

FARKLI YAYILIM SENARYOLARI İÇİN KABLOSUZ MIMO KANALLARINDA KAPASİTE ANALİZİ

¹Halil YİĞİT

²Kerem KÜÇÜK

³Adnan KAVAK

^{1,2} Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi,
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Umuttepe, Kocaeli

³ Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Veziroğlu Kampüsü, Kocaeli

e posta: {halilyigit, kkucuk, akavak}@kou.edu.tr

Özet

Verici ve alıcıda çoklu antenler kullanan çoklu-giriş çoklu-çıkış (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemleri yüksek veri hızlı haberleşme sistemlerine olan artan talebi karşılamak için anahtar teknolojidir. Etkili frekans spektrumu kullanımına olanak sağlayan bu sistemler sınırlı bant genişliği içerisinde yüksek kanal kapasitesi sağlamaktadır. Bu nedenle MIMO sistemlerinin kapasitesi son zamanlarda çok fazla dikkat çekmiştir. Bu çalışmada TDD-MIMO sistemlerinin performansı kapasite cinsinden kanal durum bilgisinin (channel state information, CSI) vericide bulunduğu durumda farklı yayılım senaryoları için analiz edilmektedir. Anten sayılarının ve çoklu yol sayısı ve açısız yayılım gibi yayılım parametrelerinin etkisi incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: MIMO, kanal, kapasite, CSI

1. Giriş

Verici ve alıcıda çoklu anten elemanları kullanan çoklu-giriş çoklu-çıkış (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemler yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını artırmada önemli bir rol oynaması beklenmektedir [1]. MIMO kavramı ilk olarak 1987 yılında Jack Winters tarafından ortaya atılmıştır [2]. Sonradan Foschini MIMO sistemlerinin analitik temelini sunmuştur ve BLAST (Bell labs Layered Space Time) olarak bilinen mimariyi önermiştir [3].

Birçok MIMO tekniğinde verici ve alıcı antenleri arasındaki kanal ideal olarak bağımsız ve özdeş dağılımlı (independent and identically distributed, IID) frekansta düz sönümleyen kanal olarak modellenir. Bir IID MIMO kanalının kapasitesi antenlerin sayısı ile doğrusal olarak artar [4]. Ancak gerçek bir MIMO sisteminin performansı realist yani ideal olmayan yayılım koşullarından etkilenir. Daha iyi bir değerlendirme için MIMO kapasite araştırmaları daha gerçekçi kanal yayılım modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir [5].

Realist yayılım koşulları altında MIMO sisteminin performansını değerlendirmek için kullanılan modelde genel olarak MIMO kanalını karakterize etmek için faz, gecikme, doppler frekansı, açısız yayılım, ayrılış açısı (angle of departure, AoD) ve varış açısı (angle of arrival, AoA) gibi önemli parametreler kullanılır. Aynı zamanda verici ve alıcıdaki anten elemanları arasındaki mesafe ve anten geometrisi hesaba katılır [6].

Bu makalede TDD-MIMO sisteminin kapasitesi farklı anten elemanları sayısı, çoklu yol sayısı ve çoklu yol açısız yayılımı gibi çeşitli parametre ve yayılım koşulları altında incelenmiştir. Vericide waterfilling ve eşit verici gücü tahsisi kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Beklendiği gibi, simülasyon sonuçları TDD-MIMO kapasitesinin hem verici hem de alıcıdaki anten elemanları sayısındaki artış ile arttığını doğrulamaktadır. Aynı zamanda daha iyi kapasitenin daha fazla sayıdaki çoklu yol ve açısız yayılımı ile elde edildiği gözlenmiştir.

2. MIMO Sistem Modeli

Vericide M_T anten ve alıcıda M_R anten ile donatılan tipik bir dar bant tek kullanıcı MIMO sisteminde iletim modeli (1) eşitliği ile verilir.

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_s}{M_T}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

$\mathbf{s}$ ($\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{M_T}$) iletilen sinyal değerlerini içeren M_T boyutlu vektör ve $\mathbf{y}$ ($\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{M_R}$) alınan sinyal değerlerini içeren M_R boyutlu vektör, $\mathbf{n}$ her reel ve sanal bileşeni için sıfır ortalamalı ve $N_0 \mathbf{I}_{M_R}$ sabit varyanslı bağımsız Gaussian gürültü vektörü ve E_s/M_T her bir verici anteninde mevcut olan ortalama enerjidir. $\mathbf{H}$ $M_R \times M_T$ boyutlu MIMO kanal matrisidir. Her bir elemanı h_{ij} j.inci verici anten ve i.inci alıcı anten arasındaki kompleks değerli yol kazancını göstermektedir.

IID Rayleigh sönümlmeli MIMO kanalında eğer kanal durum bilgisi (channel state information, CSI) sadece vericide biliniyorsa, verici antenlerdeki sinyallere eşit güç tahsisi yapılır. Bu takdirde $\rho = E_s/N_0$ ortalama alınan sinyal gürültü oranı (signal to noise ratio-SNR) olmak üzere MIMO kanalının kapasitesi [4,7,8]

$$C = \log \left| \mathbf{I}_{M_R} + \frac{\rho}{M_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right| \quad (2)$$

ile ifade edilir. $|\cdot|$ matrisin determinantını, $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ matrisinin kompleks eşlenik devriğini ve $\mathbf{I}_{M_R \times M_R}$ boyutlu birim matrisi göstermektedir. (2) eşitliği $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ 'nin özdeğerleri türünden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$C = \sum_{i=1}^r \log \left(1 + \frac{\rho}{M_T} \lambda_i \right) \quad (3)$$

Burada r kanal matrisinin rankıdır ve ideal olarak $\min(M_R, M_T)$ 'dir. (3) eşitliği MIMO kanalının kapasitesini her biri λ_i ($i=1, \dots, r$) güç kazancına ve E_s/M_T verici gücüne sahip r paralel SISO kanalın kapasitelerinin toplamı olarak ifade eder.

Eğer CSI hem vericide hem de alıcıda biliniyorsa ve kanal IID Rayleigh sönümlmeli ise vericide waterfilling algoritması kullanmak en uygun metottur [4,9]. Bu takdirde kapasite eşitliği (4) eşitliği ile verilir.

$$C = \sum_{i=1}^r \log \left(1 + \frac{\rho \gamma_i}{M_T} \lambda_i \right) \quad (4)$$

$\gamma_i = E\{|s_i|^2\}$ i .inci alt kanalın iletim enerjisidir.

3. TDD-MIMO Kanal Modelleme

Baz istasyonu (base station, BS) verici ve mobil istasyonu (mobile station, MS) alıcı olmak üzere M_T elemanlı doğrusal BS anten dizisi ve M_R elemanlı doğrusal MS anten dizisi için L çoklu yol bileşeninin her biri (ℓ indeksli) için kanal katsayıları $M_R \times M_T$ boyutlu kompleks genlikli matris ile verilir.

Her bir ℓ çoklu yol bileşeninin kompleks yol genliği α_ℓ , vericiden ayrılış açısı (angle of departure, AoD) $\phi_{T,\ell}$, alıcıya varış açısı (angle of arrival, AoA) $\phi_{R,\ell}$, gecikmesi τ_ℓ ve hareketten dolayı oluşan faz kayması (Doppler etkisi) ω_ℓ olmak üzere verilen yayılım parametreleri türünden dar bant $M_R \times M_T$ boyutlu MIMO kanal matrisi (gecikmeler τ_ℓ ihmal edilerek)

$$\mathbf{H}(t) = \sum_{\ell=1}^L \alpha_\ell \mathbf{a}_{R,\ell} \mathbf{a}_{T,\ell}^T e^{j\omega_\ell t} \quad (5)$$

eşitliği ile verilir. Burada $\mathbf{a}_{R,\ell}$ ℓ .inci çoklu yol bileşenine ait alıcıdaki dizi yanıt vektörü ve $\mathbf{a}_{T,\ell}$ vericide ℓ .inci çoklu yol bileşenine karşılık gelen dizi yanıt vektörüdür. Düzgün doğrusal dizi (uniform linear array, ULA) durumunda BS anten dizisindeki dizi yanıt vektörü

$$\mathbf{a}_{T,\ell} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\Omega_{T,\ell}} & \dots & e^{-j(M_T-1)\Omega_{T,\ell}} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilir. $k = 2\pi/\lambda$ dalga numarası ve d anten elemanları arasındaki mesafe olmak üzere ℓ yolunun açısal frekansı $\Omega_{T,\ell} = k d_T \sin\phi_{T,\ell}$ olarak modellenir. Alıcıda $\Omega_{R,\ell}$ benzer şekilde tanımlanır.

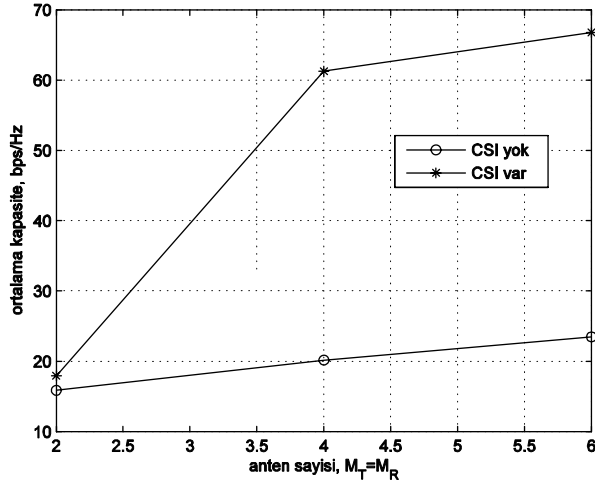
4. Simülasyon

TDD-MIMO kanalının kapasitesini farklı yayılım koşulları altında analiz etmek için bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda BS'nin sabit MS'nin ise hareketli olduğu varsayılmaktadır. Kanal verilen MS hızı (V), BS ve MS anten dizisine gelen çoklu yolların sayısı (L), açısal yayılım ($\Delta\theta_T, \Delta\theta_R$) ve ortalama AoD ve AoA açıları için üretilir. Taşıyıcı frekansı 1.8 GHz olarak alınmıştır. Örneklem zamanı $T_s = 10/15$ ms olan UTRA-TDD çerçeve yapısı kullanılmıştır [10]. Her bir TDD slotu için TDD-MIMO kanalının kapasitesi hesaplanır. İstatistiksel sonuçlar elde etmek için çoklu simülasyon koşutmaları gerçekleştirilmiştir (1000 defa). Her simülasyon koşutmasında, kablosuz ortamdaki çoklu yolların AoD ve AoA açıları rasgele değişirken, $\Delta\theta$, V ve L' nin değişmediği kabul edilmiştir. Bir simülasyon koşutmasında tüm slotlarda elde edilen kapasite değerlerinin ortalaması alınarak 1000 farklı kapasite değeri elde edilmiş ve bu değerlerin kümülâtif dağılımları elde edilmiştir. Çoklu yollardaki Doppler frekansı her simülasyon koşutmasında rasgele alınmıştır.

$$\omega_\ell = 2\pi f_{d,\ell} = 2\pi \frac{V}{\lambda} \cos(\psi_\ell) \quad (7)$$

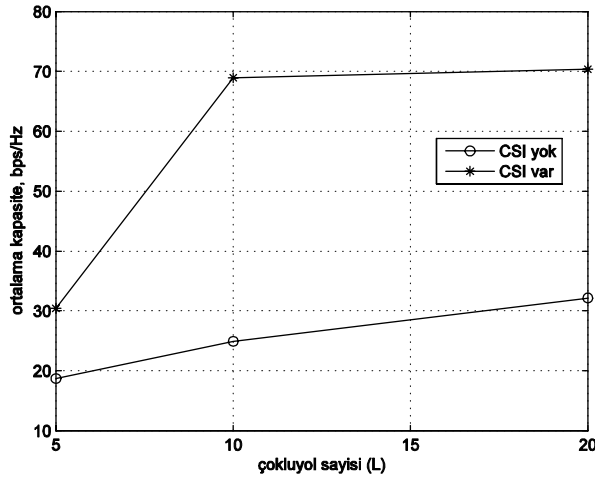
Burada λ taşıyıcı sinyalin dalga boyu ve ψ_ℓ mobilin hareket yönü ile ℓ .inci çoklu yoldan gelen dalganın yönü arasındaki açıdır. Baz istasyonu ve mobil istasyonu anten dizisindeki anten elemanları arasındaki mesafe 0.5λ değerine set edilir.

Şekil 1 SNR = 12 dB, L = 10, V = 40 km/h, $\Delta\theta_T = 10^\circ$, $\Delta\theta_R = 60^\circ$, $d_T = d_R = 0.5\lambda$ değerleri için değişen verici ve alıcı anten sayılarının ($M_T = M_R$) ortalama kapasite üzerine etkisini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi anten sayısı 2'den 6'ya artırıldığı zaman kanalın bilindiği durumda verici ve alıcıdaki anten sayısı arttığında kapasite önemli derecede artmaktadır. Kanal bilgisinin olmadığı durumda ise kapasitedeki artış hızı diğer duruma göre oldukça düşüktür.



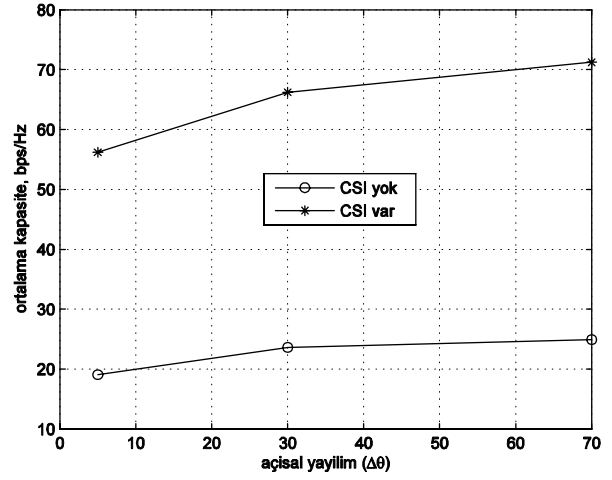
Şekil 1. Farklı anten sayıları ($M_T=M_R$) için ortalama kapasite.

Kapasiteyi etkileyen diğer bir parametre yayılım ortamındaki çoklu yolların sayısıdır. Kapasite ile ilgili çizim $M_T=M_R=6$ ve Şekil 1’deki gibi benzer koşullar için Şekil 2’de görülmektedir. Beklendiği gibi ortama eklenen çoklu yolların sayısı arttığı zaman her iki durumda (waterfilling ve eşit güç tahsisi) kapasite artmaktadır. Ancak waterfilling yönteminin performansı her zaman eşit güç tahsisi yönteminden daha yüksektir.



Şekil 2. Farklı çoklu yol sayıları için ortalama kapasite.

Şekil 3 çoklu yolların açısal yayılımının TDD-MIMO kanalının ortalama kapasitesi üzerine etkisini göstermektedir. Alıcı tarafında çoklu yolların açısal yayılımının değişimi her iki koşul için kapasitenin artan bir trende sahip olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun nedeni büyük açısal yayımlı ortamlarda çoklu yolların daha az ilintili olmasıdır. Bu da sistemde kapasite artışı olarak ortaya çıkar.



Şekil 3. Farklı çoklu yol açısal yayımları için ortalama kapasite.

5. Sonuçlar

Bu makalede TDD modunda çalışan MIMO sistemleri için kanal kapasitesi çalışılmıştır. Kanal durum bilgisinin vericide bilindiği (waterfilling) ve bilinmediği (eşit güç tahsisi) durumda kanal performansı farklı kanal yayılım (açısal yayılım, çoklu yol sayısı) ve anten sayısı koşulları altında incelenmiştir. Simülasyon sonuçları hem eşit güç hem de waterfilling yönteminde MIMO kanal kapasitesinin antenlerin sayısı ve ortama eklenen çoklu yolların artışı ile arttığını göstermektedir. Ancak waterfilling yönteminin performansı daha yüksektir. Daha yüksek kapasite özellikle büyük açısal yayılım koşulları altında vericide CSI’nın bilindiği durumda elde edilmektedir.

Kaynaklar

1. Bialkowski M., “Research into multiple element antennas to enhance performance of wireless communication systems,” in Proc. XVI Intrnl. Conf. on Microwaves, Radar, Wireless Communications, vol. 3, pp. 1071–1082, 2006.
2. Winters J., “On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment,” IEEE journal on selected area in communications, vol. SAC-5, pp. 871–878, 1987.
3. Foschini G.J., and Gans M.J., “On limits of wireless communications in an fading environment when using multiple antennas,” Wireless Personal Communications, vol. 6, no. 3, pp. 311–335, 1998.
4. Telatar E., “Capacity of multi-antenna Gaussian channels,” European Trans. On Telecommunications, vol. 10, no. 6, pp. 585–595, 1999.

5. Gesbert D., Shafī M., Shiu D.-S., Smith P. J., and Naguib A., "From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, 2003.
6. Almers P., and et al, "Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems," *Eurasip Journal on Wireless Comm. And Networking*, Volume 2007, Article ID 19070, pp. 1–19, 2007.
7. Molisch F., Steinbauer M., Toeltsch M., Bonek E., and Thoma R., "Capacity of MIMO systems based on measured wireless channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 561–569, 2002.
8. Martin C., and Ottersten S., "Analytic approximations of eigenvalue moments and mean channel capacity for MIMO channels," *Proc. IEEE ICASSP*, vol 3, pp. 2389–2392, 2002.
9. Marzetta T., and Hochwald B., "Capacity of a mobile multiple antenna communication link in Rayleigh flat fading," *IEEE Trans. Inf. Theory* vol. 45, no. 1, pp. 139–157, 1999.
10. Haardt M., et al, "The TD-CDMA based UTRA TDD mode", *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol.18, no. 8, pp. 1375–1385, 2000.