

# MIMO Kablosuz Haberleşme Kanallarında Ortak Bağlaşımlı İnce Dipol Anten Dizileri

Celal Alp Tunç, Defne Aktaş, Ayhan Altıntaş  
Bilkent Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent, Ankara  
{celal, daktas, altintas}@ee.bilkent.edu.tr

**Özet:** İnce dipol anten dizileri MIMO başarımı açısından incelendi. Doğrusal diziler için literatürde mevcut olan çalışmalar; dairesel, düzlemsel ve silindirik dipol dizileri için genişletildi. Değişik dipol dizileri için kanal kapasitesi sonuçları, hem ortak bağlaşım hesaba katılarak hem de ihmal edilerek karşılaştırıldı. Nümerik sonuçlar, gerçekçi MIMO sistem tasarımı için ortak bağlaşım etkilerinin hesaba katılması gerekliliğini gösterdi. Ayrıca, dairesel anten yapılarının doğrusal yapılardan daha iyi başarımla sergilediği gözlemlendi.

## 1. Giriş

Çoklu-giriş-çoklu-çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) kablosuz haberleşme sistemleri, alıcı ve vericide çoklu anten dizileri kullanarak, zengin saçılım ortamlarında kapasite artışı sağlamaları nedeniyle ilgi odağı olmuşlardır [1].

MIMO sistemlerle ilgili temel konulardan biri, dizi elemanları arasındaki ortak bağlaşımdır. Yakın anten aralıklarının ışın diyagramını deforme ederek işaret benzeşimini düşürdüğü çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [2], [3]. Ayrıca, ortak bağlaşımın kanal kapasitesine etkisi [4–6]'de incelendi. Bu çalışmaların çoğunda [2–5], yan yana dizilmiş ince dipol antenlerden oluşan doğrusal diziler (ULA) üzerinde durulmuş ve ortak bağlaşımın kapasiteyi artırabildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, [4] bu artışın küçük anten sayıları için geçerli olduğunu, belli sayıda antenden sonra kapasitenin düşmeye başladığını belirtmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda [2–4], dizi elemanları arasındaki ortak bağlaşım genelde yan yana doğrusal dipol antenler için [7] ve [8]'te verilen analitik formüllerle hesaplanmaktadır. Bu bildiriye, ortak empedansları elde edebilmek için integral bir ifade kullanılmaktadır. Böylece, düzlemsel veya silindirik gibi herhangi bir dizi geometrisi incelenebilmektedir. Birörnek dairesel (UCA), düzlemsel ve silindirik dipol dizileri için MIMO kapasitesi sonuçları sunulmuştur. Ayrıca bu diziler, birörnek doğrusal dizilerle MIMO başarımı açısından karşılaştırılmıştır. Bildiriye zamana bağımlılık  $e^{j\omega t}$  olarak alınmıştır.

## 2. MIMO Kanal Modeli

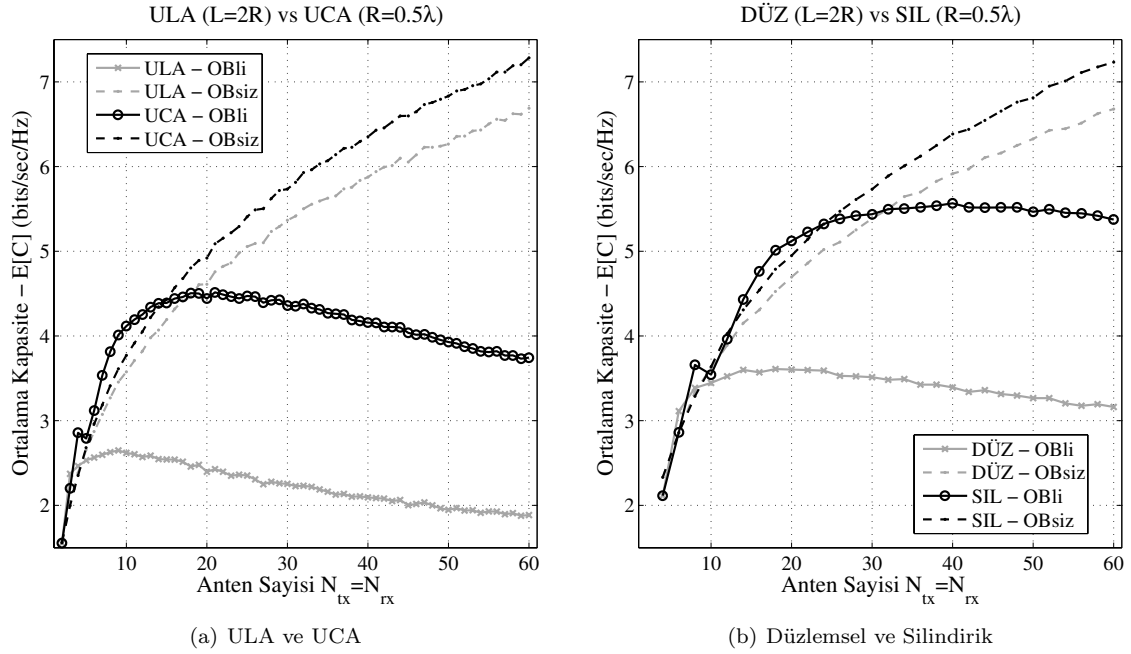
Vericide  $n_T$ , alıcıda ise  $n_R$  anten elemanlı bir MIMO haberleşme sistemi dikkate alındı. Alıcıdaki işaretin toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ile bozulduğu ve sönümün frekansta düz davrandığı varsayıldı. Alınan işaret,  $\mathbf{r}_{n_R \times 1}$ , vericideki işarete,  $\mathbf{s}_{n_T \times 1}$ , ve gürültüye,  $\mathbf{n}_{n_R \times 1}$ , aşağıdaki ifade ile bağlıdır:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

burada  $\mathbf{H}_{n_R \times n_T}$  kanal matrisidir ve elemanları  $(h_{mn})$ ,  $n$ 'inci verici antenle  $m$ 'inci alıcı anten arasındaki kanalı belirtmektedir. Kanal matrisini elde etmek için, [3]'teki geometrik model kullanıldı. Modelde,  $N_s$  saçıcının verici etrafında çapı  $R_D$  olan bir diskin içinde birörnek dağıldığı varsayıldı. Daha sonra, kanal matrisinin elemanları şöyle elde edildi:

$$h_{mn} = \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sum_{p=1}^{N_s} \alpha_p \exp[-jk(d_{n,p} + d_{p,m})] \quad (2)$$

(2)'de  $k$  dalga sayısı,  $\alpha_p$   $p$ 'inci saçıcının saçılım katsayısını belirten ortalaması sıfır, varyansı bir olan karmaşık Gauss dağılımlı bir rasgele değişkendir.  $d_{n,p}$  ve  $d_{p,m}$  sırasıyla bu saçıcıdan  $n$ 'inci verici ve  $m$ 'inci alıcıya uzaklıkları göstermektedir. Kanal kapasitesi, bir MIMO sistemde güvenli bir şekilde iletebilecek en yüksek veri miktarıdır. Bu yüzden MIMO başarımının en önemli göstergelerinden biridir. Shannon



Şekil 1: İnce dipol elemanlı doğrusal (ULA), dairesel (UCA), düzlemsel (DÜZ) ve silindirik (SIL) anten dizilerinin, ortak bağışlımlı (OBli) ve bağışlımsız (OBSiz) MIMO kapasiteleri.

kapasitesi,

$$C = \log_2 \left( \left| \mathbf{I} + \frac{\rho}{n_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right| \right) \quad (3)$$

ile verilir. Burada  $\mathbf{I}$ ,  $n_R \times n_R$  birim matrisi,  $|\cdot|$  matris determinantı ve  $*$  eşlenik transpoze operatörüdür. Kanal matrisi  $\|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{n_T n_R}$  şeklinde normalize edilmiştir,  $\|\cdot\|_F$  Frobenius normudur.  $\rho$  alıcıdaki anten başına düşen işaret gürültü oranını göstermektedir (SNR).

### 3. Ortak Bağlaşımın Etkisi

Antenler birbirlerine yakın olduklarında, aralarındaki ortak bağlaşım ihmal edilemez. Bu tür bağlaşım etkileri ortak empedanslarla modellenebilir. Bir dizide,  $q$ 'inci ve  $p$ 'inci antenler arasındaki ortak empedans,  $q$ 'inci elemanın açık devre geriliminin  $p$ 'inci antenin giriş akımına oranı ( $Z_{qp} = V_{qp,oc}/I_p$ ) olarak tanımlanabilir. Dizi elemanlarını  $z$ -yönlü sinüzoidal akımlar ( $I(z) = I \sin[k(h - |z - z_o|)]$ ) taşıyan ince dipol antenler olarak düşünersek, aşağıdaki integral ifade yazılabilir [9]:

$$Z_{qp} = \frac{j\eta}{4\pi \sin kh_p \sin kh_q} \int_{L_q} \left[ \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos kh_p \frac{e^{-jkR_o}}{R_o} \right] \sin[k(h_q - |z - z_{o,q}|)] dz \quad (4)$$

burada  $h$  dipolün yarı boyu,  $z_o$  ortasının  $z$ -koordinatı,  $\eta$  dalga empedansı ve  $\int_{L_q} (\cdot) dz$   $q$ 'inci dipol boyunca çizgi integralidir.  $R_o$ ,  $R_1$  ve  $R_2$ ,  $q$ 'inci antenden sırasıyla  $p$ 'incinin ortasının, üstünün ve altının uzaklıklarıdır. Karşılıklılık ilkesi gereğince  $Z_{pq} = Z_{qp}$ 'dir. Ortak empedans matrisi,  $\mathbf{Z}$ , (4) ve karşılıklılık ilkesi kullanılarak doldurulur ve ortak bağlaşımın kanal matrisine etkisi aşağıdaki gibi eklenir [4]:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_T)(\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_T \mathbf{I})^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}' = \mathbf{C}_R \mathbf{H} \mathbf{C}_T \quad (6)$$

$\mathbf{C}_R$  ( $n_R \times n_R$ ) ve  $\mathbf{C}_T$  ( $n_T \times n_T$ ) sırasıyla alıcı ve vericinin bağlaşım matrisleridir. İki de (5) ile elde edilebilir.  $Z_A$  anten empedansıdır ve  $Z_T$  vericideki kaynak empedanslarını veya vericideki yük

empedanslarını göstermektedir. Eşlenik uyum için  $Z_T = Z_A^*$  seçilebilir. Son olarak,  $\mathbf{H}'$  ortak bağlaşım etkileri eklenmiş kanal matrisidir, ve bu matris de belirtildiği şekilde normalize edilmiştir.

#### 4. Nümerik Sonuçlar

MIMO kanal başarımı ortalama kanal kapasitesi açısından incelendi.  $R_D = 200\lambda$  alınarak ve verici etrafında  $N_s = 100$  saçıcı birörnek dağıtılarak kanal modellendi. Alıcı anten dizisinin vericiden  $2000\lambda$  uzağa yerleştirildiği kabul edildi. Alıcı ile vericide aynı tip diziler kullanıldı. Kullanılan ince dipol elemanların hepsinin boyu  $\lambda/2$ , yarıçapları ise  $\lambda/200$  alındı. Her nümerik sonuç 1800 kanal realizasyonu kullanılarak elde edildi. Şekil 1(a)'da UCA ve ULA için sonuçlar, ortak bağlaşım hesaba katılarak ve ihmal edilerek gösterilmiştir. Dizi elemanlarının sayısı, kısıtlı bir fiziksel boyut içinde 2'den 30'a artırıldı. ULA'nın toplam uzunluğu ve UCA'nın çapı  $D = \lambda$  alındı. Şekil incelendiğinde, UCA'nın ULA'dan daha yüksek bir MIMO başarımı gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, sabit boyut için anten sayıları artırıldığında, azalan anteler arası uzaklık yüzünden artan işaret benzeşimi ile kapasitenin düştüğü gözlenmektedir. Ortak bağlaşım ve bağlaşım dışı sonuçlar arasındaki önemli farkların olduğu anten aralıkları için, bağlaşım etkilerinin hesaba katılması gerekliliği ortadadır. Optimum anten sayıları, ortak bağlaşım durumunda, UCA için 19, ULA için 9 olarak verilebilir. Şekil 1(b)'de düzlemsel ve silindirik ince dipol anten dizilerinin MIMO başarımları incelendi. İki aynı UCA (ULA)  $D_z = \lambda/2$  yükseklik farkı ile üstüste konarak silindirik (düzlemsel) dizi oluşturuldu. Anten sayıları  $n_R = n_T = 4, 6, \dots, 60$  olacak şekilde artırıldı. Elektriksel uzunlukların da artması sebebiyle silindirik veya düzlemsel dizi kullanımının, UCA veya ULA kullanımına göre daha tercih edilebilir olduğu gösterildi. Ayrıca, dairesel dizi yapılarının doğrusal olanlardan daha yüksek MIMO başarımı sağladığı gözlemlendi. Optimum anten sayıları, ortak bağlaşım durumunda, silindirik için 40, düzlemsel için 18 olarak verilebilir.

#### 5. Sonuç

İnce dipol antenlerden oluşan doğrusal, dairesel, düzlemsel ve silindirik diziler, ortak bağlaşım eklenerek ve ihmal edilerek, MIMO kanal kapasitesi bakımından incelendi. Kısıtlı fiziksel dizi boyutları için optimum dizi elemanı sayıları elde edildi. Bu optimum değerlerin, ortak bağlaşım eklendiği ve ihmal edildiği durumlarda birbirlerinden farklı oldukları gözlemlendi. Bu yüzden, gerçekçi MIMO sistem tasarımı için ortak bağlaşım etkilerinin dikkate alınması gerekliliği gösterildi. Ayrıca, dairesel anten yapılarının (UCA veya silindirik), doğrusal yapılardan (ULA veya düzlemsel) daha iyi başarımlar sergilediği gözlemlendi.

#### Kaynakça

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *Europ. Trans. Telecommun.*, vol. 10, pp. 585-595, Nov. 1999.
- [2] J. Luo, J. R. Zeidler, and S. McLaughlin, "Performance analysis of compact antenna arrays with MRC in correlated nakagami fading channels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, pp. 267-277, Jan. 2001.
- [3] T. Svantesson and A. Ranheim, "Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems", in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, Salt Lake City, UT, May 7-11, 2001, pp. 2485-2488.
- [4] R. Janaswamy, "Effect of element mutual coupling on the capacity of fixed length linear arrays", *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 157-160, 2002.
- [5] N. Maleki, E. Karami, and M. Shiva, "Optimization of antenna array structures in mobile handsets", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 4, July 2005, pp. 1346-1351
- [6] B.N. Getu and R. Janaswamy, "The effect of mutual coupling on the capacity of the MIMO cube", *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, Volume 4, 2005, pp. 240-244
- [7] J. D. Kraus, *Antennas*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York: Wiley, 1997.
- [9] R. S. Elliott, *Antenna Theory & Design*, Revised Edition, Wiley-IEEE Press, 2003