

## ADAPTIVE LINEAR PREDICTION BASED DOWNLINK BEAMFORMING FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Halil YİĞİT\*

Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü  
41380, KOCAELİ, e-mail: halilyigit@kou.edu.tr

Adnan KAVAK

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, 41040, KOCAELİ

### ABSTRACT

In Time Division Duplex (TDD) wireless communications, downlink beamforming performance of a smart antenna system can be degraded due to the variation of spatial signatures in the fast fading environment. To mitigate this, prediction based downlink beamforming can be applied, which relies on using updated weight vectors via adaptive linear prediction of spatial signatures in the downlink interval based on their autoregressive (AR) modeling in the uplink interval. In this study, the effectiveness of employing predicted spatial signatures as downlink weight vectors is demonstrated under varying mobile speed ( $V$ ), prediction filter order ( $p$ ) and the number of multipath ( $L$ ) conditions. It is observed that in the event that Doppler shifts in the multipaths are integer multiple of Doppler shift in the first path (fixed Doppler shift), prediction based beamforming achieves better SNR improvements in the received signal at the mobile terminal with increasing  $V$ ,  $p$ , and  $L$ .

**Key Words:** Smart antenna system, AR modeling, linear prediction, beamforming

## KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN UYARLAMALI DOĞRUSAL TAHMİN TABANLI AŞAĞI BAĞLANTI HÜZME ŞEKİLLENDİRME

### ÖZET

Zaman bölmeli çift yönlü (TDD) kablosuz haberleşmede, bir akıllı anten sisteminin aşağı bağlantı ışın şekillendirme performansı hızlı sönmülenen bir ortamda uzaysal imzaların değişiminden dolayı bozulabilir. Bu bozulmayı azaltmak için yukarı bağlantı aralığındaki uzaysal imza vektörlerinin özbağlanımlı modellenmesine bağlı olarak, aşağı bağlantı aralığında uyarlamalı doğrusal tahmini ile güncellenen ağırlık vektörlerinin kullanılmasını içeren hüzmeye şekillendirme uygulanabilir. Bu çalışmada, değişen mobil hızı ( $V$ ), tahmin filtresi derecesi ( $p$ ), ve çoklu yol sayısı ( $L$ ) koşulları altında aşağı bağlantı ağırlık vektörü olarak tahmin edilen uzaysal imzaların kullanılmasının verimliliği gösterilmiştir. Çoklu yollardaki Doppler kaymalarının birinci yoldaki Doppler kaymasının tamsayı katı olduğu durumda (Sabit Doppler kayması) tahmine dayalı hüzmeye şekillendirmenin artan  $V$ ,  $p$ , ve  $L$  ile birlikte mobil terminal tarafından alınan sinyalde daha iyi SNR iyileştirmesi başardığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı anten sistemi, AR modelleme, doğrusal tahmin, hüzmeye şekillendirme

### 1. GİRİŞ

Akıllı anten sistemleri kablosuz haberleşme sistemleri içerisinde yer alan baz istasyonlarında önemli derecede kapasite artırımı ve performans gelişimi sağlamaktadır (1-3). Uzaysal imza vektörü bir akıllı anten sisteminin (AAS) anten dizisinde mevcut sinyallerin yayılım karakteristiklerini tanımlar. Zaman bölmeli çift yönlü sistemde aşağı bağlantı (baz istasyonu anten dizisinden mobil terminale doğru olan iletim) hüzmeye şekillendirme

### 1. INTRODUCTION

Smart antenna systems provide significant capacity increase and performance enhancement at the base station of wireless communication systems (1-3). Spatial signature vector describes the propagation characteristics of the signals present at an antenna array of a smart antenna system (SAS). In time division duplex system, for the downlink (communication from base station antenna array towards mobile terminal) beamforming, the SAS

için, AAS geleneksel olarak yukarı bağlantı (mobil terminalden baz istasyonu anten dizisine doğru olan iletim) aralığında hesaplanan en son bilinen uzaysal imzayı ağırlık vektörü olarak kullanır. Uzaysal imza tabanlı hüzmeye şekillendirme (4) olarak bilinen bu geleneksel yaklaşım kanal karakteristiklerinin ardışık zaman aralıkları arasında aynı kalması şartıyla iyi performans gösterir. Mobil terminal durağan yada yavaş bir hızla hareket ettiği zaman, uzaysal imza değişimlerinin önemli olmadığı ve varış yönlerinin (DOAs) neredeyse değişmediği gösterilmiştir (5). Ancak eğer mobil kullanıcı bağıl olarak yüksek bir hızda hareket ederse, uzaysal imza vektörleri her çoklu yoldaki Doppler kaymasının neden olduğu hızlı sönmüleme etkisinden dolayı hızlı bir şekilde değişebilir. Bu koşullar altında, yeni mobil konumu için aşağı bağlantı ağırlık vektörü olarak bir önceki yukarı bağlantı zaman dilimindeki uzaysal imzanın kullanılması performans bozulması ile sonuçlanabilir. Aşağı bağlantı aralığında uzaysal imzaların tam olarak tahmin edilmesi ve hüzmeye şekillendirme sürecinde bir önceki (geleneksel yaklaşım) uzaysal imzaların yerine tahmin edilen uzaysal imza vektörlerinin kullanılması ile performanstaki bozulma önenebilir.

Mobilin kısa aralıklı hareketi sırasında uzaysal imza vektörlerinin sadece Doppler kaymasından dolayı değiştiği ve uzaysal imza vektörünün her bir elemanın sinüslerin toplamı olarak modellenebildiği kabul edilirse (6,7) aşağı bağlantı aralığında uzaysal vektörlerini tahmin etmek için yukarı bağlantı sırasında bu vektörler için bir özbağlanımlı (AR) model belirlenebilir. Bu çalışmada, ağırlık vektörleri olarak AR tabanlı uyarlamalı doğrusal tahmin ile güncellenen uzaysal imzaları kullanan, doğrusal tahmin tabanlı aşağı bağlantı hüzmeye şekillendirme performansını incelemiştir. Burada, uyarlamalı doğrusal tahmin filtresinin performansı değişen mobil hızı ( $V$ ), tahmin filtresi derecesi ( $p$ ) ve çoklu yolların sayısı ( $L$ ) koşulları altında aşağı bağlantı SNR gelişimi ( $\Delta_{SNR}$ ) ve bağıl hata gelişimi ( $\Delta\varepsilon$ ) cinsinden istatistiksel olarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, uyarlamalı doğrusal tahmin tabanlı aşağı bağlantı hüzmeye şekillendirme performansının  $V$ ,  $p$  ve  $L$ 'deki artışla orantılı olduğunu göstermiştir.

## 2. UZAYSAL İMZA VEKTÖRÜ MODELİ

Bir mobil terminalden iletilen, bant-sınırlı temel bant sinyali  $s(t)$  baz istasyonunda  $M$  elemanlı bir anten dizisi tarafından [1] eşitliğinde verildiği gibi alınır,

$$\mathbf{x}(t) = s(t)\mathbf{a}(t) + \mathbf{I}(t) + \mathbf{n}(t) \quad [1]$$

$\mathbf{a}(t)$  kablosuz bir ortamın fiziksel yayılım karakteristiklerini belirleyen ve mobil kullanıcıya karşılık gelen uzaysal imza vektörü,  $\mathbf{I}(t)$  çoklu erişim parazitisi ve  $\mathbf{n}(t)$  kompleks değerli gürültü vektörüdür. Haberleşme sistemlerinde yukarı bağlantı iletimleri tipik olarak her biri bir doğrultu vektörü (dizi yanıt vektörü) oluşturan, birer geliş açısı ile ilişkili çoklu yollar ile gerçekleşir. Uzaysal imza vektörü  $\mathbf{a}(t)$  doğrultu vektörlerinin ağırlıklı toplamı olarak (5) aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir,

conventionally uses the last known spatial signature estimated during the uplink (communication from mobile terminal towards base station antenna array) interval as the weight vector. This conventional approach known as spatial signature based beamforming (4), performs well as long as channel characteristics remain the same between consecutive time intervals. When the mobile terminal is stationary or moving a low speed, it has been demonstrated that spatial signature variations are not significant, and that direction of arrivals (DOAs) are almost unchanged (5). However, if the mobile user moves at a relatively high speed, spatial signature vectors can change rapidly due to fast fading effects induced by Doppler shift at each multipath. Under such circumstances, employing the spatial signature of the previous uplink time slot as the downlink weight vector for the new mobile position may result in performance degradation. This can be avoided by accurately predicting the spatial signatures in the downlink interval and substituting predicted spatial signature vectors in place of previous (conventional approach) ones in the beamforming process.

During short interval movement of the mobile, if spatial signature vectors are assumed to vary due only to Doppler shift and each element of the spatial signature vector can be modeled as the sum of sinusoids (6,7), an autoregressive (AR) model can be determined for the spatial signature vectors during the uplink to predict them in the downlink interval. In this study, the performance of the prediction based downlink beamforming which uses updated spatial signatures via AR based adaptive linear prediction as weight vectors is investigated. Here, the performance of the adaptive linear prediction filter in terms of downlink SNR improvement ( $\Delta_{SNR}$ ) and relative error improvement ( $\Delta\varepsilon$ ) under varying mobile speed ( $V$ ), prediction filter order ( $p$ ), and number of multipaths ( $L$ ) conditions is statistically evaluated. The simulation results show that the performance of the adaptive linear prediction based downlink beamforming is proportional with the increase in  $V$ ,  $p$ , and  $L$ .

## 2. SPATIAL SIGNATURE MODEL

The transmitted band-limited baseband signal  $s(t)$  from a mobile terminal is received by an  $M$  element antenna array at the base station as given by [1],

$$\mathbf{x}(t) = s(t)\mathbf{a}(t) + \mathbf{I}(t) + \mathbf{n}(t) \quad [1]$$

where  $\mathbf{a}(t)$  is the spatial signature vector which determines the physical propagation characteristics of the wireless environment, and corresponding to the mobile user,  $\mathbf{I}(t)$  is the multiple-access interference, and  $\mathbf{n}(t)$  is the complex valued noise vector. Uplink transmissions in the communications systems typically occur with multipaths, each associated with a direction of arrival (DOA) that forms a steering vector (array response vector). Spatial signature vector  $\mathbf{a}(t)$  is expressed as a weighted sum of steering vectors (5) as follows,

$$\mathbf{a}(t) = \sum_{i=1}^L r_i \alpha_i e^{j\varphi_i(t)} \mathbf{v}(\theta_i) \quad [2]$$

Burada  $L$  çoklu yolların sayısı,  $r_i$  yayılım yol kaybı,  $\alpha_i$  yerel dağıtıcılardan yansıyan yolların neden olduğu kompleks zayıflama,  $\mathbf{v}(\theta_i)$  bir  $\theta_i$  açısından gelen  $i$ .inci çoklu yol bileşeni için  $M \times 1$  boyutlu doğrultu vektörü ve  $\varphi_i$  mobilin hareketinden dolayı değişen yol uzunluklarının sebep olduğu frekans kaymasıdır (Doppler etkisi). Faz kayması [3]'de verildiği gibi sabit mobil hızı ile doğrusal bir şekilde değişir

$$\varphi_i(t) = \frac{2\pi}{\lambda} d_{0,i} + \frac{2\pi}{\lambda} V t \cos \psi_i, \quad i = 1, \dots, L \quad [3]$$

$\lambda$  taşıyıcı sinyalin dalga boyu,  $d_{0,i}$   $i$ .inci çoklu yolun başlangıç yol uzunluğu ve  $\psi_i$   $i$ .inci çoklu yoldan gelen dalga ile mobilin hareket yönü arasındaki açıdır. Bu yüzden [2] eşitliğindeki uzaysal imza modeli sabitler  $c$  teriminde birleştirilerek aşağıda gösterildiği gibi basitleştirilebilir.

$$\mathbf{a}(t) = c \sum_{i=1}^L e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_{0,i}} e^{j2\pi\frac{V}{\lambda} t \cos \psi_i} \mathbf{v}(\theta_i) \quad [4]$$

TDD sisteminde aşağı bağlantı iletimi için AAS geleneksel olarak geçerli zaman diliminde ağırlık vektörü  $\mathbf{w}(t)$  olarak bir önceki zaman diliminde elde edilen uzaysal imza vektörünü  $\mathbf{a}(t-1)$  kullanır,

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{a}(t-1) \quad [5]$$

Hızlı sönen mobil ortamlarında, aşağı bağlantı iletimin için [5]'deki ağırlık vektörünü kullanmak eski mobil konumuna doğru yönlendirilen hatalı hüzmelere sebep olabilir ve bu yüzden mobil terminalde alınan sinyalde SNR bozulmasına neden olabilir. Bu bozulma, Şekil 1'de gösterildiği gibi mobil kullanıcının doğru bir şekilde izlenebilmesi suretiyle, yeni mobil konumu için aşağı bağlantı ağırlık vektörünün güncellenmesi ile ortadan kaldırılabilir. Bunun gerçekleştirilmesi için, AAS birkaç yukarı bağlantı zaman dilimi boyunca uzaysal imza örneklerini gözlemlemelidir. Daha sonra yukarı bağlantı periyodunda bu örnekler için bir model oluşturmalıdır ve sonra geçerli zaman aralığında aşağı bağlantı hüzmeye şekillendirme için ağırlık vektörü olarak kullanılacak uzaysal imza vektörünü tahmin etmelidir. Bu şekilde, sinyal gücünün minimum kayıp ile istenilen mobil kullanıcıya iletilmesi mümkün olur

$$\mathbf{a}(t) = \sum_{i=1}^L r_i \alpha_i e^{j\varphi_i(t)} \mathbf{v}(\theta_i) \quad [2]$$

Here,  $L$  is the number of multipaths,  $r_i$  propagation path loss,  $\alpha_i$  is the complex attenuation caused by paths reflected from local scatterers,  $\mathbf{v}(\theta_i)$  is the  $M \times 1$  dimensional steering vector for the  $i$ -th multipath component which arrives at an angle of  $\theta_i$ , and  $\varphi_i$  is the phase shift induced by varying path lengths due to mobile movement (Doppler effect). The phase shift varies linearly with the constant mobile speed  $V$  as given by [3],

$$\varphi_i(t) = \frac{2\pi}{\lambda} d_{0,i} + \frac{2\pi}{\lambda} V t \cos \psi_i, \quad i = 1, \dots, L \quad [3]$$

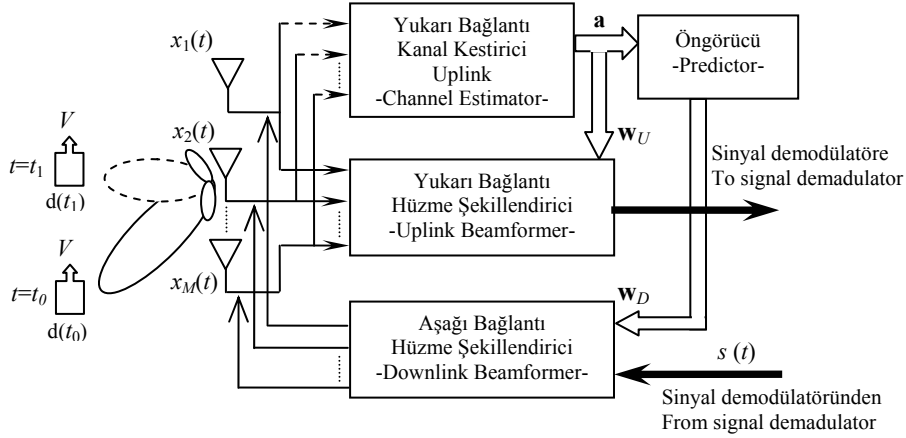
where  $\lambda$  is wavelength of the carrier,  $d_{0,i}$  is initial path length of  $i$ -th multipath, and  $\psi_i$  is the angle between the direction of incoming wave in the  $i$ -th multipath and the direction of the mobile movement. Thus, the spatial signature model in [2] is simplified with incorporating constant terms in  $c$  as follows,

$$\mathbf{a}(t) = c \sum_{i=1}^L e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_{0,i}} e^{j2\pi\frac{V}{\lambda} t \cos \psi_i} \mathbf{v}(\theta_i) \quad [4]$$

For downlink transmission in TDD system, the SAS conventionally employs spatial signature vector  $\mathbf{a}(t-1)$  obtained during the previous time slot as a weight vector  $\mathbf{w}(t)$  at current time slot,

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{a}(t-1) \quad [5]$$

In fast fading mobile environments, using the weight vector in [5] for downlink transmission might lead to inaccurate beams, which steer toward the old mobile position, and therefore, cause SNR degradation in the received signal at the mobile terminal. This degradation can be eliminated by updating the downlink weight vector for the new mobile position, thereby accurately tracking the mobile user as depicted in Figure 1. To accomplish this, the SAS must observe spatial signature samples over several uplink time slots, then construct a model for these samples in the uplink period, and then predict the spatial signature vector to be used as a weight vector for the downlink beamforming at current time interval. By this way, it is possible to deliver signal power to the desired mobile user with minimal loss.



**Figure 1.** Functional diagram of a smart antenna system using adaptive linear prediction based downlink beamforming in TDD mode operation

**Şekil 1.** TDD mod çalışmada uyarlamalı doğrusal tahmin tabanlı aşağı bağlantı hüzme şekillendirme kullanan bir akıllı anten sisteminin fonksiyonel diyagramı

Mobilin hareketi sırasında yayılım ortamındaki dağıtıcı nesnelerin sayısı ve mobil ve baz istasyonuna göre bağlı konumlarının yaklaşık olarak aynı kaldığı kabul edilir. Bu nedenle çift yönlü iletim zamanı içerisinde çoklu yolların geliş açıları (DOAs) ve doğrultu vektörleri değişmemektedir. Mobil terminal ve baz istasyonu anten dizisi arasındaki ayırım yeteri kadar büyük olduğu için çoklu yollar aynı yol kaybına  $r_i \approx r$  sahip olurlar. Çoklu yol ortamındaki dağıtıcıların aynı elektriksel özelliklere (iletkenlik, geçirgenlik) sahip olduğu düşünülürse, her bir yol için kompleks zayıflama sabit  $\alpha_i = \alpha$  kabul edilebilir.

### 3. ÖZBAĞLANIMLI (AR) MODELLEME İLE DOĞRUSAL TAHMİN

Mobil kullanıcının hareketi sırasında çoklu yol bileşenlerinin bağlı fazı Doppler kaymasından dolayı değişir. Uzaysal imza vektörünün elemanları sinuslerin toplamı olarak ifade edildiğinden dolayı, bu vektörün her bir elemanı zamanla değişen özbağlanımlı (AR) işlem olarak modellenebilir (8,9),

$$a_k(t) = -\sum_{j=1}^p b_{k,j}^* a_{k,j}(t-j) \quad k=1, 2, \dots, M \quad [6]$$

Burada,  $p$  model yada tahmin filtresinin derecesi ve  $b_{k,j}$  filtre katsayılarıdır. [7] eşitliği ile verilen  $(p+1) \times (N/2+p)$  boyutlu veri matrisini elde etmek için veri pencereleme yöntemlerinden otokorelasyon metodu (9) kullanılmıştır.

$$\mathbf{D}_k = \begin{bmatrix} a_k(1) & \dots & a_k(p+1) & \dots & a_k(N/2) & \dots & 0 \\ 0 & \dots & a_k(p) & \dots & a_k(N/2-1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & a_k(1) & \dots & a_k(N/2-p) & \dots & a_k(N/2) \end{bmatrix} \quad [7]$$

Matris eşitliğinde  $N/2$  pencere boyutu yada yukarı bağlantı uzaysal imza örneklerinin sayısıdır ve  $N/2 > p$  olarak seçilir. Tahmin filtresi katsayılarının bulunması problemi Yule-Walker eşitliklerinin çözümüne

The number of the scattering objects in the propagation environment and their relative positions with respect to the mobile and the base station are assumed to remain approximately the same during the movement of the mobile. Hence, directions of arrivals (DOAs) of multipaths and steering vectors are unchanged within duplexing time. Since the separation between the mobile terminal and the base station antenna array is sufficiently large, multipaths have the same path loss  $r_i \approx r$ . If scatterers in the multipath environment are considered to have identical electrical properties (conductivity, permittivity), the complex attenuation for each path is assumed to be constant  $\alpha_i = \alpha$ .

### 3. LINEAR PREDICTION VIA AUTOREGRESSIVE (AR) MODELING

The relative phase of multipath components changes due to Doppler shift during movement of the mobile user. Since elements of the spatial signature vector are expressed as the sum of sinusoids, each element of the vector can be modeled as time varying autoregressive (AR) process (8, 9) given by

$$a_k(t) = -\sum_{j=1}^p b_{k,j}^* a_{k,j}(t-j) \quad k=1, 2, \dots, M \quad [6]$$

where  $p$  is the model or prediction filter order, and  $b_{k,j}$  are the filter coefficients. The autocorrelation method from data windowing schemes (9) is performed to obtain the  $(p+1) \times (N/2+p)$  dimensional data matrix given by [7],

$$\mathbf{D}_k = \begin{bmatrix} a_k(1) & \dots & a_k(p+1) & \dots & a_k(N/2) & \dots & 0 \\ 0 & \dots & a_k(p) & \dots & a_k(N/2-1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & a_k(1) & \dots & a_k(N/2-p) & \dots & a_k(N/2) \end{bmatrix} \quad [7]$$

In matrix equation,  $N/2$  is the window size or number of uplink spatial signature samples, and chosen as  $N/2 > p$ . The problem of finding prediction filter coefficients is reduced to solving the Yule-Walker equations.

indirgenebilir.

$$\mathbf{R}_k \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} S_k \\ \mathbf{0}_{p \times 1} \end{bmatrix}_{(p+1) \times 1} \quad [8]$$

$\mathbf{R}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{D}_k^H$   $(p+1) \times (p+1)$  boyutlu otokorelasyon matrisi,  $\mathbf{b}_k$  [9] ile verilen katsayı vektörü,

$$\mathbf{b}_k = [1 \quad b_{k,1} \quad b_{k,2} \quad \dots \quad b_{k,p}] \quad [9]$$

ve  $\varepsilon_k = \hat{a}_k(t) - a_k(t)$  olduğu yerde  $S_k = \varepsilon_k^H \varepsilon_k$  karesel hataların toplamıdır. [8] eşitliğinden açıkça görüldüğü gibi,  $\mathbf{b}_k$  vektörü  $\tilde{\mathbf{R}}_k$ 'nin dik (sıfır) uzayında bulunmaktadır.

$$\tilde{\mathbf{R}}_k \mathbf{b}_k = \mathbf{0}_{p \times 1} \quad [10]$$

$\tilde{\mathbf{R}}_k$ ,  $\mathbf{R}_k$  matrisinin  $p \times (p+1)$  boyutlu alt matrisidir. Tahmin filtresi katsayıları  $\mathbf{b}_k$  vektörünün ilk elemanına göre normalize edilmesiyle elde edilir.

## 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

### 4.1. Simülasyon Düzeni

TDD modunda çalışan bir akıllı anten sistemi için uyarlamalı doğrusal tahmin tabanlı aşağı bağlantı hüzmeye şekillendirme performansını değerlendirmek için bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. UTRA-TDD'de (10) olduğu gibi çift yönlü iletim zamanı  $T_s = 10/15$  ms olan bir çerçeve yapısı göz önüne alınmıştır. Simülasyon iki aşamada gerçekleştiriliyor. Birinci aşamada kompleks uzaysal imza vektörünün her bir elemanı için Şekil 2'de gösterildiği gibi bir TDD çerçeve yapısı kullanılarak, yukarı bağlantı aralığında toplanan  $N/2$  örnekten  $p$  dereceli bir özbağlanımlı model oluşturulur. Her yeni gelen uzaysal imza vektörü için model ve model katsayıları uyarlamalı olarak güncellenir. Son aşamada ise aşağı bağlantı aralığı için bir sonraki uzaysal imza vektörü bu AR model katsayıları kullanılarak tahmin edilir. Uzaysal imza vektörleri [2] eşitliği kullanılarak verilen mobil hızı ( $V$ ), çoklu yolların sayısı ( $L$ ), ortalama geliş açıları ve açısal yayılım ( $\Delta\theta$ ) için üretilmiştir.

$$\mathbf{R}_k \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} S_k \\ \mathbf{0}_{p \times 1} \end{bmatrix}_{(p+1) \times 1} \quad [8]$$

$\mathbf{R}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{D}_k^H$  is  $(p+1) \times (p+1)$  dimensional autocorrelation matrix,  $\mathbf{b}_k$  is the coefficient vector given by [9],

$$\mathbf{b}_k = [1 \quad b_{k,1} \quad b_{k,2} \quad \dots \quad b_{k,p}] \quad [9]$$

and  $S_k = \varepsilon_k^H \varepsilon_k$  is the sum of squared errors where  $\varepsilon_k = \hat{a}_k(t) - a_k(t)$ . It is clearly seen from equation [8] that  $\mathbf{b}_k$  is the vector, lying in the orthogonal (null) space of  $\tilde{\mathbf{R}}_k$ ,

$$\tilde{\mathbf{R}}_k \mathbf{b}_k = \mathbf{0}_{p \times 1} \quad [10]$$

$\tilde{\mathbf{R}}_k$  is  $p \times (p+1)$  dimensional sub-matrix of  $\mathbf{R}_k$ . Predictor filter coefficients are obtained by normalizing  $\mathbf{b}_k$  with respect to its first element.

## 4. SIMULATION RESULTS

### 4.1. Simulation Setups

Computer simulations are carried out to evaluate the performance of adaptive linear prediction based downlink beamforming for a smart antenna system operating in TDD mode. A frame structure with duplexing time  $T_s = 10/15$  ms as in UTRA-TDD (10) is considered. Simulation is performed in two levels. In the first level, for each complex element of the spatial signature vector, an autoregressive model with order  $p$  is estimated from the  $N/2$  samples collected in the uplink interval by using a TDD frame structure as shown in Figure 2. Model and model coefficients are updated adaptively for each new incoming spatial signature vector. In the last level, for the downlink interval, next spatial signature vector is predicted using these AR model coefficients. Spatial signature vectors are generated using [2] for a given mobile speed ( $V$ ), the number ( $L$ ) and mean DOA of multipaths, and angle spread ( $\Delta\theta$ ).

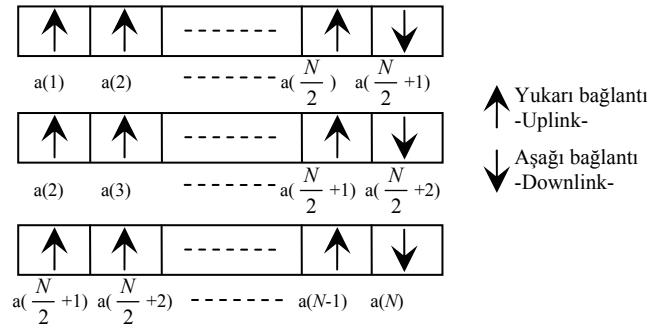
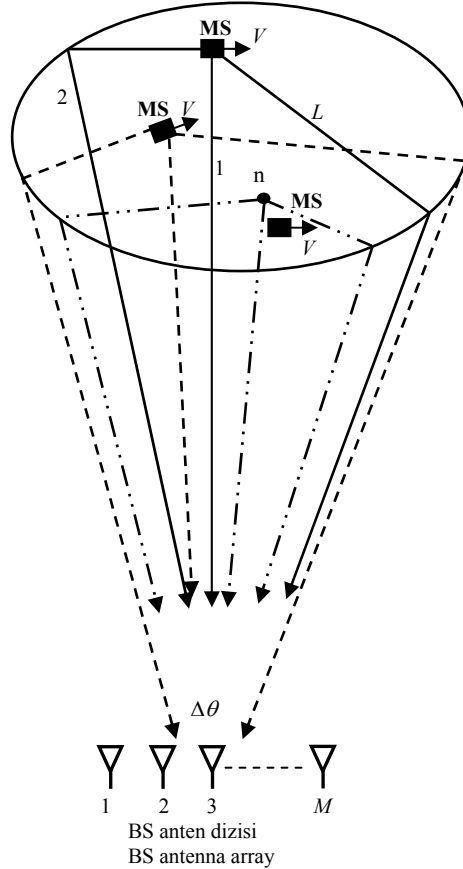


Figure 2. TDD frame structure  
Şekil 2. TDD çerçeve yapısı

Şekil 3'de gösterildiği gibi tipik yerel yansıtıcı kablosuz yayılım ortamı göz önüne alınarak, simülasyon 500 defa koşturulmuştur. Anten dizisi olarak 7-elemanlı düzgün doğrusal dizi (ULA) kullanılmıştır ve taşıyıcı frekansı 1.8 GHz seçilmiştir. Her simülasyon koşturmasında, kablosuz ortamdaki çoklu yolların geliş açıları (DOAs) ve bu sebepten mobilin başlangıç noktası rasgele değişirken,  $\Delta\theta$ ,  $V$ ,  $p$ , ve  $L$ ' nin değişmediği kabul edilmiştir. Aşağı bağlantı aralığı boyunca elde edilen tahminlerin SNR iyileştirmesi ( $\Delta_{SNR}$ ) ve bağıl hata iyileştirmesi ( $\Delta\epsilon$ ) değerlerinin ortalaması alınarak, 500 farklı değer ve bu değerlerin kümülatif dağılımları elde edilmiştir. Simülasyonlarda [11] eşitliğinde verildiği gibi çoklu yollardaki faz kaymaları sırasıyla, ilk çoklu yoldaki faz kaymasının tam sayı katı (sabit Doppler durumu), ve rasgele alınmıştır,

$$f_{d,i} = i \frac{V}{\lambda} \quad \text{ve} \quad f_{d,i} = \frac{V}{\lambda} \cos \psi_i \quad [11]$$

$$f_{d,i} = i \frac{V}{\lambda} \quad \text{ve} \quad f_{d,i} = \frac{V}{\lambda} \cos \psi_i \quad [11]$$



**Figure 3.** Multipath scattering profile for the mobile moving at the speed of  $V$ . Within scattering disc, 500 random mobile positions are selected (BS: Base station, MS: Mobile terminal)

**Şekil 3.**  $V$  hızında hareket eden mobil için çoklu yol dağılım profili. Dağıtıcı disk içerisinde 500 rasgele mobil konumu seçilmektedir. (BS: Baz istasyonu, MS: Mobil terminal)

#### 4.2. Performans Ölçütleri

Aşağı bağlantı iletimi sırasında uzaysal imzaların tahminlerinin doğruluğunu göstermek için iki farklı ölçüt kullanılmıştır. Birinci ölçüt mobil kullanıcı tarafından

#### 4.2. Performance Measures

Two different measures are used to indicate of the accuracy of the predictions of the spatial signatures during the downlink interval. The first measure is the signal to

alınan güçteki iyileşmeyi gösteren sinyal-gürültü oranı (SNR) gelişimidir ( $\Delta_{SNR}$ ). [5] eşitliğindeki geleneksel uzaysal imzanın yerine, tahmin edilen uzaysal imza vektörünün kullanılması ile aşağı bağlantı SNR'de bazı iyileşmeler elde edilir.

$$\Delta_{SNR}(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{\left| \mathbf{a}_{tahmin}^H \mathbf{a}_{gercek} \right|}{\left\| \mathbf{a}_{tahmin}^H \right\| \left\| \mathbf{a}_{gelenek} \right\|} \right) \quad [12]$$

SNR gelişimi aynı zamanda anten dizisinin aşağı bağlantı hızının ne kadar doğru yeni mobil konumu yönünde doğrultulduğunun ölçütü olarak görülebilir. İkinci ölçüt tahmin edilen ve geleneksel uzaysal imza vektörlerinin uzunluk cinsinden gerçek uzaysal imza vektörüne olan yakınlığını gösteren bağıl hata gelişimi ( $\Delta \varepsilon$ ) olarak tanımlanır,

$$\Delta \varepsilon (dB) = 20 \log_{10} \frac{\left\| \mathbf{e}_{gelenek} \right\|}{\left\| \mathbf{e}_{tahmin} \right\|} = 20 \log_{10} \frac{\left\| \mathbf{a}_{gercek} - \mathbf{a}_{gelenek} \right\|}{\left\| \mathbf{a}_{gercek} - \mathbf{a}_{tahmin} \right\|} \quad [13]$$

$\mathbf{a}_{gercek}$  aşağı bağlantı aralığında gerçek mobil konumu için olması gereken uzaysal imza vektörü,  $\mathbf{a}_{tahmin}$  tahmin edilen uzaysal imza vektörü ve  $\mathbf{a}_{gelenek}$  bir önceki zaman diliminin (yukarı bağlantı) uzaysal imza vektörüdür.

### 4.3. Sonuçlar

Bu çalışmada sabit ve rasgele Doppler kayması durumları için bir akıllı anten sisteminin uyarlamalı doğrusal tahmin tabanlı aşağı bağlantı hızı şekillendirme performansı gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'den açıkça görüldüğü gibi, uyarlamalı doğrusal tahmin filtresinin SNR gelişim performansı sabit Doppler kayması durumunda yaklaşık olarak 3 dB rasgele Doppler kayması durumundan daha büyüktür. Bu, AR modellemenin sadece sabit Doppler kayması durumunda etkili olduğunu göstermektedir.

noise ratio (SNR) improvement ( $\Delta_{SNR}$ ) in the received signal power by the mobile user. By substituting predicted spatial signature vector in place of the conventional spatial signature in [5], some improvement in the downlink SNR is obtained.

$$\Delta_{SNR}(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{\left| \mathbf{a}_{predict}^H \mathbf{a}_{actual} \right|}{\left\| \mathbf{a}_{predict}^H \right\| \left\| \mathbf{a}_{conv} \right\|} \right) \quad [12]$$

SNR improvement can also be viewed as the measure of how accurately the downlink beam of antenna array is pointed in the direction of the new mobile position. The second measure is defined as the relative error improvement ( $\Delta \varepsilon$ ), which indicates the proximity of the predicted and conventional spatial signature vectors to the actual ones in length,

$$\Delta \varepsilon (dB) = 20 \log_{10} \frac{\left\| \mathbf{e}_{conv} \right\|}{\left\| \mathbf{e}_{predict} \right\|} = 20 \log_{10} \frac{\left\| \mathbf{a}_{actual} - \mathbf{a}_{conv} \right\|}{\left\| \mathbf{a}_{actual} - \mathbf{a}_{predict} \right\|} \quad [13]$$

where  $\mathbf{a}_{actual}$  is the actual spatial signature vector for the current mobile position in the downlink interval,  $\mathbf{a}_{predict}$  is the predicted spatial signature vector, and  $\mathbf{a}_{conv}$  is the spatial signature of the previous time slot (uplink).

### 4.3. Results

In this study, adaptive linear prediction based downlink beamforming performance of a smart antenna system is evaluated for fixed and random Doppler shift cases. As seen clearly from Figure 4 that SNR improvement performance of the adaptive linear prediction filter in the fixed Doppler case is nearly 3 dB greater than that in the random Doppler case. This shows that AR modeling is effective only in the fixed Doppler case.

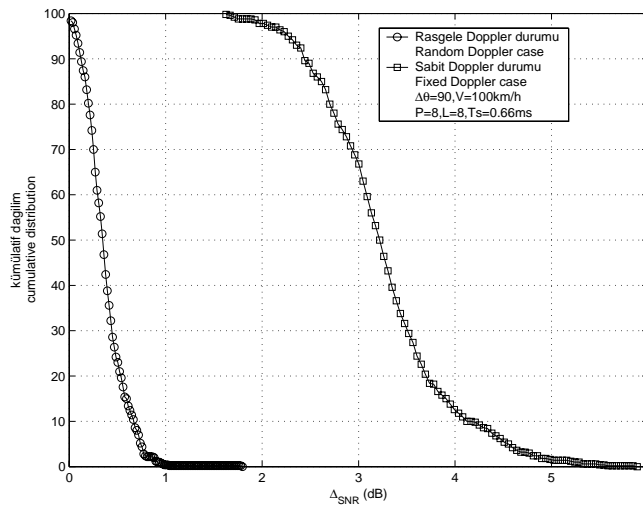
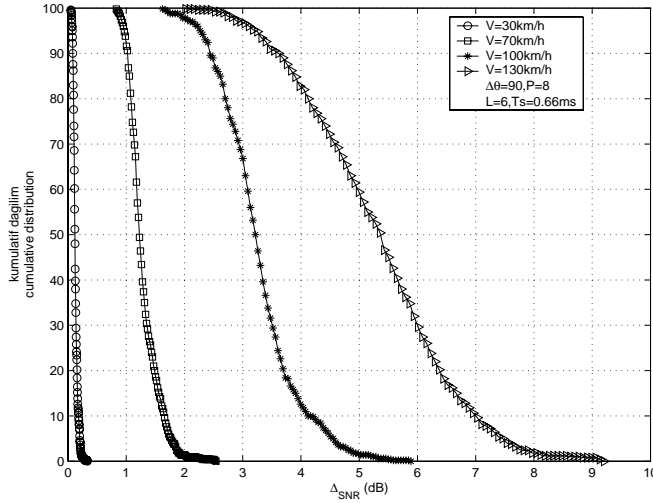


Figure 4. SNR performance of linear prediction filter with fixed and random Doppler shift cases on multipaths

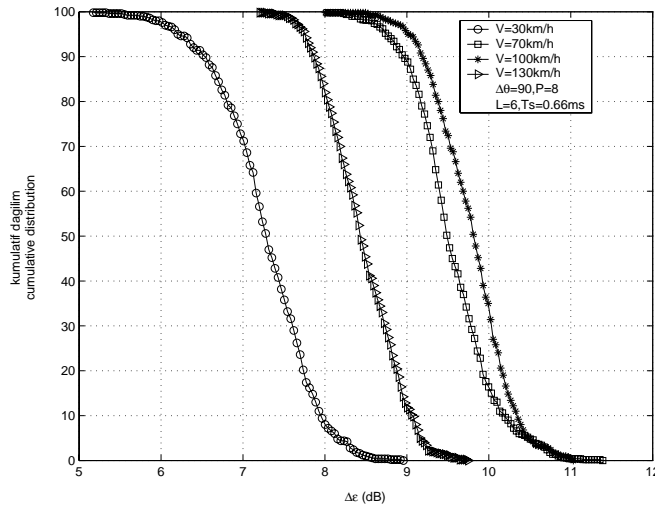
Şekil 4. Çoklu yollardaki sabit ve rasgele Doppler kayması durumunda doğrusal tahmin filtresinin SNR performansı

Mobil hızındaki değişimin tahmin performansına etkileri Şekil 5 ve Şekil 6'dan görülmektedir. Mobil hızı 50 km/h' den 130 km/h' e değiştiği zaman yüksek hızlarda daha büyük  $\Delta_{SNR}$  değerleri elde edilir. Diğer bir deyişle, tahmin filtresinin anten dizisinin aşağı bağlantı iletimindeki SNR kaybını gidermesi yüksek mobil hızlarında daha da belirginleşmektedir. Çünkü, ardışık aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı zaman aralıklarındaki uzaysal imza vektörleri yüksek hızlarda daha az korelasyona sahip olurlar. Aynı eğilim  $\Delta\varepsilon$  için gözlenmemesine rağmen, mobil hızındaki değişim Şekil 6'da gösterildiği gibi ortalama yaklaşık olarak 7.3 dB ile 9.8 dB arasında değişmektedir. Tahmin edilen uzaysal imza vektörü bir önceki uzaysal imza vektörüne göre gerçek vektöre hem açı hem de uzunluk (genlik) cinsinden daha yakın olmaktadır.

The effects of the mobile speed variation on the performance of prediction are seen in Figure 5 and Figure 6. When mobile speed varies from 50 km/h to 130 km/h, larger  $\Delta_{SNR}$  values are obtained in high speeds. In other words, eliminating SNR loss in the downlink transmission of antenna array of prediction filter becomes evident in higher mobile speeds still. This is because, spatial signature vectors in the successive downlink and uplink time intervals have less correlation in higher speeds. Although the same trend cannot be observed for  $\Delta\varepsilon$ , mobile speed variation fluctuates approximately among 7.3 dB and 9.8 dB in the average as shown in Figure 6. The predicted spatial signature vector becomes closer in both angle and length (amplitude) to the actual one than the previous spatial signature vector.



**Figure 5.** Cumulative distributions of SNR improvement for varying mobile speeds in fixed Doppler case  
**Şekil 5.** Sabit Doppler kayması durumunda değişen mobil hızları için SNR gelişiminin kümülatif dağılımları

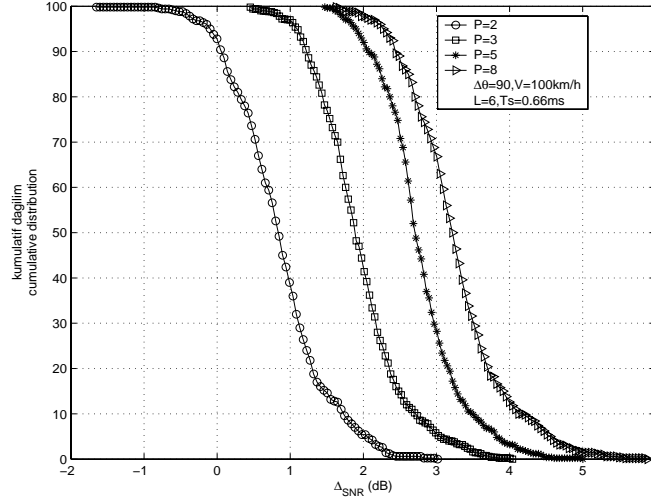


**Figure 6.** Cumulative distributions of relative error improvement for varying mobile speeds in fixed Doppler case  
**Şekil 6.** Sabit Doppler kayması durumunda değişen mobil hızları için bağıl hata gelişiminin kümülatif dağılımları

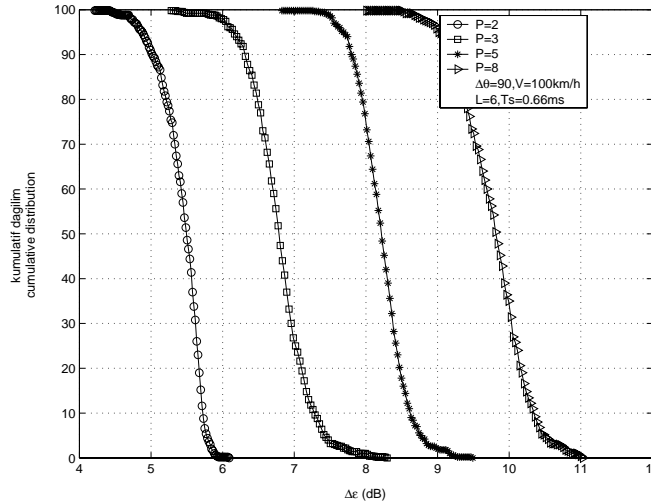


Şekil 7 ve 8,  $\Delta\theta=90^\circ$ ,  $V=100\text{km/h}$  ve  $L=6$  koşulları altında değişen tahmin filtresi derecesi ( $p$ ) için anten dizisinin aşağı bağlantı hüzmeye şekillendirme performansına etkilerini göstermektedir. Çizimlerden görüldüğü gibi tahmin filtresi derecesi artırılırken, tahminler hem  $\Delta_{SNR}$  hem de  $\Delta\epsilon$  cinsinden daha iyi performans gerçekleştirmektedir.

Figure 7 and 8 show the effects on the downlink beamforming performance of antenna array for changing the prediction filter order ( $p$ ) under  $\Delta\theta=90^\circ$ ,  $V=100\text{km/h}$ , and  $L=6$  conditions. As seen from plots, predictions achieve better performance in terms of both  $\Delta_{SNR}$  and  $\Delta\epsilon$  as the prediction filter order is increased.



**Figure 7.** Cumulative distributions of SNR improvement for varying prediction filter order in fixed Doppler case  
**Şekil 7.** Sabit Doppler kayması durumunda değişen tahmin filtresi dereceleri için SNR gelişiminin kümülatif dağılımları



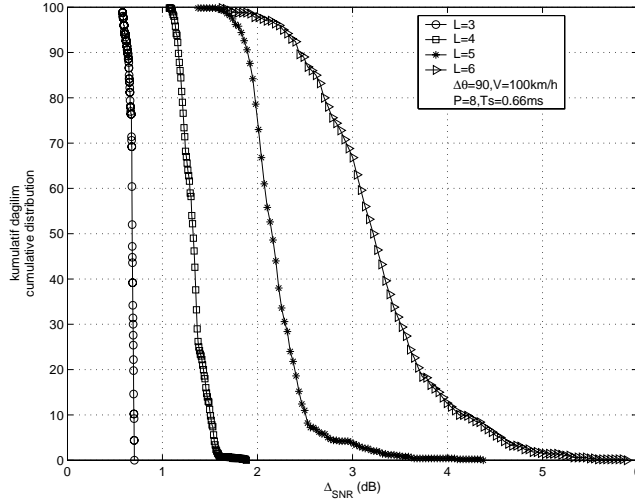
**Figure 8.** Cumulative distributions of relative error improvement for varying prediction filter order in fixed Doppler case  
**Şekil 8.** Sabit Doppler kayması durumunda değişen tahmin filtresi dereceleri için bağıl hata gelişiminin kümülatif dağılımları

Doğrusal tahmin filtresinin performansını etkileyen diğer bir parametre yayılım ortamındaki çoklu yolların ( $L$ ) sayısıdır. Bir uzaysal imza vektörü için temel vektörleri oluşturan doğrultu vektörlerinin (dizi yanıt vektörleri) sayısı  $L'$  ye eşittir.  $\Delta_{SNR}$  ve  $\Delta\epsilon$  için çizimler sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10' da verilmektedir. Açıkça görülüyor ki, bir anten dizisi tarafından alınan çoklu yolların sayısı arttıkça zaman tahminler daha iyi SNR gelişimi ile sonuçlanırken, bağıl hata gelişimini kötüleştirir. Yayılım ortamında çoklu yolların sayısı artarsa, uzaysal imza örneklerinin alt uzay boyutu artar ve hem uzunluk

The other parameter that affects the performance of linear prediction filter is the number of multipaths ( $L$ ) in the propagation environment. The number of steering vectors (array response vectors), which form the basis vectors for a spatial signature vector is equal to  $L$ . Plots for  $\Delta_{SNR}$  and  $\Delta\epsilon$  are given in Figure 9 and Figure 10, respectively. It is clearly seen that predictions result in better SNR improvement but worse error improvement when the number of multipaths received by the antenna array is increased. If the number of multipaths increases in the propagation environment, the subspace dimension of

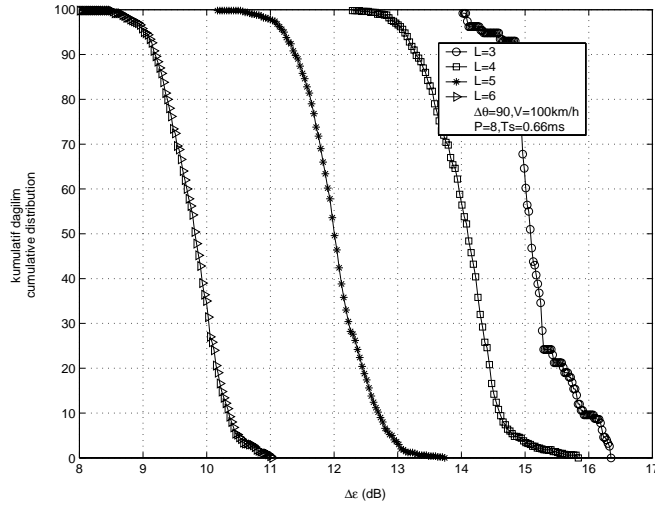
hem de açı cinsinden değişim gösterirler. Sonuç olarak, ardışık uzaysal imza örnekleri ilintisiz olurlar. Şekil 9 ve 10'dan görülüyor ki, AR modelleme uzaysal imzalardaki açı değişimlerini yakalarken, genlikteki değişimleri izleyemiyor.

the spatial signature samples increases and they fluctuate both in length and angle. Consequently, successive spatial signature samples become uncorrelated. It is clearly seen from Figure 9 and 10 that AR modeling is probably able to capture angle change but not amplitude change in spatial signatures.



**Figure 9.** Cumulative distributions of SNR improvement for varying multipath numbers in fixed Doppler case

**Şekil 9.** Sabit Doppler kayması durumunda değişen çoklu yol sayıları için SNR gelişiminin kümülatif dağılımları



**Figure 10.** Cumulative distributions of relative error improvement for varying multipath numbers in fixed Doppler case

**Şekil 10.** Sabit Doppler kayması durumunda değişen çoklu yol sayıları için bağıl hata gelişiminin kümülatif dağılımları

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı kanal yayılım ve tahmin filtre derecesi koşulları altında aşağı bağlantı ağırlık vektörü olarak, bir önceki (geleneksel yaklaşım) uzaysal imza vektörünün yerine tahmin edilen uzaysal imza vektörünü kullanan uyarlamalı doğrusal tahmin tabanlı aşağı bağlantı hüzme şekillendirme performansı gerçekleştirilmiştir.

Kablosuz yayılım kanalında baz istasyonu anten dizisinde mevcut olan uzaysal imza vektörlerinin Doppler etkisinden dolayı değiştiği zaman bu vektörlerin yukarı bağlantı aralığında AR modellenmesiyle, aşağı bağlantı

## 5. CONCLUSION

In this study, the performance of the adaptive linear prediction based downlink beamforming, which employs predicted spatial signature vector rather than previous (conventional approach) spatial signature vector as downlink weight vector under different channel propagation and prediction filter order conditions is evaluated.

When the spatial signature vectors present at a base station antenna array in a wireless propagation channel vary due to Doppler effect, their adaptive predictions in

aralığında uyarlamalı tahminleri TDD sisteminde anten dizisinin mobil doğru bir şekilde izlemesini sağlar ve bu yüzden aşağı bağlantı hüzme şekillendirme performansını iyileştirir.

Simülasyon sonuçları uzaysal imza vektörlerinin uyarlamalı doğrusal tahminlerinin rasgele Doppler kayması ile karşılaştırıldığında, sabit Doppler kayması durumunda daha etkili olduğunu göstermektedir. Düşük hızlarda ( $V = 30$  km/h) uyarlamalı doğrusal tahmin tabanlı hüzme şekillendirme yaklaşık olarak geleneksel hüzme şekillendirme ile aynı performansı gösterir. Mobil hızı artırılırsa, tahminler bir önceki uzaysal imzaların kullanılması ile karşılaştırıldığında daha etkili olmaya başlamaktadır ve yüksek mobil hızında ( $V = 130$  km/h) 5.3 dB' ye kadar SNR iyileştirmesi gerçekleştirmektedir. Daha büyük SNR gelişimi ve bağıl hata gelişimi değerleri daha yüksek dereceli tahmin filtresi kullanılarak elde edilebilir. Haberleşme kanalındaki çoklu yolların sayısı arttığı zaman, ( $L=3, 4, 5$  ve  $6$ ), ardışık uzaysal imzalar, alt uzay boyutundaki artış nedeniyle daha az ilintili olurlar ve aşağı bağlantı hüzme şekillendirme bir önceki uzaysal imzaların yerine tahmin edilen uzaysal imzaların kullanılması ile bağıl olarak yüksek SNR değerleri elde edilir. Ancak, ortama eklenen fazla sayıdaki çoklu yollar bağıl hata gelişimi cinsinden tahmin performansını kötüleştirir.

#### KAYNAKLAR/ REFERENCES

1. Godara, L.C., "Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: performance improvement, feasibility, and system considerations", **IEEE Proceedings**, 85(7): 1031-1060 (1997).
2. Kavak, A., "Adaptive antenna arrays for downlink capacity increase in third generation wireless CDMA", in **Proc. IEEE Radio and Wireless Conf.**, 77-80 (2001).
3. Winters, J.H., "Smart antennas for wireless systems", **IEEE Personal Comm. Mag.**, 5(1): 23-27 (1998).
4. Krim, H. and Viberg, M., "Two decades of array signal processing research", **IEEE Signal Proc. Mag.**, 3(4): 67-94 (1996).
5. Kavak, A., Yang, W., Xu, G., and Vogel, W.J., "Characteristics of vector propagation channels in dynamic mobile scenarios", **IEEE Trans. on Ant. Prop.**, 39(12): 1695-1702 (2001).
6. Hwang, J.K., and Winters, J.H., "Sinusoidal modeling and prediction of fast fading processes", in **Proc. IEEE GLOBECOM**, Sydney/Australia, 1: 892-897 (1998).
7. Duel-Hallen, A., Hu, S., and Hallen, H., "Long-range prediction of fading signals", **IEEE Signal Proc. Mag.**, 17(3): 62-75 (2000).
8. Dong, L., Xu, G., and Ling, H., "Prediction of fast fading mobile radio channels in wideband communication systems", in **Proc. IEEE GLOBECOM**, 3287-3291 (2001)
9. Haykin, S., "Adaptive filter theory", **Prentice Hall**, NJ (1996).
10. Haardt, M., et al, "The TD-CDMA based UTRA TDD mode", **IEEE J. Sel. Areas in Commun.**, 18(8):1375-1385 (2000).

the downlink interval via AR modeling of these vectors in the uplink interval enable the antenna array to track the mobile accurately, and therefore improve downlink beamforming performance in TDD system.

Simulation results show that adaptive linear predictions of spatial signature vectors are more effective in fixed Doppler shift case compared to random Doppler shift case. At low speeds ( $V = 30$  km/h), adaptive linear prediction based beamforming performs approximately the same as conventional beamforming. If the mobile speed is increased, predictions start to become more effective compared to using previous spatial signatures and achieve SNR improvement up to 5.3 dB at high mobile speed ( $V = 130$  km/h). Larger SNR improvement and relative error improvement values can be obtained with using higher order prediction filter. When the number of multipaths in the communications channel increases ( $L=3, 4, 5$ , and  $6$ ), successive spatial signatures become less correlated due to increase in their subspace dimension, and relatively high SNR values is obtained by using the predicted spatial signatures in place of previous spatial signatures in downlink beamforming. However, predictions perform worse in terms of relative error improvement with more multipaths added in the environment.