

Yüksek İrtifa Platform İstasyonları için Korelasyon Matrisinin Yaklaşımı

Approximation of Correlation Matrix for High Altitude Platform Stations

Aybüke Cengiz*, Semiha Tedik Başaran*, Güneş Karabulut Kurt*[†], Berna Özbek[‡], Halim Yanıkömeroğlu[§]

*Elektronik ve Haberleşme Müh., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

[†]Elektrik Mühendisliği, Polytechnique Montreal Üniversitesi, Montreal, Kanada

[‡]Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye

[§]Sistemler ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ottawa, Carleton Üniversitesi, Kanada

E-posta: {cengizal7, tedik, gkurt}@itu.edu.tr, bernaozbek@iyte.edu.tr, halim@sce.carleton.ca

Özetçe —Yüksek İrtifa Platform İstasyonları (HAPS), kablo-suz iletişim hizmetleri, trafik izleme, navigasyon uygulamaları ve IoT uygulamaları gibi farklı kullanım alanları bulunan, yeni ve gelecek vaat eden bir teknolojidir. Yer seviyesindeki kullanıcılara göre çok daha yukarıda konumlandığı için doğrudan görüş yolu (line-of-sight, LOS) HAPS sistemlerinde daha yaygın olarak bulunmaktadır. Özellikle çoklu anten içeren HAPS sistemlerinde antenler arasındaki korelasyon etkisi performansı sınırlayan önemli bir faktördür. Korelasyon etkisi anten elemanları arasındaki mesafeden ve çevresel faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenir. Bu etki, karasal çok girişli çok çıkışlı (Multi-Input/Multi-Output, MIMO) sistemlerde zengin saçılma ortamının etkisi ile azaltılabilir fakat bu gözlem HAPS sistemleri için geçerli değildir. Bu çalışmada çoklu anten içeren HAPS sisteminin performansında önemli bir yere sahip olan ve kapalı form ifadesi bulunmayan korelasyon matrisine çok sıkı yakınsayan yaklaşık bir ifade elde edilmiştir. Yaklaşık ifadenin gerçek değere yakınsama performansı, farklı sistem parametreleri altında elde edilen kapsamlı sayısal sonuçlar ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler—Yüksek irtifa platform istasyonu (HAPS), çoklu anten sistemleri, korelasyon.

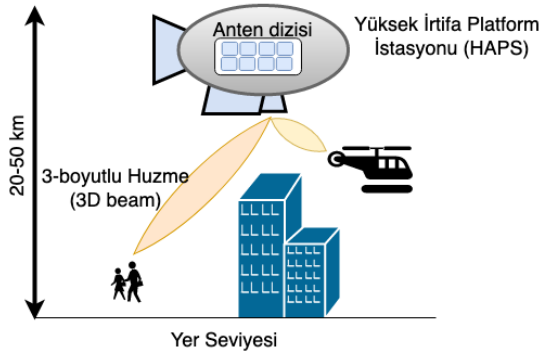
Abstract—A High Altitude Platform Station (HAPS) is a new and promising technology with different uses like wireless communication services, traffic monitoring, navigation applications and Internet of Things (IoT) applications. Since it is positioned much higher than ground-level users, line-of-sight (LOS) is more common in HAPS systems. Especially in HAPS systems that include multiple antennas, the effect of correlation between antennas is an important factor limiting the performance. The effect of correlation is strongly influenced by the spacing between the antenna elements and environmental factors. This effect can be reduced by the effect of rich scattering environment in terrestrial Multi-Input/Multi-Output (MIMO) systems, yet this observation is not applicable to HAPS systems. In this study, a tight bound expression for the correlation matrix which does not have an expression in closed form and has a significant place in the performance of HAPS systems has been obtained. Comprehensive numerical values have been obtained under different system parameters to demonstrate the convergence performance of the approximate expression to the real value, and the results have been compared.

Keywords—High altitude platform station (HAPS), multiple-antenna systems, correlation.

I. GİRİŞ

Gelecek nesil haberleşme sistemlerinin tasarımında karasal olmayan ağların (non-terrestrial networks, NTN) hem sistem verimliliğini artırma, hem de gittikçe artan yüksek veri hızı taleplerini sağlama konularında önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. NTN farklı özellik ve gereksinimleri olan istasyonlardan oluşmaktadır, bunlar; insansız hava araçları (unmanned aerial vehicle, UAV), yüksek irtifa platform istasyonları (high altitude platform station, HAPS) ve uydu cihazlarıdır. HAPS, iletişim rölesi yüklerini taşıyan ve stratosferde 22 km'ye kadar yüksekliklerde çalışan bir ağ düğümüdür [1]. International Telecommunication Union (ITU) tarafından ise Dünya'ya göre belirli, nominal, sabit bir noktada 20 ila 50 km yükseklikte bir nesnenin üzerinde bulunan istasyon olarak tanımlanmıştır [2]. HAPS, stratosferde bulunan hava platformlarına dayalı uzak ve kırsal alanlardaki telekomünikasyon altyapı çözümleri için yeni bir teknoloji olarak görülmektedir [3]. Bu yaklaşıma ek olarak HAPS sistemlerinin, nüfusun yoğun olduğu bölgelerde milyonlarca kullanıcıya ve cihaza yüksek kapasiteli ağ erişimini destekleyebileceği, hesaplama yükünü kaldırabileceği ve veri analitiği araçlarını sağlayabileceği de öngörülmektedir [4]. Ayrıca, HAPS birimleri karasal ve karasal olmayan gibi heterojen ağlarla sorunsuz bir şekilde entegre edilebilir [5]. HAPS iletim birimi içeren örnek bir iletim senaryosu Şekil 1'de gösterilmektedir.

Bazı uygulamalarda HAPS birimleri 17-18 km seviyesinde de kullanılmışlardır [4]. Uydu navigasyon uygulamaları, kirlilik izleme, meteorolojik ölçümler, trafik izleme ve kontrolü, sismik veya kıyı bölgelerinin ve karasal yapıların gerçek zamanlı izlenmesi gibi uygulamalarda kullanılabilirler [6]. Akıllı şehir vizyonu bağlamında nesnelerin interneti (Internet of things, IoT) teknolojilerinin artan uygulamaları, çok sayıda bağlı cihazın farklı bağlantı, güvenilirlik ve gecikme gereksinimlerini de beraberinde getirmiştir. Mevcut altyapı oldukça sınırlı olduğundan ve bu yüksek talep karablosuz sistemleri ve servisleri destekleyemediğinden, HAPS sistemleri çok sayıda IoT cihazına daha geniş kapsama alanı sağlamak için idealdir. Ayrıca insansız kargo hava araçları (cargo drones) ve akıllı ulaşım sistemleri (intelligent transportation systems, ITS) için güvenilir kapsama alanı sağlayabilirler [4]. Uzak



Şekil 1: İki boyutlu bir anten dizisi HAPS birimi üzerine yerleştirilen örnek bir sistem modeli.

ve geçirimsiz bölgeleri hücrenel veya fiber ağlarla kapsamak oldukça güç ve ekonomik olarak verimsizdir. HAPS birimleri bu tür alanlarda telekomünikasyon hizmetlerini sağlamada çok yararlı olabilir [6]. HAPS, afetlerden (sel, deprem vb.) kaynaklanan acil durumlarda ya da karasal ağ kesintisi veya aşırı yüklenmesi durumlarında (konser, trafik sıkışıklığı vb.) konuşlandırıldığında kullanıcıların afet bölgelerinde mevcut cep telefonlarını kullanmalarına olanak sağlarken, "anında" hücrenel bağlantılar kurabilen havadan baz istasyonu olarak çalışır [7].

HAPS birimlerinin potansiyeline erişmesi için çoklu anten sistemleriyle desteklenmesi gerekmektedir. Çoklu anten sistemleri, kablosuz iletişim sistemlerinde önemli kesinti kaynaklarından bir tanesi olan ortak kanal girişiminin (co-channel interference, CCI) azaltılması ve hata oranının (error rate) iyileştirilmesi gibi avantajlar sağlar [8]. Noktadan noktaya iletişim sistemlerinde çoklu anten kullanımı verici gücünün önemli ölçüde azaltılmasına olanak sağlayabilir [9]. Ayrıca, kablosuz servislerde genel sistem performansını kapasite ve spektrum verimliliği açısından geliştirerek veri hızını artırır [10]. Çoklu anten sistemlerinin bir diğer avantajı da çeşitleme kazancıdır [8]. Çoklu anten sistemleri çeşitleme kazancını artırır ve bu sayede kanal sönümlemesi azaltılabilir [11].

HAPS birimlerine çoklu anten sistemlerinin konumlandırılması sistem performansını artırır. HAPS sistemlerinde iletim hattı genellikle doğrudan görüş yolu (line-of-sight, LOS) üzerindedir [12]. Bu çalışmada, Şekil 1'de gösterildiği üzere bir HAPS biriminin antenleri arasındaki korelasyon ifadesi ele alınmaktadır. LOS bileşeni antenler arasında korelasyona neden olmaktadır. Ortaya çıkan korelasyonun analiz edilmesi için kapalı formda bir ifade henüz literatürde bulunmamaktadır. Sayısal integrasyon yöntemlerinden olan Simpson'un 1/3 ve 3/8 yöntemleri bir arada uygulanarak, korelasyon analizi için kullanılabilir esnek yapıda bir ifade bulunmuştur. Bu ifadenin çıkarım detayları II. bölümde verilmiştir. Bulunan ifadenin yakınsama durumu sayısal sonuçlarla incelenerek III. bölümde sunulmuştur. Elde edilen sonuçların ve gelecek çalışmaların tartışıldığı IV. bölüm ile bildiri tamamlanmıştır.

II. İŞIMA YAYILIMLI HAP SİSTEMİ

Çoklu anten sistemlerinin başarımı anten elemanları arasındaki korelasyona bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple çoklu anten yapılarından oluşan HAPS sistemlerinin başarım analizinde korelasyon belirleyici bir faktördür [13]. Bu çalışmada

ele alınan sistem modeli çok antenli tek bir HAPS istasyonu ve K tane kullanıcı içermektedir.

İşima yayımlı HAPS sistemindeki HAPS istasyonu, N_T antenli tek tip düzlemsel anten (uniform planar antenna, UPA) ile donatılmıştır. M ve N dikey ve yatay anten sayılarını gösteren toplam anten sayısı $N_T = M \times N$ 'dir. λ taşıyıcı dalga boyu olarak tanımlanmıştır. Antenler arasındaki dikey ve yatay mesafeyi temsil eden d_v ve d_h , $\lambda/2$ 'ye eşittir [13]. $\lambda/2$, bağımsız iletim kanalları oluşturabilmek için gerekli anten elemanları arasındaki en düşük mesafedir. Azimut açısı yayılımının yüksek olduğu zengin bir saçılım ortamında bulunan MIMO sistemlerinde anten dizisinin elemanları arasındaki korelasyon azalmaktadır [14]. Ancak bu tür ortamlar HAPS sistemleri için çoğunlukla geçerli değildir ve k . kullanıcının g . huzmedeki korelasyon matrisi, $\tilde{R}_{g_k} \in C^{N_T \times N_T}$, şu şekilde elde edilmektedir [13]:

$$\left[\tilde{R}_{g_k} \right]_{p,q} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) f(\varphi) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (d_1 + d_2)} d\varphi d\theta \quad (1)$$

burada $f(\varphi) = \frac{e^{(\kappa \cos(\varphi - \mu_{g_k}))}}{2\pi I_0(\kappa)}$, $I_0(\cdot)$ sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonunu tanımlamaktadır. $\mu_{g_k} \in [-\pi, \pi]$ k . kullanıcının g . huzmedeki yatay kalkış açısı (angle of departure, AoD)'ni belirtirken κ açısal yayılmayı (angular spread, AS) kontrol etmektedir. Ayrıca, $f(\theta) \propto e^{(-\frac{\sqrt{2}|\theta - \theta_0|}{\delta})}$, θ_0 ve δ ise dikey AoD ve AS ortalamasını temsil eder. $d_1 = (p - q)d_v \sin \theta \cos \varphi$ ve $d_2 = (p - q)d_h \sin \theta \sin \varphi$ 'dir. d_1 ve d_2 Denklem (1)'de kullanılarak

$$\left[\tilde{R}_{g_k} \right]_{p,q} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) e^{j\pi(p-q) \sin \theta (\cos \varphi + \sin \varphi)} d\varphi d\theta \quad (2)$$

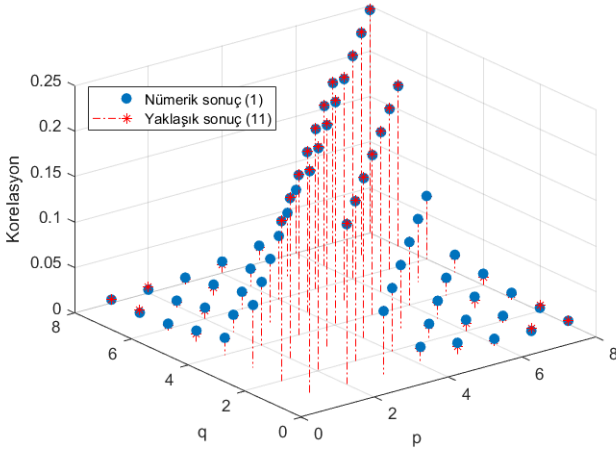
elde edilmektedir. $\chi = \pi(p - q) \sin \theta$ ve $I_\varphi = \int_{-\pi}^{\pi} e^{(\kappa \cos(\varphi - \mu_{g_k}))} e^{j\chi(\cos \varphi + \sin \varphi)} d\varphi$ olmak üzere korelasyon ifadesi aşağıdaki formülle elde edilebilmektedir:

$$\begin{aligned} \left[\tilde{R}_{g_k} \right]_{p,q} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(\theta)}{2\pi I_0(\kappa)} \int_{-\pi}^{\pi} e^{(\kappa \cos(\varphi - \mu_{g_k}))} e^{j\chi(\cos \varphi + \sin \varphi)} d\varphi d\theta \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(\theta)}{2\pi I_0(\kappa)} I_\varphi d\theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Euler formülü ve $\cos(x - y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y$ eşitliği sırasıyla kullanılarak

$$\begin{aligned} I_\varphi &= \int_{-\pi}^{\pi} e^{(\kappa \cos \mu_{g_k} \cos \varphi + \kappa \sin \mu_{g_k} \sin \varphi)} [\cos(\chi \cos \varphi + \chi \sin \varphi) \\ &\quad + j \sin(\chi \cos \varphi + \chi \sin \varphi)] d\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

ifadesi elde edilmektedir. Denklem (5) ve (6)'daki eşitliklerde [15] $p = \kappa \cos \mu_{g_k}$, $q = \kappa \sin \mu_{g_k}$, $a = b = \chi$, $m = 0$, $C = \kappa^2 - 2\chi^2$ ve $D = 2\chi\kappa(\cos \mu_{g_k} + \sin \mu_{g_k})$ olarak alınarak



Şekil 2: 8×8 anten dizisinde elde edilen nümerik ve yaklaşık korelasyon değerleri.

Denklem (7)'deki eşitlik elde edilmiştir.

$$\int_0^{2\pi} e^{(p \cos x + q \sin x)} \sin(a \cos x + b \sin x - mx) dx$$

$$= j\pi[(b-p)^2(a+q)^2]^{-\frac{m}{2}} \left\{ (A+jB)^{\frac{m}{2}} I_m(\sqrt{C-jD}) - (A-jB)^{\frac{m}{2}} I_m(\sqrt{C+jD}) \right\} \quad (5)$$

$$\int_0^{2\pi} e^{(p \cos x + q \sin x)} \cos(a \cos x + b \sin x - mx) dx$$

$$= \pi[(b-p)^2(a+q)^2]^{-\frac{m}{2}} \left\{ (A+jB)^{\frac{m}{2}} I_m(\sqrt{C-jD}) + (A-jB)^{\frac{m}{2}} I_m(\sqrt{C+jD}) \right\} \quad (6)$$

$$I_\varphi = 2\pi I_0 \left(\sqrt{\kappa^2 - 2\chi^2 + j2\chi\kappa(\cos \mu_{g_k} + \sin \mu_{g_k})} \right). \quad (7)$$

Burada I_φ integrali sadece θ 'ya bağlı olan bir ifade haline geldiğinden, $g(\theta) = I_\varphi$ değişken dönüşümü kullanılmaktadır. Böylece, Denklem (1)'de verilen korelasyon matrisi şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$\left[\tilde{R}_{g_k} \right]_{p,q} = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} \int_0^{\frac{\pi}{2}} h(\theta) d\theta \quad (8)$$

burada $h(\theta)$, $f(\theta) \cdot g(\theta)$ fonksiyonunu temsil etmektedir. Denklem (8)'de verilen korelasyon ifadesinin kapalı formda karşılığı bulunmadığı için nümerik integral hesaplama yöntemi olan Simpson kuralı kullanılarak yaklaşık ifade elde edilecektir.

Öncelikle Denklem (8)'de bulunan ifadeyi hesaplamak için integral iki parçaya bölünmüştür. I_1 ve I_2 , sırasıyla, Simpson'un 1/3 kuralı ve Simpson'un 3/8 kuralı uygulanarak bulunmuş yaklaşık ifadeleri temsil eder. Alt aralık sayısı her iki integral içinde $n_1 = n_2 = 6$ olarak alınmıştır. $h_{1,2}$ noktalar arasındaki mesafeyi tanımlar. $h_1 = (\frac{\pi}{4} - 0)/n_1$ ve $h_2 = (\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4})/n_2$ 'dir. $\theta_0 = 0$ ve $\theta_k = \theta_0 + kh_1$ ($k = 1, 2, \dots, 6$) değerleri için elde edilen sonuç yaklaşık şu

şekildedir:

$$I_1 \approx \int_0^{\frac{\pi}{4}} h(\theta) d\theta = \frac{h_1}{3} \left[h(\theta_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n_1-1} h(\theta_i) + 2 \sum_{j=2,4}^{n_1-2} h(\theta_j) + h(\theta_{n_1}) \right]. \quad (9)$$

$\theta_0 = \pi/4$ ve $\theta_k = \theta_0 + kh_2$ ($k = 1, 2, \dots, 6$) değerleri için elde edilen yaklaşık sonuç şu şekildedir:

$$\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} h(\theta) d\theta \approx I_2 = \frac{3h_2}{8} \left[h(\theta_0) + 3 \sum_{i=1,2,4,5}^{n_2-1} h(\theta_i) + 2 \sum_{j=1}^{\frac{n_2}{3}-1} h(\theta_{3j}) + h(\theta_{n_2}) \right]. \quad (10)$$

Böylece Denklem (1)'in yaklaşık ifadesi:

$$\left[\tilde{R}_{g_k} \right]_{p,q} \approx \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} \left(I_1 + I_2 \right) \quad (11)$$

olarak bulunmuştur.

III. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde Denklem (1)'deki korelasyon matrisi ifadesinin yaklaşık ifadesi olarak önerilen Denklem (11)'e ilişkin nümerik sonuçlar sunulmaktadır. Bu kapsamda açılal yayılım κ , ortalama açılal yayılım (δ) ve yatay kalkış açısı (μ_{g_k}) parametrelerinin farklı değerleri için sonuçlar elde edilmektedir.

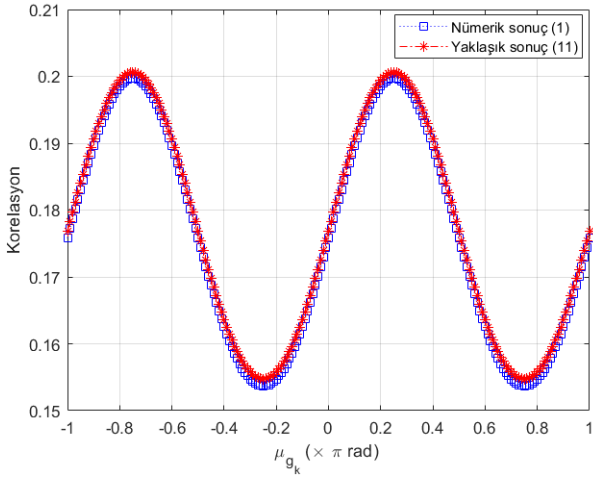
Korelasyon ifadesini veren Denklem (1)'deki integralde bulunan temel parametreler μ_{g_k} , δ , θ_0 ve κ , sırasıyla, 0° , 10° , 30° ve 5 olarak alınmıştır [13]. İntegralin nümerik sonucu ve Denklem (11)'de bulduğumuz yaklaşık ifade arasındaki göreceli hata (relative error) oranı $p - q = 1$ olduğunda 0.5617%'dir. Şekil 2'de 8×8 anten dizisi için elde edilen korelasyon değerleri verilmiştir. Beklenildiği gibi antenler arası mesafe arttıkça korelasyonun azaldığı gözlemlenebilmektedir. Örneğin $p = 8$, $q = 1$ iken korelasyon nümerik ve yaklaşık olarak sırasıyla 0.003736 ve 0.003899 olarak bulunmaktadır. Yine antenler arası mesafenin azaldığı durumlarda ise korelasyon değerinin artması beklenmektedir. Örneğin $p = 3$, $q = 1$ iken korelasyon nümerik ve yaklaşık olarak sırasıyla 0.06937 ve 0.06924 olarak bulunmaktadır.

Elde edilen yaklaşık ifadenin gerçek değere yakınsadığını göstermek amacıyla farklı κ , δ ve μ_{g_k} değerleri için bulunan sonuçlar Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmaktadır. Korelasyon ifadesini veren Denklem (1)'deki integralde bulunan temel parametreler μ_{g_k} , δ , θ_0 ve κ , sırasıyla, 0° , 10° , 30° ve 5 olarak alınmıştır [13]. μ_{g_k} Şekil 3'te $[-\pi, \pi]$ aralığında değiştirilmiştir. Yaklaşık ifadenin gerçek değerle arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar azdır.

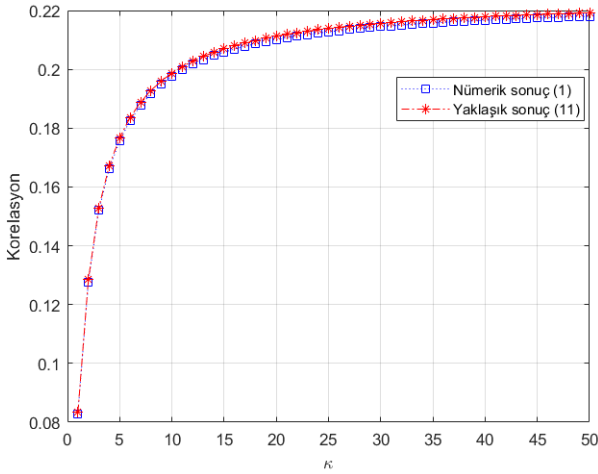
Şekil 4'te ise tüm parametreler sabit tutulup κ 1'den 50'ye kadar değiştirildiğinde bulunan ifadede elde edilen değerlerin korelasyonun gerçek değerine yakınsadığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 5'teki sonuçlar incelendiğinde ise δ 'nın büyük değerleri için yaklaşık ifadenin gerçek değere yakınsadığı ancak küçük değerleri için iraksadığı gözlemlenmektedir.

IV. SONUÇ

Yüksek irtifa platform istasyonları (HAPS) birimlerinin 6. nesil haberleşme sistemlerinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bu rol özellikle nüfus yerleşiminin yoğun



Şekil 3: $\kappa = 5$, $\delta = 10^\circ$ ve $\theta_0 = 30^\circ$ iken değişen μ_{g_k} 'ya göre elde edilen nümerik ve yaklaşık korelasyon değerleri.

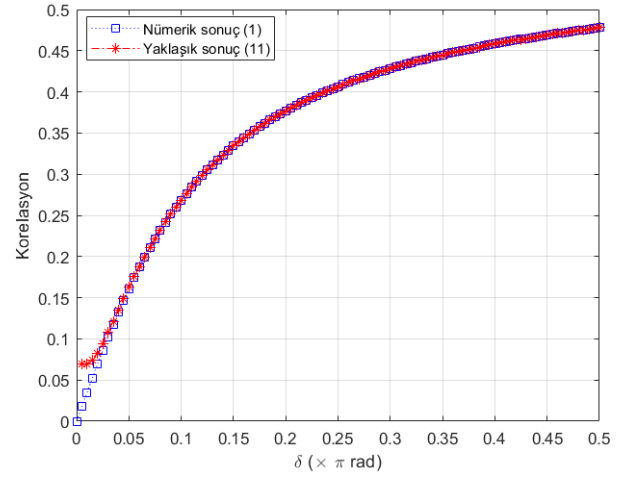


Şekil 4: $\mu_{g_k} = 0^\circ$, $\delta = 10^\circ$ ve $\theta_0 = 30^\circ$ iken değişen κ 'ya göre elde edilen nümerik ve yaklaşık korelasyon değerleri.

olduğu büyük şehirlerde önemli bir haberleşme kapasite artışı olarak beklenmektedir. Korelasyon, önemli bir performans parametresi olan kapasiteyi sınırlayan bir faktördür. Bu nedenle bu kapasite artışının ne kadar olabileceğini belirleyebilmek için bir HAPS birimi üzerine yerleştirilmiş olan antenlerin birimlerinin arasındaki korelasyon değerinin doğru modellenmesi önemlidir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen bu çalışmada, çok antenli HAP birimlerindeki antenler arasındaki korelasyon modeli için yaklaşık bir kapalı formda ifade sunulmuştur. Bu sayede sistem kapasitesi hesaplamaları gerçeğe daha uygun olarak elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] T. Tozer and D. Grace, "High-altitude platforms for wireless communications," *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, pp.127–137, June 2001.
- [2] ITU Radio Regulations, 2016 edition.
- [3] E. Setiawan, "The potential use of high altitude platform station in rural telecommunication infrastructure," *Int. Conf. on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev)*, Bandung, Indonesia, 2018, pp. 35-37.



Şekil 5: $\mu_{g_k} = 0^\circ$, $\kappa = 5$ ve $\theta_0 = 30^\circ$ iken değişen δ 'ya göre elde edilen nümerik ve yaklaşık korelasyon değerleri.

- [4] G. Karabulut Kurt, M. G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. Darwish, M. S. Alam, H. Yanikomeroğlu, and A. Yongacoglu, "A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, yayınlanmak üzere kabul edildi, 2021.
- [5] D. Grace and M. Mohorcic, *Broadband Communications via High Altitude Platforms*, Hoboken, NJ, USA:Wiley, 2011.
- [6] S. Karapantazis and F. Pavlidou "Broadband communications via high-altitude platforms: a survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 7, no. 1, pp. 2-31, First Qtr. 2005.
- [7] G. Avdikos, G. Papadakis and N. Dimitriou, "Overview of the application of high altitude platform (HAP) systems in future telecommunication networks," *Int. Workshop on Signal Processing for Space Communications*, Rhodes, Greece, 2008, pp. 1-6.
- [8] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. H. Gerstacker and P. A. Hoeher, "Multiple-antenna techniques for wireless communications - a comprehensive literature survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 2, pp. 87-105, Second Quarter 2009.
- [9] H. Li, L. Song and M. Debbah, "Energy efficiency of large-scale multiple antenna systems with transmit antenna selection," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 2, pp. 638-647, February 2014.
- [10] E. Del Re and L. Pierucci, "Multiple antenna systems: Frontier of Wireless Access," *IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Barcelona, Spain, 2004, pp. 930-934.
- [11] Lihong Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073-1096, May 2003.
- [12] A. Nauman and M. Maqsood, "System design and performance evaluation of high altitude platform: Link budget and power budget," *Int. Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Bongpyeong, 2017, pp. 138-142.
- [13] P. Ji, L. Jiang, C. He, Z. Lian and D. He, "Energy-efficient beamforming for beamspace HAP-NOMA systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 5, pp. 1678-1681, May 2021.
- [14] J. P. Kermaol, P. E. Mogensen, S. H. Jensen, J. B. Andersen, F. Frederiksen, T. B. Sørensen, and K. I. Pedersen, "Experimental investigation of multipath richness for multi-element transmit and receive antenna arrays," *IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings*, Tokyo, Japan, 2000, pp. 2004–2008.
- [15] I. S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*, A. Jeffrey, Ed., 5th ed. New York: Academic, 1994.