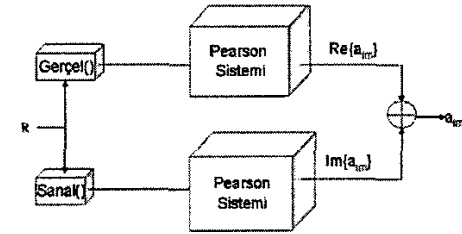
Görüldüğü gibi (14), gürültülü doğrusal BBA-göz kapalı kaynak ayrıştırma (ICA-BSS) modeli ile aynıdır.

4. Kanal Kestirimi

Daha önce belirtildiği gibi, Avrupa'da GSM sistemi üzerinde yapılan ölçümler alıcıdaki sinyalin dikevreli ve eşevreli bileşenlerinin çoğu zaman Gauss dağılımından saptığını ve böylece zafın her zaman Rayleigh veya Rice olamayacağını göstermiştir [3]. Çoğu iletişim sistemi, Rayleigh veya Rice sönmülemeli kanal için tasarlandığından, kanal istatistiğinin Gauss'dan sapması sistemin performansını olumsuz etkilemektedir [4]. Literatürde, kanal katsayılarının dağılımları Class A modeli, Gauss-Laplace karışım modeli ve SIRP gibi dağılımlarla modellenmiştir [1,2,3,5]. Sönmüleme katsayılarının dağılımlarının farklı durum ve çevre şartlarına göre modellenebilmesi için çeşitli çalışmalar devam etmektedir [1]. Bu çalışmada kanalın katsayıları alfası 1,8-1,9 arasında olan alfa-

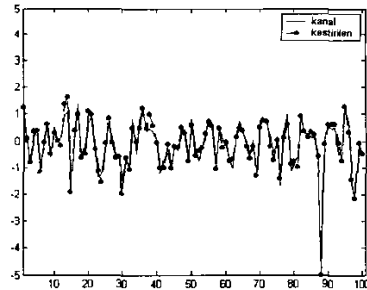
kararlı bir dağılımla modellenmiştir. Gauss dağılımı da alfa kararlı dağılım ailesinin bir üyesidir, alfa=2 olduğunda alfa kararlı dağılım Gauss olmaktadır [6]. Alfa'nın 2'ye çok yakın değerleri için kanalı Gauss dağılımından saptığı ama Gauss'a çok yakın ancak daha dürtün dağılımlara sahip olduğu durumları modelleyebiliriz. Pearson Sistemi tabanlı gözü kapalı kaynak ayrıştırma metodu, Gauss dağılıma yakın dağılımları, dağılımın asimetrisini de kullanarak ayrıştırma başarılı olduğundan kanal kestiriminde tercih edilmiştir.

Bu sistemde, kanal katsayılarının belirli bit uzunluğunda sabit kaldığı kabul edilmektedir. Yardımcı bitler daha önceden kestirilen sönmülemeli kanalın katsayısının sabit kaldığı aralıkta, her bit dizisinin başında gönderilerek sönmülemeli kanal katsayıları kestirilir. Yardımcı bitler $b_{km}=1$ seçilirse (14)'deki \mathbf{F} matrisinde sadece kanal katsayıları kalır. Daha sonra Şekil 2'deki gibi gelen işaret gerçel ve sanal kısımlarına ayrılıp, Pearson Sistemi'ne dayalı kaynak ayrıştırması işlemi yapılarak kanal katsayılarının sanal ve gerçel kısımları ayrı ayrı kestirilir, sonra elde edilen işaretler toplanarak karmaşık kanal katsayısı elde edilir.



Şekil 2: Kanal katsayılarının kestirimi.

5. Benzetim Sonuçları

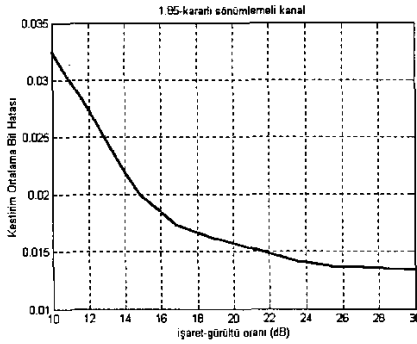


Şekil 3: 1,85-kararlı dağılıma sahip kanalın kestirilmesi

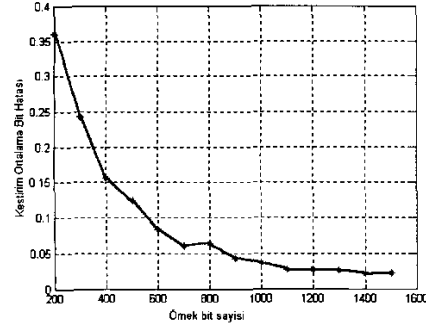
Benzetimde en basit şekilde sonuçları görebilmek için 2 kullanıcı 3 yollu bir CDMA sistemi modeli gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te alfası 1,85 olan kararlı dağılımla modellenen kanalın gerçel katsayılarının kestirilmesi gösterilmiştir. Sistem kanal katsayılarını başarılı bir biçimde takip etmiştir. Geleneksel BBA da, başarılı bir kestirim sağlamıştır ama Pearson Sistemi tabanlı BBA Gauss'a yakın dağılımları ayrıştırırken daha hızlı yakınsadığı için daha hızlı kestirim sağlamıştır. Kanal katsayıları, ICA yerine MMSE kestiricisi ile kestirilmeye çalışıldığında ise başarılı olunamamıştır.

Şekil 4, farklı gürültü oranları için kanal kestiriminin ortalama hata analizini göstermektedir. Görüldüğü gibi kanalın gürültüsü arttıkça ortalama bit hatası artmaktadır. Fakat 10-30 dB işaret gürültü oranı aralığında ortalama hata makul değerlerde kalmaktadır. Bu benzetimler için, sinyalin sadece gerçel kısmı ve 1000 simge kullanılmıştır.

Son olarak, sistemin kanalı kestirebilmesi için ihtiyacı olan yardımcı bit sayısını belirlemek için, farklı sayıdaki bitler için kanal kestirim performansı incelenmiştir. Genellikle bütün kestirim metodlarında olduğu gibi yardımcı bit sayısı arttıkça kanal kestirimi daha başarılı olmuştur. Şekil 5'te 200 ile 1500 arasındaki sayılarda bitler için ortalama hata incelenmiştir.



Şekil 4: Kanal kestiriminde Ortalama Hata-İşaret Gürültü Oranı analizi (N=1000, alfa=1,85)



Şekil 5: Kanal Kestiriminde Ortalama Hata-Örnek Sayısı analizi (SNR=20dB, alfa=1,80)

6. Vargılar

Bu çalışmada Gauss'dan daha dürtün sönümlenmeli kanallar üzerinden istasyon kullanıcı yönünde simge sezimi için Pearson Sistemi'ne dayalı BBA yöntemi önerilmiştir. Benzetim sonuçları Rayleigh ve Rice zarflı sönümlenmeli kanallarda başarılı olan geleneksel MMSE sezicisinin alfası 1,8 ile 1,9 arasındaki alfa-kararlı dağılımlarla modellenen dürtün sönümlenmeli kanallarda başarısız olduğunu göstermiştir. Hiperbolik tanjant değer işlevi kullanan BBA yöntemi ve önerdiğimiz Pearson Sistemi'ne dayalı BBA yöntemi dürtün sönümlenmeli kanalı başarıyla

kestirmişlerdir. Pearson Sistemi'ne dayalı BBA yöntemi daha hızlı olması nedeniyle tercih edilmelidir. Ayrıca yamuk ve savrukluğu Gauss'a yakın dağılımları başarıyla modellemesi nedeniyle kanal istatistikindeki değişimlere karşı gürbüz niteliktedir. Ancak kanalın tam olarak Gauss olduğu durumda Pearson Sistemi, MMSE sezici kadar başarılı olamamaktadır. Bu yüzden bundan sonraki aşamada kanalın zamanla Gauss olmasına ve Gauss'dan sapmasına göre kanal kestirimi yapabilecek uyarlanabilir sistemler oluşturulmaya çalışılacaktır.

7. Kaynakça

- [1] C. Chayawan, V. A. Aalo, "Performance study of MRC systems with multiple cochannel interferers in a non-Gaussian multipath fading environment", Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, Volume: 3, 24-28 Sept. 2002, pp. 1720-1724, vol.3.
- [2] A. Abdi, H. A. Barger, M. Kaveh, "Signal Modelling in wireless fading channels using spherically invariant process", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 4, pp. 2297-3000, 2000.
- [3] K.H. Biyari, W.C. Lindsey, "Error performance of DPSK mobile communication systems over non-Rayleigh fading channels" Vehicular Technology, IEEE Transactions on, Volume: 44, Issue: 2, May 1995, pp. 211 - 219.
- [4] E. Conte, M. Longo, and M. Lops, "Modeling and simulation of non-Rayleigh radar clutter", IEE Proc., Part F, vol.138, no.2, pp. 121-130, Apr 1991.
- [5] K.H.Biyari, W.C.Lindsey, "A quasi-moment approach for the analysis of noncoherent communications over complex non-Gaussian fading channels" Global Telecommunications Conference, 1993, including a Communications Theory Mini-Conference. Technical Program Conference Record, IEEE in Houston. GLOBECOM'93, IEEE, 29 Nov.-2 Dec. 1993, 1429-1432, vol.3.
- [6] M. Shao, C. L. Nikias, "Signal Processing with fractional lower order moments: Stable Processes and their applications," Proc. IEEE, July 1993.
- [7] K. Yap, L. Guan, J. Evans, "Blind Adaptive Detection for CDMA systems based on regularized independent component analysis", GLOBECOM'01, IEEE, vol. 1, pp. 249-253, 25-29 Nov. 2001.
- [8] R. Cristescu, J. Joutsensalo, T. Ristaniemi, J. Karhunen, "CDMA delay estimation using fast ICA algorithm", IEEE International Conference on Communications, vol.1, pp. 56-59, 18-22 June 2000.
- [9] T. Ristaniemi, J. Joutsensalo, "Advanced ICA-Based Receivers for DS-CDMA systems", The 11th IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Vol.1, pp. 276-281, 18-21 Sept. 2000.
- [10] R. Critescu, J. Joutsensalo, J. Karhunen and E. Oja, "A complexity minimization approach for estimating fading Gaussian channel in CDMA communication", in Proc. ICA Workshop 2000.
- [11] J. Karvenen, J.Eriksson, V. Koivunen, "Pearson system based method for blind separation", ICA 2000, Proc. of the Second International Workshop on ICA and Blind Signal Separation, 2000, pp. 585-590.
- [12] J. Karvanen and V. Koivunen, "Blind separation methods based on Pearson system and its extensions" Signal Processing, Volume 82, Issue 4, April 2002, pp. 663-673.