





Hibrit uydu-hava-kara ağlarında hız bölme çoklu erişim tabanlı FSO/RF iletim

Rate splitting multiple access-based FSO/RF transmission in hybrid satellite-aerial-terrestrial networks

Mehmet Can^{1,*} , İbrahim Altunbaş² 

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, uydunun röle görevi gören yüksek irtifalı platform istasyonu (high altitude platform station, HAPS) yardımıyla birden çok kullanıcıyla hız bölme çoklu erişim (rate-splitting multiple access, RSMA) tekniğini kullanarak haberleşme sağladığı sistemin performansı incelenmiştir. Uydu ile HAPS arasında serbest alan optik (free space optics, FSO) bağlantısı varken HAPS ile kullanıcılar arasında radyo frekansı (radio frequency, RF) bağlantısı vardır. RF ve FSO haberleşmesi kullanan hibrit-uydu-hava kara ağları için uygun kanal modelleri dikkate alınarak ele alınan sistemde kullanıcıların kesinti olasılığı ifadeleri kapalı formda elde edilmiştir ve bilgisayar benzetimleri ile doğrulanmıştır. Kullanıcıların ve sistemin verimi, kesinti olasılıkları kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı gölgeleme ve türbülans etkilerinin kullanıcıların kesinti performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca RSMA tabanlı sistem ile dik olmayan çoklu erişim (nonorthogonal multiple access, NOMA) tabanlı sistemin verimleri karşılaştırılmış ve RSMA tabanlı sistemin artan kullanıcı sayısı ile beraber daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Örneğin, iletim gücü 20 dBm ve 4 kullanıcı için RSMA, sistem verimi açısından NOMA'ya göre 0.16 bpcu kazanç sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit uydu-hava-kara ağları, Hız bölme çoklu erişim, FSO/RF, Kesinti olasılığı, Sistem verimi

1 Giriş

Uydu ağları, geniş kapsama alanına sahip olması ve kara ağları ile haberleşmenin sağlanamadığı alanlarla da bağlantı kurulmasına olanak sağlaması sebebiyle gelecek nesil haberleşme sistemlerinde çok daha önemli oranda yer alacağı düşünülen teknolojilerden bir tanesidir [1]. Daha düşük üretim ve fırlatma maliyetine sahip olması ve düşük gecikme sağlaması sebebiyle düşük dünya yörüngeli (low Earth orbit, LEO) uydular hem akademik çalışmalarda hem de endüstride ilgi görmektedir [2]. Uyduların kullanıcı ile doğrudan haberleşme sağladığı sistemlerin yanı sıra yüksek irtifalı platform istasyonlarının (high altitude platform station, HAPS), düşük irtifalı platform istasyonlarının (low altitude platform station, LAPS) ve kara istasyonlarının röle olarak görev aldığı hibrit uydu ağlarının kullanılması da

Abstract

In this work, the performance of the system in which the satellite communicates with multiple users by means of a high altitude platform station (HAPS), which is served as a relay, using the rate-splitting multiple access (RSMA) technique is investigated. The link between satellite and HAPS is free space optic (FSO) while the links between HAPS and users are radio frequency (RF). Using appropriate channel models for the considered hybrid satellite-aerial-terrestrial networks with FSO/RF transmission, the outage probability expressions of the users are derived in closed form and validated by computer simulations. The throughput of the users and the system is calculated by using outage probabilities. The effect of various shadowing and turbulence effects on the user outage performance is studied. Moreover, the RSMA-based system and the non-orthogonal multiple access (NOMA)-based system are compared in terms of system throughput and it is shown that the RSMA-based system outperforms the NOMA-based system with the increasing number of users. For example, for a 20 dBm transmit power in a 4-user scenario, RSMA provides a 0.16 bpcu throughput gain over NOMA.

Keywords: Hybrid satellite-aerial-terrestrial networks, Rate-splitting multiple access (RSMA), FSO/RF, Outage probability, Throughput

öngörülmektedir [2]. Farklı atmosfer koşulları dikkate alınarak uydu ağlarının kanal modellenmesi için yapılmış çalışmalar literatürde mevcuttur ve uydu kanallarının çok yönlü sönmüleme ve gölgelemeye maruz kaldığı gösterilmiştir [3]. [4]'te çok yönlü sönmülemenin Rayleigh, doğrudan görüş hattının (line-of-sight, LoS) Nakagami-m dağılımı ile modellendiği ve LoS teriminden dolayı gölgelemeli Rician (shadowed Rician) olarak adlandırılan kanal modeli önerilmiştir. Uydu, HAPS ve kara istasyonlarının birlikte düşünüldüğü hibrit röle ağları [5]'te incelenmiştir ve farklı iletim stratejileri önerilmiştir. [6]'da kuvvetlendir ve aktar iletim tekniğini kullanan rölelerin bulunduğu hibrit uydu-kara ağları için farklı röle sayıları ve gölgeleme etkilerinde bit hata olasılığı performansı incelenmiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: canmehmet@itu.edu.tr (M. Can)

Geliş / Received: 25.09.2023 Kabul / Accepted: 10.01.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1365940

Uydu ağlarında radyo frekansı (radio frequency, RF) haberleşmenin yanı sıra serbest alan optik (free space optics, FSO) haberleşmenin de kullanılması planlanmaktadır. FSO, lisans gerektirmeyen yüksek bant genişliğine sahip olması ve yüksek veri güvenliği sağlaması gibi sebeplerle uzay haberleşmesi için umut verici bir tekniktir [7]. Açık hava koşullarında iyi performans sağlasa da bulutlu, yağmurlu ve sisli havalarda gibi kötü hava şartları FSO bağlantısının kalitesini önemli ölçüde bozabilir. FSO haberleşmede kanal, hava koşulları ve atmosferik türbülans etkisi göz önünde bulundurularak modellenmektedir. FSO haberleşme için performans analizleri çoğunlukla Log-normal, K, Gamma-Gamma ve üstel Weibull (exponentiated Weibull) sönümlemeli kanallar kullanılarak yapılmaktadır. Literatürde kötü hava ve atmosferik koşulların etkisini azaltmak amacıyla RF ve FSO haberleşmenin hibrit olarak kullanıldığı yapılar önerilmiştir. [8]'de RF ve FSO haberleşmenin birlikte kullanıldığı hibrit yapı önerilmiştir. [9]'da hava koşullarına bağlı olarak RF ya da FSO bağlantısı seçilerek iletim yapıldığı hibrit RF/FSO iletim yöntemi önerilmiştir. [10]'da hibrit uydu-hava-kara ağları için uydu ile hava aracı arasında FSO, hava aracı ile yer arasında RF bağlantısının olduğu FSO/RF haberleşme sisteminin kesinti olasılığı (outage probability) incelenmiştir.

Yüksek veri hızı, cihazların aynı anda sürekli haberleşme sağlayabilmesi ve kaynakların daha verimli kullanılması gelecek nesil haberleşme sistemlerindeki temel gereksinimlerdir. Ancak artan kullanıcı ve cihaz sayısı göz önünde bulundurulduğunda geleneksel dik çoklu erişim tekniklerinin bu gereksinimleri karşılayamayacağı düşünülmektedir. Bu yüzden dik olmayan çoklu erişim (nonorthogonal multiple access, NOMA) teknikleri literatürde büyük ilgi görmüştür. NOMA'da çok sayıda kullanıcının işareti kontrollü bir şekilde girişime izin verilerek aynı kaynaktan iletilmektedir [11]. Son yıllarda NOMA tabanlı uydu röle ağları da literatürde yer bulmuştur. [12]'de yer istasyonlarının uydu ile kullanıcılar arasında röle görevi gördüğü NOMA tabanlı hibrit uydu-kara röle ağlarında kesinti olasılığı incelenmiştir. [13]'te NOMA tabanlı hibrit uydu-hava-kara ağları için FSO/RF haberleşmede kesinti olasılığı incelenmiştir.

Hız bölmeli çoklu erişim (rate-splitting multiple access, RSMA) son yıllarda literatürde ilgi gören bir çoklu erişim tekniğidir. RSMA'da kullanıcıların verileri ortak ve özel bölüm olmak üzere ikiye bölünür. Tüm kullanıcıların ortak bölümleri tek bir ortak işarete eşlenir ve özel bölümlerin ayrı ayrı eşlenmesiyle oluşan özel işaretlerle birlikte vericiden gönderilir. Ortak işaret tüm kullanıcılar tarafından çözülürken özel işaretler sadece ilgili kullanıcılar tarafından çözülür. Kullanıcılarda özel işaretin çözülebilmesi için ilk olarak ardışık girişim giderme (successive interference cancellation, SIC) tekniği ile ortak işaretin çözülüp alınan işareten çıkarılması gerekmektedir. Özel işaretler çözülürken diğer kullanıcıların özel işaretlerine gürültü gibi davranılır. Bu yönüyle RSMA, daha genel ve esnek bir çoklu erişim tekniğidir [14]. Ayrıca, girişimin kısmen çözülüp kısmen gürültü gibi davranılmasıyla veri hızı ve servis kalitesi artırılırken karmaşıklığın azalmasına olanak tanınır. RSMA özellikle çok girişli çok çıkışlı (multiple-input

multiple-output, MIMO) sistemler için literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Vericideki kanal bilgisinin kusurlu olduğu durumda ortaya çıkacak kullanıcı girişimi de göz önünde bulundurularak ön kodlamanın yapıldığı RSMA şeması [15]'te incelenmiştir. [16]'da vericide çok antenin bulunduğu kullanıcı işbirlikli RSMA şeması önerilmiştir. [17]'de MIMO uydu ağlarına RSMA tekniği uygulanmıştır. Ayrıca MIMO'nun yanı sıra tek girişli tek çıkışlı (single-input single-output, SISO) sistemler için de RSMA'nın kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. [18]'de SISO sistemlerde kullanıcıların ortak ve özel mesajları için uygun veri hızı ve iletim gücü optimizasyonu incelenmiştir. [19]'da hava aracının baz istasyonu gibi düşünüldüğü ve RSMA ile kullanıcılara hizmet sağladığı SISO sistem için kesinti olasılığı incelenmiştir.

1.1 Yapılan çalışmanın literatüre katkıları

Bu çalışmada, uydu-hava-kara ağlarında RSMA tekniğinin performansı incelenmiştir. Uydu ile HAPS arasında FSO haberleşmesi yapılırken, HAPS ile karada bulunan kullanıcılar arasında RF haberleşmesi yapılmaktadır. FSO bağlantısı Gamma-Gamma sönümlemeli kanal ile, RF bağlantısı ise gölgelemeli Rician sönümlemeli kanal ile modellenmiştir. Çalışmanın literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılması **Tablo 1**'de görülmektedir ve RSMA'nın ve RF/FSO haberleşmesinin birlikte kullanıldığı uydu-hava-kara ağlarına uygulanması yönünden diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Tablo 1. Bu çalışmanın literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılması

Yazar	Yıl	Çoklu erişim	RF/FSO haberleşmesi	Uydu/hava/kara ağları
Yahia vd. [9]	2022	×	RF, FSO	Uydu-kara
Liu vd. [10]	2020	×	RF, FSO	Uydu-hava-kara
Ge vd. [12]	2022	NOMA	RF	Uydu-kara
Lei vd. [13]	2020	NOMA	RF, FSO	Hava-kara
Yin vd. [17]	2021	RSMA	RF	Uydu-kara
Singh vd. [19]	2021	RSMA	RF	Uydu-hava-kara
Ashrafzadeh vd. [20]	2019	×	RF, FSO	Kara
Bu makale	2024	RSMA	RF, FSO	Uydu-hava-kara

Bu çalışmanın temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

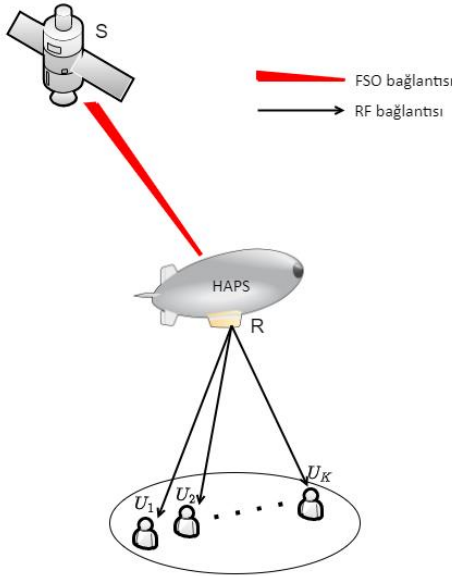
- RSMA tabanlı hibrit uydu-hava-kara ağlarının kesinti olasılığı ifadeleri, ele alınan kanallarda RF ve FSO haberleşme için kapalı formda elde edilmiştir.
- Elde edilen kesinti olasılığı ifadelerinden yararlanılarak kullanıcıların ve sistemin verimi (throughput) hesaplanmıştır.
- Sistemin kesinti olasılığı, RF bağlantısı için farklı gölgeleme etkileri ve FSO bağlantısı için farklı

türbülans etkileri altında incelenmiştir ve bilgisayar benzetimleri ile teorik sonuçların uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

- Ele alınan RSMA tabanlı sistem, NOMA tabanlı sistem ile sistem verimi açısından karşılaştırılmıştır ve kullanıcı sayısının artmasıyla RSMA tabanlı sistemin daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir.

2 Sistem modeli

Uydunun (S) röle görevi gören HAPS (R) yardımıyla K kullanıcıyla ($U_k, k = 1, \dots, K$) haberleşme sağladığı RSMA tabanlı sistem modeli Şekil 1'de görülmektedir. S ile R arasında FSO, R ile kullanıcılar arasında ise RF haberleşme yapılmaktadır. Vericilerde ve alıcılarda tek anten bulunmaktadır ve tüm alıcıların kusursuz kanal bilgisine sahip olduğu varsayılmaktadır. İletim iki zaman aralığında gerçekleşmektedir.



Şekil 1. Sistem modeli.

İlk zaman aralığında RSMA tekniği kullanılarak U_k 'nın mesajı, ortak mesaj ($W_{c,k}$) ve özel mesaj ($W_{p,k}$) olmak üzere iki bölüme ayrılır ($k = 1, \dots, K$). Kullanıcıların ortak mesajları birleştirilerek S'den iletilecek ortak mesaj W_c oluşturulur. W_c ve $W_{p,k}$ sırasıyla birim güçlü s_c ve $s_{p,k}$ işaretlerine eşlenir. Bu işaretlerin süperpozisyonu ile birim güçlü $x = \sqrt{\alpha_c} s_c + \sum_{k=1}^K \sqrt{\alpha_k} s_{p,k}$ işareti elde edilir. Burada α_c ve α_k sırasıyla ortak ve özel mesajlar için atanan güç katsayılarını göstermektedir ve $\alpha_c + \sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ olmalıdır. S'de optik işaret oluşturmak için alt taşıyıcı yoğunluk modülasyonu (subcarrier intensity modulation, SIM) kullanılır ve optik işaretin pozitif değerde olması için DC bileşen eklenir [20]. R'de yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (intensity modulation/direct detection, IM/DD) yöntemi kullanılır [20] ve R'de alınan optik işaret

$$y_r = \eta \ell_R I \sqrt{P_S} (1 + x) + n_R \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir [20]. Burada P_S , S'deki iletim gücünü göstermektedir ve n_R , sıfır ortalamalı ve σ_R^2 varyanslı toplamsal Gauss gürültüsüdür. η elektrik-optik dönüşüm katsayısını göstermektedir. $l_R = \frac{1}{2}(G_t + G_r - Att_{FS} - Att_{Atm} + L_{lens} - M)$ [dB] olarak tanımlıdır [10] ve G_t , G_r , Att_{FS} , Att_{Atm} , L_{lens} ve M sırasıyla verici kazancı, alıcı kazancı, yol kaybı, atmosferik zayıflama, lens kaybı ve sistem marjini göstermektedir. $l = h_a h_p$ olmak üzere S ile R arasındaki FSO kanal katsayısını göstermektedir. Burada h_a , Gamma-Gamma dağılımlı atmosferik türbülans sönümlenme katsayısını, h_p ise hedefleme hatasını (pointing error) göstermektedir. R'de DC bileşen filtreledikten sonra alınan işaret aşağıdaki gibi ifade edilebilir [20]:

$$y_r' = \eta \ell_R I \sqrt{P_S} x + n_R. \quad (2)$$

R'de ortak işaret, özel işaretlere gürültü gibi davranılarak çözülür. R'de s_c 'ye ilişkin işaret girişim gürültü oranı (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanır [19]:

$$\gamma_R^c = \frac{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S \alpha_c}{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S (1 - \alpha_c) + \sigma_R^2}. \quad (3)$$

s_c alınan işareten çıkarılır ve sonrasında özel işaret, diğer kullanıcıların özel işaretlerine gürültü gibi davranılarak çözülür. Bu durumda R'de $s_{p,k}$ 'ye ilişkin SINR ifadesi aşağıdaki gibidir [19]:

$$\gamma_R^{p,k} = \frac{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S \alpha_k}{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S (1 - \alpha_c - \alpha_k) + \sigma_R^2}. \quad (4)$$

İkinci zaman aralığında R, çöz ve aktar yöntemini kullanarak çözdüğü işaretlerin süperpozisyonunu (x') kullanıcılara iletir. U_k 'da alınan işaret

$$y_k = \ell_k h_{R,k} \sqrt{P_R} x' + n_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

şeklinde. Burada P_R , R'deki iletim gücünü göstermektedir ve n_k , sıfır ortalamalı σ_k^2 varyanslı toplamsal kompleks Gauss gürültüsüdür. $l_k = \frac{1}{2}(20 \log_{10}(d_k) + 20 \log_{10}(f) + 92.4)$ [dB] biçiminde hesaplanmaktadır [10] ve d_k , R ile U_k arasındaki km cinsinden uzaklığı, f ise GHz cinsinden frekansı ifade etmektedir. $h_{R,k}$, R ile U_k arasındaki kompleks kanal katsayısını göstermektedir ve kanal gölgelemeli Rician sönümlenmeli olarak modellenmiştir.

Tüm kullanıcılarda ortak işaret SIC tekniği ile çözülür ve alınan işareten çıkarılır. Kullanıcılarda s_c 'ye ilişkin SINR ifadesi aşağıdaki gibidir [19]:

$$\gamma_{U_k}^c = \frac{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R \alpha_c}{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R (1 - \alpha_c) + \sigma_k^2}. \quad (6)$$

SIC'den sonra kullanıcılarda $s_{p,k}$ 'ye ilişkin SINR ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir [19]:

$$\gamma_{U_k}^{p,k} = \frac{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R \alpha_k}{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R (1 - \alpha_c - \alpha_k) + \sigma_k^2} \quad (7)$$

3 Kesinti olasılığı ve sistem verimi

3.1 Kesinti olasılığı

Haberleşmenin kesintiye uğramaması için rölede ve kullanıcılarda ortak ve özel işaretlerin çözülmesi sırasında [Denklem \(3\)](#), [\(4\)](#), [\(6\)](#) ve [\(7\)](#) ile hesaplanan SINR değerlerinin istenen eşik değerler $\gamma_{th,c}$ ve $\gamma_{th,p,k}$ 'den yüksek olması gerekmektedir. Bu SINR değerlerinin herhangi biri istenen eşik değerinin altına düşerse kesinti olacaktır. Burada $\gamma_{th,c} = 2^{2R_c} - 1$ ve $\gamma_{th,p,k} = 2^{2R_{p,k}} - 1$ olarak tanımlıdır. R_c ve $R_{p,k}$ sırasıyla ortak işaret ve U_k 'nin özel işareti için hedeflenen veri hızlarıdır. Ayrıca $R_{c,k}$, U_k 'nin ortak mesajı için hedeflenen veri hızını göstermek üzere $R_c = \sum_{k=1}^K R_{c,k}$ olarak tanımlıdır. U_k için hedeflenen toplam hız $R_k = R_{c,k} + R_{p,k}$ şeklinde hesaplanabilir.

U_k için kesinti olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [\[19\]](#):

$$P_{o,k} = 1 - \Pr(\gamma_R^c \geq \gamma_{th,c} \cap \gamma_R^{p,k} \geq \gamma_{th,p,k} \cap \gamma_{U_k}^c \geq \gamma_{th,c} \cap \gamma_{U_k}^{p,k} \geq \gamma_{th,p,k}) \quad (8)$$

$$= 1 - \Pr(I^2 \geq C_1 \cap I^2 \geq P_1 \cap |h_{R,k}|^2 \geq C_2 \cap |h_{R,k}|^2 \geq P_2).$$

Burada $C_1 = \frac{\sigma_R^2 \gamma_{th,c}}{\eta^2 \ell_R^2 P_S [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,c}]}$, $P_1 = \frac{\sigma_R^2 \gamma_{th,p,k}}{\eta^2 \ell_R^2 P_S [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,p,k}]}$, $C_2 = \frac{\sigma_k^2 \gamma_{th,c}}{\ell_k^2 P_R [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,c}]}$ ve $P_2 = \frac{\sigma_k^2 \gamma_{th,p,k}}{\ell_k^2 P_R [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,p,k}]}$ olarak tanımlıdır. C_1 ve C_2 'den görüldüğü üzere $\alpha_c > \frac{\gamma_{th,c}}{1 + \gamma_{th,c}}$ koşulu sağlanmalıdır.

Benzer şekilde P_1 ve P_2 'den görüldüğü üzere $\alpha_k > \frac{(1 - \alpha_c) \gamma_{th,c}}{1 + \gamma_{th,c}}$ koşulu sağlanmalıdır. Aksi durumda kesinti olacaktır ve bu durumda $P_{o,k} = 1$ olur.

I^2 ve $|h_{R,k}|^2$ bağımsız oldukları için [Denklem \(8\)](#) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$P_{o,k} = 1 - \Pr(I^2 \geq \Lambda_1) \Pr(|h_{r,k}|^2 \geq \Lambda_2). \quad (9)$$

Burada, $\Lambda_1 = \max(C_1, P_1)$ ve $\Lambda_2 = \max(C_2, P_2)$ olarak tanımlıdır.

I^2 ve $|h_{R,k}|^2$ için birikimli dağılım fonksiyonları (cumulative distribution function, CDF) kullanılarak [Denklem \(9\)](#) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_{o,k} = 1 - (1 - F_{I^2}(\Lambda_1)) \left(1 - F_{|h_{R,k}|^2}(\Lambda_2) \right) \quad (10)$$

$$= F_{I^2}(\Lambda_1) + F_{|h_{R,k}|^2}(\Lambda_2) - F_{I^2}(\Lambda_1) F_{|h_{R,k}|^2}(\Lambda_2).$$

I^2 için CDF aşağıdaki gibi verilmiştir [\[21\]](#):

$$F_{I^2}(x) = \frac{\xi^2}{\Gamma(\mu)\Gamma(\zeta)} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\mu\zeta}{A_0} \sqrt{x} \middle| 1, \xi^2 + 1 \right)_{\xi^2, \mu, \zeta, 0}. \quad (11)$$

Burada $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$, Meijer-G fonksiyonunu [\[22, Denklem \(9.301\)\]](#) ve $\Gamma(\cdot)$, Gamma fonksiyonunu göstermektedir. A_0 , hedefleme hatası olmadığı durumdaki geometrik kayıptır. $\xi = \frac{\omega_e}{2\sigma_s}$ olarak tanımlıdır ve ω_e eşdeğer ışın yarıçapını (equivalent beam radius) gösterirken σ_s ise alıcıdaki hedefleme hatasının yer değiştirme standart sapmasıdır. μ ve ζ atmosferik türbülans parametreleridir.

$|h_{R,k}|^2$ için CDF aşağıdaki gibi verilmiştir [\[4\]](#):

$$F_{|h_{R,k}|^2}(x) = \nu \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(m)_l (\delta)_l}{(1)_l l!} \beta^{-l-1} \gamma(l+1, \beta x). \quad (12)$$

Burada $\nu = \frac{1}{2b_0} \left(\frac{2b_0 m}{2b_0 m + \Omega} \right)^m$, $\beta = \frac{1}{2b_0}$ ve $\delta = \frac{\Omega}{2b_0(2b_0 m + \Omega)}$ olarak tanımlıdır. $2b_0$ ve Ω sırasıyla çok yollu sönmüleme ve LoS için ortalama gücü gösterirken m sönmüleme parametresidir. $(\cdot)_l$ ve $\gamma(\cdot, \cdot)$ sırasıyla Pochhammer sembolünü [\[22, s. xliii\]](#) ve tamamlanmamış alt Gamma (lower incomplete Gamma) fonksiyonunu [\[22, Denklem \(8.354.1\)\]](#) göstermektedir.

[Denklem \(11\)](#) ve [\(12\)](#), [\(10\)](#)'da yerine koyularak U_k için kesinti olasılığı hesaplanabilir.

3.2 Sistem verimi

Kullanıcılardaki verim, [Denklem \(10\)](#) yardımıyla kanal kullanımı başına bit sayısı (bit per channel use, bpcu) cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır [\[19\]](#):

$$\tau_k = (1 - P_{o,k}) \frac{R_k}{2}. \quad (13)$$

[Denklem \(13\)](#) kullanılarak sistemin verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tau_{sistem} = \sum_{k=1}^K \tau_k. \quad (14)$$

4 Benzetim sonuçları

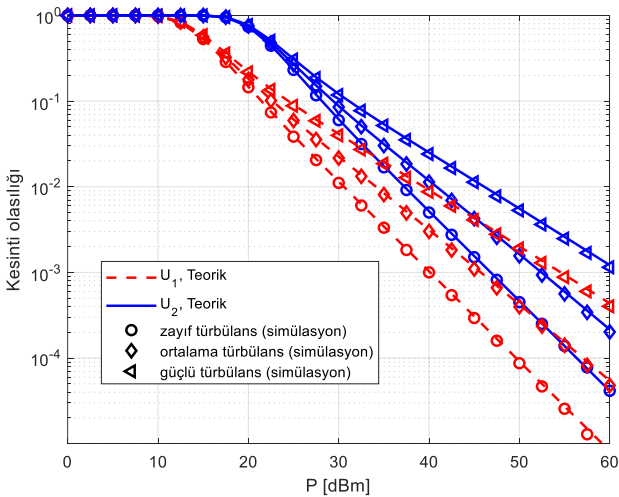
Bu bölümde, ele alınan sistemin kesinti olasılığı ve sistem verimi için analitik sonuçlar ve bilgisayar benzetimleri farklı parametrelerde incelenmiştir. Sistemin kesinti olasılığı bilgisayar benzetimleri [Denklem \(8\)](#), analitik sonuçlar ise [Denklem \(10\)](#) kullanılarak çizdirilmiştir. Sistem verimi sonuçları için [Denklem \(14\)](#) kullanılmıştır. Ayrıca ele alınan RSMA tabanlı sistem, NOMA tabanlı sistem ile karşılaştırılmıştır. NOMA tabanlı sistemde kullanıcıların mesajları doğrudan işaretlere eşlenir ve bu işaretlerin süperpozisyonu S'den iletilir. Kullanıcılarda ise kendisinden daha yüksek güç atanan kullanıcıların işaretlerinden

kaynaklanan girişim, en yüksek güç atanan kullanıcının işaretinden başlanarak SIC ile tamamen giderilmektedir. Bu işlemden sonra kullanıcının işareti çözülmektedir. FSO bağlantısı için zayıf, orta ve güçlü türbülans için μ ve ζ parametreleri sırasıyla ($\mu = 2.902, \zeta = 2.51$), ($\mu = 2.296, \zeta = 1.822$) ve ($\mu = 2.064, \zeta = 1.342$) olmaktadır [10]. $\eta = 1$ ve $\xi = 3$ alınmıştır. RF bağlantısı için zayıf, ortalama ve güçlü gölgeleme için b_k, m_k ve Ω_k parametreleri sırasıyla ($b_0 = 0.158, m = 19.4, \Omega = 1.29$), ($b_0 = 0.126, m = 10.1, \Omega = 0.835$) ve ($b_0 = 0.063, m = 0.739, \Omega = 8.97 \times 10^{-4}$) olmaktadır [4]. $P_R = P_S = P$, $l_1 = l_2 = \dots = l_K = l_D$ ve $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_K^2 = \sigma_D^2$ olarak ayarlanmıştır. Ayrıca $l_R^2 = -50.74$ dB, $l_D^2 = -114.44$ dB, $\sigma_R^2 = -99.06$ dB ve $\sigma_D^2 = -136.84$ dB alınmıştır [10].

Şekil 2’de RF bağlantısı ortalama gölgeleme etkisi altındayken FSO bağlantısı için zayıf, orta ve güçlü türbülans etkileri incelenmiştir. $K = 2$ olmak üzere bilgisayar benzetim parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 2’den görüldüğü üzere türbülans etkisi kuvvetlendikçe kesinti olasılığı artmaktadır. Örneğin kesinti olasılığının 10^{-3} olması için güçlü türbülans olduğu durumda zayıf türbülansa göre yaklaşık 10 dB daha fazla güç harcanmaktadır. Ayrıca farklı türbülans etkileri için bilgisayar benzetimleri ile teorik sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Bilgisayar benzetimi parametreleri

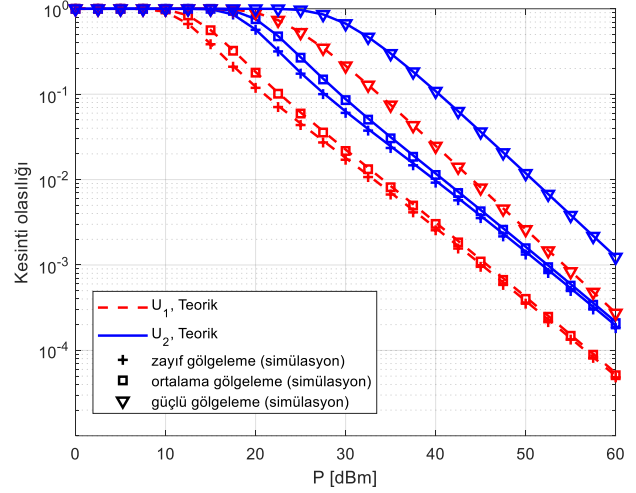
Parametre	Değer
Ortak mesaj için hedef veri hızı	$R_c = 0.5$ bpcu ($R_{c,1} = 0.1, R_{c,2} = 0.4$)
U_1 ve U_2 için hedef veri hızları	$R_1 = 0.2$ bpcu $R_2 = 1$ bpcu
Ortak ve özel mesaj için atanan güç katsayıları	$\alpha_c = 0.6$ $\alpha_1 = 0.15, \alpha_2 = 0.25$



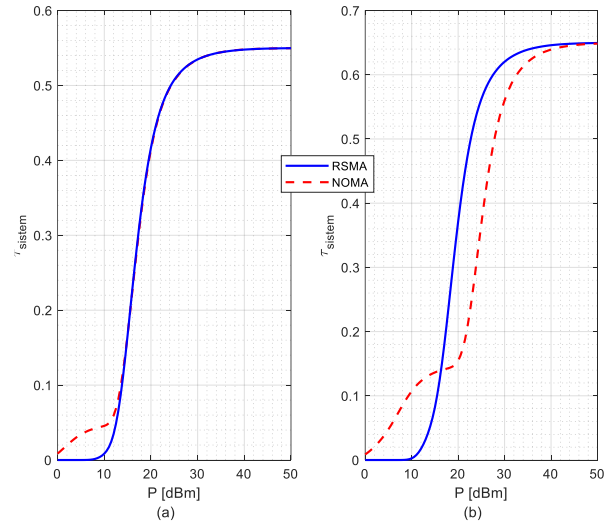
Şekil 2. Farklı türbülans etkileri için kesinti olasılığı

Şekil 3’te FSO bağlantısı orta türbülans etkisi altındayken RF bağlantısı için zayıf, ortalama ve güçlü gölgeleme etkileri incelenmiştir. $K = 2$ olmak üzere

bilgisayar benzetim parametreleri Şekil 2 ile aynıdır ve Tablo 2’de verilmiştir. Beklenildiği üzere gölgeleme etkisi arttıkça kesinti olasılığı artmaktadır. Örneğin kesinti olasılığının 10^{-3} olması için güçlü gölgeleme olduğu durumda zayıf gölgelemeye göre yaklaşık 9 dB daha fazla güç harcanmaktadır. Şekil 3’ten farklı gölgeleme parametreleri için de bilgisayar benzetimleri ile teorik sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Farklı gölgeleme etkileri için kesinti olasılığı



Şekil 4. RSMA tabanlı sistem ile NOMA tabanlı sistemin karşılaştırılması: a) $K=2$ b) $K=4$.

Şekil 4’te RSMA tabanlı ve NOMA tabanlı sistem verimleri $K = 2$ ve $K = 4$ için orta türbülans ve ortalama gölgeleme altında karşılaştırılmıştır. $K = 2$ olduğu durumda RSMA için $R_c = 0.3$ ($R_{c,1} = 0.05, R_{c,2} = 0.25$), $R_{p,1} = 0.05$ ve $R_{p,2} = 0.75$ bpcu seçilmiştir. Bu durumda $R_1 = 0.1$ ve $R_2 = 1$ bpcu olmaktadır. Güç katsayıları $\alpha_c = 0.6$, $\alpha_1 = 0.05$ ve $\alpha_2 = 0.35$ olarak ayarlanmıştır. NOMA için aynı veri hızlarında güç katsayıları $\alpha_1 = 0.6$ ve $\alpha_2 = 0.4$ olarak ayarlanmıştır. $K = 4$ olduğu durumda RSMA için $R_c = 0.5$ ($R_{c,1} = R_{c,2} = R_{c,3} = 0.05, R_{c,4} = 0.35$), $R_{p,1} = R_{p,2} =$

$R_{p,3} = 0.05$ ve $R_{p,4} = 0.65$ bpcu seçilmiştir. Bu durumda $R_1 = R_2 = R_3 = 0.1$ ve $R_4 = 1$ bpcu olmaktadır. Güç katsayıları $\alpha_c = 0.6$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.04$ ve $\alpha_4 = 0.28$ olarak ayarlanmıştır. NOMA için aynı veri hızlarında güç katsayıları $\alpha_1 = 0.6$, $\alpha_2 = 0.22$, $\alpha_3 = 0.12$ ve $\alpha_4 = 0.06$ olarak ayarlanmıştır. Şekil 4'ten görüldüğü üzere $K = 2$ için toplam verim RSMA ve NOMA için oldukça yakındır. $K = 4$ olduğu durumda ise düşük iletim gücünde NOMA daha iyi olsa da daha yüksek iletim güçlerinde RSMA'nın üstünlüğü görülmektedir. Örneğin $P = 20$ dBm için RSMA ile NOMA'ya göre 0.16 bpcu kazanç sağlanmaktadır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, uydu-hava-kara ağlarında RSMA tabanlı FSO/RF iletim yapılan sistemin performansı incelenmiştir. Uydu ile HAPS arasında kanalın Gamma-Gamma dağılımı ile modellendiği FSO haberleşme, HAPS ile kullanıcılar arasında ise kanalın gölgelemeli Rician dağılımı ile modellendiği RF haberleşme kullanılmaktadır. Kullanıcıların kesinti olasılığı analitik yöntemlerle hesaplanmıştır. Kesinti olasılığı hesaplamaları kullanılarak kullanıcıların ve sistemin verim hesaplamaları yapılmıştır. Teorik sonuçlar bilgisayar benzetimi sonuçları ile doğrulanmıştır. Farklı türbülans etkileri ve gölgeleme etkileri altında kullanıcıların kesinti olasılığı incelenmiştir. Örneğin kesinti olasılığının 10^{-3} olması için güçlü türbülans olduğu durumda zayıf türbülansa göre 10 dB, güçlü gölgeleme olduğu durumda da zayıf gölgelemeye göre 9 dB daha fazla güç harcanması gerektiği görülmüştür. Son olarak RSMA tabanlı sistemin NOMA tabanlı sisteme göre yüksek kullanıcı sayısında daha iyi verim sağladığı gösterilmiştir. Örneğin $P = 20$ dBm için RSMA tabanlı sistem ile NOMA tabanlı sisteme göre 0.16 bpcu kazanç sağlandığı görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] O. Kodheli et al., Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 23 (1), 70-109, 2021. doi: [10.1109/COMST.2020.3028247](https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3028247).
- [2] Darwish T., Kurt G. K., Yanikomeroglu H., Bellemare M. and Lamontagne G., LEO satellites in 5G and beyond networks: A review from a standardization perspective, IEEE Access, 10, 35040-35060, 2022. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3162243](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3162243).
- [3] Al-Hourani A., Guvenc I., On modeling satellite-to-ground path-loss in urban environments, IEEE Commun. Lett., 25 (3), 696-700, 2021, doi: [10.1109/LCOMM.2020.3037351](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3037351).
- [4] Abdi A., Lau W. C., Alouini M.-S., Kaveh M., A new simple model for land mobile satellite channels: first- and second-order statistics, IEEE Trans. Wireless Commun., 2 (3), 519-528, 2003. doi: [10.1109/TWC.2003.811182](https://doi.org/10.1109/TWC.2003.811182).
- [5] Ye J., Dang S., Shihada B., Alouini M.-S., Space-air-ground integrated networks: outage performance analysis, IEEE Trans. Wireless Commun., 19 (12), 7897-7912, 2020. doi: [10.1109/TWC.2020.3017170](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3017170).
- [6] Yang L., Hasna M. O., Performance analysis of amplify-and-forward hybrid satellite-terrestrial networks with cochannel interference, IEEE Trans. Commun., 63 (12), 5052-5061, 2015. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2495278](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2495278).
- [7] Chaudhry A. U., Yanikomeroglu H., Free space optics for next-generation satellite networks, IEEE Consum. Electron. Mag., 10 (16), 21-31, 2021. doi: [10.1109/MCE.2020.3029772](https://doi.org/10.1109/MCE.2020.3029772).
- [8] Nadeem F., Kvicera V., Awan M.S., Leitgeb E., Muhammad S.S., Kandus G., Weather effects on hybrid FSO/RF communication link, IEEE J. Sel. Areas Commun., 27 (9), 1687-1697, 2009. doi: [10.1109/JSA-C.2009.091218](https://doi.org/10.1109/JSA-C.2009.091218).
- [9] Yahia O. B., Erdogan E., Kurt G. K., Altunbas I., Yanikomeroglu H., A weather-dependent hybrid RF/FSO satellite communication for improved power efficiency, IEEE Wireless Commun. Lett., 11 (3), 573-577, 2022. doi: [10.1109/LWC.2021.3136444](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3136444).
- [10] Liu X., Lin M., Zhu W.-P., Wang J.-Y., Upadhyay P. K., Outage performance for mixed FSO-RF transmission in satellite-aerial-terrestrial networks, IEEE Photonics Technol. Lett., 32 (21), 1349-1352, 2020. doi: [10.1109/LPT.2020.3025452](https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3025452).
- [11] Dai L., Wang B., Yuan Y., Han S., Chih-lin I., Wang Z., Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends, IEEE Commun. Mag., 53 (9), 74-81, 2015. doi: [10.1109/MCOM.2015.7263349](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263349).
- [12] Ge R., Bian D., An K., Cheng J., Zhu H., Performance analysis of cooperative nonorthogonal multiple access scheme in two-layer GEO/LEO satellite network, IEEE Syst. J., 16 (2), 2300-2310, 2022. doi: [10.1109/JSYST.2021.3091781](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3091781).
- [13] Lei X., Yang L., Zhang J., Li G., Chen J., LAP-based FSO-RF cooperative NOMA systems, 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall), 1-5, 2020. doi: [10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348683](https://doi.org/10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348683).
- [14] Mao Y., Clerckx B., Li V. O., Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA, EURASIP J Wirel Commun Netw., 2018 (1), 2018. doi: [10.1186/s13638-018-1104-7](https://doi.org/10.1186/s13638-018-1104-7).
- [15] Clerckx B., Joudeh H., Hao C., Dai M., Rassouli B., Rate splitting for MIMO wireless networks: a promising phy-layer strategy for LTE evolution, IEEE Commun. Mag., 54 (5), 98-105, 2016. doi: [10.1109/MCOM.2016.7470942](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470942).
- [16] Zhang J., Clerckx B., Ge J., Mao Y., Cooperative rate splitting for MISO broadcast channel with user relaying, and performance benefits over cooperative NOMA, IEEE Signal Process Lett., 26 (11), 1678-1682, 2019. doi: [10.1109/LSP.2019.2942994](https://doi.org/10.1109/LSP.2019.2942994).

- [17] Yin L., Clerckx B., Rate-splitting multiple access for multigroup multicast and multibeam satellite systems, *IEEE Trans. Commun.*, 69 (2), 976-990, 2021. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3037596](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3037596).
- [18] Yang Z., Chen M., Saad W., Shikh-Bahaei M., Optimization of rate allocation and power control for rate splitting multiple access (RSMA), *IEEE Trans. Commun.*, 69 (9), 5988-6002, 2021. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3091133](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3091133).
- [19] Singh S. K., Agrawal K., Singh K., Li C.-P., Outage probability and throughput analysis of UAV-assisted rate-splitting multiple access, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 10 (11), 2528-2532, 2021. doi: [10.1109/LWC.2021.3106456](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3106456).
- [20] Ashrafzadeh B., Soleimani-Nasab E., Kamandar M., Uysal M., A framework on the performance analysis of dual-hop mixed FSO-RF cooperative systems, *IEEE Trans. Commun.*, 67 (7), 4939-4954, 2019. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2904501](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2904501).
- [21] Wang J. Y., Wang J. B., Chen M., Huang N., Jia L. Q., Guan R., Ergodic capacity and outage capacity analysis for multiple-input single-output free-space optical communications over composite channels, *Opt. Eng.*, 53 (1), 2014. doi: [10.1117/1.OE.53.1.016107](https://doi.org/10.1117/1.OE.53.1.016107).
- [22] Gradshteyn I. S., Ryzhik I.M., *Table of Integrals, Series and Products (7. Baskı)*, Academic Press, New York, A.B.D., 2007.

