

ÖZET

YÜKSEK İRTİFA AĞLARINDA HAP’LAR ARASI İLETİŞİM İÇİN BİR SİSTEM

5 Buluş, yüksek irtifada bir havadan havaya (Air-to-Air, A2A) kanal alanındaki veri hızını arttırmak ve kesintisiz veri iletişimi sağlamak için özellikle sabit olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki hareketli ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP’lar arası iletişim için bir sistem ile ilgilidir.

İSTEMLER

1. Yaklaşık 20 km yüksek irtifada bir havadan havaya (Air-to-Air, A2A) kanal alanındaki veri hızını arttırmak ve kesintisiz veri iletişimi sağlamak için özellikle sabit olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki HAP'lardan en az biri hareketli ve en az biri hareketsiz veya en az ikisi hareketli veya en az ikisi hareketsiz olan ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP'lar arası iletişim için; mmWave frekans bandında çalışan en az bir HAP **içeren**; en az bir verici HAP ve en az bir alıcı HAP olmak üzere, söz konusu alıcıda ve vericide en az bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) özelliğine sahip $N \times N$ yönlü Düzgün Dikdörtgen Düzlemsel Dizi (URPA) anten içeren en az iki HAP'ın iletişim kurduğu yer ve iletilen sinyal üzerinde oluşturulan hüzmeye 3 boyutlu alıcı-verici hareket geometrisini analiz ederek, havadan havaya (Air-to-Air, A2A) olmak üzere HAP'ların yükseklik, hız ve yörüngesini de hesaba katan analitik üç boyutlu (3D) bir geometrik kanal modelini çalıştıran ve ayrıca bahsedilen alıcı HAP ve verici HAP tarafında her bir antenin faz açılarını uygun şekilde doğru yöne ayarlanmasını yani her bir antenin optimizasyonu yaparak istenen hüzmeyi gerçekleştiren ve ayrıca bahsedilen hüzmeyi elde etmek için gerekli tüm kontrol/analiz ve hesaplamaları yapan en az bir kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** bir sistem.
2. h1 ve h2 rakımlarına sahip bir A2A kanalı üzerinden birbiriyle mmWave yani 30-300GHz frekans bandında iletişim kuran ve her zaman iterasyonunda (t_i), herhangi bir kısıtlı yörünge olmadan hareket eden en az 2 HAP için yön açılarının zamanla değişen hem azimut hem de yükseklik alanlarına bağlı olduğunun varsayıldığı ve söz konusu HAP'lar üzerinde yer alan antenlerin yönlendirme yönlerinin, HAP'ların yön açılarına göre antenlerin faz açıları değiştirilerek ayarlandığı bir 3D alıcı-verici modelini çalıştıran en az bir kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** istem 1'deki gibi bir sistem.
3. HAP'lar üzerine konumlandırılan anten sayısı ve anten dizilimine (URPA) bağlı olarak hüzmeye yapan kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** istem 2'deki gibi bir sistem.
4. HAP'ların ani dönüşlerinin olması sebebiyle ani dönüşlerin de hesaba katılmasını sağlayan söz konusu en az bir HAP için hız, azimut yönü ve yükseklik yönü vektörlerini her zaman iterasyonunda (t_i) (yinelemesinde) hesaplamaya dahil edildiği bir Gauss-Markov/3D rastgele yürüyüş hareketlilik modelini dahil ederek sistemi çalıştıran ve gerekli tüm kontrolleri/analizleri yapan kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** istem 3'deki gibi bir sistem.

5. Yaklaşık 100 m/sn yüksek hızlarda hareketliliğin ve bunun sonucunda ortaya çıkan Doppler kaymasının varlığında yani HAP'ların hareketinden kaynaklanan, hem açısal hem de frekans bileşenlerini göz önünde bulundurarak, frekans kayması sebebiyle Doppler'in etkisini dahil ederek sistemi çalıştıran ve gerekli kontrolleri/analizleri yapan kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** istem 3 veya 4'deki gibi bir sistem.

6. Görüş Hattı Dışı (NLoS) koşulları, Kalkış (AAOD) Azimut Açısı, Kalkış Yükseklik Açısı (EAOD), lokal saçıcıların Varış Azimut Açısı (AAOA) ve Yükseklik Varış Açısı (EAOA) tanımlayarak HAP'lar arası iletişimi bir Doppler etkisine göre hesaplayarak sistemi çalıştıran ve gerekli kontrolleri/analizleri yapan kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** istem 5'deki gibi bir sistem.

7.

$$C = \sum_{p=1}^{N_c} \log_2 (1 + \gamma_p). \quad (46)$$

formülüne göre iletilen sinyalin kapasite hesabını yapan kontrol ünitesi ile **karakterize edilen** istem 6'daki gibi bir sistem.

8. Zaman-seçici kanalın varlığı dikkate alınarak sinyal kapasitesi ve gelen ışının yön açıları (θ^{Rx}, ϕ^{Rx}) seçilen odak açılarına $(\theta^{Rx}, F, \phi^{Rx}, F)$ göre ışın kazancı ve Olasılık Yoğunluğu Fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) açısından hesaplamalara katarak sistemi çalıştıran ve gerekli kontrolleri/analizleri yapan en az bir kontrol ünitesi içermesi ile **karakterize edilen** istem 7'deki gibi bir sistem.

9. Sinyali belirli bir açıyla alıcıya odaklamak için her analog anten elemanına faz kaydırıcıların konumlandırılmasıyla ışın hizalamasını yapan MIMO alıcı-verici anten içermesi ile **karakterize edilen** istem 8'deki gibi bir sistem.

10. Eşit sayıda, homojen diziliimli, 30-300GHz'lik yüksek frekanslarda çalışabilen, beamforming (hüzmeleme) yapmaya uygun ve önceden belirlenmiş mesafede dörtgen şeklinde periyodik sıralanmış HAP-1'deki verici anten sayısı (NT_x) ve HAP-2'deki alıcı anten sayısı (NR_x) içeren HAP'lar ile **karakterize edilen** istem 9'daki gibi bir sistem.

TARİFNAME

YÜKSEK İRTİFA AĞLARINDA HAP'LAR ARASI İLETİŞİM İÇİN BİR SİSTEM

Teknik Alan

- 5 Buluş, özellikle sabit olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki hareketli ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP'lar arası iletişim için bir sistem ile ilgilidir.

Tekniğin Bilinen Durumu

- 10 Gelecekteki kablosuz iletişim sistemlerinin artan gereksinimleri, yüksek veri hızları, güvenilirlik ve düşük gecikme süresi gibi, Karasal Olmayan Ağların (Non-Terrestrial Networks, NTN) aktif kullanımını kaçınılmaz bir gereklilik haline getirmektedir. Bu bağlamda, Yüksek İrtifa Platformları (High Altitude Platforms, HAPs); yüksek kapsama alanı, uzun süreli operasyonel dayanıklılık ve geçici (ad-hoc) hareket gibi benzersiz özellikleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Ancak, HAP'ların aktif kullanımı
- 15 için, çeşitli kullanım senaryolarına yönelik kanal modellerinin, özellikle veri hızını artırmak için hüzmeme gibi karmaşık Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) tekniklerinin kullanıldığı durumlarda, iyi tanımlanması gerekir. Mevcut teknik ve mevcut tekniğin eksiklik/dezavantajlarını daha iyi anlamak adına, referans numaraları ile bilimsel çalışmalar, aşağıdaki paragraflarda atıf yapılmak suretiyle verilmiştir.

- 20 Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarının ve internet kullanıcılarının çeşitli bölgelerdeki eşit olmayan dağılımı nedeniyle şehir merkezleri, engebeli araziler, kırsal köyler, geniş okyanuslar ve daha birçok diğer zorlu ortamlarda, yeterli kapsamanın sağlanması, yüksek Hizmet Kalitesinin (QoS) sağlanmasında kritik bir faktör haline gelmiştir [1]. Bu bağlamda
- 25 Beşinci Nesil (5G), NTN kullanımını ilk kez hayata geçirmiş ve tam kapsama sağlama yolunda olası zorlukları ortadan kaldırmak için NTN'deki Yeni Radyonun (NR) özellikleri tanımlanmıştır [2], [3].

- Ancak, Karasal Olmayan Ağları (NTN'yi) mevcut iletişim ağlarının içinde uygulanmasına yönelik bazı erken girişimler olsa da, çoğunlukla Karasal Baz İstasyonlarından (Base Stations, BSs) oluşan mevcut 5G standartlarının, 6G çağında Dünya yüzeyinin tamamını
- 30 kapsayacak tatmin edici bir çözüm sağlayacağı mümkün görünmemektedir [4].

Öte yandan, 5G ve 6G ağlarındaki mmWave ve MIMO sistemlerinin benimsenmesi, kablosuz teknolojiye olan talebin artmasıyla, bağlı cihazların ve internet uygulamalarının çoğalmasından kaynaklanan mevcut spektrumun kıtlığı nedeniyle motive edilmektedir [5].

5G'nin kullanıma sunulmasıyla birlikte, 30-300 GHz aralığında çalışan mmWave, milyarlarca cihaz için bol bant genişliği, düşük gecikme süresi ve gigabit hızında bağlantı sağlamak üzere kullanılmaktadır [6]. Ancak, mmWave spektrumunun kullanılması, yol kaybı, penetrasyon kaybı, gölgeleme, atmosferik zayıflama ve donanım sınırlamaları gibi zorlukları beraberinde getirir. Buna karşılık, her endüstri ve hem de akademi, dış mekan 5G hücresel ağlarda mmWave'in kullanımını olanaklı kılmak için yenilikçi MIMO teknikleri ve kanal modelleri üzerinde çalışmaktadır.

HAP iletişim sistemlerine mmWave ve MIMO teknolojilerinin uygulanması, spektral verimliliği artırabilir. Ancak, 6G çağının gelişiyle birlikte, uzun mesafeli karasal olmayan havadan havaya (A2A) ve havadan yere (A2G) uygulamalar için yeni iletim teknikleri ve kanal modellerine olan gereksinim, 5G vizyonunu tamamlamak ve yeni nesil iletişim ağlarına dünyayı hazırlamak için her zamankinden daha fazladır.

Şunu belirtmek gerekir ki literatürde önerilen A2A/A2G kanal modellerinin çoğunluğu, alçak irtifa İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) için geliştirilmiştir. Ancak hem Alçak Dünya Yörünge (LEO) uyduları gibi uzaydaki terminallerin hem de dronlar gibi alçak irtifalı havadan taşınan İHA'ların bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu bağlamda, iki HAP'ın bir A2A kanalı üzerinden iletişim kurduğu senaryoda, mmWave bandında hüzmeme kullanımını analiz etmek ve modellemek gerekmektedir.

Öte yandan mevcut teknik olan [7] numaralı referansta, İHA iletişimi için geometrik bir A2A kanal modeli sunulmaktadır. Önerilen kanal modeli, sabit-olmayan İHA ağları hakkında bazı aydınlatıcı bilgiler sağlamasına rağmen, bu model mmWave bandının özelliklerini araştırma fırsatını kaçırmaktadır. [7]'den farklı olarak, [8] ve [9]'daki çalışma, mmWave MIMO teknolojisini kullanan sabit-olmayan İHA ağları için geometrik bir A2A kanal modelini temsil etmektedir. Her ne kadar bu çalışmalarda önerilen kanal modeli, mmWave bandının kullanımı hakkında bazı değerli bilgiler sağlasa da sabit-olmayan İHA iletişimlerinde MIMO ile, yüksek frekans bantlarının kullanımına yönelik temel tekniklerden biri olan hüzmeme karakterizasyonu yapılmamaktadır.

[10]'da geometrik bir yaklaşım kullanarak İHA ağları için ayrıntılı bir kanal modeli analizi sağlanmıştır (Dabiri ve ark.). Çalışma üç senaryoya odaklanmaktadır: ilki A2A bağlantı senaryosu, ikincisi yerden havaya ve havadan yere bağlantı senaryosu ve son olarak ortada bir röle görevi gören bir İHA tarafından güçlendirilen iki İHA arasındaki iletişimin sağlandığı bir senaryodur. Bu senaryolar için önerilen kanal modelleri, birden fazla anten elemanının yerleştirilmesiyle yönlü hüzmeye İHA'ların performans gösterebileceği varsayımı altında yürütülmektedir. Ancak model, İHA'ların hareketliliğini göz ardı ederek, Doppler kayması, ışın kayması vb. gibi yalnızca hareketli senaryolarda gözlemlenebilen bazı aydınlatılmamış alanları bırakan, bir havada asılı kalma senaryosuna odaklanmaktadır.

- 10 Ayrıca, alçak irtifa A2A ve A2G iletişim bağlantıları için bazı kanal modelleri, [16]–[18]'de verilen HAP ağları için bazı kanal modelleriyle birlikte [11]–[15]'te sunulmuştur.

Mevcut A2A literatürü, ağırlıklı olarak alçak irtifa hava terminallerine dayanmasına rağmen, HAP'lar arası iletişim bağlantılarının kanal özelliklerine ilişkin bazı bilgiler de sağlar. Bunlar, HAP ağları için yüksek irtifa A2A kanalını karakterize etmek için doğrudan benimsenemez. Şunu belirtmek gerekir ki, literatürde önerilen A2A/A2G kanal modellerinin çoğunluğu alçak irtifa İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) için geliştirilmiştir. İHA'lar genellikle alçak irtifalarda uçtukları için genellikle Tx'in çevresinde saçıcılar bulunur. Bu bağlamda, saçılmanın olmadığı iletişim senaryoları geliştirmek gerekmektedir.

- 20 Verilen referans dokümanların haricinde tekniğin bir diğer bilinen durumunda yer alan “*A Survey on Millimeter-Wave Beamforming Enabled UAV Communications and Networking*” başlıklı dokümanda UAV'lar için mmWave dalga boyunda 3-boyutlu hüzmeye (beamforming) yönelik çalışmalar değerlendirilmektedir. Ancak yapılan bu çalışma düşük irtifalı drone ağları için yapılmış olup, HAP sistemlerine yönelik yeteri kadar açıklayıcı bir bilgilendirme yapmamaktadır. Düşük irtifalı drone ağlarında her bir dronun yüksekliği birkaç yüz metreyi geçmez iken, HAP ağlarında bu irtifa 20 km'ye kadar ulaşabilmektedir. Ayrıca düşük irtifalı drone ağlarında kullanılan dronların hızı, 120m/s hıza kadar çıkabilen HAP'lar ile karşılaştırıldığında çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Dolayısıyla, HAP ağları ile drone ağları aynı kategoride değildir. Ayrıca verilen çalışmada bahsedilen URPA kullanımı, ebat olarak oldukça küçük olan drone araçlarında yüksek frekanslarda kullanıma uygun değildir.
- 30

Verilen referans dokümanların haricinde tekniğin bir diğer bilinen durumunda yer alan “*A Geometry-Based Beamforming Channel Model for UAV mmWave Communications*” başlıklı dokümanında A2G ağında haberleşme için HAP sistemlerde hüzmeye (beamforming) yönelik bir çalışma açıklanmıştır. Burada kırsal alandaki araç iletişimi göz önüne alınmıştır. Ayrıca URPA anten kullanımı da bu çalışmada açıklanmıştır. Çalışmada açıklanan A2G ağlarda karasal olmayan erişim noktası, oldukça yüksek hızlarda (120 m/s’ye kadar) hareket edebilmektedir. Ancak karasal araç kullanıcıları için aynı şey söylenemez. Ancak bu çalışmada, alıcı tarafın hareketi 2 boyutta verilmiş olup, yörüngesi de her ne kadar kesin bir kalıba sokulmamış olsa da araçların gittiği yollar tarafından kısıtlandırılmıştır.

- Özetle, mevcut tekniğin eksikliklerinden dolayı özellikle HAP ağları için yüksek irtifa A2A kanal alanındaki iletişim sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Mevcut teknikte, sabit-olmayan İHA iletişimlerinde MIMO ile, yüksek frekans bantlarının kullanımına yönelik temel tekniklerden biri olan hüzmeye karakterizasyonu yapılmamaktadır.

Mevcut teknikte yer alan ve bu bölümde de referans numaralarına atıfta bulunmak suretiyle verilmiş bilimsel kaynakların detayları aşağıda verilmiştir:

Referanslar:

- [1] B. Li, Z. Fei, and Y. Zhang, “UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, pp. 2241–2263, 2018.
- [2] M. Kırık, N. A. Abusanad, and H. Arslan, “Inter-HAP based geometrical 3-D channel model operating at 28 to 60 GHz for future 6G non-terrestrial networks,” in IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2023, pp. 1–5.
- [3] Y. I. Demir, M. S. J. Solaija, and H. Arslan, “On the performance of handover mechanisms for non-terrestrial networks,” in IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring). IEEE, 2022, pp. 1–5.
- [4] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, 2019.
- [5] L. Afeef and H. Arslan, “Beam squint effect in multi-beam mmWave massive MIMO systems,” in IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). IEEE, 2022, pp. 1–5.

- [6] X. Wang, L. Kong, F. Kong, F. Qiu, M. Xia, S. Arnon, and G. Chen, "Millimeter wave communication: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1616–1653, 2018.
- [7] Z. Ma, B. Ai, R. He, G. Wang, Y. Niu, and Z. Zhong, "A wideband non-stationary air-to-air channel model for UAV communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 1214–1226, 2019.
- [8] Z. Ma, B. Ai, R. He, Z. Zhong, M. Yang, J. Wang, L. Pei, Y. Li, and J. Li, "Three-dimensional modeling of millimeter-wave MIMO channels for UAV-based communications," in *GLOBECOM. IEEE*, 2020, pp. 1–6.
- [9] Z. Ma, B. Ai, R. He, Z. Zhong, and M. Yang, "A non-stationary geometry-based MIMO channel model for millimeter-wave UAV networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 10, pp. 2960–2974, 2021.
- [10] M. T. Dabiri, H. Safi, S. Parsaeefard, and W. Saad, "Analytical channel models for millimeter wave UAV networks under hovering fluctuations," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2868–2883, 2020.
- [11] H. Jiang, Z. Zhang, and G. Gui, "Three-dimensional non-stationary wideband geometry-based UAV channel model for A2G communication environments," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26 116–26 122, 2019.
- [12] L. Zeng, X. Cheng, C.-X. Wang, and X. Yin, "A 3D geometry-based stochastic channel model for UAV-MIMO channels," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [13] X. Mao, C.-X. Wang, and H. Chang, "A 3D non-stationary geometry-based stochastic model for 6G UAV air-to-air channels," in *13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. IEEE, 2021, pp. 1–5.
- [14] H. Jiang, B. Xiong, H. Zhang, and E. Basar, "Physics-based 3D end-to-end modeling for double-RIS assisted non-stationary UAV-to-ground communication channels," *IEEE Transactions on Communications*, 2023.
- [15] C. Cao, Z. Lian, Y. Wang, Y. Su, and B. Jin, "A non-stationary geometry-based channel model for IRS-assisted UAV-MIMO channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 3760–3764, 2021.

- [16] Z. Lian, Y. Su, Y. Wang, and L. Jiang, "A non-stationary 3-D wideband channel model for intelligent reflecting surfaceassisted HAP-MIMO communication systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 1109–1123, 2021.
- [17] Z. Lian, L. Jiang, C. He, and Q. Xi, "A novel channel model for 3-D HAP-MIMO communication systems," in *International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [18] Z. Lian, L. Jiang, C. He, and D. He, "A non-stationary 3-D wideband GBSM for HAP-MIMO communication systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1128–1139, 2018.
- [19] B. Liang and Z. J. Haas, "Predictive distance-based mobility management for pcs networks," in *IEEE INFOCOM'99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No. 99CH36320)*, vol. 3. IEEE, 1999, pp. 1377–1384.
- [20] K.-H. Chiang and N. Shenoy, "A 2-D random-walk mobility model for location-management studies in wireless networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 413–424, 2004.
- [21] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.
- [22] J. Ariyakhajorn, P. Wannawilai, and C. Sathitwiriyawong, "A comparative study of random waypoint and Gauss-Markov mobility models in the performance evaluation of manet," in *International Symposium on Communications and Information Technologies*. IEEE, 2006, pp. 894–899.
- [23] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel, "Flying ad-hoc networks (fanets): A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [24] P. Aguiar, D. Brett, and N. Brandon, "Solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system analysis for high-altitude longendurance unmanned aerial vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 23, pp. 7214–7223, 2008.

[25] Z. Ma, B. Ai, R. He, and Z. Zhong, “A 3D air-to-air wideband non-stationary channel model of UAV communications,” in 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). IEEE, 2019, pp. 1–5.

[26] W. Tan, S. D. Assimonis, M. Matthaiou, Y. Han, X. Li, and S. Jin, “Analysis of different planar antenna arrays for mmWave massive MIMO systems,” in 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2017, pp. 1–5.

[27] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of wireless communication. Cambridge university press, 2005.

[28] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, “Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, 2014.

[29] S. Umeyama, “An eigendecomposition approach to weighted graph matching problems,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 10, no. 5, pp. 695–703, 1988.

Buluşun Kısa Açıklaması

Buluşun amacı, yaklaşık 20 km’lik yüksek irtifada bir havadan havaya (Air-to-Air, A2A) kanal alanındaki veri hızını arttırmak ve kesintisiz veri iletişimi sağlamak için özellikle sabit olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki hareketli ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP’lar (Yüksek İrtifa Platformları) arası iletişim için çeşitli kontrolleri/analizleri/hesaplamaları yapan en az bir kontrol ünitesi içeren bir sistem gerçekleştirmektir.

Bu bağlamda, buluşta, iki HAP’ın bir A2A kanalı üzerinden iletişim kurduğu bir senaryoda milimetre dalga (mmWave) bandında (30-300 GHz aralığında dalga bandında yani yüksek frekansta) hüzmleme kullanımı analiz edilmekte ve modellenmektedir.

Mevcut teknikte bahsedilen HAP’ların aktif kullanımı için, çeşitli kullanım senaryolarına yönelik kanal modellerinin, özellikle veri hızını arttırmak için hüzmleme gibi karmaşık Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) tekniklerinin kullanıldığı durumlarda, iyi tanımlanmasını yapmak için buluşta mmWave bandında çalışan, sabit olmayan HAP ağlarının hüzmleme yeteneklerini karakterize etmek için havadan havaya (Air-to-Air, A2A) üç boyutlu (3D) bir geometrik kanal modeli önerilmektedir. Bu bağlamda,

buluşta havadaki iki HAP'ın 3 boyutlu geometrisi analiz edilerek, bir uygulamada Doppler'in HAP'ların hareketinden kaynaklanan etkisi ve Sinyal Gürültü Oranı (SNR) zerindeki etkisi sorgulanmıştır. Doppler etkisi, sinyal yönünün doğru tayin edilmesini olumsuz etkileyen bir etkindir. şekil 5'te gösterildiği gibi Doppler'li kazanç, Doppler'siz kazançtan daha düşüktür. Ancak, sinyal kazancını belirlemek açısından bunun etkisi hesaplamalara dahil edilmelidir. Buluşta nerilen A2A kanal modeli, çok sayıda antenle hzmelemeyi kullanmak için mmWave kullanıldığında gelecekteki Altıncı Nesil (6G) HAP ağlarını karakterize etmek için uygulanabilir.

Ancak, HAP'ları, hem Alçak Dünya Yörüngesi (LEO) uyduları gibi uzaydaki terminallerden hem de dronlar gibi alçak irtifalı havadan taşınan İHA'lardan daha tercih edilebilir kılan benzersiz avantajları vardır. Bu nedenle önerilen kanal modeli HAP'ların iletişimi esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, buluşta, iki HAP'ın bir A2A kanalı üzerinden iletişim kurduğu senaryoda mmWave bandında hüzmeleme kullanımı analiz edilmekte ve modellenmektedir. Buluşta, hüzmelemenin mmWave frekans bandında gerçekleştirildiği bir senaryoda HAP'tan HAP'a bağlantı için, 3 boyutlu geometrik kanal modeli detaylandırılmıştır.

Öte yandan, mevcut teknikten farklı olarak buluşta, HAP araçları, boyutlarından dolayı oldukça fazla sayıda antene (Massive MIMO) ev sahipliği yapabileceğinden, söz konusu antenler çok yüksek frekanslarda çok ince sinyal hüzmelerini zayıflamaya uğramadan iletebilmektedir. Önerilen kanal modellemesinde kullanılan antenler, yüksek frekanslarda çalışabilen beamforming (hüzmeleme) yapmaya uygun ve önceden belirlenmiş mesafede dörtgen şeklinde periyodik sıralanmış çok sayıda antendir. Ayrıca kanal modellemesinin yapıldığı ortam gereği sinyal zayıflamasına sebep olabilecek olası etkenler de yok sayılmıştır. Dolayısıyla sinyaller zayıflamadan iletilebilmektedir. Dolayısıyla, buluş konusu sistem konfigürasyonu ile yüksek frekans bantlarının kullanımına yönelik temel tekniklerden biri olan hüzmeleme (beamforming) karakterizasyonu yapılabilir.

Bilinmektedir ki, yüksek frekanslı sinyallerin dalga boyları oldukça küçüktür. Bu da onları sinyal zayıflamasına (propagation) karşı oldukça savunmasız kılmaktadır. Ancak yine de yüksek veri oranlarına (data rate) ulaşılabilmesi için yüksek frekanslı sinyallerin kullanımı gereklidir. Dolayısıyla mevcut teknikteki sinyal zayıflamasının önüne geçebilmek için beamforming (hüzmeleme) gibi oklu Girdi oklu ıktı (MIMO) tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Buluş konusu sistemde geliştirilen hzmelemedeki temel mantık, oldukça

fazla sayıda anten kullanılarak iletilen sinyalin tıpkı bir lazer ışığı gibi çok ince ama bir o kadar da güçlü olmasını sağlamaktır.

Ayrıca, mevcut teknikten ayrı olarak haberleşmede sinyal alıcı ve verici amaçla kullanılan HAP'lar, 3 boyutlu yörüngede ve kısıtlayıcı bir yörüngeye bağlı olmayacak şekilde serbestçe hareket etmektedir.

Dolayısıyla buluş konusu sistem, yaklaşık 20 km yüksek irtifada bir havadan havaya (Air-to-Air, A2A) kanal alanındaki veri hızını arttırmak ve kesintisiz veri iletişimi sağlamak için özellikle sabit olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki HAP'lardan en az biri hareketli ve en az biri hareketsiz veya en az ikisi hareketli veya en az ikisi hareketsiz olan ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP'lar arası iletişim için; mmWave frekans bandında çalışan en az bir HAP içermektedir. Ayrıca sistem, en az bir verici HAP ve en az bir alıcı HAP olmak üzere, söz konusu alıcıda ve vericide en az bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) özelliğine sahip $N \times N$ yönlü Düzgün Dikdörtgen Düzlemsel Dizi (URPA) anten içeren en az iki HAP'ın iletişim kurduğu yer ve iletilen sinyal üzerinde oluşturulan hüzmeye 3 boyutlu alıcı-verici hareket geometrisini analiz ederek, havadan havaya (Air-to-Air, A2A) olmak üzere HAP'ların yükseklik, hız ve yörüngesini de hesaba katan analitik üç boyutlu (3D) bir geometrik kanal modelini çalıştıran ve ayrıca bahsedilen alıcı HAP ve verici HAP tarafında her bir antenin faz açılarını uygun şekilde doğru yöne ayarlanmasını yani her bir antenin optimizasyonu yaparak istenen hüzmeyi gerçekleştiren ve ayrıca bahsedilen hüzmeyi elde etmek için gerekli tüm kontrol/analiz ve hesaplamaları yapan en az bir kontrol ünitesi içermektedir. Bahsedilen kontrol ünitesi, h_1 ve h_2 rakımlarına sahip bir A2A kanalı üzerinden birbiriyle mmWave yani 30-300GHz frekans bandında iletişim kuran ve her zaman iterasyonunda (t_i), herhangi bir kısıtlı yörünge olmadan hareket eden en az 2 HAP için yön açılarının zamanla değişen hem azimut hem de yükseklik alanlarına bağlı olduğunun varsayıldığı ve söz konusu HAP'lar üzerinde yer alan antenlerin yönlendirme yönlerinin, HAP'ların yön açılarına göre antenlerin faz açıları değiştirilerek ayarlandığı bir 3D alıcı-verici modelini çalıştırmaktadır.

Ayrıca kontrol ünitesi, HAP'lar üzerine konumlandırılan anten sayısı ve anten dizilimine (URPA) bağlı olarak hüzmeye yapmakta ve HAP'ların ani dönüşlerinin olması sebebiyle ani dönüşlerin de hesaba katılmasını sağlayan söz konusu en az bir HAP için hız, azimut yönü ve yükseklik yönü vektörlerini her zaman iterasyonunda (t_i) (yinelemesinde) hesaplamaya dahil edildiği bir Gauss-Markov/3D rastgele yürüyüş hareketlilik modelini

dahil ederek sistemi çalıştırmakta ve gerekli tüm kontrolleri/analizleri yapmaktadır. Öte yandan kontrol ünitesi, yaklaşık 100 m/sn yüksek hızlarda hareketliliğin ve bunun sonucunda ortaya çıkan Doppler kaymasının varlığında yani HAP'ların hareketinden kaynaklanan, hem açısal hem de frekans bileşenlerini göz önünde bulundurarak, frekans kayması sebebiyle Doppler'in etkisini dahil ederek sistemi çalıştırmakta ve gerekli kontrolleri/analizleri yapmaktadır. Diğer yandan, kontrol ünitesi, Görüş Hattı Dışı (NLoS) koşulları, Kalkış (AAOD) Azimut Açısı, Kalkış Yükseklik Açısı (EAOD), lokal saçıcıların Varış Azimut Açısı (AAOA) ve Yükseklik Varış Açısı (EAOA) tanımlanarak HAP'lar arası iletişimi bir Doppler etkisine göre hesaplayarak sistemi çalıştıran ve gerekli kontrolleri/analizleri yapmaktadır. İlgili kontrol ünitesi, zaman-seçici kanalın varlığını dikkate alarak sinyal kapasitesi ve gelen ışının yön açıları (θ^{Rx} , ϕ^{Rx}) seçilen odak açılarına (θ^{Rx}, F , ϕ^{Rx}, F) göre ışın kazancı ve Olasılık Yoğunluğu Fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) açısından hesaplamalara katarak sistemi çalıştırmakta ve gerekli kontrolleri/analizleri yapmaktadır.

Buluş konusu sistemin içerdiği MIMO alıcı-verici antenler, sinyali belirli bir açıyla alıcıya odaklamak için her analog anten elemanına faz kaydırıcıların konumlandırılmasıyla ışın hizalamasını yapmaktadır.

Buluş konusu sistemin içerdiği HAP'lar, eşit sayıda, homojen diziliimli, 30-300GHz'lik yüksek frekanslarda çalışabilen, beamforming (hüzmeleme) yapmaya uygun ve önceden belirlenmiş mesafede dörtgen şeklinde periyodik sıralanmış HAP-1'deki verici anten sayısı (NT_x) ve HAP-2'deki alıcı anten sayısı (NR_x) içermektedir.

Sekillerin Açıklaması

Şekil 1. Buluşta bahsedilen HAP-1'in hız ve yön vektörlerini gösteren grafik (a) Hız vektörü (b) azimut yön vektörü (c) yükseklik yön vektörü

Şekil 2. Buluşta bahsedilen HAP-2'nin hız ve yön vektörlerini gösteren grafik (a) Hız vektörü (b) azimut yön vektörü (c) yükseklik yön vektörü

Şekil 3. Verilen bir zaman periyodu için havada HAP-1 ve HAP-2'nin konumlarını gösteren grafik

Şekil 4. Buluşta önerilen senaryonun alıcı ve verici yapılarını gösteren temsili çizimler (a) Verici yapı (b) Alıcı yapı

Şekil 5. $NT_x = 16$ ve $(\theta_{Rx,F}, \phi_{Rx,F}) = (60, 30)$ için, t_i anında ışın kazancının Doppler etkili ve Doppler etkisiz gösterim

Sekillerdeki Referansların Açıklaması

- 5 Buluşun daha iyi anlaşılabilmesi için şekillerdeki referansların/numaraların karşılığı aşağıda verilmiştir:

DA1: HAP-1'in azimut alanındaki yön açısı

DE1: HAP-1'in yükseklik alanındaki yön açısı

- 10 **DA2:** HAP-2'nin azimut alanındaki yön açısı

DE2: HAP-2'nin yükseklik alanındaki yön açısı

θ^{Tx} : HAP-1'in azimut alanındaki faz açısı

ϕ^{Tx} : HAP-1'in yükseklik alanındaki faz açısı

θ^{Rx} : HAP-2'nin azimut alanındaki faz açısı

- 15 **ϕ^{Rx} :** HAP-2'nin yükseklik alanındaki faz açısı

Buluşun Detaylı Açıklaması

- Buluş, yaklaşık 20 km'lik yüksek irtifada bir havadan havaya (Air-to-Air, A2A) kanal alanındaki veri hızını arttırmak ve kesintisiz veri iletişimi sağlamak için özellikle sabit
- 20 olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki hareketli ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP'lar arası iletişim için çeşitli kontrolleri/ analizleri/ hesaplamaları yapan en az bir kontrol ünitesi içeren bir sistem ile ilgilidir. Söz konusu kontrol ünitesi, en az bir antenin faz açısının doğru yöne doğru ayarlanmasını da gerçekleştirmektedir. Buluşta, hüzmeleme yapılan sinyalin faz açılarının kayması ve kaymaması durumunda elde edilecek
- 25 Sinyal Girişim Artı Gürültü Oranı (Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR) ve kapasite hesaplamaları buna göre verilmiştir. Buluşta, mmWave frekans bandında (30-300GHz) çalışan, sabit olmayan HAP ağlarının hüzmeleme yeteneklerini karakterize etmek için havadan havaya (Air-to-Air, A2A) üç boyutlu (3D) bir geometrik kanal modeli önerilmektedir. Bu bağlamda, buluşta havadaki iki HAP'ın 3 boyutlu geometrisi analiz
- 30 edilerek, bir uygulamada Doppler'in HAP'ların hareketinden kaynaklanan etkisi ve Sinyal Gürültü Oranı (SNR) üzerindeki etkisi sorgulanmıştır. Buluşta HAP'lar üzerine konumlandırılan anten sayısı ve anten dizilimine (URPA) bağlı olarak hüzmeleme

yapılmaktadır. Doppler ve mobility (hareketlilik), hüzmelenin yapılacağı yönü etkilemektedir.

Buluştta, gelecekteki 6G FANET'lerdeki HAP'ların hüzmleme özelliklerini temsil etmek için, mmWave bandında çalışan analitik bir 3 boyutlu kanal modeli önerilmiştir. Bu bağlamda, $N \times N$ yönlü Düzgün Dikdörtgen Düzlemsel Dizi (URPA) antenleri ile donatıldığı düşünülen iki HAP'ın, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) özellikleri bir uygulamda, yüksek hareketliliğin ve bunun sonucunda ortaya çıkan Doppler kaymasının varlığında sorgulanmıştır. Ayrıca buluşun bir diğer uygulamasında, gerçek-hayat senaryolarında HAP'ların daha doğru hareket tahminini sağlamak için ortak bir Gauss-Markov/3D rastgele yürüyüş hareketlilik modeli tanıtılmıştır. Buluşta önerilen model, matematiksel türetmelerle kanıtlanmış ve bunların geçerliliği Monte-Carlo simülasyonları tarafından pekiştirilmiştir. Aşağıda detayları verilen Sinyal Girişim Artı Gürültü Oranı (Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR), sinyal kapasitesi, ışıın kazancı ve Olasılık Yoğunluğu Fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) açısından hesaplama ve simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, gelecekteki havadan Karasal Olmayan Ağların (Non-Terrestrial Networks, NTN) sunabileceği gereksinimleri karşılama konusunda büyük bir potansiyele sahip olan iki hareketli HAP arasında yüksek frekanslarda hüzmlemeiletişiminin uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır.

Özetle, hüzmlemelerde etki eden ve etki etmeyen etmenler şu şekildedir:

$N \times N$ yönlü URPA: Anten sayısı arttıkça daha iyi (daha güçlü ve daha ince) bir sinyal olacak şekilde, hüzmleme yapılabilirlerdir.

MIMO özellikleri: Buluş konusu sistem üç boyut (3D) üzerine düşünüldüğü için URPA antenleri kullanılmıştır. İki boyutlu (2D) sistemlerde kullanılan lineer anten oryantasyonlarının kullanımının önerilen senaryoda uygun olmayacağına kanaat getirilmiştir.

Diğer etkenler: Doppler etkisi, Gauss-Markov/3D random walk etkisi, hüzmleme yapılmasında etkili değildir, ancak hüzmleme yapılan sinyalin alıcı tarafa aktarıldığından emin olunabilmesi için bu kavramlar da göz önünde bulundurulmalı ve yapılan

hesaplamalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda hüzmleme yapılan sinyalin 3D yönü buna göre hesaplanmalıdır.

Alçak irtifa uçan İHA'ların maruz kaldığı saçılmaların aksine çoğu HAP iletişim senaryosunda yüksek uçuş irtifasından dolayı Verici Antenlerin (Tx) çevresinde saçılma yoktur. Bu nedenle HAP haberleşmesi için geliştirilen kanal modelleri, İHA haberleşmesinin A2A senaryolarına doğrudan uygulanamaz. Buluş ile HAP-HAP bağlantıları için yeni bir kanal modeli önerilmiştir:

i.) mmWave gibi daha yüksek frekans bantlarında kanalın özellikleri, büyük ölçüde saçıcılar ve reflektörler gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Bunun nedeni, bu bantlardaki kısa dalga boyu, sinyalin bir ışın gibi davranmasına ve çoklu bir yol oluşturmaktan çok, doğrultusundan sapmasına neden olur. Bu sapmaları karakterize etmek için, geometrik kanal modelleri, literatürde deterministik veya stokastik kanal modellerinden daha yoğun olarak kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, alçak irtifa İHA'ları ve HAP'ların özellikleri çevresel açıdan belirleyici farklılıkları olmaları nedeniyle aynı kanal modeliyle değerlendirilemez. HAP'ların çalıştırıldığı yükseklikte; binalar, araçlar, bulutlar vb. gibi olası saçıcı ve reflektörlerin mevcut olmaması nedeniyle, iletilen sinyal ışınının geometrisinin HAP'lar için özel olarak analiz edilmesi gerekir. Bu sebeple, buluş, bu senaryolar için mmWave bandında bir A2A kanalı üzerinden iki sabit olmayan HAP'ın iletişim kurduğu yer ve iletilen sinyal üzerinde oluşturulan hüzmde ayrıntılı bir 3 boyutlu geometrik kanal modeli analizi sunmaktadır.

ii.) HAP'lar için yükseklik, hız ve yörüngeyi de hesaba katan kapsamlı bir hareketlilik modeli önerilmiştir. Model HAP'ların çeşitli çevresel faktörlerin varlığındaki davranışlarını anlamak için gerekli olan sınırsız hareket yeteneklerinin karakterizasyonuna izin vermektedir. Bu katkı, HAP'ların hareket özelliklerine göre performansını tahmin etmek ve optimize etmek için bir araç sağlar.

iii.) Buluş, bir verici ve bir alıcı HAP arasındaki MIMO ve hüzmleme özelliklerini matematiksel olarak analiz eder ve sonuçları simülasyonlarla birleştirir. Özellikle, buluşta, iki HAP'ın göreceli konumlarının, yönelimlerinin ve hüzmleme parametrelerinin iletişim bağlantı kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hüzmleme, kablosuz iletişim sistemlerinin performansını artırmak için kritik bir tekniktir ve buluşta gerçekleştirilen

analiz, HAP ağlarını optimize etmek için hüzmelemenin nasıl kullanılabileceğine dair fikir vermektedir.

iv.) Buluşta, ışın yönü yanlış hizalandığında alınan sinyalin performansı üzerindeki Doppler etkisi de araştırılmıştır. Buluşçular, Doppler etkisinin hem açısal hem de frekans bileşenlerini göz önünde bulundurarak bunların alınan sinyalin kalitesini nasıl etkilediğini incelediler. Buna göre, Doppler, kablosuz iletişim sistemlerinin performansında önemli bozulmalara neden olabilmektedir. Bu ise, HAP ağlarını nasıl etkilediğinin anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu analiz sonuçları, Doppler'in etkilerini azaltabilecek daha sağlam iletişim sistemlerinin tasarımına bilgi sağlamak için kullanılabilir;

I. SİSTEM MODELİ

A. Alıcı-Verici Modeli

Bu senaryoda, oldukça mobil iki HAP'ın sırasıyla h_1 ve h_2 rakımlarına sahip bir A2A kanalı üzerinden birbiriyle iletişim kurduğu varsayılmaktadır. HAP'ların doğası sebebiyle, her zaman iterasyonunda (t_i), herhangi bir kısıtlı yörünge olmadan hareket etmelerine olanak tanınır, burada HAP'ların konumlarının tahmin edilemez olduğu varsayılmaktadır. Bu senaryoda, iletilen sinyalin kısa dalga boyundan kaynaklanan şiddetli yol kaybı nedeniyle, iki HAP arasındaki 3 boyutlu mesafenin (D_{3D}) sınırlı olduğu varsayılır ve iki HAP arasındaki iki boyutlu (D_{2D}) mesafenin (D_{2D}) h_1 ve h_2 ile birlikte D_{3D} 'e bağlı olarak değiştiği varsayılır.

Bu çalışmanın temel amacı, Uçan Geçici Ağlarda (FANET'ler) hüzmeleme uygulamaları için A2A kanalını karakterize etmektir. Bu nedenle, taşıyıcı frekansı (f_c) şu şekilde seçilir: bir mmWave bant çalışma frekansı ve her bir HAP'ın $N \times N$ yönlü Düzgün Dikdörtgen Düzlemsel Dizi (URPA) antenleri ile donatıldığı varsayılır. Çalışma frekansının mmWave bandında olması ve iletilen sinyale hüzmelemenin uygulanması nedeniyle, her zaman iterasyonunda (yinelemede) iki HAP'ın konum vektörlerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekir. Bu nedenle önerilen kanal modelinde bir 3 boyutlu yaklaşım benimsenmiştir. Buna göre, HAP-1 ve HAP-2'nin yön açılarının zamanla değişen hem azimut hem de yükseklik alanlarına bağlı olduğu varsayılmaktadır. HAP-1'in azimut ve yükseklik alanlarındaki yön açıları sırasıyla DA_1 ve DE_1 olarak, HAP-2 için ise bu açılar DA_2 ve DE_2 olarak verilmiştir. HAP'ların zaman içindeki hareket yönleri rastgele ve bağımsız olduğundan, bir HAP'tan iletilen sinyal ışınlarının diğer HAP'ın alıcısıyla mükemmel şekilde hizalanması her zaman

garanti edilmeyecektir. Çünkü HAP'ların hareket yönleri ile anten yönleri aynı kabul edilirse her yön değişikliğinde aralarındaki iletişim bozulacaktır. Bu nedenle iki HAP arasındaki iletişimin sürekliliğini sağlamak amacıyla, HAP'lar üzerinde yer alan antenlerin yönlendirme yönleri, HAP'ların yön açılarına göre antenlerin faz açıları değiştirilerek ayarlanması gerekmektedir. Bu bağlamda, sırasıyla açılar (θ_1, ϕ_1) HAP-1'in azimut ve yükseklik alanlarındaki faz açıları olarak, (θ_2, ϕ_2) ise HAP-2'nin azimut ve yükseklik alanlarındaki faz açıları olarak verilmiştir.

Belirtmek gerekir ki, sinyale uygulanan hüzmleme antenler sayesinde yapılmaktadır. Hem verici hem alıcı tarafında her bir antenin faz açıları uygun şekilde oryante edildiğinde hüzmleme yapılabilmektedir. Hüzmleme yaparak dalgaboyu çok düşük olan sinyallerin uzun mesafelerde zayıflamasını engellemek amaçlanmaktadır. Hüzmleme yapmanın amacı, veri oranını arttırabilme kabiliyetine sahip yüksek frekanslı sinyallerin zayıflamasını önlemektir. HAP'ların öngörülemeyen anlık hareketleri sadece bu hüzmleme yapılmış sinyallerin istenilen yöne değil de farklı bir yöne gitmesine sebep olur ki, bu da istenmeyen bir durum dolayısıyla bu anlık hareketlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Öte yandan belirtmek gerekir ki buluş konusu sistemde kullanılan hüzmleme tekniği, çok fazla sayıda ($N \times N$ yönlü URPA) anten kullanılarak yüksek frekanslı sinyallerin uzun mesafeleri zayıflamaya uğramadan kat edebilmesini sağlayan bir MIMO tekniğidir.

B. Hareketlilik Modeli

Bu çalışmada Gauss-Markov hareketlilik modeli [19], bir 3 boyutlu rastgele yürüyüş hareketlilik modeli [20] ile birlikte kullanılmıştır. Buluşta, böyle bir işbirlikçi hareketlilik modelinin benimsenmesinin nedeni, Gauss-Markov hareketlilik modeli hareketli nesnelerin zamansal ilişkisini göstermek için literatürde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, gerçek-hayat senaryolarında, bu nesnelerin hareketi sırasında beklenmeyen ani dönüşlerin olasılığı oldukça yüksektir ve dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle buluşta, bir rastgele yürüyüş hareketlilik modeli (a random walk mobility model), nesnenin bir sonraki manevrasının önceki eylemden bağımsız olarak değiştiği durumlarda Gauss-Markov hareketlilik modeliyle uyum içinde kullanılmaktadır.

Bu bağlamda her iki HAP için de hız, azimut yönü ve yükseklik yönü vektörleri, her zaman iterasyonunda (t_i) (yinelemesinde) hesaplanır, (t_{i-1}) zaman anındaki bu vektörlerin değerleri aşağıdaki gibidir [21]:

$$\mathcal{V}_{(1,2)}(t_i) = \alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}} \mathcal{V}_{(1,2)}(t_{i-1}) + \left(1 - \alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}}\right) \mu_{\mathcal{V}_{(1,2)}} + \sqrt{1 - \left(\alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}}\right)^2} X_{(1,2)i-1}, \quad (1)$$

$$\mathcal{D}_{A(1,2)}(t_i) = \alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}} \mathcal{D}_{A(1,2)}(t_{i-1}) + \left(1 - \alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}}\right) \mu_{\mathcal{D}_{A(1,2)}} + \sqrt{1 - \left(\alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}}\right)^2} Y_{(1,2)i-1}, \quad (2)$$

$$\mathcal{D}_{E(1,2)}(t_i) = \alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}} \mathcal{D}_{E(1,2)}(t_{i-1}) + \left(1 - \alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}}\right) \mu_{\mathcal{D}_{E(1,2)}} + \sqrt{1 - \left(\alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}}\right)^2} Z_{(1,2)i-1}, \quad (3)$$

5

burada $i \in \{1, 2, 3, \dots\}$ her iterasyonu belirtmek için kullanılan t_i iterasyon faktörüdür. $\mathcal{V}_{(1,2)}(t_i)$, $\mathcal{D}_{A(1,2)}(t_i)$ ve $\mathcal{D}_{E(1,2)}(t_i)$; sırasıyla hem HAP-1 hem de HAP-2 için t_i anında hız, azimut yönü ve yükseklik yön vektörleriyken; $\mathcal{V}_{(1,2)}(t_{i-1})$, $\mathcal{D}_{A(1,2)}(t_{i-1})$, $\mathcal{D}_{E(1,2)}(t_{i-1})$; bu vektörlerin t_{i-1} anındaki değerlerini temsil eder. $\mu_{\mathcal{V}_{(1,2)}}$, $\mu_{\mathcal{D}_{A(1,2)}}$ ve $\mu_{\mathcal{D}_{E(1,2)}}$; i sonsuza yaklaştığında hem HAP-1 hem de HAP-2 için sırasıyla hız, azimut yönü sapması ve yükseklik yönü sapmasının asimptotik ortalama değerleri olarak verilmiştir. X , Y , Z parametreleri, sıfır ortalama ve birlik varyansa sahip Gauss dağıtılmış rastgele değişkenler (distributed random variables) olarak verilirken, α parametreleri, yani $\alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}}$, $\alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}}$, $\alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}}$; HAP-1 ve HAP-2'nin $[0, 1]$ arasında değişen, rastgelelik ve hafıza seviyesini tanımlayan ayar (tuning) parametreleridir [22].

15

Hız ve yön vektörlerinin başlangıç değerleri atanarak, (1), (2), (3)'te verilen Gauss- Markov hareketlilik modelinin formülasyonları, [7] olarak yeniden yazılabilir:

$$\mathcal{V}_{(1,2)}(t_i) = (\alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}})^i \mathcal{V}_{(1,2)}(t_0) + \left(1 - (\alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}})^i\right) \mu_{\mathcal{V}_{(1,2)}} + \sqrt{1 - \left(\alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}}\right)^2} \sum_{j=0}^{i-1} (\alpha_{\mathcal{V}_{(1,2)}})^{i-j-1} X_j, \quad (4)$$

$$\mathcal{D}_{A(1,2)}(t_i) = (\alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}})^i \mathcal{D}_{A(1,2)}(t_0) + \left(1 - (\alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}})^i\right) \mu_{\mathcal{D}_{A(1,2)}} + \sqrt{1 - \left(\alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}}\right)^2} \sum_{j=0}^{i-1} (\alpha_{\mathcal{D}_{A(1,2)}})^{i-j-1} Y_j, \quad (5)$$

$$\mathcal{D}_{E(1,2)}(t_i) = (\alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}})^i \mathcal{D}_{E(1,2)}(t_0) + \left(1 - (\alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}})^i\right) \mu_{\mathcal{D}_{E(1,2)}} + \sqrt{1 - \left(\alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}}\right)^2} \sum_{j=0}^{i-1} (\alpha_{\mathcal{D}_{E(1,2)}})^{i-j-1} Z_j, \quad (6)$$

20

Bu çalışmada, HAP'ların hareket yollarının rastgele bir senaryo için önceden tanımlandığı varsayılmaktadır. Bu nedenle HAP'ların hareketleri sırasında bazı ani dönüşlerin olması beklenmektedir. Bu ani dönüşleri karakterize etmek için rastgele yürüyüş hareketlilik modeli Gauss-Markov hareketlilik modeliyle birlikte kullanılır. Her ne kadar HAP'ların ani dönüşlerinin sayıları ve öngörülebilir hareket süreleri rastgele seçilse de, bu hareketlilik modelinde bahsedilen rastgeleliğin genel yörünge için önceden tanımlandığına dikkat edilmelidir. Bunun anlamı, yörüngenin belirli bir senaryo için tanımlanmasının ardından, hareket yolu önceden tanımlanmış yörüngeyi takip edecek şekilde sınırlandırılır.

10 Ancak, ortamdaki beklenmedik değişiklikler ve görev güncellemeleri yine de HAP'ları yönlerini önceden tanımlanmış yörüngeden sapmaya zorlayabilir [23]. Bu yörünge tanımının ve bu hareketlilik modelinde bahsedilen rastgeleliğin açıklığa kavuşturulması, HAP'ların havada rastgele uçmasına izin verilmesinin bazı güvenlik sorunlarına neden olabileceği gerçeği nedeniyle çok önemlidir, ancak bu buluşta önerilen durum böyle değildir.

15

Şekil 1 ve **Şekil 2** sırasıyla HAP'ların hızı 100 m/s olarak kabul edildiğinde 100 saniyelik bir süre için HAP-1 ve HAP-2'nin hız ve yön vektörlerini göstermektedir [24]. Neredeyse 100 m/s'ye eşit ve verilen zaman dilimi boyunca büyük ölçüde değişmez olduğu durumda iki HAP'ın hız vektörlerindeki değişkenler, Şekil 1(a) ve Şekil 2(a)'dan görülebilir. Bunun nedeni HAP'ların hız hesaplamaları için yalnızca Gauss-Markov modelinin $\alpha V(1,2) = \{0,5919, 0,3718\}$ ayarlama parametreleriyle dikkate alınmasıdır. Böyle bir hareketliliği benimseyerek modelde, HAP'ların her zaman iterasyonunda değerlerinin değiştirilmesi yerine hızlarının sabit tutulması amaçlanmaktadır.

25 Diğer yandan, Şekil 1(b) ve Şekil 2(b) azimut alanında sırasıyla HAP-1 ve HAP-2 yön vektörlerini gösterirken; Şekil 1(c) ve Şekil 2(c)'de yükseklik alanında sırasıyla HAP-1 ve HAP-2'nin yön vektörleri gösterilmektedir. Bu şekillerden her iki HAP'ın hem azimut hem de yükseklik yönleri için Gauss-Markov modelinin belirli bir süreye kadar korunduğu görülmektedir. Ancak, rastgele seçilen bir zamanda yön değişkenleri, önceki zaman anından bağımsız, ilgisiz bir değere atanır. Buluşta, beklenmedik bir zaman anında HAP'ların ani dönüşlerini göstermek için böyle bir hareketlilik modeli uygulanmıştır.

30

Hacimli araçlar ve bunların zaman içindeki hareketleri, doğaları onlara izin verdiği için çoğunlukla tahmin edilebilirdir. Her ne kadar, gerçek hayat senaryolarında konuşlandırılan

HAP'ların hacimli araçlar ve bunların zaman içindeki hareketleri çoğunlukla öngörülebilir olsa da, doğaları onlara izin verdiği için senaryoya dayalı bir yörünge izleyerek havada kalmaya çalıştıklarından, böyle bir Gauss-Markov ve 3 boyutlu rastgele yürüyüş modeli karışımı, HAP'ların gerçek hareketlilik özelliklerini Gauss-Markov modelinin tek başına olmasından daha iyi yansıtmaktadır.

Her iki HAP'ın havadaki hareketini Gauss-Markov eklemi ve 3 boyutlu rastgele yürüyüş modeliyle göstermek amacıyla $h_1 \approx h_2 \approx 20$ km yükseklikte zaman içindeki konum değişimleri **Şekil 3**'te verilmiştir. Bu şekilde her zaman iterasyonunda, noktalı çizgiler HAP-1'in konumunu ve HAP-2'nin konumunu temsil etmektedir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, her iki HAP da belirli bir süre boyunca sabit bir yönde hareket ederken, rastgele bir anda, yönleri rastgele değişiyor ve bu, gerçek hayat senaryosunda bir görev güncellemesi ile haklı gösterilebilir.

C. Hareketlilik Nedeniyle Doppler Etkisi

Daha önce de belirtildiği gibi, buluşta mmWave bandında çalışan bir sinyal tarafından iletilecek iki mobil HAP arasındaki iletişim ele alınmaktadır. Bu koşullar altında, frekans kayması sebebiyle Doppler etkisinin, iletişim kalitesini önemli ölçüde düşürmesi beklenmektedir. Bu nedenle, önerilen kanal modelinin geri kalanı boyunca, bunun analitik olarak hesaplanması ve dikkate alınması gerekmektedir. Bu bakımdan; Doppler frekansı, hız, yön ve faz açısı açısından şu şekilde verilmiştir [25]:

$$f_d(t_i) = \frac{V_1(t_i)}{\lambda} \left(\cos(\theta_1(t_i) - D_{A_1}(t_i)) \cos(\phi_1) \cos(D_{E_1}(t_i)) + \sin(\phi_1) \sin(D_{E_1}(t_i)) \right) + \frac{V_2(t_i)}{\lambda} \left(\cos(\theta_2(t_i) - D_{A_2}(t_i)) \cos(\phi_2) \cos(D_{E_2}(t_i)) + \sin(\phi_2) \sin(D_{E_2}(t_i)) \right). \quad (7)$$

(7)'de verilen denklemin geçerliliği, Görüş Hattı (LoS) koşulu karşılandığı durumlarda mevcuttur. Bu; HAP'ların faz açılarının yaklaşık olarak hesaplandığı anlamına gelir. Bahsedilen faz açıları; $\theta_1 \approx 0$, $\theta_2 \approx \pi$ ve $\phi_1 \approx \phi_2 \approx D_1|2E$ burada $D_1|2E$ olup, HAP-2'ye göre HAP-1'in göreceli yükseklik açısıdır ve aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\mathcal{D}_E^{1/2} = \tan^{-1} \left(\frac{h_1 - h_2}{D_{2D}} \right). \quad (8)$$

Ancak iki HAP arasındaki iletişim mmWave frekansında olduğundan, yani yansıma, kırılma vb. sapma nedenlerinin olasılığı büyük ölçüde yüksek olduğundan, bu da LoS'nin kırılmasına neden olabilir. Böyle bir durumda, (7)'de verilen denklem, Görüş Hattı Dışı (NLoS) koşullara, Kalkış (AAOD) Azimut Açısı, Kalkış Yükseklik Açısı (EAOD), local
5 saçıcıların Varış Azimut Açısı (AAOA) ve Yükseklik Varış Açısı (EAOA) tanımlanarak uyarlanmalıdır.

II. SİSTEM ANALİZİ

Bu bölümde, HAP'ların MIMO özellikleri, ışın kazancı ve kapasite açısından sorgulanmaktadır. Bu sorgulamayı gerçekleştirmek için, bir t_i zamanı anında bir sinyal
10 ışınının, HAP-2 tarafından alındığı ve HAP-1'den iletildiği varsayılır.

HAP'ların donanım özelliklerinin birebir aynı olduğu kabul edilmektedir. Her bir HAP'ın $N \times N$ özdeş izotropik antenler içeren bir Düzgün Dikdörtgen Düzlemsel Dizi (URPA) dağıtması durumunda HAP'ların aynı olduğu kabul edilir. Bu nedenle, HAP-1'deki verici anten sayısı (N_{Tx}) ve HAP-2'deki alıcı anten sayılarının (N_{Rx}) **Şekil 4**'te gösterildiği gibi
15 eşit ve düzgün olduğu kabul edilir. Yani HAP-1 ve HAP-2'deki anten sayıları HAP'lar üzerinde eşit sayıda olup, homojen dizilimlidir. HAP'lardaki verici ve alıcıda çok sayıda anten bulunmaktadır. Herbirinin de kendine ait bir faz kaydırıcısı bulunmaktadır. Hüzmeleme, bu antenlerin faz açılarının birbirleriyle uyumlu ve doğru bir şekilde ayarlanmasıyla yapılır.

20 Bu koşullar altında, belirli bir anten elemanının alınan eşdeğer sinyali, azimut alanına (AAOA) bir varış açısıyla antene çarpar ve yükseklik alanı (EAOA) şu şekilde verilebilir:

$$y_{m,n}(t_i) = \sqrt{\rho_{m,n}} h_{m,n}(t_i) \times s\left(t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)\right) + \omega_{m,n}(t_i), \quad (9)$$

burada (m, n) anten dizisinin sırasıyla x eksen ve y eksenindeki koordinasyon
25 göstergeleridir ve

$$h_{m,n}(t_i) \in \mathbf{H}(t_i) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t_i) & h_{1,2}(t_i) & \cdots & h_{1,n}(t_i) \\ h_{2,1}(t_i) & h_{2,2}(t_i) & \cdots & h_{2,n}(t_i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}(t_i) & h_{m,2}(t_i) & \cdots & h_{m,n}(t_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

(m, n)'inci antenin karmaşık Rayleigh kanal katsayısıdır, $s(\cdot)$ iletilen semboldür ve

$$\tau_x = \frac{d_x \sin \theta^{Rx} \cos \phi^{Rx}}{c}, \quad (11)$$

$$\tau_y = \frac{d_y \sin \theta^{Rx} \sin \phi^{Rx}}{c} \quad (12)$$

Bunlar, anten aralığı mesafesi $d_{x,y} = \lambda c/2$ olan, sırasıyla x eksen ve y eksenindeki bitişik antenler arasındaki zaman gecikmeleridir ve $\omega_{m,n}(t_i)$, sıfır ortalama ve birlik varyansa sahip toplam beyaz Gauss gürültüsüdür. Ayrıca x eksen ve y eksenindeki zaman gecikmelerinden birlikte yararlanılarak alıcıdaki anten elemanları arasındaki maksimum zaman gecikmesi şu şekilde hesaplanabilir:

$$y_{m,n}(k) = \sqrt{\rho_{m,n}} \sum_{l=0}^{v-1} h_{m,n}(k, l) \times s\left(k - ((n-1)l + (m-1)l)\right) + \omega_{m,n}(k), \quad (14)$$

burada $h_{m,n}(k, l)$, l'inci kademedenin kanal dürtü tepkisi olarak verilmiştir ve v, alınan verilerin sonlu dürtü tepkisinin yaklaşımını artırmak için iterasyon limitidir.

Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform, DFT), (14) denklemi üzerinde gerçekleştirilirse, frekans alanındaki (m, n)-inci antenin alınan sinyali şu şekilde hesaplanabilir:

$$y_{m,n}(f(t_i)) = a(\theta^{Rx}, \phi^{Rx}, f(t_i)) s(f(t_i)) + \omega_{m,n}(f(t_i)), \quad (15)$$

burada $a(\cdot)$ yönlendirme vektörüdür ve [26] olarak verilmiştir.

$$a(\theta, \phi, f(t_i)) = \mathbf{v}_x(\theta, \phi, f(t_i)) \otimes \mathbf{v}_y(\theta, \phi, f(t_i)). \quad (16)$$

$\mathbf{v}_x(\cdot)$ ve $\mathbf{v}_y(\cdot)$ için karşılık gelen ifadeler sırasıyla şu şekilde verilmiştir:

$$\mathbf{v}_x(\theta, \phi, f(t_i)) = \left[1, \exp\left(-j2\pi \frac{f(t_i)}{c} d_x \sin \theta \cos \phi\right), \dots \right. \\ \left. \exp\left(-j(n-1)2\pi \frac{f(t_i)}{c} d_x \sin \theta \cos \phi\right) \right]^T \in \mathbb{C}^{1 \times N_{Tx, Rx-x}}, \quad (17)$$

$$\mathbf{v}_y(\theta, \phi, f(t_i)) = \left[1, \exp\left(-j2\pi \frac{f(t_i)}{c} d_y \sin \theta \sin \phi\right), \dots \right. \\ \left. \exp\left(-j(m-1)2\pi \frac{f(t_i)}{c} d_y \sin \theta \sin \phi\right) \right]^T \in \mathbb{C}^{1 \times N_{Tx, Rx-y}}, \quad (18)$$

burada $N_{T_x, R_{x-x}}$ sırasıyla x eksenindeki verici/alıcı anten elemanlarının sayısıdır ve $N_{T_x, R_{x-y}}$ sırasıyla y eksenindeki verici/alıcı anten elemanlarının sayısıdır. Yönlendirme vektörünün $a(\cdot)$ hem verici HAP hem de alıcı HAP için ayrı ayrı hesaplanması gerektiğine dikkat edilmelidir. Bu bağlamda, bu iki HAP için notasyonlar sırasıyla $a_{T_x}(\theta_{T_x}, \phi_{T_x}, f(t_i))$ ve $a_{R_x}(\theta_{R_x}, \phi_{R_x}, f(t_i))$ olarak verilebilir.

Doppler yayılımı ve çoklu yol nedeniyle iki HAP arasındaki kanalın hem zaman hem de frekans alanında oldukça seçici olduğu kabul edilmektedir; bu; HAP'lar zaman içinde hareket ettikçe, $H(f(t_i))$ kanal matrisinin hızla değişeceği anlamındadır. Kanalı karakterize etmek için, verici HAP ve alıcı HAP'ın yönlendirme vektörlerinden yararlanılabilir. Bu konuda K saçılma kümesi ve L yayılma yolları için $H(f(t_i))$ gösterimi [27], [28] olarak verilebilir.

$$H(f(t_i)) = \frac{N_{T_x} N_{R_x}}{\sqrt{KL}} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L g_{kl}(t_i) \Lambda_{R_x}(\theta_{kl}^{R_x}, \phi_{kl}^{R_x}, f(t_i)) \Lambda_{T_x}(\theta_{kl}^{T_x}, \phi_{kl}^{T_x}, f(t_i)) a_{R_x}(\theta_{kl}^{R_x}, \phi_{kl}^{R_x}, f(t_i)) a_{T_x}^H(\theta_{kl}^{T_x}, \phi_{kl}^{T_x}, f(t_i)) \exp(j2\pi f_{d_{\max}} t_i \sin \theta_{kl}^{rd} \cos \phi_{kl}^{rd}), \quad (19)$$

burada g_{kl} , k 'inci kümenin sıfır ortalama ve birlik varyansa karşılık gelen l 'inci yolunun rastgele dağıtılmış karmaşık Gaussian küçük ölçekli kazancıdır, $\theta_{T_x, kl}$, $\phi_{T_x, kl}$ ve $\theta_{R_x, kl}$, $\phi_{R_x, kl}$ AAOD'dur, EAOD ve AAOA, k 'inci kümenin l 'inci yolunun EAOA'sı, $\Lambda_{T_x}(\theta_{T_x, kl}, \phi_{T_x, kl}, f(t_i))$ ve $\Lambda_{R_x}(\theta_{R_x, kl}, \phi_{R_x, kl}, f(t_i))$ sırasıyla verici ve alıcının her bir elemanı için anten kazancıdır ve $\Lambda_{T_x}(\theta_{T_x, kl}, \phi_{T_x, kl}, f(t_i)) = \Lambda_{R_x}(\theta_{R_x, kl}, \phi_{R_x, kl}, f(t_i)) = 1$ olduğu varsayılır.

(19)'daki üstel kısım, HAP'ların hareketliliğinin olmadığı durumlarda genellikle 1 olarak kabul edilir. Ancak bu senaryoda kanalı karakterize ederken hareketlilik çok önemli bir rol oynadığından, Doppler frekansı, kanalın gösteriminde maksimum değerinin, $f_{d_{\max}}$, dikkate alınmasını zorunlu kılar. Şunu da belirtmek gerekir ki açılar AAOA ve EAOA'yı temsil etmek için üstel kısımda kullanılan $\theta_{rd, kl}$ ve $\phi_{rd, kl}$, Bölüm II-B'de sırasıyla azimut ve yükseklik alanları için DA2 ve DE2 olarak verilen alıcı HAP'nin hareket yönüne bağlıdır.

A. Işın Kazancı

İletilen verinin dar bir ışın şeklinde olması nedeniyle, sinyal hizalaması, alıcının tam konumuna göre ayarlanması çok önemlidir. Bu durumlarda, ışın hizalaması başarılı bir şekilde çalıştırılmazsa, ışının yanlış hizalanmasının ciddiyetine bağlı olarak iletişim performansı ya önemli ölçüde düşebilir ya da tamamen kaybolabilir.

5

MIMO sistemlerinde ışın hizalaması, **Şekil 4**'te gösterildiği gibi sinyali belirli bir açıyla alıcıya odaklamak için her analog anten elemanına faz kaydırıcılar yerleştirilerek elde edilir. Böyle bir hizalama sabit erişim noktalarına uygulanabilse de, önerilen senaryoda HAP'ların öngörülemeyen hareketi, faz kaydırıcıların anlık olarak farklı bir odak açısına uyarlanması konusunda zorluk yaratmaktadır. Bu nedenle bu bölümde ışın hizasızlığının etkisi sorgulanmaktadır.

10

Bu bağlamda ışının iletim tarafındaki odak açıları azimut ve yükseklik alanlarında sırasıyla $\theta_{R_x,F}$ ve $\phi_{R_x,F}$ olarak tanımlanır. UPA için analog hüzmleme matrisi şu şekilde gösterilir:

$$\mathbf{W} = \left[\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_{N_{RF}} \right] \in \mathbb{C}^{N_{Tx}N_{Rx} \times N_{RF}}, \quad (20)$$

15

burada N_{RF} , vericideki RF zincirlerinin sayısıdır ve $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N_{Tx} \times N_{Rx}}$, RF zincirine karşılık gelen hüzmleme vektörüdür.

20

Her RF zinciri için $\mathbf{w}$ vektörünün hesaplanması aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_x \otimes \mathbf{w}_y. \quad (21)$$

$\mathbf{w}_x(\cdot)$ ve $\mathbf{w}_y(\cdot)$ için karşılık gelen ifadeler sırasıyla şu şekilde verilmiştir:

$$\mathbf{w}_x = [e^{-j\beta_{1x}}, e^{-j\beta_{2x}}, \dots, e^{-j\beta_{n_x}}] \in \mathbb{C}^{1 \times N_{Tx-x}}, \quad (22)$$

$$\mathbf{w}_y = [e^{-j\beta_{1y}}, e^{-j\beta_{2y}}, \dots, e^{-j\beta_{m_y}}] \in \mathbb{C}^{1 \times N_{Tx-y}}, \quad (23)$$

25

burada

$$\beta_{n_x} = \frac{2\pi}{\lambda_c} (n-1) d_x \sin \theta^{Tx} \cos \phi^{Tx}, \quad (24)$$

$$\beta_{m_y} = \frac{2\pi}{\lambda} (m-1) d_y \sin \theta^{Tx} \sin \phi^{Tx} \quad (25)$$

(m, n)'inci anten elemanının faz kaydırıcılarıdır.

Hüzmeleme matrisi ve $\mathbf{a}_{\mathbf{R}\mathbf{x}}(\theta^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, \phi^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, f(t_i))$ alıcının yönlendirme vektörünü kullanarak ışın kazancı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

5

$$\begin{aligned} g(\mathbf{W}, \theta^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, \phi^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, f(t_i)) &= \mathbf{W}^H \mathbf{a}_{\mathbf{R}\mathbf{x}}(\theta^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, \phi^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, f(t_i)) \\ &= \sum_{n=1}^{N_{Tx-x}} \sum_{m=1}^{N_{Tx-y}} e^{-j2\pi(n-1)\frac{d_x}{c}\mu_x} \otimes e^{-j2\pi(m-1)\frac{d_y}{c}\mu_y}, \end{aligned} \quad (26)$$

şu şekilde daha da ifade edilebilir:

$$g(\mu_x, \mu_y, t_i) = \frac{\sin\left(-N_{Tx}\pi\frac{d_x}{c}\mu_x\right)}{\sin\left(-\pi\frac{d_x}{c}\mu_x\right)} e^{-2j\pi\frac{d_x}{c}(N_{Tx}-1)\mu_x} \otimes \frac{\sin\left(-N_{Tx}\pi\frac{d_y}{c}\mu_y\right)}{\sin\left(-\pi\frac{d_y}{c}\mu_y\right)} e^{-2j\pi\frac{d_y}{c}(N_{Tx}-1)\mu_y}, \quad (27)$$

10

Burada

$$\mu_x = (f_c(t_i) + f_d(t_i)) \sin \theta^{\mathbf{R}\mathbf{x}} - f_c(t_i) \sin \theta_F^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, \quad (28)$$

$$\mu_y = (f_c(t_i) + f_d(t_i)) \sin \phi^{\mathbf{R}\mathbf{x}} - f_c(t_i) \sin \phi_F^{\mathbf{R}\mathbf{x}}. \quad (29)$$

15 Ulaşılabilecek maksimum kazanç, $\mu_x = \mu_y = 0$ durumunda $g_{\max} = g(0, 0, t_i) = N_{Tx}$ olarak elde edilebilir, yani Doppler etkisi yoktur ve iletilen sinyalin alıcıya çarpması için gerekli olan hem azimut hem de yükseklik alanlarındaki odak açıları, ışının geliş açılarına eşittir.

Bu durumda, verici ve alıcı arasındaki etkili kanal, analog hüzmeleme matrisi ile alıcının yönlendirme vektörünün çarpımı olarak yorumlanabilir; bu, matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$h_{eff} = g(\mathbf{W}, \theta^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, \phi^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, f(t_i)) = \mathbf{W}^H \mathbf{a}_{\mathbf{R}\mathbf{x}}(\theta^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, \phi^{\mathbf{R}\mathbf{x}}, f(t_i)). \quad (30)$$

20

Ancak, Doppler etkisi de dahil edildiğinde, varış açılarının eşleşme olasılığı ve açısal alandaki dağılım nedeniyle odak açıları önemli ölçüde azalmakta, bu da odak açılarının istenilen değerlerden kaymasına neden olmaktadır. Böyle bir durumda, faz kaydırmanın, analog hüzmeleme matrisinin hüzme seçici kanalın etkisini telafi edebileceği şekilde çalıştırılması gerekir.

t_i anında ışın kazancının gösterimi **Şekil 5**'te $N_{Tx} = 16$ ve $(\theta^{Rx},F, \phi^{Rx},F) = (60, 30)$ için verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, Doppler'in olmadığı durumda, gelen ışının yön açıları (θ^{Rx}, ϕ^{Rx}) seçilen odak açılarına $(\theta^{Rx},F, \phi^{Rx},F)$ eşit olduğunda, ışın kazancı maksimum N_{Tx} değerine ulaşır ve (θ^{Rx}, ϕ^{Rx}) ve $(\theta^{Rx},F, \phi^{Rx},F)$ arasındaki fark büyüdüğünde kademeli olarak bozulur. Ancak, Doppler dahil edildiğinde odak açıları kaydırılmakta ve istenilen değerlerde maksimum kazanç elde edilememektedir.

B. Sistem Kapasitesi

Önerilen senaryoda HAP'ların yüksek mobilitesinden dolayı, Doppler yayılımı, kanalın zaman etki alanında oldukça seçici olmasına neden olur ve çoklu yol, kanalın frekans alanında oldukça seçici olmasına neden olur.

Frekans seçici kanalın etkilerini telafi etmek amacıyla, Semboller Arası Girişimi (ISI) önlemek için zaman alanında zaman gecikmesinden daha uzun bir Döngüsel Önek'in (CP) kullanıldığı varsayılmaktadır. Bu nedenle, sistem kapasitesi hesaplamaları, yalnızca zaman-seçici kanalın varlığı dikkate alınarak yapılır.

Böyle bir zaman-seçici kanalın varlığı altında, tek-taşıyıcılı dalga biçimi yerine, çok taşıyıcılı dalga biçimi kullanıldığında, taşıyıcılar arasında ortaya çıkan girişim, bu taşıyıcılar arasındaki dikliğin bozulması nedeniyle, iletişimin performansını düşürme potansiyeline sahiptir. Bu bölümde, bu taşıyıcılar arasındaki girişimin etkisini, yani Taşıyıcılar Arası Girişim'in (Inter-Carrier Interference, ICI), iki mobil HAP arasındaki çoklu taşıyıcı iletişim üzerindeki etkisini, değerlendirmek için, bu bölümde önerilen senaryonun Sinyal Girişim Artı Gürültü Oranı (Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR) performansı analiz edilmektedir. Buluşta, çok taşıyıcılı bir sistem düşünülmüştür. Dolayısıyla ICI dediğimiz taşıyıcılar arası karışma ile karşılaşilmektedir. SINR hesaplaması da buna göre yapılmıştır.

Bu şekilde, (14)'te hesaplanan (m, n) 'inci antenin alınan sinyali aşağıdaki şekle dönüştürülebilir:

$$y_{m,n}(p_{N_c}, f(t_i)) = \sqrt{\rho_{m,n}} \left(h_{m,n}(p_{N_c}, f(t_i)) \times s(p_{N_c}, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)) \right) + \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq p}}^{N_c-1} h_{m,n}(q, f(t_i)) \times s(q, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)) + \omega_{m,n}(p, t_i), \quad (31)$$

burada N_c her anten elemanındaki taşıyıcıların sayısıdır, $p \in \{0, 1, \dots, N_c-1\}$, verinin alındığı (m, n) 'inci anten elemanının spesifik taşıyıcısı, ve $q \in \{0, 1, \dots, N_c-1\}$, $q \neq p$, ICI nedeniyle gürültü olarak kabul edilen p dışındaki kalan tüm taşıyıcılardır.

- 5 (31)'i bir adım daha ileriye taşımak için, mekânsal çeşitliliğin istismar edilmesi durumu değerlendirilebilir. Böyle bir durumda alınan sinyal formülü şuna dönüşür:

$$\mathbf{y}_{m,n}(f(t_i)) = \sqrt{\rho_{m,n}} \left(\left[h_{m,n}(p_1, p_1, f(t_i)) \times s(p_1, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)), \dots, h_{m,n}(p_{N_c}, p_{N_c}, f(t_i)) \times s(p_{N_c}, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)) \right] + \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq p}}^{N_c-1} h_{m,n}(p, q, f(t_i)) \times s(q, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)) \right) + \omega_{m,n}(p_{N_c}, t_i) \in \mathbb{C}^{1 \times N_c}, \quad (32)$$

Burada $h_{m,n}(p_{N_c}, F(t_i))$

$$\mathbf{h}_{m,n}(p_{N_c}, f(t_i)) \in [h_{m,n}(p_1, f(t_i)), \dots, h_{m,n}(p_{N_c}, f(t_i))], \mathbb{C}^{1 \times N_c} \quad (33)$$

- 10 her taşıyıcı kanal katsayılarından oluşan (m, n) 'inci anten elemanının kanal vektörüdür

Basitleştirmek gerekirse (32);

$$\mathbf{y}_{m,n}(f(t_i)) = \sqrt{\rho_{m,n}} \left(\mathbf{h}_{m,n}(p_{N_c}, p_{N_c}, f(t_i)) \times \mathbf{x}(p_{N_c}, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)) \right) + \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq p}}^{N_c-1} h_{m,n}(p, q, f(t_i)) \mathbf{x}(q, t_i - ((n-1)\tau_x + (m-1)\tau_y)) + \omega_{m,n}(p_{N_c}, t_i) \in \mathbb{C}^{1 \times N_c}. \quad (34)$$

Bu durumda, t_i zaman anında alınan sinyal, vektör biçiminde ifade edilebilir.

$$\mathbf{Y}(f(t_i)) = [\mathbf{y}_{1,1}(f(t_i)), \mathbf{y}_{1,2}(f(t_i)), \dots, \mathbf{y}_{1,n}(f(t_i)), \mathbf{y}_{2,1}(f(t_i)), \mathbf{y}_{2,2}(f(t_i)), \dots, \mathbf{y}_{2,n}(f(t_i)), \dots, \mathbf{y}_{m,1}(f(t_i)), \mathbf{y}_{m,2}(f(t_i)), \dots, \mathbf{y}_{m,n}(f(t_i))], \in \mathbb{C}^{mn \times N_c}, \quad (35)$$

- 15 ve kapalı formda,

$$\mathbf{Y}(f(t_i)) = \mathbf{H}(p, p, f(t_i))\mathbf{X}(p) + \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq p}}^{N_c-1} \mathbf{H}(p, q, f(t_i))\mathbf{X}(q) + \omega(p). \quad (36)$$

Toplam gürültünün kovaryans matrisinin $\hat{\omega}(p) = \omega_{\text{ICI}}(p) + \omega(p)$ hesaplanması ile, önerilen çok taşıyıcılı HAP iletişiminin ICI analizi (36) 'ya dayanabilir.

$$\omega_{\text{ICI}}(q) = \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq q}}^{N_c-1} \mathbf{H}(p, q, f(t_i))\mathbf{X}(q). \quad (37)$$

- 5 $\omega_{\text{ICI}}(p)$ 'nin kovaryansını matematiksel olarak ifade etme prosedürü aşağıdaki gibi temsil edilebilir:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [\omega_{\text{ICI}}(q)\omega_{\text{ICI}}^H(q)] &= \mathbb{E} \left[\sum_{\substack{p=0 \\ p \neq j}}^{N_c-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{N_c-1} \mathbf{H}(j, p, f(t_i))\mathbf{X}(p)\mathbf{X}^H(q)\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i)) \right] \\ &= \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq j}}^{N_c-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{N_c-1} \mathbb{E} [\mathbf{H}(j, p, f(t_i))\mathbf{R}_{XX}(p, q)\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))] , \end{aligned} \quad (38)$$

burada $\mathbf{R}_{XX}(p, q)$, $\mathbb{E}[\mathbf{X}(p)\mathbf{X}(q)]$ terimini temsil edecek şekilde tanımlanır.

- 10 Aşağıdaki analiz kolaylık sağlamak amacıyla (38)'de verilen $\mathbb{E}[\mathbf{H}(j, p, f(t_i))\mathbf{R}_{XX}(p, q)\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))]$ teriminden oluşturulmuştur. Bu bağlamda analize, [29] olarak verilen sinyal kovaryans matrisinin öz-bileşimi ile başlanmıştır:

$$\mathbf{R}_{XX}(p, q) = \mathbf{U}(p, q)\mathbf{\Lambda}_X(p, q)\mathbf{U}^H(p, q), \quad (39)$$

burada $\mathbf{U}(p, q)$ özvektörleri içeren üniter matristir ve

$$\mathbf{\Lambda}_X(p, q) = \text{diag}(\lambda_1(p, q), \dots, \lambda_{N_{Tx}}(p, q)) \quad (40)$$

- 15 Burada $\mathbf{\Lambda}_X(p, q)$; $\mathbf{R}_{XX}(p, q)$ 'nin özdeğerlerinin köşegen matrisidir. Yapılan analizde, $\mathbf{H}(j, p, f(t_i))$ kanal matrisinin bağımsız ve aynı şekilde dağıtılmış Gaussian değişkenlerinden oluştuğu varsayılmaktadır.

- 20 Dolayısıyla, $\mathbf{H}(j, p, f(t_i))$ dağılımının $\mathbf{H}(j, p, f(t_i)) \mathbf{U}(p, q)$ dağılımına eşdeğer olduğu söylenebilir. Bu durumda, $\mathbb{E}[\mathbf{H}(j, p)\mathbf{R}_{XX}(p, q)\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))]$ terimi şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [\mathbf{H}(j, p, f(t_i)) \mathbf{R}_{XX}(p, q) \mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))] = \\ \mathbb{E} [\mathbf{H}(j, p, f(t_i)) \mathbf{\Lambda}_X(p, q) \mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))] . \end{aligned} \quad (41)$$

(41)'de verilen matrisin incelenmesi, bazı spesifik endeksler seçilerek daha ayrıntılı bir şekilde yapılabilir. Bu bakımdan, matris (r, s)'inci eleman için şu şekilde temsil edilebilir:

$$\begin{aligned} \{\mathbb{E} [\mathbf{H}(j, p, f(t_i)) \mathbf{\Lambda}_X(p, q) \mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))]\}_{r,s} = \\ \sum_{k=1}^{N_{Tx}} \lambda_k(p, q) \mathbb{E} [\{\mathbf{H}(j, p, f(t_i))\}_{r,k} \{\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))\}_{k,s}] = \\ \sum_{k=1}^{N_{Tx}} \lambda_k(p, q) \mathbb{E} [\{\mathbf{H}(j, p, f(t_i))\}_{r,k} \{\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))\}_{k,r}] \delta_{r-s}, \end{aligned} \quad (42)$$

burada δ_{r-s} , matrisin korelasyon parametresidir.

Denklem (42)'nin son formu, yalnızca kanalın korelasyonsuz olduğu durum için geçerlidir. $r \neq s$ olduğunda, bu değerler arasındaki çapraz-korelasyon sıfır olur ve denklem (42)'nin sıfır olmayan bir değere sahip olmasına yol açar. $r = s$ olması durumunda oto-korelasyon maksimumdur şu ve denklem (42)'nin sıfır olmasına yol açar. Fourier bazını kullanarak denklem (42) şu şekilde temsil edilebilir:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [\{\mathbf{H}(j, p, f(t_i))\}_{r,k} \{\mathbf{H}^H(j, q, f(t_i))\}_{k,r}] = \frac{1}{N_c^2} \left(\sum_{l=0}^{v-1} \exp(-j2\pi l(p-q)/N_c) \right) \times \\ \sum_{r_1=0}^{N_c-1} \sum_{r_2=0}^{N_c-1} \mathbb{E} [h_{m,n}^{(k,r)}(r_1, l) h_{m,n}^{(k,r)}(r_2, l)] \times \exp(j2\pi r_1(p-j)/N_c) \exp(-j2\pi r_2(q-j)/N_c). \end{aligned} \quad (43)$$

Sonuç olarak, ICI'nın kovaryans matrisi aşağıdaki gibi verilir:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [\omega_{\text{ICI}}(q) \omega_{\text{ICI}}^H(q)] = \sum_{\substack{p=0 \\ q \neq j}}^{N_c-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{N_c-1} \frac{\text{tr}(\mathbf{\Lambda}_X(p, q))}{N_c^2} \left(\sum_{l=0}^{v-1} \exp(-j2\pi l(p-q)/N_c) \right) \times \\ \left(\sum_{r_1=0}^{N_c-1} \sum_{r_2=0}^{N_c-1} \mathbb{E} [h_{m,n}^{(k,r)}(r_1, l) h_{m,n}^{(k,r)}(r_2, l)] \exp(j2\pi r_1(p-j)/N_c) \exp(-j2\pi r_2(q-j)/N_c) \right). \end{aligned} \quad (44)$$

ICI'nin kovaryans matrisi elde edildikten sonra, p'inci taşıyıcıdaki SINR'nin hesaplanması,

$1 \leq p \leq N_c$ olduğunda aşağıdaki gibi çalıştırılabilir:

$$\gamma_p = \frac{E_{x,p} |\mathbf{H}(p, p, f(t_i))|^2}{\sum_{q \neq p} E_{x,q} |\mathbf{H}(p, q, f(t_i))|^2 + E_{x,\omega} |\omega(t_i)|}, \quad (45)$$

burada $E_{x,p}$; p'inci taşıyıcıya tahsis edilen giriş enerjisidir ve $E_{x,q}$; p'inci taşıyıcıyı kirlüten q'uncu taşıyıcıdan olan kaçak enerjidir. SINR analizi elde edildiği için artık sistemin ergodik kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C = \sum_{p=1}^{N_c} \log_2 (1 + \gamma_p). \quad (46)$$

Söz konusu hesaplama (46. Denklem), ilgili kontrol ünitesi tarafından yapılmakta ve iletilen sinyalin kapasite hesabını vermektedir.

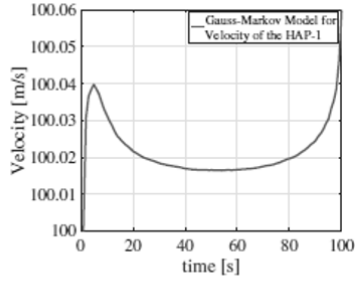
Buluşta, HAP'lerden biri hareketli biri hareketsiz veya ikisi de hareketli veya ikisi de hareketsiz olması durumlarının hepsi hesaba katılmaktadır.

Buluşun Sanayiye Uygulanabilirliği

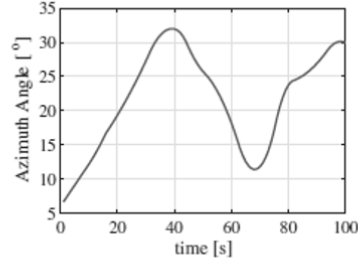
Buluş, yüksek irtifada bir havadan havaya (Air-to-Air, A2A) kanal alanındaki veri hızını arttırmak ve kesintisiz veri iletişimi sağlamak için özellikle sabit olmayan uçan geçici ağ olan HAP ağlarındaki hareketli ve rastgele ve bağımsız hareket yönlerine sahip HAP'lar arası iletişim için çeşitli hesaplamaları yapan en az bir kontrol ünitesi içeren bir sistem ile ilgili olup, sanayiye uygulanabilir niteliktedir.

Buluş yukarıdaki açıklamalar ile sınırlı olmayıp, teknikte uzman bir kişi kolaylıkla buluşun farklı uygulamalarını ortaya koyabilir. Bunlar buluşun istemler ile talep edilen koruma kapsamında değerlendirilmelidir.

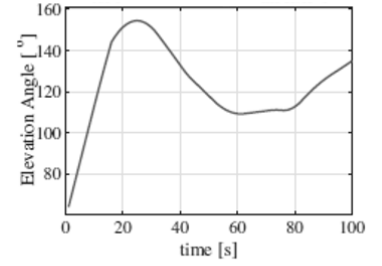
Şekil-1



(a)

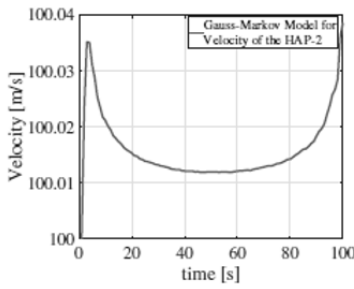


(b)

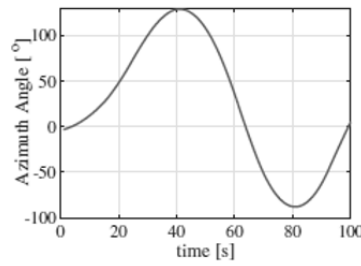


(c)

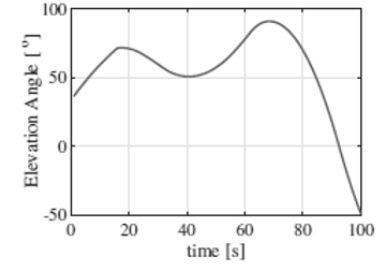
Şekil-2



(a)

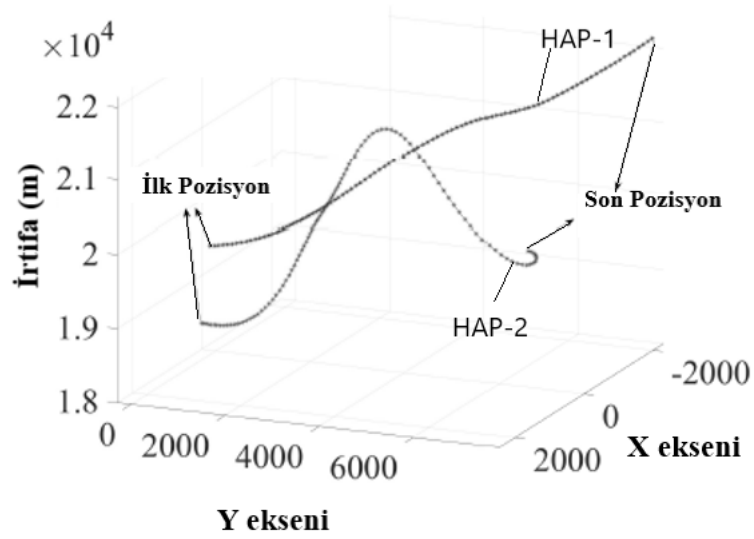


(b)

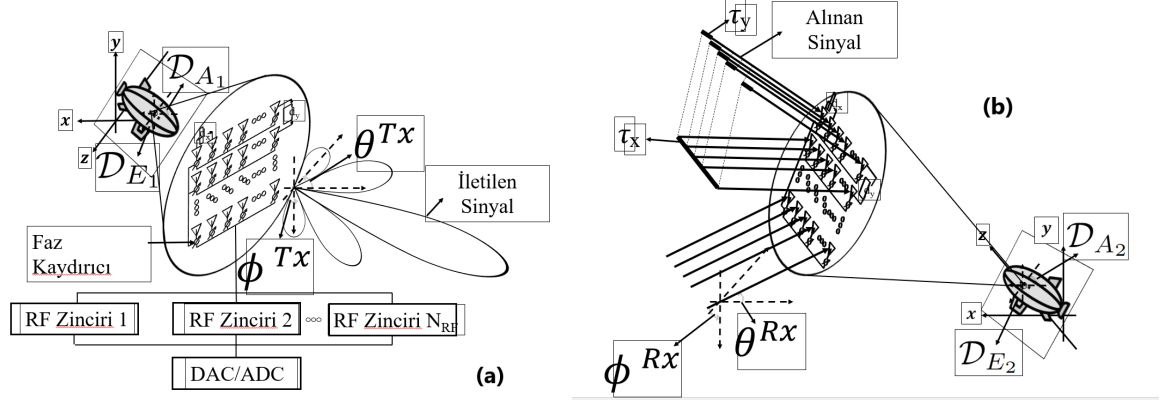


(c)

Şekil-3



Şekil-4



Şekil-5

