



The impact of cooperative unmanned aerial vehicles communication under Nakagami-m fading channel

Muhammet Ali Karabulut^{1*}, A. F. M. Shahen Shah²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kafkas University, 36000, Kars, Türkiye

²Department of Electronic Communication Engineering, Faculty of Electrical and Electronics, Yıldız Technical University, 34220, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- Cooperative UAVs communication
- Analytical study under unsaturated conditions
- Throughput and delay analysis under fading channel

Keywords:

- Cooperative communication
- IEEE 802.11
- Nakagami-m fading
- UAVs communication

Article Info:

Research Article

Received: 20.09.2021

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.997670

Correspondence:

Author: Muhammet Ali

Karabulut

e-mail:

mali.karabulut@kafkas.edu.tr

phone: +90 474 225 1150 /

1612

Graphical/Tabular Abstract

Direct Transmission (DT) mode and Cooperative Transmission (CT) mode are shown in Figure A.

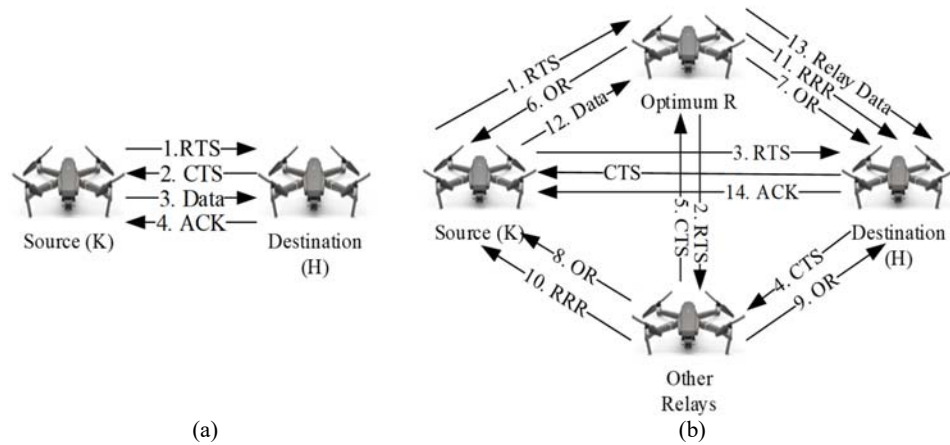


Figure A. (a) Direct Transmission (DT) mode (b) Cooperative Transmission (CT) mode

Purpose: In this paper, an analytical model is developed to evaluate the performance of CT medium access control protocol for unmanned aerial vehicles (UAV) on Nakagami-m channel fading.

Theory and Methods: The proposed protocol mainly includes DT and CT modes to increase throughput. Also, the algorithm is defined to select a suitable data transmission mode and select the optimal relay. Only the mechanism defined in the IEEE 802.11 standards specifically designed for direct communication is not suitable for cooperative communication. Therefore, new control packages are used and the existing control package format has been changed to support cooperative communication. To perform the performance analysis of the proposed CT mode protocol, an analytical model based on the unsaturated Markov Chain model was derived and validated by simulation. The simulation results show that the proposed protocol maximizes the system throughput.

Results: The performance of CT mode is higher than DT mode (IEEE 802.11). Throughput is higher in CT mode due to optimal R. The system using the Rayleigh fading channel ($m=1$) has the lowest throughput. The extra packet transmission with an increase of N lowers the data rate and increases the probability of collisions. The system using the Rayleigh fading channel ($m=1$) has the lowest data rate. The probability of failed transmission increases with increasing N for the fading channels. More packets will compete for transmission with an increase in N which will increase the probability of collisions.

Conclusion: The performance of the IEEE 802.11 MAC layer for CT mode was investigated using the Markov chain model in unsaturated conditions. The performance of the CT mode in the proposed MAC protocol has been studied under Nakagami-m channel fading for UAVs. Different data transmission modes are proposed to increase the throughput and a mechanism for selecting the appropriate data transmission mode is presented. Collision probability, successful and unsuccessful transmission probability, throughput, and delay expressions are derived. The performance of the CT mode protocol under fading channels is clearly demonstrated by the simulation results. It is clear that due to the increased probability of successful transmission, the data rate increases. On the other hand, channel fading reduces the data rate due to the increased probability of unsuccessful transmission.



İşbirlikli insansız hava araçlarının iletişiminin Nakagami-m sönümlenmeli kanal altında etkisi

Muhammet Ali Karabulut^{1*}, A. F. M. Shahen Shah²

¹Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 36000, Kars, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- İşbirlikli UAV haberleşme protokolü
- Doymamış koşullar altında analitik analiz
- Sönümlenmeli kanal altında veri hızı ve gecikme analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 20.09.2021

Kabul: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.997670

Anahtar Kelimeler:

IEEE 802.11,
işbirlikli haberleşme,
optimum röle,
UAV

ÖZ

Bu çalışmada, insansız hava araçları (unmanned aerial vehicles, UAV) için işbirlikli iletim ortam erişim kontrolü (cooperative transmission medium access control, CT-MAC) protokolünün Nakagami-m kanal sönümlenmesi üzerine performansı araştırılmıştır. Önerilen protokol, verimi artırmak için esas olarak doğrudan iletim (DT) ve işbirlikli iletim (CT) modlarını içermektedir. Ayrıca, uygun bir veri iletim modunu seçmek ve optimal röleyi seçmek için algoritma tanımlanmaktadır. Yalnızca doğrudan iletişim için özel olarak tasarlanmış IEEE 802.11 standartlarında tanımlanan mekanizma, işbirlikli iletişim için uygun değildir. Bu nedenle, yeni kontrol paketleri kullanılır ve mevcut kontrol paketi formatı, işbirliğine dayalı iletişimi desteklemek üzere değiştirilmiştir. Önerilen CT-MAC protokolünün performans analizini gerçekleştirmek için, doymamış Markov Zinciri modeline dayanan bir analitik model simülasyonla türetilip ve doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen protokolün sistem verimini en üst düzeye çıkardığını göstermektedir.

The impact of cooperative unmanned aerial vehicles communication under Nakagami-m fading channel

HIGHLIGHTS

- Cooperative UAV communication protocol
- Analytical analysis under unsaturated conditions
- Data rate and delay analysis under fading channel

Article Info

Research Article

Received: 20.09.2021

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.997670

Keywords:

Cooperative communication,
IEEE 802.11,
optimum relay,
UAV

ABSTRACT

In this study, the performance of cooperative transmission medium access control (CT-MAC) protocol for unmanned aerial vehicles (UAV) on Nakagami-m channel fading is investigated. The proposed protocol mainly includes direct transmission (DT) and cooperative transmission (CT) modes to increase throughput. Besides, the algorithm is defined to select a suitable data transmission mode and select the optimal relay. The mechanism defined in the IEEE 802.11 standards specifically designed for direct communication is not suitable for cooperative communication. Therefore, new control packets are used and the existing control packet format has been changed to support cooperative communication. To perform the performance analysis of the proposed CT-MAC protocol, an analytical model based on the unsaturated Markov Chain model is derived and validated by simulation. The simulation results show that the proposed protocol maximizes system efficiency.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *mali.karabulut@kafkas.edu.tr, shahen.shah@hotmail.com /
Tel: +90 474 225 1150 / 1612

1. Giriş (Introduction)

İnsansız hava araçları (unmanned aerial vehicles, UAV) akıllı ulaşım sisteminin (intelligent transportation system, ITS) önemli bir unsurudur. Uçan tasarsız ağlar (flying ad hoc networks, FANET), UAV'ler ile diğer yol kenarındaki ünitelerle araçlar arasında iletişimi sağlar. FANET'ler; şerit değiştirme desteği, trafik işareti veya sinyal ihlali uyarısı, yol durumu, acil durum bildirim, elektronik fren lambası göstergesi ve kaza önleme vb. güvenlik mesajlarını içermektedirler. Ortam erişim kontrolü (medium access control, MAC) katmanı en önemli katmanlardan biridir çünkü FANET'ler için güvenilir ve verimli veri aktarımı doğrudan MAC protokolüne bağlıdır [1]. IEEE 802.11 standardı [2], fiziksel (PHY) ve orta erişim kontrolü (MAC) katmanı için özellikler sağlayan IEEE tarafından sağlanmaktadır. 5.850-5.925 GHz bandında, 75 MHz geniş spektrumunda yedi 10 MHz kanallı özel kısa menzilli iletişim (DSRC), bir tanesi kontrol kanalı (control channel, CCH) ve altısı servis kanalı (service channel, SCH) olarak tahsis edilmiştir. ITS G5 standardı [3] Avrupa telekomünikasyon standart enstitüsü (ETSI) tarafından hazırlanmıştır. Avrupa'da, ETSI tarafından 5.875-5.925 GHz frekans bandında 50 MHz'lik bir spektrum belirtilmiştir. IEEE 1609.4 standardı [4], birden fazla kanal üzerinden veri iletimi için üst katman işlemlerini tanımlamaktadır.

UAV'lerde göreceli hareketlilik ve araçların yüksek hareketliliği, paket kaybı ve çarpışma ile sonuçlanan sık sık bağlantı kesilmeleriyle dengersiz iletişime neden olan hızlı topoloji değişikliklerine yol açabilir. Çözüm olarak, işbirliğine dayalı iletişim, kullanıcı hareketliliği nedeniyle kablosuz kanal bozukluklarını azaltarak UAV'in performansını artırabilir. İşbirlikli iletişimde, birkaç düğüm işbirliği yaparak belirli bir hedefe sinyal iletir. Kablosuz ağlar, ortak iletişim kullanarak çok yönlü yayılmadan kaynaklanan ciddi kanal bozukluklarını azaltabilir. Bu durumda, kanaldaki uzaysal çeşitliliğin kullanılmasıyla daha büyük faydalar elde edilir [5]. İşbirlikli iletişimin temel faydaları; zamanla değişen bir kanal üzerinden iletişim güvenilirliğini artırmak, iletim hızını artırmak ve ağ genelinde iletişim gecikmesini azaltmak, iletim gücünü azaltmak, paraziti azaltmak, kanal sönümlemesinin etkisini azaltmak, iletim aralığını genişletmek ve kesinti olasılığını azaltmaktır [6]. İşbirlikli iletişim, röle (R) yardımıyla iletişim kurmaya ve kaynaktan (K) hedefe (H) doğrudan aktarmaya kıyasla performansı artırmaya izin veren bir tekniktir [7]. K ve H arasındaki kanal güvenilir olmasa da, K, daha iyi kanal durumuna sahip R'lerin yardımıyla veri paketlerini H'ye iletebilir. Ancak kablosuz ağlarda işbirliği her zaman veya her durumda yararlı olmayabilir veya gerekli olmayabilir. İşbirliği kazancı maliyet düşüldüğü zaman çok küçük olduğunda gereksiz hale gelir. Bu nedenle, verilerin doğrudan mı yoksa işbirliği içinde mi aktarılacağını bilmek için bir mekanizmaya ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, farklı veri iletim modları ve hangi modun ne zaman etkili olduğu açıklanmaktadır. Farklı veri iletim modları şunlardır: doğrudan iletim (direct transmission, DT) ve işbirlikli iletim (cooperative transmission, CT). Optimum performans elde etmek için uygun modu seçmek için bir algoritma önerilmektedir. IEEE 802.11 standardı yalnızca doğrudan aktarımı desteklemektedir [2], işbirlikli iletişimi desteklememektedir. Bu protokolde, IEEE 802.11 RTS/CTS mekanizması değiştirilmiştir. Ayrıca, yeni kontrol paketleri: röle gönderme isteği (Relay Request To Send, RRTS), röle teklifi (Offer to Relay, OR), röleye iletme hazır (Relay Ready to Relay, RRR), röle iletim için uygun (Relay Clear to Relay, RCR), röle alındı bilgisi (Relay Acknowledgement, RACK) tanıtılmıştır. IEEE 802.11 standardının paket kontrol mekanizması değiştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı veri iletim modları için kontrol paketi değişim mekanizması da açıklanmaktadır. IEEE 802.11 MAC protokolünün performansı, ideal kanal koşulunun varsayıldığı [8-10]'deki UAV'ler için incelenmiştir. UAV'lerde düğümlerin yüksek hareketliliği, sık sık

bağlantı kopmasıyla topolojiyi hızla değiştirerek iletişimi kararsız hale getirir. Diğer yandan, işbirlikli iletişim, hareketliliğin neden olduğu kanal bozukluklarını azaltarak veri iletiminin performansını artırabilir. Performansı artırmak için [11-15]'de UAV'ler için işbirlikli MAC protokolü önerilmiştir, ancak önerilen protokollerde ideal kanal koşulu olduğu varsayılmaktadır. Kısa bir süre önce, ideal kanal koşulunu da düşündüğümüz işbirliği iletişimiyle sistem performansını artırmak için CT-MAC protokolünü [16, 17] önermiştik. Sistemin gerçek performansını anlamak için kanal sönümlemesini dikkate almak gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada kanal sönümlemesinin CT-MAC protokolünün performansı üzerine etkileri incelenmiştir.

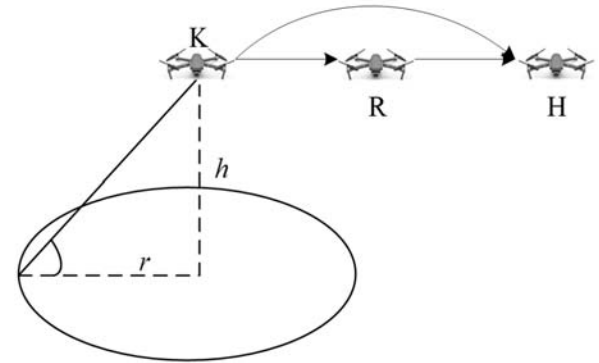
Bu makalenin literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- IEEE 802.11 MAC protokolünün performansını incelemek için özgün bir model sunulmuştur. İşbirlikli ve doğrudan olmak üzere farklı veri iletim modları önerilmiştir ve karşılaştırılmıştır.
- Markov zincir modeline dayalı doymamış durum altında analitik bir model sunulmuştur. UAV araç ağlarının performansını doğrudan etkileyebilecek parametrelerden çarpışma olasılığı (collision probability), başarılı iletim olasılığı (successful transmission probability), başarısız iletim olasılığı (unsuccessful transmission probability), hatalı çerçeve iletim olasılığı (errored frame transmission probability), veri hızı (throughput) ve gecikme ile performans ölçütleri arasındaki ilişki elde edilmiştir.
- Nakagami-m sönümlenmeli kanal altındaki sistem veri hızı hesaplanmıştır. M-PSK modülasyonu kullanılarak bit hata oranı hesaplanmıştır. Ayrıca önerilen sistemin performans modeli benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır.

Çalışmanın geri kalanı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: bölüm 2, önerilen CT-MAC protokolünü açıklamaktadır. Bölüm 3, sistem performansının analizini içermektedir. Bölüm 4'te benzetim sonuçları sergilenmektedir. Sonuçlar, bölüm 5'de verilmiştir.

2. Ct-Mac Protokolü (Ct-Mac Protocol)

Bu bölümde, UAV için CT-MAC protokolü ayrıntılı olarak incelenmektedir. Şekil 1'de bir kaynak, bir röle ve bir hedef düğümünden oluşan UAV ağı gösterilmektedir. Önce en uygun veri iletim modunu, sonra en uygun röleyi seçmek gerekmektedir. Burada kontrol paketi değişim mekanizması ve değiştirilmiş kontrol paketi formatı gösterilmektedir. Ayrıca, CT-MAC protokolünün zaman çizelgesi DT ve CT gibi farklı veri iletim modları için ifade edilir [16, 17].



Şekil 1. Sistem modeli (System model)

Uygun bir veri iletim modu elde etme algoritması Tablo 1'de sunulmaktadır. U aynı ağ kapsamındaki araç düğüm kümesidir, K

göndericidir ve H alıcısıdır. S_r sürede S_r veri hızıyla L boyutunda paketi gönderir. R_{CT} CT moduyla etkili paket aktarım hızıdır, T_{CT} , aynı veri paketini kaynaktan hedefe göndermek için gereken süredir. Ur, iyi röle R_j dizisidir. K ve H aynı ağdaysa, yük taşıma kapasitesi L 'den büyükse S, DT modunda veri iletir. K ve H aynı ağdaysa ve L yük kapasitesi iletişim yükünden ve etkin yük aktarım hızından büyükse, R_{CT} , gönderen veri hızı S_r 'den ve yükü kaynaktan hedefe göndermek için gereken süreden daha büyüktür. T_{CT} , gönderen iletim süresi S_r 'den daha az ise S, CT modunda veri iletir. CT modu, iletim hızını artırır ve ağdaki iletişim gecikmesini azaltır. CT modu için iyi bir röleye ihtiyaç vardır. İşbirlikli iletişim, karmaşıklığı beraberinde getirirken, aynı zamanda da gereksiz işbirliği en uygun MAC protokol tasarımında sorun çıkarabilmektedir.

Tablo 1. Uygun Veri İletim Modunu Bulma Algoritması
(An Algorithm To Find Optimum Data Transmission Mode)

| |
|--------------------------------------------------------------|
| 1: If (S, D) \in U |
| 2: then DT |
| 3: end |
| 4: If (S, D) \in U ve $R_{CT} > S_r$, ve $T_{CT} < S_r$, |
| 5: then CT |
| 6: else if $R_i \notin U_r$ |
| 7: else DT |
| 8: end |

2.1. DT Modu (DT Mode)

IEEE 802.11p'de tanımlanan RTK / CTK üzerinden doğrudan iletim, CT-MAC protokolünün DT modudur. DT modu için; Şekil 2a, CT-MAC protokolünün zaman çizelgesini gösterir. Şekil 2b, CT-MAC protokolünün kontrol paketi değişim mekanizmasını göstermektedir. Veri iletiminden önce K tarafından RTS yollanıp, CTS alınır. Daha sonra veri iletimi gerçekleştirilmektedir. Başarılı iletim için H tarafından yollanan ACK K tarafından alınmalıdır.

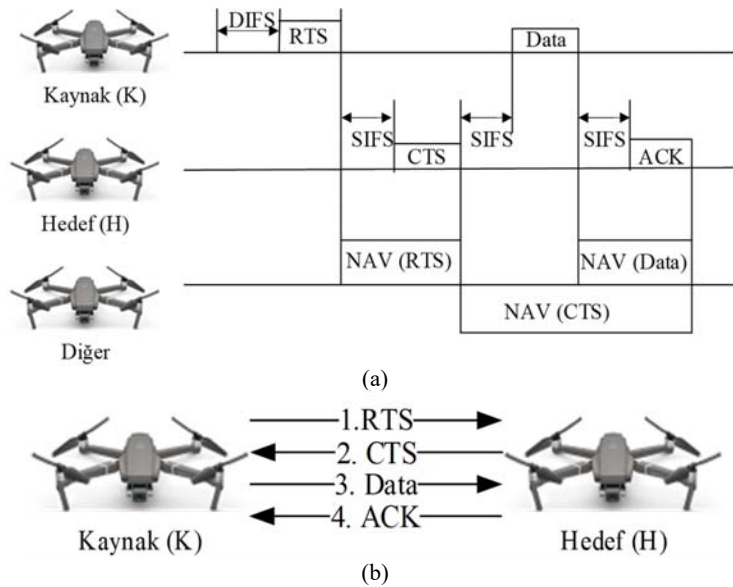
2.2. CT Modu (CT Mode)

CT modunda, RTS, CTS veri iletiminden önce iletir, RTS ve CTS sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) bilgisini içermektedirler. Araç düğümleri hem K hem de H'ye OR göndermek

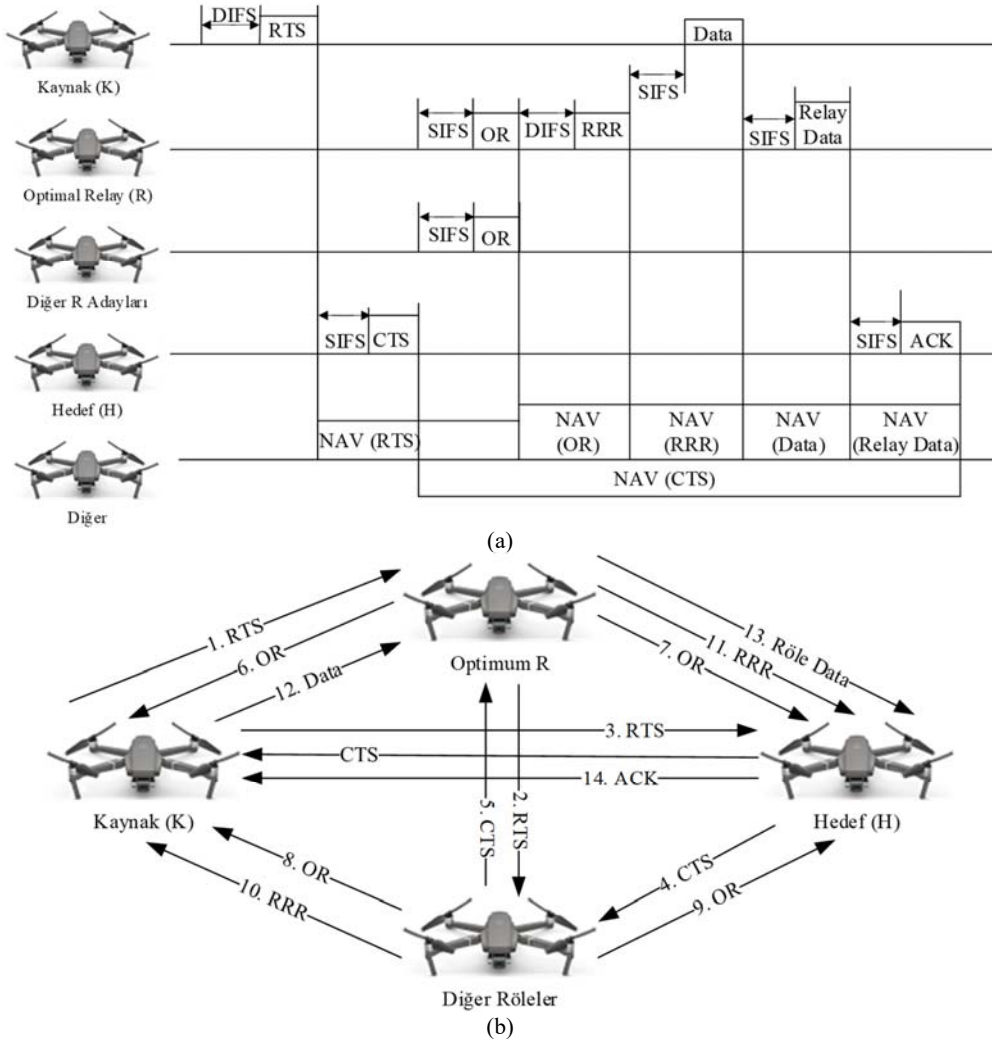
daha yüksek SNR'ye sahiptir. OR yardımcıyı gösterir. OR tüm ağa yayın yapmaktadır. Optimal R, dağıtılmış koordinasyon işlevi (distributed coordination function, DCF) çerçeveler arası boşluk (DCF inter-frame space, DIFS) süresinden sonra araç düğümleri K ve D'ye RRR gönderir. Diğer düğümler RRR'deki aralık ve ağ tahsis vektörünü (NAV) görür. Kısa çerçeveler arası boşluk (SIFS) süresinden sonra K, verileri H'ye ileten optimum R'ye gönderir ve bu optimum R, H'ye veri gönderir. K, veri iletiminin onaylama (ACK) ile başarılı olduğunu iletir. ACK, SIFS aralığından sonra K'ye ulaşmazsa, R, verileri H'ye geri gönderir. UAV'lerin, yeni veri iletimini başlatmak için DIFS süresinin beklenmesi gerekir. Şekil 3a, CT modu için CT-MAC protokolünün zaman çizelgesini gösterir. Şekil 3b, CT modu için CT-MAC protokolünün kontrol paketi değişim mekanizmasını göstermektedir.

2.3 Röle Seçimi (Relay Selection)

Veri iletimi için DT ve CT arasından uygun bir iletim modu ve gerekirse veri aktarımı için uygun bir röle seçmek gerekmektedir. İşbirliği kazancı röle sayısına bağlıdır. Röle sayısının artmasıyla iletişimin güvenilirliği ve çeşitlilik kazancını artırır. Röle düğümü seçimi için gerekli bazı parametreler vardır. Röle seçilecek düğüm boşa olmalı ve yüksek K-H SNR değerine sahip olmalıdır. Anlık kanal durumu da parametre olarak kullanılır. İşbirlikli iletişim, kaynaktan hedefe olan tüm bağlantılara bağlıdır. Bir röle, kontrol mesajlarının anlık SNR değerine göre seçilmelidir. RTS ve CTS aracılığıyla, tüm komşu düğümler hem gönderenin hem de alıcının SNR'sini bilmektedirler. Gönderilen bir ek SNR bilgisi, sırasıyla K ve H veri iletim hızını bilmek için RTS ve CTS paket içerisinde yer alır. Boşa ve yüksek SNR'ye sahip olan düğümler OR'yi hem K hem de H'ye gönderir. Bu şekilde, bilgi geçişi için en iyi yola sahip olan düğümler seçilebilir ve bir dizi iyi röle U_r oluşur. Çoğu zaman veri iletimi başarılı olmalıdır, çünkü bu RTS ve CTS değişimi tarafından yapılır. Anlık SNR bilgilerine bakarak K ve H arasındaki en kısa yolu bulunarak optimal R seçilebilir. Burada röle, iyi röle ve optimal röle olarak sınıflandırılır. RTS ve CTS değişiminden sonra bir dizi iyi röle bulunur ve daha sonra en kısa yol algoritması yoluyla iyi röleler arasından optimal röle seçilir. İyi röleler boşta, daha yüksek veri hızına, daha düşük iletim süresine ve iyi kanal durumuna sahiptir. Optimal R sadece iyi bir röle değil, aynı zamanda K ve H arasındaki en kısa yolu sahiptir. Bu şekilde, düşük bir veri hızına sahip düğüm, R düğümü yardımıyla yüksek veri hızıyla veri iletilebilir.



Şekil 2. DT modu için önerilen CT-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması
(Proposed CT-MAC protocol for DT mode; (a) timeline (b) control package exchange mechanism)



Şekil 3. CT modu için önerilen CT-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması
(Proposed CT-MAC protocol for CT mode: (a) timeline (b) control package exchange mechanism)

2.4. Kontrol Paketi Değişim Mekanizması (Exchanged Control Packet Format)

Önerilen protokolün farklı veri iletim modları için iletişim zaman çizelgesi ve kontrol paketi değişim mekanizması, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmektedir. Burada yeni kontrol paketleri: RRTS (Gönderme Rölesi Talebi), OR (Yardım Teklifi), RRR (Röleye Yardımcı Yardımcı), RCR (Röleye Yardımcı Yardımcı), RACK (Röle Onayı) tanımlanmıştır. Değiştirilmiş kontrol paketi formatları Şekil 4'te verilmektedir.

3. Performans Analizi (Performance Analysis)

Önerilen CT-MAC protokolünde araçların yolda rastgele dağıldığı ve UAV ağının N dronedan oluştuğu varsayılmıştır. Kullanılan ağdaki K düğümü ile H düğümü arasındaki haberleşme ağı doymamış koşullar altındaki Markov zincir modeli ile modellenmiştir. Şekil 6'da, geri sayım mekanizmasını açıklamak için tek boyutlu Markov zincir modeli sunulmaktadır. Önerilen sistemde ele alınan Markov zincir modelinde, ağdaki bir aracın ara belleğinin boş olduğu yeni bir rölanlı durumu (I) sunulmuştur. $b(t)$, t zaman diliminde belirli bir araç için stokastik geri çekilme işlemini belirtir ($b(t) \in \{0, 1, \dots, CW_0 - 1\}$). q , bekleme durumunda veya iletim durumunda yeni bir paketin gelme

olasılığdır. $q \rightarrow 1$ limiti alındığında modelimiz τ için Bianchi'nin doymuş modeliyle [18] aynı değeri verir.

Şekil 5'te gösterildiği gibi, tek adımlı geçiş olasılıkları [19]

$$\begin{aligned} P[i | i+1] &= 1, \quad i \in [0, CW_0 - 2], \\ P[i | 0] &= q / CW_0, \quad i \in [0, CW_0 - 1], \\ P[i | I] &= q / CW_0, \quad i \in [0, CW_0 - 1], \\ P[I | 0] &= 1 - q, \\ P[I | I] &= 1 - q, \end{aligned} \quad (1)$$

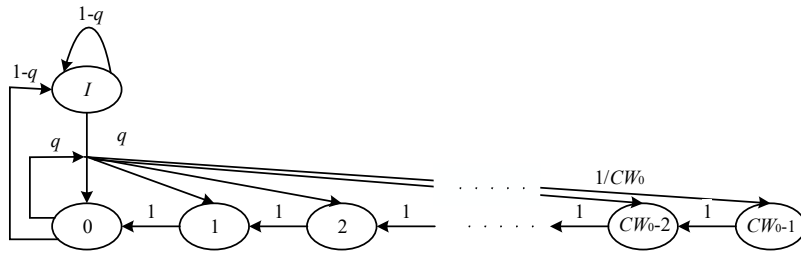
Eş. 1'de gösterildiği gibi açıklanabilir.

$b_k = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{b(t) = i\}$, ($i \in [0, CW_0 - 1]$) zincirin sabit dağılımıdır ve aşağıdaki ilişkiler, kararlı durumda Markov zincirinden Eş. 2'deki gibi türetilir.

$$b_k = \frac{q(b_0 + b_I)(CW_0 - i)}{CW}, \quad i \in [0, CW_0 - 1]. \quad (2)$$

| | | | | | | |
|-----------------|------|----|-------|-------|---------|-----|
| RTS | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | TA | T-SNR | FCS | |
| RRTS | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | TA | HA | T-SNR | FCS |
| CTS | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | R-SNR | | FCS | |
| OR | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | TA | HA | R-SNR | FCS |
| RRR | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | TA | HRRA | RRR-SNR | FCS |
| RCR | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | TA | HRRA | FCS | |
| ACK | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | | RA | | FCS | |
| RACK | | | | | | |
| Çerçeve Kontrol | Süre | RA | HRRA | | FCS | |

Şekil 4. Kontrol değişim paket formatı (Exchanged control packet format)



Şekil 5. Doymamış koşullar altında IEEE 802.11 için tek boyutlu Markov zincir modeli (One-dimensional Markov chain model for IEEE 802.11 broadcast under unsaturated conditions)

Tüm olası durumların toplamı Eş. 3'teki gibi bire eşittir:

$$\sum_{i=0}^{CW_0-1} b_i + b_l = 1. \quad (3)$$

Daha sonra,

$$b_0 = \frac{2q}{(CW_0 - 1)q + 2} \quad (4)$$

Eş. 4 elde edilir. Bir UAV'nın rastgele seçilen bir zaman diliminde bir paket iletme olasılığı τ , Eş. 5'teki gibi elde edilebilir:

$$\tau = b_0 = \frac{2q}{(CW_0 - 1)q + 2}. \quad (5)$$

Her UAV, paket varışları sabit bir varış oranı λ_q olan bir Poisson dağılımını takip eder. Bir veya daha fazla paketin zaman dilimine ulaşma olasılığı $1 - e^{-\lambda_q T_c}$. Zaman aralığı kısa olduğunda varış sırası

atlanabilir ve bu nedenle Markov durumunda paket varış olasılığı q Eş. 6 gibi yazılabilir.

$$q = 1 - e^{-\lambda_q T_e} \approx \lambda_q T_e. \quad (6)$$

Bir UAV'nın her bir Markov durumunda geçirmesi beklenen süre T_e , Eş. 7'deki gibi hesaplanır.

$$T_e = (1 - P_b)T_{slot} + P_b P_s (1 - P_{ef})T_s + P_b (1 - P_s)T_c + P_b P_s P_{ef} T_{ef}, \quad (7)$$

İletim süresince kalan $N-1$ tane UAV drone düğümünden en az biri paket gönderdiğinde paket çarpışmaya neden olur. Bu durumda çarpışma olasılığı P_c , Eş. 8'e dönüşür.

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (8)$$

Sistemde olan N tane UAV düğümünden herhangi biri herhangi bir zaman aralığında bir paket gönderirse, kanal meşgul olacaktır. Bu durumda kanalın meşgul olma olasılığı P_b , Eş. 9 gibi gösterilir.

$$P_b = 1 - (1 - \tau)^N \quad (9)$$

Gönderilen bir paketin başarıyla teslim alındığı ve başarılı iletim olasılığı P_s , Eş. 10 gibi ifade edilebilir.

$$P_s = \frac{N\tau(1-\tau)^{N-1}}{P_b} \quad (10)$$

P_{us} başarısız iletim olasılığını temsil etmektedir. MAC katmanındaki çarpışma ve/veya fiziksel katmandaki kanal sönümlenmesi ve/veya gürültü nedeniyle hatalı bir çerçeve nedeniyle paket iletimi başarısız olabilir. P_{ef} hatalı çerçeve olasılığı olduğuna göre P_{us} Eş. 11'deki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned} P_{us} &= 1 - (1 - P_c)(1 - P_{ef}) \\ &= 1 - (1 - \tau)^{N-1} (1 - P_{ef}). \end{aligned} \quad (11)$$

T_{slot} zaman aralığı süresidir. Eş. 7'de verilen T_c ve T_s sırasıyla çarpışan paket ve başarılı iletiminin zaman süresidir ve bu süreler RTS/CTS mekanizması için sırasıyla Eş. 12, Eş. 13, Eş. 14'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_c = T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{delay}, \quad (12)$$

$$T_{s_DT} = T_{DIFS} + 3T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + \frac{L}{R_d}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} T_{s_CT} &= 2T_{DIFS} + 5T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} \\ &+ T_{OR} + T_{RRR} + T_{ACK} + \frac{2L}{R_d}, \end{aligned} \quad (14)$$

Burada $T_{DIFS}, T_{SIFS}, T_{RTS}, T_{CTS}, T_{ACK}$ DCF çerçeve aralığı (DCF Inter-Frame Space, DIFS), kısa çerçeve içi aralığı (Short Inter-Frame Space, SIFS), gönderme isteği (Request to Send, RTS), göndermek için hazır (Clear to Send, CTS), alındı bilgisi (Acknowledgement, ACK) süreleridir. x , röle sayısını temsil eder. L veri uzunluğunu, T_{delay} yayılım gecikmesini ve R_d veri iletim hızını ifade eder. T_d ortalama veri iletim süresi Eş. 15'teki gibi gösterir.

$$T_{d_DT} = \frac{L}{R_d}, T_{d_CT} = \frac{2L}{R_d}. \quad (15)$$

P_{or} , optimal röleyi alma olasılığıdır ve Eş. 16'daki gibi gösterilebilir.

$$P_{or} = 1 - \frac{N - R_{no}}{N}, \quad (0 \leq R_{no} \leq N - 2) \quad (16)$$

burada, R_{no} optimum röle sayısını ifade etmektedir.

3.1. Nakagami- m Sönümlenmeli Kanal (Nakagami- m Fading Channel)

Nakagami- m sönümlenmeli kanal modeli, Rayleigh ve Rician sönümlenme modellerine göre daha genel bir dağılımdır ve uzun mesafelerde hızlı sönümlenmeyi karakterize eden bir kanal modelidir. $|h|$ Nakagami- m dağılımı olduğundan SNR'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, pdf) Eş. 17'deki gibi verilebilir.

$$f(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)\gamma} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^m e^{-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}}. \quad (17)$$

Burada m dağılım parametresini $\Gamma(\cdot)$ ise Gamma fonksiyonunu gösterir. $\gamma = E|h|^2 / \sigma_N$, $\bar{\gamma} = E\Omega / \sigma_N$ ve $\Omega = E[h^2]$ olarak ifade edilir. $E[\cdot]$ beklenen değer operatörünü temsil eder. Kesinti olasılığı P_{kes} , alınan sinyalin ortalama SNR'sinin ($\bar{\gamma}$) SNR eşik değerinden (γ_{th}) düşük olması olasılığı olarak tanımlanır. P_{kes} Eş. 18'deki gibi hesaplanabilir [20].

$$\begin{aligned} P_{kes} &= P(\gamma < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f(\gamma) d\gamma = F(\gamma_{th}) \\ &= \int_0^{\gamma_{th}} \frac{1}{\Gamma(m)\gamma} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^m e^{-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}} d\gamma. \end{aligned} \quad (18)$$

Biraz basitleştirmeden sonra eşitlik [21]

$$\begin{aligned} P_{kes} &= 1 - e^{-\left(\frac{m\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right)^k}{k!} \\ &= 1 - e^{-\left(\frac{m\gamma_{th}\sigma_{Noise}(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}\right)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m\gamma_{th}\sigma_{Noise}(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}\right)^k}{k!}, \end{aligned} \quad (19)$$

Eş. 19 elde edilebilir. Burada G_r ve G_t alıcı ve verici için anten kazancıdır. $\lambda = c / f$ işaretin dalga uzunluğudur ($c=3 \times 10^8$ m/s ışık hızı ve $f=5$ GHz taşıyıcı frekansdır). Tüm araçların iletilen gücü aynıdır. σ_{Noise} , eklenebilir beyaz Gauss gürültüsüdür (AWGN). α parametresi yol kaybı üssü olarak ifade edilmiştir P_{ef} ile P_{kes} arasındaki ilişki [21], Eş. 20'deki gibi yazılabilir.

$$P_{ef} = 1 - (1 - P_{kes}) \left[\sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m \gamma_{th} \sigma_{Noise} (4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R} \right)^k}{k!} \right], \quad (20)$$

3.2. Veri Hızı Analizi (Throughput Analysis)

S , bir zaman dilimine gönderilen ortalama veri hızı ve bir zaman diliminin ortalama süresinin oranıdır ve Eş. 21'deki gibi hesaplanabilir.

$$S = \frac{E[data]}{E[time]} = \frac{P_{suc} P_{busy} (1 - P_{ef}) R_d T_d}{(1 - P_{or}) T_e}. \quad (21)$$

$E[\cdot]$ beklenen değer operatörünü temsil etmektedir. Eş. 7, 9, 10, 15, 16 ve 18, Eş. 21 içerisine yazıldığında S , Eş. 22'deki gibi ayrıntılı olarak elde edilir.

$$S = \frac{P_s P_b (1 - P_{ef}) R_d T_d}{T_e (1 - P_{or})}. \quad (22)$$

Önerilen sistem modelini simülasyon sonuçları ile eşleştirmek için q 'yu sunulan paket yüküyle ilişkilendirmeliyiz. Doymuş bir sistemin modellenmesi, yani her zaman hizmet bekleyen bir paketin var olması, $q=1$ alınarak elde edilir. Paketler λ_q oranı ile üstel olarak dağılmış paketler arası varış süreleri ile Poisson dağılımlı gelirse, $1-q$, tipik bir T_e uzunluğu zaman dilimine hiçbir paketin ulaşmama olasılığıdır.

3.3. Gecikme Analizi (Delay Analysis)

$E[D]$, başarıyla iletilen paketin olarak verilen ortalama gecikmesidir ve Eş. 23'teki gibi yazılabilir [22].

$E[D]$

$$E[D] = E[T_{interval}] - P_{ST} E[T_{drop}]. \quad (23)$$

$E[T_{interval}]$, bir alıcıda iki paket bir başarılı şekilde alındığı ortalama süredir, P_{ST} başarılı iletme göre ortalama iletimi bırakılan pakettir ve $E[T_{drop}]$ bir paketin iletimi bırakmak için ortalama süresidir. P_{drop} , bir paketin nihayet düşürülme olasılığı ise, P_{ST} Eş. 24'teki gibi ifade edilebilir.

$$P_{ST} = \frac{P_{drop}}{1 - P_{drop}}. \quad (24)$$

$E[T_{interval}]$, Eş. 7 kullanılarak Eş. 25 hesaplanabilir.

$$E[T_{interval}] = N T_e, \quad (25)$$

$E[T_{drop}]$ da Eş. 7 kullanılarak Eş. 26'daki gibi hesaplanabilir.

$$E[T_{drop}] = E[X_{drop}] T_e \quad (26)$$

Burada $E[X_{drop}]$, bırakma paketi için ortalama slot süresi olup şeklinde verilebilir.

$$E[X_{drop}] = \frac{2q}{(CW - 1)q + 2}. \quad (27)$$

Böylece, Eş. 24 ile Eş. 27 arasındaki denklemler kullanılarak ortalama paket gecikmesi Eş. 28'deki gibi yazılabilir:

$$E[D] = T_e \left(N - \frac{P_{drop}}{1 - P_{drop}} \times \frac{2q}{(CW - 1)q + 2} \right). \quad (28)$$

Tablo 2. Sayısal Sonuçlarda Kullanılan Parametre Değerleri (Value of Parameters Utilized in Numerical Results)

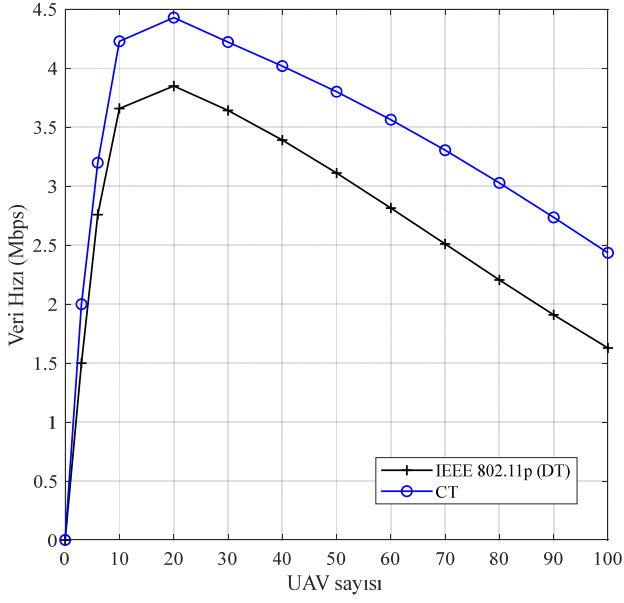
| Parameters | Value |
|-------------------------------------------------------|---------------------|
| $T_{DIFS}, T_{SIFS}, T_{delay}, T_{slot}$ (μs) | 50, 10, 1, 20 |
| RTS, CTS, L_h, L, ACK (bytes) | 26, 20, 50, 512, 14 |
| R_c, R_H (Mbps) | 1, 11 |
| N, CW, r (m) | 0 - 100, 64, 1000 |
| $\sigma_R, \sigma_{Noise}, \gamma_{th}$ (dB) | 10, -50, 5 |
| v (km/h), G_t, G_r | 0 - 100, 1, 1 |
| f (GHz), α | 5, 3 |

4. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

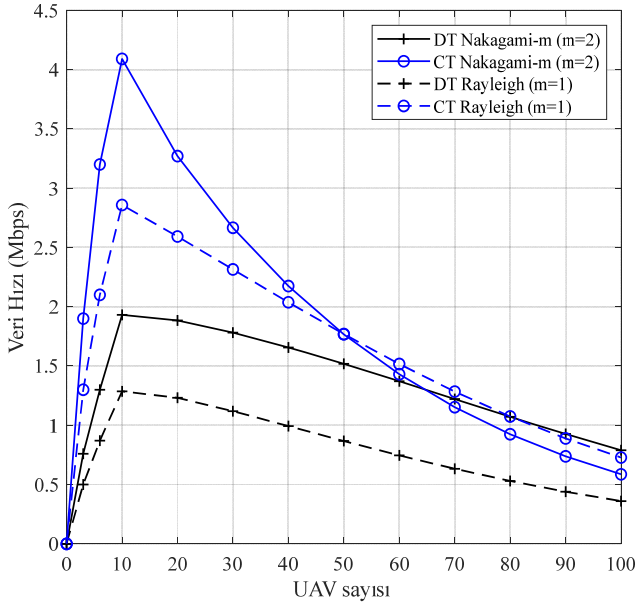
CT-MAC protokolünün performansı bu bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tablo 2, benzetimlerdeki parametrelerin değerini göstermektedir. Benzetim sonuçları MATLAB'da elde edilmiştir.

Şekil 6, araç sayısına göre veri hızını göstermektedir. Performans belirli sayıda araca kadar yükselir. Daha sonra, performans azalmaya başlar çünkü kanal için daha fazla paket rekabet haline girmektedirler, bu da UAV sayısındaki artış yüzünden daha fazla çarpışmaya neden olur. CT'nin performansı DT (IEEE 802.11)'den daha yüksektir. Optimum R verileri nedeniyle CT modunda veri hızı performansı daha yüksektir.

Şekil 7, iki kanal modeli için UAV sayısına karşı veri hızını göstermektedir. Tüm sönümlenmeli kanallar için veri hızı, N 'nin artmasıyla azalır. N arttığında, ilave araçlardan daha fazla paket ulaşacaktır ve bu da iletim için gereken paket sayısını arttıracaktır. N artışı ile ekstra paket iletimi, veri hızını düşürür ve çarpışma olasılığını artırır. Rayleigh sönümlenmeli kanalı ($m=1$) kullanan sistem en düşük veri hızına sahiptir. Nakagami- m sönümlenmeli kanalı ($m=2$) kullanan sistemin en yüksek veri hızına sahip olduğu şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 6. UAV sayısına göre veri hızındaki değişim
(Variation in throughput versus number of UAVs)

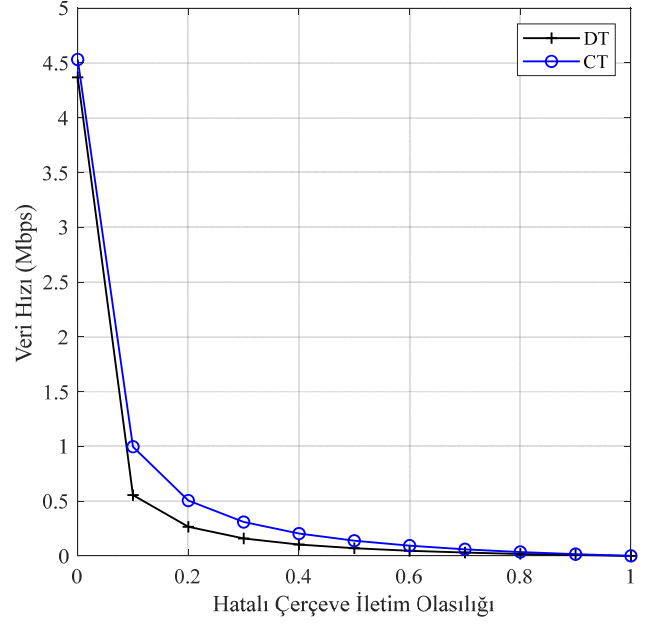


Şekil 7. Kanal sönmülmesi olması durumunda UAV sayısına göre veri hızındaki değişim
(Variation in throughput versus number of UAVs in case of channel fading)

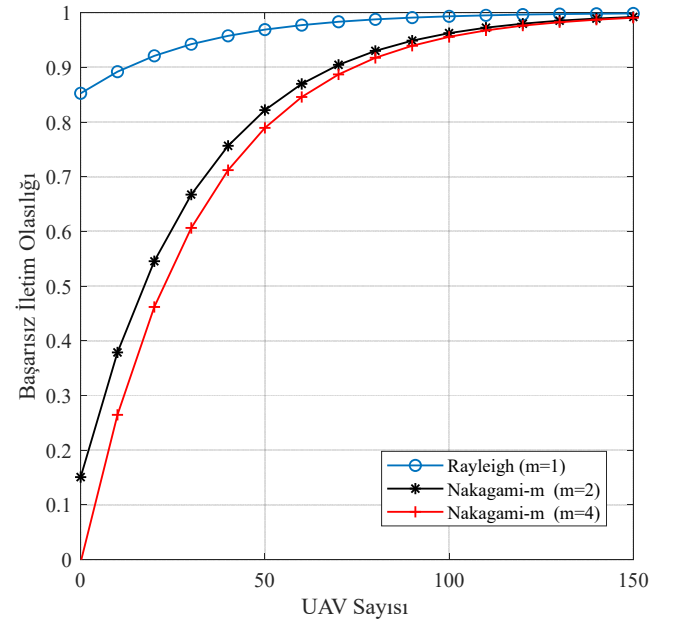
Şekil 8, hatalı çerçeve olasılığına karşı veri hızını göstermektedir. CW çok küçük olduğunda, iletimden önceki backoff süresi çok kısa olur. Bu nedenle, paket kanalda çok hızlı bir şekilde fazla bekltilmeden iletilmektedir. CW boyutu arttığında, kanalın backoff süresi artmaktadır. Bu da veri hızını azaltmaktadır, çünkü paketin iletilmesi için uzun süre beklemek gerekmektedir.

Şekil 9, UAV sayısına karşı başarısız iletim olasılığını göstermektedir. Başarısız iletim olasılığı, iki sönmülmeli kanal için N 'nin artmasıyla artar. Daha fazla paket, çarpışma olasılığını artıracak olan N artışı ile iletim için rekabete girecektir. Çarpışma olasılığı arttığında, başarısız iletim olasılığı da artar. Rayleigh sönmülmeli kanalı ($m=1$) kullanan

sistemin en yüksek başarısız iletim olasılığına ve Nakagami- m sönmülmeli kanalı ($m=2$) kullanan sistemin en düşük başarısız iletim olasılığına sahip olduğu açıkça görülmektedir.

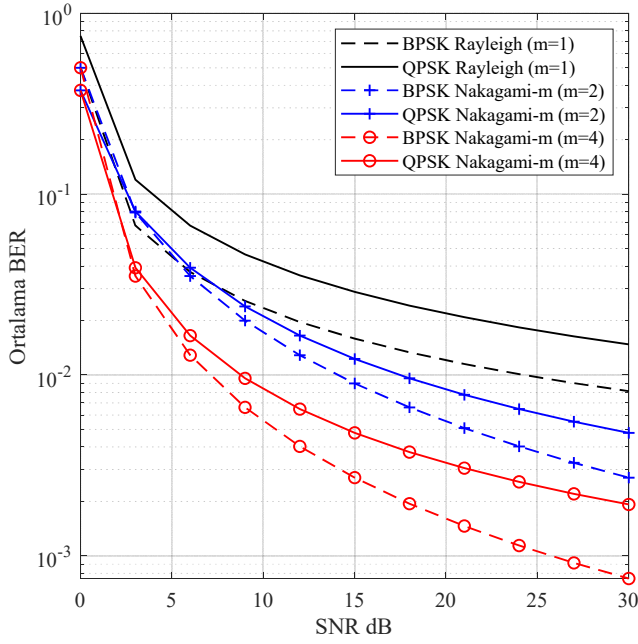


Şekil 8. Hatalı çerçeve iletim olasılığına karşı veri hızı değişimi
(Throughput versus probability of error framed transmission)

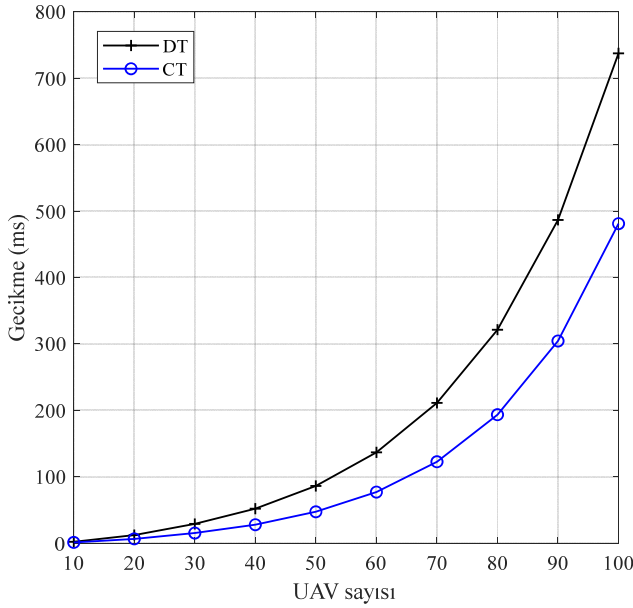


Şekil 9. UAV sayısına karşı başarısız iletim olasılığındaki değişim eğrisi
(Curve of change in probability of failed transmission versus number of UAVs)

Şekil 10, SNR'ye karşı ortalama BER'i göstermektedir. SNR'nin artması ile birlikte sistem performansı artmaktadır. Böylece BER düşmektedir. BPSK ve QPSK modülasyonları için Nakagami- m sönmülmeli kanalı kullanan sistemin performansı Rayleigh sönmülmeli kanalı tipini kullandıktan daha iyidir. Nakagami- m sönmülmeli kanalı kullanan sistemde m arttıkça BER düşmektedir.



Şekil 10. SNR'ye karşı ortalama BER değişimi (SNR versus average BER)



Şekil 11. UAV sayısına karşı gecikme değişimi (Delay variation versus number of UAVs)

Şekil 11, UAV sayısına karşı ortalama gecikmeyi göstermektedir. İletim için paket sayısı, daha fazla paket çekişmesi ile sonuçlanan UAV sayısı ile artacaktır. Kanal, çarpışma olasılığını artıracak daha fazla paket tartışması için daha yoğun olacaktır. Bu nedenle, gecikme UAV sayısının artması ile artmaktadır.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Doymamış koşullarda Markov zincir modelinde kullanılarak IEEE 802.11 MAC katmanının CT-MAC protokolü performansı incelenmiştir. Ayrıntılı benzetim sonuçlarının nicel ve nitel bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. CT-MAC protokolünün performansı,

UAV'ler için Nakagami- m kanal sönümlemesi altında incelenmiştir. Veri hızını artırmak için farklı veri iletim modları önerilmiş ve uygun veri aktarım modunu seçmek için bir mekanizma sunulmuştur. Çarpışma olasılığı, başarılı ve başarısız iletim olasılığı, veri hızı, gecikme analizi ifadeleri türetilmiştir. Benzetim sonuçları ile sönümlemeli kanallarda CT-MAC protokolünün performansı açıkça gösterilmiştir. Başarılı iletim olasılığının artması nedeniyle, veri hızının arttığı açıktır. Öte yandan, kanal sönümlemesi, başarısız iletim olasılığının artması nedeniyle veri hızını azaltmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Karabulut M.A., Shah A.F.M.S., Ilhan H., Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETs, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1575-1588, 2020.
2. IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802.11, 2012.
3. ITS G5-2009: European telecommunications standards institute, intelligent transport systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of intelligent transport systems operating in the 5 GHz frequency band, ETSI, ES, 202 663 V1.1.0, 2009.
4. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802.11-2016, 2016.
5. Tao X., Xu X. and Cui Q., An overview of cooperative communications, IEEE Communications Magazine, 50 (6), 65-71, 2012.
6. Miao J., Li H., Zheng Z. and Wang C., Secrecy Energy Efficiency Maximization for UAV Swarm Assisted Multi-Hop Relay System: Joint Trajectory Design and Power Control, IEEE Access, 9, 37784-37799, 2021.
7. Wang S., Liu J., Zhou S., Zhou L., Yin M., Hao H., Cooperative relay MAC protocol for ad hoc networks, IEEE International Conference on Commun. Technol. (ICCT), 612-616, 2017.
8. Jayakody D. N. K., Perera T. D. P., Ghayeb A. and Hasna M. O., Self-Energized UAV-Assisted Scheme for Cooperative Wireless Relay Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69 (1), 578-592, 2020.
9. Shah A. F. M. S., Ilhan H. and Tureli U., Designing and Analysis of IEEE 802.11 MAC for UAVs Ad Hoc Networks, IEEE 10th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, USA, 934-939, 2019.
10. Karabulut M. A., Shah A. F. M. S. and Ilhan H., OEC-MAC: A Novel OFDMA Based Efficient Cooperative MAC Protocol for VANETs, IEEE Access, 8, 94665-94677, 2020.
11. You W., Dong C., Wu Q., Qu Y., Wu Y. and He R., Joint task scheduling, resource allocation, and UAV trajectory under clustering for FANETs, China Communications, 19 (1), 104-118, 2022.
12. Nazib R. A. and Moh S., Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle-Aided Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey, IEEE Access, 8, 77535-77560, 2020.
13. Tan X., Zuo Z., Su S., Guo X., Sun X. and Jiang D., Performance Analysis of Routing Protocols for UAV Communication Networks, IEEE Access, 8, 92212-92224, 2020.
14. Wu Q., Routing protocol for heterogeneous FANETs with mobility prediction, China Communications, 19 (1), 186-201, 2022.
15. Hassija V. et al., Fast, Reliable, and Secure Drone Communication: A Comprehensive Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 23 (4), 2802-2832, 2021.
16. Karabulut M. A., Shah A. F. M. S. and Ilhan H., CR-MAC: Cooperative Relaying MAC Protocol for VANETs, IEEE 5th Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT), 1-4, 2019.
17. Karabulut M. A., Shah A. F. M. S. and Ilhan H., Performance of the CR-MAC with Channel Fading and Capture Effect under Practical Traffic Scenarios for VANETs, IEEE 10th Annual Ubiquitous

- Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York City, USA, 0647-0652, 2019.
18. Bianchi G., Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18 (3), 535-547, 2000.
 19. Malone D., Duffy K. and Leith D., Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Heterogeneous Conditions, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 15 (1), 159-172, 2007.
 20. Simon M. K., Alouini M.-S., *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 253-257, 2015.
 21. Jameel F., Haider M. A. and Butt A., Performance analysis of VANETs under Rayleigh, Rician, Nakagami-m and Weibull fading, *IEEE International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*, Islamabad, 127-132, 2017.
 22. Karabulut M. A., Shah A. F. M. S. and Ilhan H., Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 DCF for VANETs, *9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Munich, 346-351, 2017.

