

Hızlı Değişen Rician Sönümlemeli Kanallarda STBC-SM Sistemleri için Esnek Şerit Tabanlı Kanal Kestirimi

Spline Based Channel Estimation for STBC-SM Systems over Fast-Varying Rician Fading Channels

Yusuf Acar

Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Kültür Üniversitesi
34156, Bakırköy, İstanbul, Türkiye
y.acar@iku.edu.tr

Hakan Doğan

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Üniversitesi
34320, Avcılar, İstanbul, Türkiye
hdogan@istanbul.edu.tr

Erdal Panayırıcı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kadir Has Üniversitesi
34083, Cibali, İstanbul, Türkiye
eepanay@khas.edu.tr

Özetçe —Uzay-zaman blok kodlamalı (STBC) uzaysal modülasyon (SM) yapısı, hem STBC sembolleri hemde bu sembollerin gönderildiği verici antenlerin indisini kullanarak bilgi iletimini gerçekleştirmektedir. Literatürde, STBC-SM yapısı için yapılan çalışmalarda tam kanal durum bilgisinin (P-CSI) alıcıda bilindiği varsayılmıştır. Pratikte, STBC sembollerinin ve verici anten indislerinin uyumlu sezimi için alıcıda kanal kestirimi büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, hızlı değişen Rician sönümlemeli kanallarda STBC-SM sistemleri için esnek şerit (Spline) ara değerlendirme kullanılarak pilot sembol tabanlı kanal kestirimi önerilmiştir. Pilot sembollerinin bulunduğu noktalardaki kanal katsayıları en küçük kareler (LS) yöntemi ile elde edilerek daha sonra data noktalarındaki kanal katsayıları ara değerlendirme yöntemleriyle bulunmuştur. Bilgisayar benzetim sonuçları ile esnek şerit ara değerlendirme tabanlı kanal kestiriminin, parçalı doğrusal (Piecewise Linear) ara değerlendirme ve en yakın komşu (Nearest Neighbor) ara değerlendirme tabanlı kanal kestirim yöntemlerinden daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Uzaysal Modülasyon, Uzay Zaman Blok Kodlama, Pilot Sembol Yardımlı Kanal Kestirimi, Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler, Zamanla Değişen Rician Sönümlemeli Kanallar.

Abstract—In the STBC-SM systems, the information is carried both by STBC symbols and indices of the transmit antennas from which these symbols are transmitted. Channel estimation is a critical process at the receiver during the coherent detection of the transmitted STBC symbols and indices of the transmit antennas. In this paper, a spline interpolation and pilot symbols based channel estimation has been proposed for the space-time block coded spatial modulation (STBC-SM) systems to track the channel variations in the presence of Rician fading channels. The estimation of channel at pilot durations is done by least squares (LS) method and then the spline based channel interpolation is performed. It has been shown via computer simulations that the proposed spline based channel estimation channel estimation outperforms the piecewise linear interpolation (PLI) and the nearest neighbor interpolation (NNI) based channel estimations.

Keywords—Spatial Modulation; MIMO; STBC; Pilot Symbol Assisted Channel Estimation; Time Varying Rician Fading Channels.

I. GİRİŞ

Pratikte, çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO: Multiple-Input Multiple-Output) sistemlerde kanallar arası girişim (ICI: Inter Channel Interference) ve antenler arası senkronizasyon (IAS: Inter Antenna Synchronization) önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır [1], [2]. MIMO sistemlerinde meydana gelen bu problemlerin üstesinden gelebilmek için Mesleh ve diğerleri tarafından [3] uzaysal modülasyon (SM: Spatial Modulation) yapısı önerilmiştir. SM yapısında verici antenler arasındaki ICI tamamen ortadan kalkmakta ayrıca alıcı kısmında sadece bir tane radyo frekansı (RF: Radio Frequency) olduğu için IAS' ya da gerek kalmamaktadır. Böylelikle yüksek izgesel verimlilik düşük karmaşıklıkla elde edilmiştir [3]. SM' in temel çalışma prensibi, iki boyutlu sinyal kümesine ek olarak verici antenlerin indislerini de kullanarak bilgi taşımaya dayanmaktadır. Böylelikle iki boyutlu sinyal uzayına üçüncü bir boyut ekleyerek üç boyutlu sinyal uzayını elde etmektedir.

Son zamanlarda, Başar ve diğerleri [4] uzay zaman blok kodu (STBC: Space-Time Block Code) ve SM'i birleştirerek STBC-SM adında yeni bir MIMO iletim yapısı önermişlerdir. SM sisteminde her bir iletim aralığında sadece bir verici anten aktiftir fakat Alamouti STBC-SM yapısında ise iletimi gerçekleştirebilmek için aktif olan iki verici anten çiftinin indisini kullanılmaktadır. Böylelikle iletilen semboller sadece uzay ve zaman dömenlerini içermiyor aynı zamanda anten (Spatial) dömenini de içermektedir. Bundan dolayı her iki verici anten çiftinin indisini ve STBC yapısı birlikte bilgi taşımaktadır. STBC-SM yapısının SM yapısına göre önemli ölçüde başarımlı avantajı sağladığı gösterilmiştir [4]. Ayrıca, Alamouti kodunun dikliği sayesinde en büyük olasılıklı (ML: Maximum Likelihood) kod çözücü yapısının işlemel karmaşıklık-lığı düşürülmüş bununla birlikte yüksek izgesel verimlilik elde edilmiştir [4].

Literatürde, STBC-SM için önde gelen çalışmalar tam kanal durum bilgisinin (P-CSI: Perfect Channel State Infor-

mation) alıcıda olduğunu varsaymışlardır. Ancak STBC-SM sinyalinin alıcıda çözülmesi için kanal katsayılarının doğru bir biçimde kestirilmesi gerekmektedir. Yüksek mobilitenin olduğu haberleşme kanallarındaki en büyük engellerden birisi Doppler etkisinden kaynaklanan hızlı zamanla değişen sönmülleme etkisidir [5]. Uzaysal modülasyon sistemlerinde zamanla değişen kanallar için durağan sönmüllemeli kanallarda kullanılan kanal kestirim yöntemlerinin uygulanması alıcıda hata eğrilerine neden olacaktır [6]. Bu sebeple, zamanla hızlı değişen sönmüllemeli çevreler için pilot sembol yardımcı kanal kestirim (PSA-CE: Pilot Symbol Aided Channel Estimation) yöntemi ara değerlendirme ile birleştirilerek önerilmiştir [7]. Bu çalışmada art arda gelen zaman dilimlerinde kanalın hızlı değiştiğini varsayılarak 4×4 STBC-SM için ilgili sinyal modeli çıkartılmıştır. Daha sonra, pilot sembollerinin bulunduğu noktalarındaki kanal katsayıları en küçük kareler (LS: Least Squares) yöntemi ile elde edilerek data noktalarındaki kanal katsayıları için esnek şerit ara değerlendirme (SI: Spline interpolation), parçalı doğrusal ara değerlendirme (PLI: Piecewise Linear Interpolation) ve en yakın komşu ara değerlendirme (NNI: Nearest Neighbor Interpolation) yöntemleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, yapılan benzetim çalışmalarında 4×4 STBC-SM sisteminde SI tabanlı kanal kestiriminin, PLI ve NNI tabanlı kanal kestirim yöntemlerinden daha iyi olduğu gösterilmiştir.

II. 4×4 STBC-SM SİNYAL MODELİ

Alamouti 4×4 STBC-SM yapısını c çift verici antenli olarak düşünelim ($c = 4$). Vericide ilk $\log_2 c$ bit anten çiftinin pozisyonunu ve son $2\log_2 M$ bit ise sembol çiftini ifade etmektedir. 4×4 STBC-SM' de iki verici anten için uygulanan Alamouti kodlama matrisi [8] aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2) = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

burada x_1 ve x_2 iletilecek olan M 'li dik genlik modülasyon (M -QAM: Quadrature Amplitude Modulation) kümesindeki karmaşık sembolleri ifade etmektedir. Kodlama matrisinin sütunu uzay domenini ve satırları zaman domenini göstermektedir. Birinci zaman aralığında 4×4 STBC-SM sistemindeki iletim vektörünü şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\mathbf{x}_c^1(n) = [\overbrace{x_1(n)e^{j\theta_c}}^{c_1}, 0, 0, \overbrace{x_2(n)e^{j\theta_c}}^{c_2}]^T \quad (2)$$

burada θ_c dönme acısı, c_1 ve c_2 ise c . verici anten çiftinin iki aktif verici anteninin indislerini ifade etmektedir. İkinci zaman diliminde 4×4 STBC-SM sisteminin iletim vektörünü şu şekilde yazabilir:

$$\mathbf{x}_c^2(n+1) = [-\overbrace{(x_1(n)e^{j\theta_c})^*}^{c_1}, 0, 0, \overbrace{(x_2(n)e^{j\theta_c})^*}^{c_2}]^T \quad (3)$$

Buradaki iletim vektörleri $\mathbf{x}_c^1(n)$ ve $\mathbf{x}_c^2(n+1)$, 4×1 boyutlu sinyal vektörleridir.

[4]' e göre 4-QAM' li 4×4 STBC-SM sisteminin verimliliği $0.5 \log_2 4 + \log_2 4 = 3$ olmaktadır. Dönme acısı θ_c ve verici anten çifti seçiminin optimizasyonu [4]' de tartışılmıştır. Tablo 1' de STBC-SM sisteminde 16-QAM ve 4-QAM modülasyonları için θ_c , c_2 , c_1 ve anten çiftlerinin indisleri verilmiştir.

Eşleştirmeden elde edilen $\mathbf{X}_c = [\mathbf{x}_c^1 \ \mathbf{x}_c^2]$ sinyali zamanla değişen 4×4 MIMO kanal üzerinden iletilmektedir. Birinci

Tablo I. STBC-SM PARAMETRELERİ

Anten Çifti Numarası	4-QAM	16-QAM
$l = 0$	$(c_1, c_2) = (1, 2), \theta_c = 0$	$(c_1, c_2) = (1, 2), \theta_c = 0$
$l = 1$	$(c_1, c_2) = (3, 4), \theta_c = 0$	$(c_1, c_2) = (3, 4), \theta_c = 0$
$l = 2$	$(c_1, c_2) = (1, 4), \theta_c = 0.61$	$(c_1, c_2) = (1, 4), \theta_c = 0.75$
$l = 3$	$(c_1, c_2) = (2, 3), \theta_c = 0.61$	$(c_1, c_2) = (2, 3), \theta_c = 0.75$

zaman diliminde $r = 1, \dots, 4$ için alınan sinyaller aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y_r(n) = h_{2,c_1}(n)x_1(n)e^{j\theta_c} + h_{2,c_2}(n)x_2(n)e^{j\theta_c} + w_r(n) \quad (4)$$

burada $y_r(n)$ alınan sinyalleri, $h_{r,j}(n)$ ise j . verici anten ile r . alıcı anten arasındaki kanalı göstermekte ve $w_r(n)$ karmaşık değerli, sıfır ortalamalı, σ_w^2 varyanslı eklemeli beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN: Additive White Gaussian Noise) ifade etmektedir.

İkinci zaman diliminde $r = 1, \dots, 4$ için alınan sinyaller şu şekilde tanımlanabilir:

$$y_r(n+1) = h_{2,c_1}(n+1)(-x_2(n))^* e^{j\theta_c} + h_{2,c_2}(n+1)(x_1(n))^* e^{j\theta_c} + w_r(n+1) \quad (5)$$

(4) ve (5)' i kullanarak alınan sinyalleri matris formunda bir sonraki sayfanın başında yer alan (6) denklemi gibi yazabilir.

Alınan sinyali daha kısa formda ise şu şekilde yazabiliriz:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{H}_l(n)\mathbf{x}(n) + \mathbf{w}(n) \quad (7)$$

4×4 STBC-SM sisteminde (7) için ML sezim yapıldı. Optimum sezim aşağıda gösterildiği gibi olası tüm cM^2 iletim matrislerinin detaylı bir şekilde taranması ile elde edilmektedir [4]:

$$[\hat{l}(n), \hat{x}_1(n), \hat{x}_2(n)] = \arg \min_{l, x_1, x_2} \|\mathbf{y}(n) - \mathbf{H}_l(n)\mathbf{x}(n)\|_F^2 \quad (8)$$

daha sonra (8)' i minimize eden x_1 , x_2 ve l değerlerine karar verilir (burada $0 \leq l \leq 3$ şeklindedir).

III. 4×4 STBC-SM İÇİN KANAL KESTİRİMİ

4×4 STBC-SM sisteminde modüleli sembollerin, $(\hat{x}_1(n), \hat{x}_2(n))$, ve iletimdeki anten çifti indisinin, $\hat{l}(n)$, sezimi için CSI' ye ihtiyaç vardır. Pratikte, kablosuz haberleşme sistemleri hareketlilikten dolayı zamanla değişen kanala maruz kalır. Açıkça gözükmektedir ki, durağan kanallar için kullanılan kanal kestirim yöntemlerinin başarımı zamanla değişen kanallarda düşecektir. Bu yüzden, PSA-CE ile birlikte ara değerlendirme yöntemleri kullanılarak yüksek hızlı mobil haberleşme çevreleri için yeni bir alıcı yapısı önerdik. Bu çalışmada, önerilen kanal kestirimindeki ara değerlendirme yöntemleri için SI, PLI ve NNI yöntemleri kullanılmıştır. Art arda gelen iki sembol arasındaki sönmüllemenin sabit olduğu varsayımından

$$\begin{bmatrix} y_1(n) \\ y_1^*(n+1) \\ y_2(n) \\ y_2^*(n+1) \\ y_3(n) \\ y_3^*(n+1) \\ y_4(n) \\ y_4^*(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,c_1}(n)e^{j\theta_c} & h_{1,c_2}(n)e^{j\theta_c} \\ h_{1,c_2}^*(n+1)e^{-j\theta_c} & -h_{1,c_1}^*(n+1)e^{-j\theta_c} \\ h_{2,c_1}(n)e^{j\theta_c} & h_{2,c_2}(n)e^{j\theta_c} \\ h_{2,c_2}^*(n+1)e^{-j\theta_c} & -h_{2,c_1}^*(n+1)e^{-j\theta_c} \\ h_{3,c_1}(n)e^{j\theta_c} & h_{3,c_2}(n)e^{j\theta_c} \\ h_{3,c_2}^*(n+1)e^{-j\theta_c} & -h_{3,c_1}^*(n+1)e^{-j\theta_c} \\ h_{4,c_1}(n)e^{j\theta_c} & h_{4,c_2}(n)e^{j\theta_c} \\ h_{4,c_2}^*(n+1)e^{-j\theta_c} & -h_{4,c_1}^*(n+1)e^{-j\theta_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_1^*(n+1) \\ w_2(n) \\ w_2^*(n+1) \\ w_3(n) \\ w_3^*(n+1) \\ w_4(n) \\ w_4^*(n+1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

hareketle gözlemlenen sinyal modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1(n) \\ y_2(n) \\ y_3(n) \\ y_4(n) \\ y_1(n+1) \\ y_2(n+1) \\ y_3(n+1) \\ y_4(n+1) \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{y}}(n)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 \\ -\mathbf{X}_2^* & \mathbf{X}_1^* \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{X}}} \underbrace{\begin{bmatrix} h_{1,c_1}(n) \\ h_{2,c_1}(n) \\ h_{3,c_1}(n) \\ h_{4,c_1}(n) \\ h_{1,c_2}(n) \\ h_{2,c_2}(n) \\ h_{3,c_2}(n) \\ h_{4,c_2}(n) \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{h}}_1(n)} + \underbrace{\begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \\ w_3(n) \\ w_4(n) \\ w_1(n+1) \\ w_2(n+1) \\ w_3(n+1) \\ w_4(n+1) \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{w}}(n)} \quad (9)$$

burada \mathbf{X}_1 ve \mathbf{X}_2 şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} x_1(n) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1(n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1(n) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_1(n) \end{bmatrix} e^{j\theta_c}$$

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} x_2(n) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_2(n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2(n) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_2(n) \end{bmatrix} e^{j\theta_c}$$

Alınan sinyali aşağıdaki gibi daha basit formda yazabiliriz:

$$\tilde{\mathbf{y}}(n) = \tilde{\mathbf{X}}\tilde{\mathbf{h}}_1(n) + \tilde{\mathbf{w}}(n) \quad (10)$$

Bilinen pilot sembollerle gözlemlenen modelin LS çözümü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\hat{\mathbf{h}}_1(n) = (\tilde{\mathbf{X}}^\dagger \tilde{\mathbf{X}})^{-1} \tilde{\mathbf{X}}^\dagger \tilde{\mathbf{y}}(n) \quad (11)$$

burada $(\tilde{\mathbf{X}}^\dagger \tilde{\mathbf{X}})^{-1} = \frac{1}{2E_{av}} \mathbf{I}$ şeklindedir ve E_{av} ortalama sembol enerjisini ve \mathbf{I} ise birim matrisi ifade eder.

PSA-CE yönteminde kanaldaki zaman değişimlerini takip edebilmek için pilot sembolleri zaman domeninde periyodik olarak yerleştirilmektedir. Daha sonra, alınan pilot sembollerle LS metodu kullanılarak tüm pilot pozisyonlarındaki kanal darbe cevapları (CIR: Channel Impulse Response) kestirilir. Yeni nesil haberleşme sistemlerinde PSA-CE ile birlikte ara değerlendirme oldukça sık kullanılmaktadır. Bu sebeple, LS kestiriminden sonra SI, PLI ve NNI yöntemi ile tüm data pozisyonlarındaki CIR' lar elde edildi. Aşağıdaki alt bölümlerde SI, PLI ve NNL algoritmaları tartışılmıştır.

A. Esnek Şerit Ara Değerleme (SI)

Eldeki veri sayısı arttıkça klasik eğri uydurma yöntemlerinde kullanılan polinomun derecesi büyüyecektir. Bu nedenle veriler alt aralıklara bölünerek daha düşük dereceli polinomların kullanılması oldukça önem arz etmektedir. Literatürde en etkili ara değerlendirme yöntemlerinden biri parçalı kübik Hermite ara değerlendirme yöntemidir [9]. Bu çalışmada

kullanılan SI yöntemi ise ikinci türevi sürekli olan parçalı kübik Hermite ara değerlendirme yöntemidir. Ayrıca kesme noktalarında ikinci türevinin değeri sıfırdır. SI yönteminde her bir aralıkta verilen data noktaları düzgün (smooth) ve sürekli olan üçüncü dereceden bir polinoma uydurulur [7].

B. Parçalı Doğrusal Ara Değerleme (PLI)

[10]' da pilotlar kullanarak kanal cevabını elde etmek için PLI ara değerlendirme yöntemi verilmiş ayrıca PLI' in basitliği ve kolay uygulanabilirliği de gösterilmiştir. Ancak 4×4 STBC-SM sistemi için henüz PLI tabanlı kanal kestirimi gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada, data noktalarındaki CIR' lar bir boyutlu doğrusal ara değerlendirme yöntemi ile elde edildi. Elde edilen CIR' lar zamanın sürekli bir fonksiyonu, tamamen düz dağılımlı, türevi her bir aralıkta sabit değerli ve kesme noktalarında lokal monotonluğu da sürdürmektedir.

C. En Yakın Komşu Ara Değerleme (NNI)

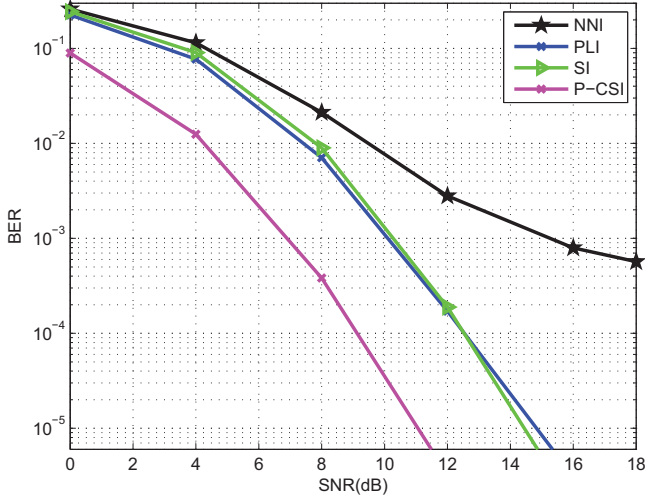
En basit ara değerlendirme yöntemlerinden biri ise NNI yöntemidir. Bu yöntemde örnek noktaların arasına her bir örneğin değerini diğer örneğin aralığına kadar tutarak ara değerlendirme yapmaktadır. [10]' de PLI' un NNI' dan daha iyi başarımlı sergilediği gösterilmiştir.

IV. BİLGİSAYAR BENZETİM SONUÇLARI

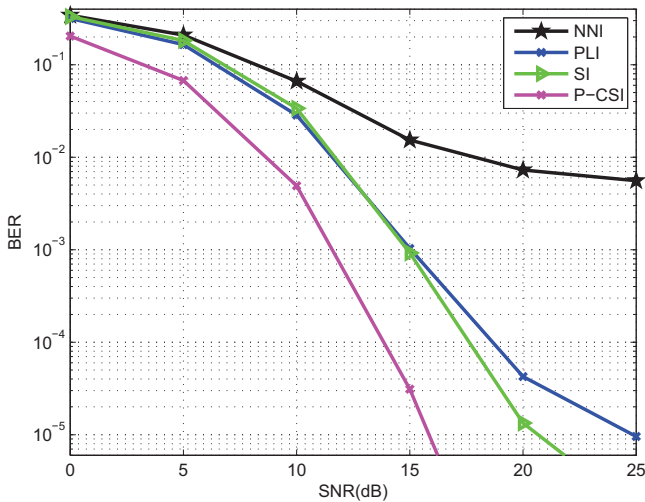
Bu bölümde, bilgisayar benzetim sonuçları ile 4×4 STBC-SM sistemi için önerilen ara değerlendirme tabanlı kanal kestirim yöntemlerinin başarımlı gösterilmiştir. Benzetimlerde, izgesel verimlilik sırasıyla 4-QAM ve 16-QAM modülasyonları için $R=3$ b/s/Hz ve $R=6$ b/s/Hz olacak şekilde kullanıldı ve Rician faktör $K=3$ olarak seçilmiştir. Pilot ve data sembollerinden oluşan 4×4 STBC-SM bloğu 104 örnekten oluşmakta ve bunun ilk 4 örneği ise pilot sembollerinden oluşmaktadır. Sinyal gürültü oranı (SNR: Signal to noise ratio) $\frac{E_s}{\sigma^2}$ olarak belirlenmiştir. Burada E_s sembol başına düşen enerjiyi ve σ^2 gürültü gücünü göstermektedir.

Gelecek nesil haberleşme sistemlerinin anahtar özelliklerinden biri çok yüksek mobilite etkisi olacaktır. Benzetimlerde mobil terminal 1.8 Ghz taşıyıcı frekansında 200 km/saat hızla hareket etmektedir. Alıcı ve verici antenler arasındaki kablosuz kanallar zamanla değişen Rician sönümlenmeli kanal olarak üretilmiş ve Doppler etkisi göz önünde bulundurulmuştur. 4×4 STBC-SM sisteminde 4-QAM modülasyonunun kullanılması durumunda kanal kestiriminin BER başarımlı üzerine etkisi Şekil 1' de sunulmuştur. BER başarımları P-CSI durumu, SI, PLI ve NNI için çizdirilmiştir. Şekil 1' de SI yönteminin PLI yönteminden daha iyi başarımlıya sahip olduğu ve P-CSI durumu ile karşılaştırıldığında $BER=10^{-5}$ ' te

yaklaşık 3.5 dB lik bir farkın olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, SI ve PLI yöntemleri ile NNI arasındaki BER başarımları artan SNR değerleri ile birlikte arttığı görülmüştür. Buna ek olarak yüksek SNR' larda NNI yönteminin hata eğrisi oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 1. $V = 200\text{km/saat}$ ve Rician faktör $K = 3$ olması durumunda 4×4 STBC-SM-4QAM sistemi için PSA-CE' nin BER başarımları



Şekil 2. $V = 200\text{km/saat}$ ve Rician faktör $K = 3$ olması durumunda 4×4 STBC-SM-16QAM sistemi için PSA-CE' nin BER başarımları

Şekil 2' te önerilen yöntemlerin BER başarımları 16-QAM için gösterilmiştir. Bu şekilde, yüksek dereceli modülasyonun kullanılması durumunda, SI yönteminin PLI ve NNI yöntemlerinden daha iyi başarımlar sağladığı gösterilmiştir. Özellikle, $\text{BER} = 10^{-5}$ te SI yöntemi PLI yöntemine nazaran 4dB' lik kazanç sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, NNI yönteminin

yüksek SNR değerlerinde düzeltilemez hata eğrisi oluşturduğu saptanmıştır. Sonuç olarak benzetimlerde de gözlemlendiği üzere özellikle yüksek SNR' larda yüksek mobiliteden dolayı oluşan hızlı değişen kanallar PLI ve NNI yönteminin başarımlarını düşürmüştür. Böylelikle SI yönteminin düşük karmaşıklığı ve yüksek başarımları sayesinde tercih edilebilir olduğu gösterilmiştir.

V. SONUÇLAR

Gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemleri için STBC-SM yapısı standartlara girebilecek tekniklerden bir tanesidir. Bu çalışmada, STBC-SM yapısı için pilot sembol yardımcı ve ara değerlendirme tabanlı kanal kestirim teknikleri önerilmiştir. Hızlı değişen kanallarda kanal kestirim hatalarından dolayı STBC-SM sisteminde başarımın olumsuz yönde etkileneceği gösterilmiştir. Zamanla değişen Rician sönümlenmeli kanallarda kanal değişimlerini takip edebilmek için SI ve PLI tabanlı PSA-CE teknikleri önerilmiştir. 4×4 STBC-SM sisteminde SI tabanlı PSA-CE yönteminin PLI ve NNI tabanlı PSA-CE yöntemlerine göre daha iyi BER başarımları sağladığını gösterdik. NNI tabanlı PSA-CE tekniği yüksek SNR' larda düzeltilemez hata eğrileri oluşturduğu bilgisayar benzetim sonuçları ile gözlemledik. Sonuç olarak hızlı değişen kanallarda SI ve PLI tabanlı PSA-CE yöntemleri başlıca yüksek başarımları ve kolay uygulanabilirliği sayesinde tercih edilebilir.

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] 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.
- [3] 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.
- [4] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Space-time block coded spatial modulation," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 3, pp. 823–832, 2011.
- [5] J. K. Cavers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for rayleigh fading channels [mobile radio]," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 4, pp. 686–693, 1991.
- [6] S. Sugiura and L. Hanzo, "Effects of channel estimation on spatial modulation," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 19, no. 12, pp. 805–808, 2012.
- [7] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in ofdm systems," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 3, pp. 223–229, 2002.
- [8] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct 1998.
- [9] R. Keys, "Cubic convolution interpolation for digital image processing," *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 6, pp. 1153–1160, 1981.
- [10] J. Rinne and M. Renfors, "Pilot spacing in orthogonal frequency division multiplexing systems on practical channels," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 4, pp. 959–962, 1996.