

HIZLI SÖNÜMLEMELİ KANALLARDA UZAYSAL MODÜLASYON SİSTEMLERİ İÇİN İTERATİF KANAL KESTİRİMİ

ITERATIVE CHANNEL ESTIMATION FOR SPATIAL MODULATION SYSTEMS OVER FAST FADING CHANNELS

Yusuf Acar¹, Hakan Doğan² ve Erdal Panayırıcı³

¹İstanbul Kültür Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34156 Bakırköy, İstanbul

²İstanbul Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar, İstanbul

³Kadir Has Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34083 Cibali, İstanbul

y.acar@iku.edu.tr, hdogan@istanbul.edu.tr, eepanay@khas.edu.tr

ÖZETÇE

Sembol işaret kümelerine ek olarak anten indisleriyle de bilgi iletmek temeline dayanan Uzaysal Modülasyon (SM), Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (MIMO) sistemlerde karşılaşılan pratik problemleri çözmek için son dönemde önerilmiştir. Literatürde SM sistemleri için kanal kestirimi sadece zamanla yavaş değişen kanallar için pilot sembol tabanlı yenilemeli en küçük kareler (RLS) tabanlı olarak yapılmıştır. Ancak pilot sembol sayısının yeterli olmadığı ve kanalın hızla değiştiği durumlarda iteratif alıcıların önemli başarımlar sağladığı bilinmektedir. Bu çalışmada, RLS kanal kestirimcinin hızlı değişen kanallardaki başarımının düştüğü görülmüş ve bu sebeple gerekli sinyal modeli oluşturularak iteratif alıcı tasarımı yapılmıştır. Yapılan bilgisayar benzetimlerinde, zamanla değişen Rayleigh kanallarda iteratif alıcı RLS tabanlı alıcının başarımından daha iyi başarımlar gösterdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Uzaysal Modülasyon, Kanal Kestirimi, Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler, İteratif Alıcı.

ABSTRACT

Spatial Modulation (SM) based on the use of antenna indices to transmit information in addition to the conventional signal constellations has been recently proposed to solve practical problems encountered in MIMO systems. In the literature, estimation of CSI for SM systems is simply investigated by RLS for slow fading channels. However, iterative receivers that offer significant performance gains over a non-iterative when the total number of pilot is not sufficient and the channel is fast fading have not been investigated for SM based systems. In this paper, it is shown that the RLS based receiver has a performance degradation for fast fading channels and a new iterative channel estimation technique is proposed with the necessary signal model to enhance receiver performance for fast fading channels. Computer simulation results indicate that proposed iterative receiver has a significant performance advantage over the RLS based receiver for time-varying Rayleigh channels.

Keywords—Spatial Modulation, Channel Estimation, MIMO, Iterative Receiver.

I. GİRİŞ

Çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin kapasite ve hata başarımlarını artıran avantajları, alıcı ve vericideki antenler arasındaki mesafeye [1], [2], alıcıdaki kanallar arası girişime (ICI: Inter channel interference) ve verici antenlerin senkronizasyonu (IAS: Inter antenna synchronization) [3], [4] gibi bazı önemli parametrelere bağlıdır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için tasarlanacak alıcı yapıları da oldukça karmaşıktır.

Son zamanlarda MIMO sistemleri için uzaysal modülasyon (SM: Spatial modulation) önerilmiştir [5]. Önerilen SM tekniği iki boyutlu sinyal uzayına üçüncü bir boyut olan uzaysal boyutu eklemektedir. Böylelikle üç boyutlu sinyal uzayı elde edilmektedir. SM’de toplam iletilen bilgi biti sayısı kullanılan modülasyonun derecesine ve kullanılan verici anten sayısına bağlıdır. Örneğin 5 bitlik bilgi bitini SM modülasyonu ile gönderebiliriz. Bu durumda 16QAM ve 2 verici anten kullanılarak SM modülasyonu gerçekleştirilebilir. Eğer kullanılan modülasyon türü etkilenen kanal ve girişim çevresi için kullanışlı değilse bu kanal ve girişim çevresi için daha uygun olan SM parametreleri seçilerek aynı sayıda bilgi biti iletimi gerçekleştirilebilir. Aynı örnek için aynı izgesel verimliliği elde edebilmek için 8QAM ve 8 verici anten kullanılarak da SM modülasyonu gerçekleştirilir. SM’ in önemli bir avantajı ise verici antenler arasında ilinti olmadığından alıcıda ICI tamamen yok olmakta ve hiçbir şekilde senkronizasyona ihtiyaç duymamaktadır. Diğer taraftan senkronizasyona ihtiyaç duymaması sistem başarımını büyük ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir [3], [4]. Sonuç olarak SM yapısı çok esnek bir mekanizmaya sahip olduğu için yüksek izgesel verimlilik ve çok düşük alıcı karmaşıklığı sağlamaktadır.

İletilen sembolde modüleli işaretin bilgisi ve hangi verici antenin kullanıldığı bilgisi mevcut olduğundan verici anten numarası kestirimi büyük bir önem arz etmektedir. Literatürde anten numarası ve sembollerin sezimi, optimum ve optimum olmayan sezim yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir [5], [6]. Bu sezim işlemlerinde kanal durum bilgisinin (CSI: Channel state information) alıcıda bilindiği varsayılmıştır. Ancak pratikte kanal kestirimine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde, SM sistemine kanal kestirim hatasının etkileri gürültü gibi modellenerek incelenmiş ve SM sistemlerinin kanal kestirim hatalarına duyarlı olduğu gösterilmiştir [7], [8]. Ayrıca, tek taşıyıcı SM sistemleri için kanal kestirimi pilot tabanlı yenilemeli en küçük kareler (RLS: Recursive least-squares)

yöntemiyle kanalın bir çerçeve boyunca değişmediği kabul edilerek yapılmıştır [9]. Ancak pilot sembollerinin sayısının yeterli olmadığı ve kanalın hızla değiştiği durumlarda RLS kanal kestirimcinin başarımı sınırlı kalacaktır. Bu tür durumlarda iteratif alıcıların önemli başarımlar sağladığı bilinmektedir. Bu çalışmada, RLS kanal kestirimcinin hızlı değişen Rayleigh dağılımlı kanallardaki başarımının düştüğü görülmüş ve gerekli sinyal modeli oluşturularak iteratif alıcı tasarımı yapılmıştır. Sonuçta önerilen alıcı yapısının gerçekleştirilebilir işlemsel karmaşıklık getirmesine rağmen RLS tabanlı alıcıdan daha iyi başarımlar sergilediği gösterilmiştir.

Notasyon: Bildiride; vektörler kalın küçük harflerle 'a', matrisler kalın büyük harflerle 'A' ifade edilmiştir. Vektörler sütun vektörleri olmak üzere; $(\cdot)^*$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$, $(\cdot)^+$, $(\cdot)^{-1}$ ve $\|\cdot\|_F$ sırasıyla karmaşık eşleniği, evriği, Hermisyen eşleniği, sözde matris tersi, matris tersi ve Frobenius normunu ifade etmektedir.

II. SM SİNYAL MODELİ

Genel olarak M -sembollü SM sistemlerinde iletilen bilgi biti sayısı $k = \log_2(N_t) + \log_2(M)$ şeklinde ifade edilebilir. Burada N_t verici anten sayısını M ise modülasyon derecesini göstermektedir. İletilmek istenen k bitlik bilgi bitleri SM eşleştiriciye gönderilir ve SM eşleştirici çıkışında N_t boyutunda başka bir

$$\mathbf{x}^n = [x_1^n, x_2^n, \dots, x_{N_t}^n]^T \quad (1)$$

vektörüne eşleştirilir. Burda n zaman dilimini ifade etmektedir. Bu vektörün sadece bir elemanı sıfırdan farklıdır:

$$\mathbf{x}_j^n \triangleq [0 \dots \underbrace{x_q^n}_{j. \text{ verici anten}} \dots 0]^T. \quad (2)$$

Burada j aktif anten numarasını göstermekte ve x_q^n ise M -sembollü yıldız diagramının q . sembolünü ifade eder. Bu durumda sinyal aktif antenden MIMO kanal üzerinden iletilir. Kabloz kanal $N_r \times N_t$ boyutlu olmak üzere alıcıda alınan sinyal vektörü

$$\begin{bmatrix} y_1^n \\ \vdots \\ y_r^n \\ \vdots \\ y_{N_r}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^n & h_{12}^n & \dots & h_{1N_t}^n \\ h_{21}^n & h_{22}^n & \dots & h_{2N_t}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}^n & h_{N_r,2}^n & \dots & h_{N_r,N_t}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ x_q^n \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1^n \\ \vdots \\ w_r^n \\ \vdots \\ w_{N_r}^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

şeklinde. Burada $h_{r,\tau}^n$, Rayleigh dağılımlı olmak üzere τ . verici anten ile r . alıcı anten arasındaki kanal kazancını, w_r^n alıcı antenler için toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN: Additive white Gauss noise) göstermektedir. Denklem kısa formda

$$\mathbf{y}^n = \mathbf{H}^n \mathbf{x}_j^n + \mathbf{w}^n, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

olarak yazılabilir.

III. OPTIMUM KARAR VERME

SM' de verici anten indislerinin bilgi taşımasından dolayı verici anten numarasının alıcıda bulunması büyük bir önem

arzettmektedir. Bu amaçla, enbüyük olabirlikli (ML: Maximum likelihood) çalışma yapısına bağlı optimum yapı,

$$\left[\hat{j}_{ML}^n, \hat{q}_{ML}^n \right] = \arg \max_{j,q} p_Y(\mathbf{y}^n / \mathbf{x}_j^n, \mathbf{H}^n) \quad (5)$$

şeklinde yazılır [6]. Bu durumda, \mathbf{h}_j^n , \mathbf{H}^n matrisinin j . sütununu göstermek üzere \mathbf{y}^n 'nin \mathbf{x}_j^n ve \mathbf{H}^n 'a göre koşullu olasılığı

$$p_Y(\mathbf{y}^n / \mathbf{x}_j^n, \mathbf{H}^n) = \pi^{-N_r} \exp(-\|\mathbf{y}^n - \mathbf{h}_j^n x_q^n\|_F^2) \quad (6)$$

şeklinde yazılır. Burada x_q^n (4) denkleminde verilen \mathbf{x}_j^n vektörünün çeşitli q ve j için olabilecek ihtimallerini göstermektedir. (5) denkleminin açılımı

$$= \arg \max_{j,q} \|\mathbf{g}_{jq}^n\|_F^2 - 2\Re\{\mathbf{y}^{n,H} \mathbf{g}_{jq}^n\} \quad (7)$$

şeklinde yapılmaktadır. Burada \mathbf{g}_{jq}^n ,

$$\mathbf{g}_{jq}^n = \mathbf{h}_j^n x_q^n, 1 \leq j \leq N_t, 1 \leq q \leq M \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca \hat{j}_{ML}^n ve \hat{q}_{ML}^n 'lerin doğru bulunduğu varsayılırsa alıcı çok basit bir şekilde elde edilen anten bilgisini ve iletilen sembol bilgisini birleştirip orijinal bilgi bitlerini elde eder. Ancak görüldüğü üzere, bütün zaman aralıkları için toplam kanal matrisi \mathbf{H} alıcıda sinyallerin sezilebilmesi için bilinmesi gerekmektedir ve

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}^1, \mathbf{H}^2, \dots, \mathbf{H}^n, \dots, \mathbf{H}^N] \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir.

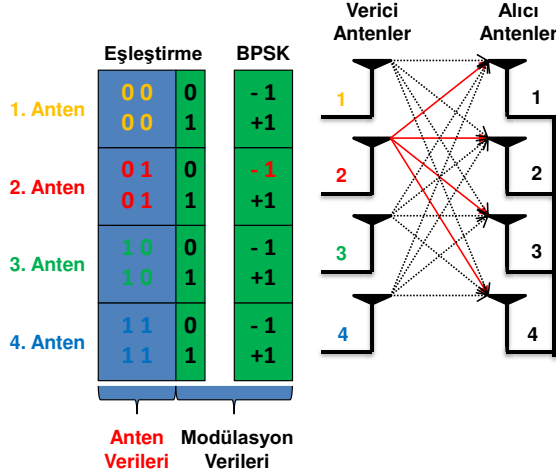
IV. İTERATİF-RLS KANAL KESTİRİMİ

SM sistemlerinde alıcıda sinyalin ve anten indislerinin sezilebilmesi için her bir alıcı verici antenlere ait kanal bilgisinin bilinmesi gerekmektedir. Genel olarak kanal kestirimi olarak ele alınan bu problem literatürde SM sistemleri için şuan yeterli çalışma yapılmamıştır. Literatürde kanalın bilinmediği durum için RLS algoritması kullanarak kanal kestirimi gerçekleştirilip elde edilen kanal kestirimi ile optimum alıcı yapısı kullanılmıştır [9]. Ancak pratikte kanallar çoğunlukla zamanla değişen kanallardır. Bu çalışmada RLS kestirimcinin kullanılması durumunda SM' in başarımını büyük oranda olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bu yüzden SM için zamanla değişen kanallarda iteratif tabanlı kanal kestirim yöntemi kullanılarak yeni bir alıcı yapısı tasarlanmıştır. Bu çalışmada iteratif kanal kestirimcinin başlangıç değerleri RLS algoritmasıyla yapılmıştır.

IV-A. İteratif Alıcı

İteratif alıcılar yeni nesil haberleşme sistemlerinde önerilmiş ve özellikle yeterli sayıda pilot sembolünün olmadığı veya kanal değişiminin fazla olduğu durumlarda avantajları gösterilmiştir [10]. Ayrıca alıcı yapısının işlemsel karmaşıklığında azaltılabileceği gösterilmiştir [11].

Pilot sembollerle kanalın başlangıç değerleri bulunabilir. İteratif alıcının başlangıç değeri için RLS yöntemi kullanılmıştır. Ancak haberleşme süresinde belli zaman aralıkları için sadece tek bir anten aktif olmakta ve diğer kanallar bu sebeple bilinmemektedir. Bu sebeple, tüm kanal matrisi yayın yapılan aralıklar için kestirilen sembollerle yapılarak



Şekil 1. Üç bit iletim için 4 verici 4 alıcı antene BPSK kullanılarak SM Eşleme Tablosu

geri kalan kısım interpolasyon yapılabilir. Bu çalışmada interpolasyon işlemi polinom uydurma ile yapılmaktadır. Kanal matrisi $\tilde{\mathbf{H}}$,

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} h_{11}^1 & h_{21}^2 & \dots & h_{N_1}^n & \dots & h_{11}^N \\ h_{21}^1 & h_{22}^2 & \dots & h_{N_2}^n & \dots & h_{21}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}^1 & h_{N_r,2}^2 & \dots & h_{N_r,n}^n & \dots & h_{N_r,1}^N \\ h_{12}^1 & h_{12}^2 & \dots & h_{12}^n & \dots & h_{12}^N \\ h_{22}^1 & h_{22}^2 & \dots & h_{22}^n & \dots & h_{22}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,2}^1 & h_{N_r,2}^2 & \dots & h_{N_r,2}^n & \dots & h_{N_r,2}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1N_t}^1 & h_{1N_t}^2 & \dots & h_{1N_t}^n & \dots & h_{1N_t}^N \\ h_{2N_t}^1 & h_{2N_t}^2 & \dots & h_{2N_t}^n & \dots & h_{2N_t}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,N_t}^1 & h_{N_r,N_t}^2 & \dots & h_{N_r,N_t}^n & \dots & h_{N_r,N_t}^N \end{bmatrix} \quad (10)$$

olarak yazılabilir. Buradaki satır vektörlerini

$$\mathbf{h}_{r,\tau} = [h_{r,\tau}^1, \dots, h_{r,\tau}^n, \dots, h_{r,\tau}^N] \quad (11)$$

şeklinde yazarsak, verici antenlerden j . antenin aktif olduğu varsayılırsa ($\tau = j$), alıcı antenlerden alınan sinyaller

$$\mathbf{y}^n = [h_{1j}^n x_q^n + w_1^n, h_{2j}^n x_q^n + w_2^n, \dots, h_{N_r,j}^n x_q^n + w_{N_r}^n] \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ancak n . zaman aralığı için sadece bir verici anten aktif olacağından, verici ve alıcı antenler arasındaki kanal için kestirim

$$\hat{\mathbf{h}}_{r,\tau} = [0, \dots, \hat{h}_{r,\tau=j}^n, \dots, 0], \quad r = 1, \dots, N_r \quad (13)$$

olmak üzere

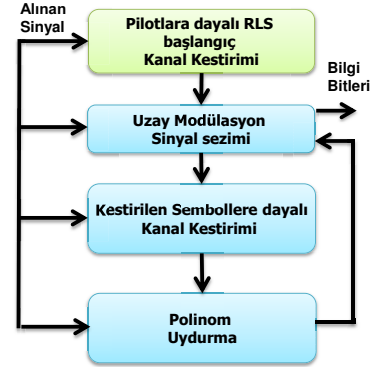
$$\hat{h}_{r,\tau=j}^n = y_r^n / x_q^n, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (14)$$

şeklinde hesaplanır. Burada y_r^n , \mathbf{y}^n vektörünün r . elemanıdır.

IV-B. Polinom Uydurma

Tüm MIMO kanala ait $\hat{\mathbf{h}}_{r,\tau}$ kanalın $n = 0, 1, \dots, N$ değerleri için (p-1). dereceden polinoma uydurma üzere n . zaman aralığı için kabul edilebilir model aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\hat{h}_{r,\tau}(t_n) = \theta_{r,\tau}^1 + \theta_{r,\tau}^2 t_n + \dots + \theta_{r,\tau}^p t_n^{p-1} + w(t_n). \quad (15)$$



Şekil 2. İteratif Alıcı Yapısı

Burada $w(t_n)$ ' lerin sıfır ortalamalı σ^2 varyanslı bağımsız beyaz Gauss gürültüsü örnekleri olduğunu varsaydık. Böylece genel lineer model

$$\hat{\mathbf{h}}_{r,\tau} = \mathbf{T}\boldsymbol{\theta}_{r,\tau} + \mathbf{w} \quad (16)$$

olarak yazılabilir. Burada K kanal için eldeki toplam örnek sayısını göstermek üzere

$$\hat{\mathbf{h}}_{r,\tau} = [\tilde{h}_{r,\tau}(t_1), \tilde{h}_{r,\tau}(t_2), \dots, \tilde{h}_{r,\tau}(t_K)]^T, \quad \boldsymbol{\theta}_{r,\tau} = [\theta_{r,\tau}^1, \theta_{r,\tau}^2, \dots, \theta_{r,\tau}^p]^T \text{ ve } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \dots & t_1^{p-1} \\ 1 & t_2 & \dots & t_2^{p-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & t_K & \dots & t_K^{p-1} \end{bmatrix}$$

şeklinde. $\boldsymbol{\theta}_{r,\tau}$ için minimum varyanslı yansız (MVU: Minimum variance unbiased) kestirimci aşağıdaki gibidir:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{r,\tau} = (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \hat{\mathbf{h}}_{r,\tau}. \quad (17)$$

Gözlemlenen matris Vandermonde matrisinin özel bir biçimine sahiptir. Daha sonra uydurulan eğri

$$\hat{h}_{r,\tau}(t_n) = \sum_{i=1}^p \hat{\theta}_{r,\tau}^i t_n^{i-1}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

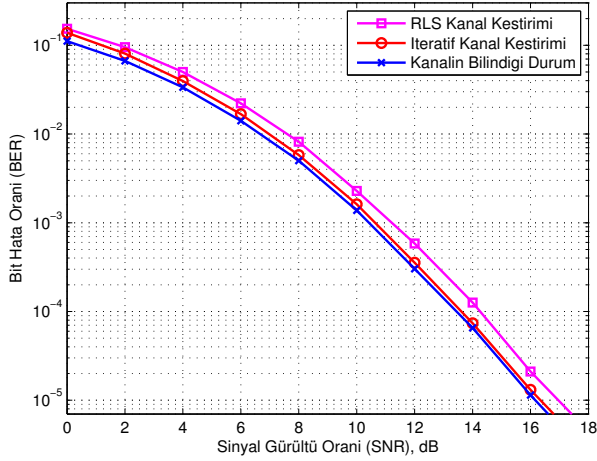
olarak yazılabilir. Denklem (18) ile bir çerçeve boyunca zamanla değişen kanalın kestirimi yapılabilir. Zamanla değişen kanal matrisinin kestirimi yapıldıktan sonra Şekil.2' deki gibi tekrar sezim işlemi yapılır.

V. BİLGİSAYAR BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, SM sistemler için RLS kestirimcinin ve önerilen iteratif tabanlı kestirimcinin bit hata oranı (BER: Bit error rate) başarımları farklı kanallarda incelenmiştir. Önerilen alıcı yapısını değerlendirmek için Şekil.1' de verilen ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK: Binary phase shift keying) modüleli, dört verici ($N_t = 4$) ve dört alıcı ($N_r = 4$) antenli SM sistemi göz önünde bulundurulmuştur. Antenlerden iletilen sinyallerinin hepsinin aynı güç ile iletiildiği ve alıcı girişindeki sinyal gürültü oranının (SNR: Signal to noise ratio) $\frac{E_s}{\sigma^2}$ olduğu varsayılmıştır (Burada E_s sembol başına enerji ve σ^2 gürültü gücünü göstermektedir). Alıcı ve verici antenler arasındaki kablosuz kanal Rayleigh dağılımlı ve $\|\mathbf{h}_j\|_F = 1$ olmak üretilmiş ve Doppler etkisi göz önünde bulundurulmuştur [5].

Şekil.2' de gösterildiği gibi öncelikle RLS algoritması kullanılarak iteratif kanal kestirimi için başlangıç değeri elde

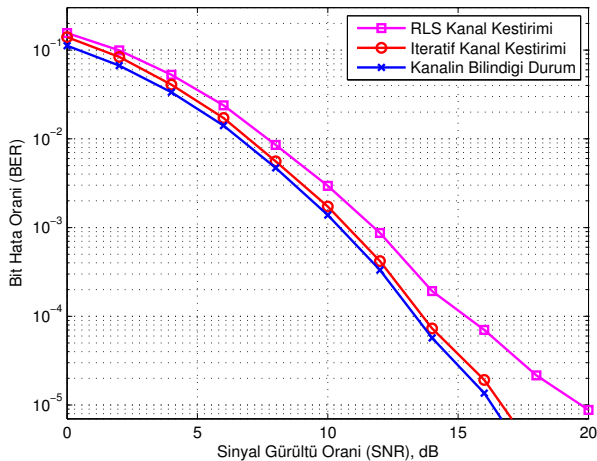
edilmiştir. Kanalin zamanla değişmedi kabul edilerek elde edilen başlangıç değerleri ile birinci dereceden polinom uydurma işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada sadece tek bir iterasyon yeterli olmuştur. Bir iterasyon ile elde edilen kanal kestirimi kullanılarak sembol ve anten indisleri için sezim işlemleri yapılmıştır.



Şekil 3. $V_1 = 30\text{km/saat}$ durumunda SM sistemi için RLS ve önerilen iteratif tabanlı kestirimcinin BER başarımı, $p = 2$

Bilgisayar benzetimleri farklı hızlardaki mobil kullanıcı için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3' de ki sonuç $V_1 = 30\text{km/saat}$ ve Şekil 4' de ise $V_2 = 150\text{km/saat}$ hız değeri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3' de kanal değişimi oldukça yavaş olmaktadır ve önerilen iteratif tabanlı kestirimci kanalın bilindiği durum ile aynı başarımı göstermiştir. Ayrıca RLS kanal kestirimcisinden daha iyi başarımleri sergilediği görülmüştür.

Şekil 4' te SM için RLS kestirimcinin ve önerilen iteratif tabanlı kestirimcinin yüksek hızdaki sonuçları gösterilmiştir. Yüksek hızlarda kanal değişimi hızlı olduğu için RLS kanal kestirimcinin başarımının düştüğü görülmüştür. $BER = 10^{-5}$ için iteratif tabanlı kanal kestirimcisi RLS kanal kestirimcisine göre yaklaşık olarak 3 dB' lik daha iyi bir kazanç sağladığı görülmüştür ve kanalın bilindiği duruma yakın başarımleri sergilemiştir. Ayrıca iteratif tabanlı kestirimci ile RLS kestirimcinin arasındaki başarımleri artıran SNR değerleri ile birlikte daha da arttığı gösterilmiştir.



Şekil 4. $V_2 = 150\text{km/saat}$ durumunda SM sistemi için RLS ve önerilen iteratif tabanlı kestirimcinin BER başarımı, $p = 2$

VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada sembol işaret kümelerine ek olarak anten indisleriyle de bilgi iletmek temeline dayanan SM sistemleri için kanal kestirimi zamanla değişen kanallar için RLS ve iteratif tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kanaldaki değişimin hızlı olması durumunda RLS kanal kestirimcinin başarımının düştüğü görülmüştür. Alternatif olarak önerilen iteratif tabanlı kestirimci yapısı kanalın hızlı değişimlerine karşı RLS tabanlı alıcıdan daha iyi başarımleri sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca iteratif tabanlı kestirimci ile RLS kestirimci arasındaki başarımleri artıran SNR değerleri ile birlikte daha da arttığı görülmüştür. Bu sebeple, önerilen yeni iteratif tabanlı alıcı yapısı uzaysal modülasyon tabanlı yeni nesil haberleşme sistemleri için oldukça önem arz edecektir.

VII. KAYNAKÇA

- [1] D.-S. Shiu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 3, pp. 502–513, 2000.
- [2] S. Loyka and G. Tsoulos, "Estimating MIMO system performance using the correlation matrix approach," *Communications Letters, IEEE*, vol. 6, no. 1, pp. 19–21, 2002.
- [3] M. Chiani, M. Z. Win, and A. Zanella, "On the capacity of spatially correlated MIMO rayleigh-fading channels," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 10, pp. 2363–2371, 2003.
- [4] S. Catreux, P. F. Driessen, and L. J. Greenstein, "Simulation results for an interference-limited multiple-input multiple-output cellular system," *Communications Letters, IEEE*, vol. 4, no. 11, pp. 334–336, 2000.
- [5] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation—a new low complexity spectral efficiency enhancing technique," in *Communications and Networking in China, 2006. ChinaCom'06. First International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 1–5.
- [6] J. Jeganathan, A. Ghayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis," *Communications Letters, IEEE*, vol. 12, no. 8, pp. 545–547, 2008.
- [7] S. Sugiura and L. Hanzo, "Effects of channel estimation on spatial modulation," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 19, no. 12, pp. 805–808, 2012.
- [8] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Performance of spatial modulation in the presence of channel estimation errors," *Communications Letters, IEEE*, vol. 16, no. 2, pp. 176–179, 2012.
- [9] M. U. Faiz, S. Al-Ghadhban, and A. Zerguine, "Recursive least-squares adaptive channel estimation for spatial modulation systems," in *Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 785–788.
- [10] H. Dogan, H. A. Cirpan, and E. Panayirci, "Iterative channel estimation and decoding of turbo coded SFBC-OFDM systems," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 8, pp. 3090–3101, 2007.
- [11] Y. Acar, A. Salih, and H. Dogan, "SAGE algorithm based channel estimation for uplink STBC-MC-CDMA systems," in *Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2011 5th International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 1–5.