



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Ευφυή περιβάλλοντα σε δίκτυα νέας γενιάς

**Εφαρμογή Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης για την εύρεση
βέλτιστης διαδρομής και τοποθέτησης αυτόνομων εναέριων
οχημάτων σε τρισδιάστατο χώρο για συστήματα 5G and
beyond**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

Βολακάκη Μαρίας-Γαρυφαλλιάς και Παπαϊωάννου Γρηγόρη

Επιβλέπων : Βουγιούκας Δημοσθένης

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Σκούτας Δημήτριος, Μαλιάτσος Κωνσταντίνος

Σάμος, Μάιος 2022

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών με τίτλο «Διαδίκτυο των Πραγμάτων Ευφυή περιβάλλοντα σε δίκτυα νέας γενιάς» του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της εργασίας κύριο Δημοσθένη Βουγιούκα, Καθηγητή του Τμήματος για τις πολύτιμες πληροφορίες και συμβουλές που απαιτούνταν για την εκπόνηση της διπλωματικής, για το κουράγιο, για την βοήθεια και για τον χρόνο που μας αφιέρωσε. Δεν θα μπορούσαμε επίσης να παραλείψουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την υποστήριξη, το κουράγιο και την υπομονή τους.

Αφιερωμένη στις οικογένειες μας και στον ξάδελφο Σταύρο Χατζηγεωργίου που έφυγε νωρίς...

© 2022

των

Βολακάκη Μαρίας-Γαρυφαλλιάς και Παπαϊωάννου Γρηγόρη
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικών και Επικοινωνιακών Συστημάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Δίκτυα 5G and Beyond	1
1.2	Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από την 1η στην 6η Γενιά	3
1.3	Τεχνολογίες του 6G	5
1.3.1	Διάχυτη Τεχνητή Νοημοσύνη	5
1.3.2	Ευφρείς επιφάνειες με δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης	5
1.3.3	Massive MIMO χωρίς κυψέλες	6
1.3.4	Επικοινωνία Ambient Backscatter	7
1.4	Εφαρμογές του 6G	8
1.4.1	Οδήγηση με τηλεχειρισμό	8
1.4.2	Απτικό Διαδίκτυο.....	9
2	Εισαγωγή στα UAVs	11
2.1	Παραδείγματα εφαρμογών σε HAPs και LAPs	12
2.1.1	Facebook Aquila Project	12
2.1.2	Google Loon	13
2.1.3	NOKIA F-Cell.....	14
2.1.4	Eurecom Perfume	15
2.1.5	Huawei Wireless X Lab.....	16
2.2	Η Ασύρματη επικοινωνία των UAVs	16
2.3	Ασύρματες τεχνολογίες για την επικοινωνία των UAVs.....	18
2.3.1	Direct Links.....	18
2.3.2	Δορυφορική ζεύξη	18
2.3.3	Δίκτυο AdHoc.....	19
2.3.4	Δίκτυο Κινητής Τηλεφωνίας.....	19
2.3.5	Υβριδικό Σύστημα.....	19
2.4	Διασυνδεδεμένα UAV με κυψελωτά δίκτυα.....	20
2.4.1	Ασύρματες επικοινωνίες υποβοηθούμενες από UAVs.....	21
2.5	Ευκαιρίες και προκλήσεις στις υποβοηθούμενες επικοινωνίες με UAVs	21
2.5.1	Υψηλό υψόμετρο.....	22
2.5.2	Υψηλή πιθανότητα LoS.....	22

2.5.3	Υψηλή 3-D κινητικότητα.....	23
2.5.4	Περιορισμοί SWAP.....	23
2.5.5	Βελτιστοποίηση τοποθέτησης των UAVs	24
2.5.6	Βελτιστοποίηση κινητικότητας για UAVs.....	25
3	Ευφυή Κυβελωτά Δίκτυα Νέας Γενιάς	26
3.1	Η Μηχανική Μάθηση	26
3.1.1	<i>Supervised Learning</i>	27
3.1.1.1	Deep Learning.....	27
3.1.1.2	SVM.....	28
3.1.1.3	KNN.....	29
3.1.1.4	Random Forest.....	29
3.1.2	<i>Unsupervised Learning</i>	31
3.1.2.1	K-means	31
3.1.3	<i>Reinforcement Learning</i>	31
3.1.3.1	Αλγόριθμος Q-learning.....	32
3.1.4	Προ-επεξεργασία δεδομένων στην Μηχανική Μάθηση	33
3.1.4.1	Overfitting.....	34
3.1.4.2	Underfitting.....	34
3.1.5	Μετρικές της Μηχανικής Μάθησης	34
3.1.5.1	Accuracy	36
3.1.5.2	Recall	36
3.1.5.3	Precision.....	36
3.1.5.4	F1-score.....	37
4	Μελέτη των Παρεμβολών στα Δίκτυα Νέας Γενιάς.....	38
4.1	Είδη παρεμβολών στα κυβελωτά δίκτυα.....	39
4.1.1	Αυτό-παρεμβολή	39
4.1.2	Παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης.....	39
4.1.3	Ομοδιαυλική παρεμβολή.....	40
4.1.4	Παρεμβολή γειτονικού καναλιού	40
4.1.5	<i>Inter-Cell Interference</i>	40
4.1.6	<i>Intra-Cell Interference</i>	40
4.2	Παρεμβολές και UAV.....	41
4.3	Έλεγχος ισχύος για την αντιμετώπιση παρεμβολών	42
4.4	Προσομοίωση Βέλτιστης Διαδρομής και Τοποθέτησης UAV σε 3D χώρο	43

4.5	Υλοποίηση Reinforcement Learning για τη βέλτιστη διαδρομή UAV.....	44
4.6	Βέλτιστη Τοποθέτηση UAVs.....	57
4.7	Αποτελέσματα Σεναρίου αντιμετώπισης παρεμβολών από γειτονικό UAV	61
4.8	Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης διαδρομής με τη χρήση Supervised Learning	63
5	Συμπεράσματα	66
6	Μελλοντική Έρευνα	68
	Βιβλιογραφία	69

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Οι εφαρμογές που προσφέρει το δίκτυο της 6 ^{ης} Γενιάς [14].....	3
Σχήμα 2: Ύπαρξη έξυπνης αναδιαμορφώσιμης επιφάνειας σε τηλεπικοινωνιακό σύστημα [14].....	6
Σχήμα 3: Η απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του Cell-free Massive MIMO(Imoize et al., 2021).....	7
Σχήμα 4: Επικοινωνία μηχανής προς μηχανή στην αυτόνομη οδήγηση [24].....	9
Σχήμα 5: Σχήμα απεικόνισης καθυστέρησης στην αρχιτεκτονική του Tactile Internet [25].....	10
Σχήμα 6: Παρουσίαση της αρχιτεκτονικής Facebook Aquila [29].....	13
Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική του Google Loon [29].....	13
Σχήμα 8: Η όψη του NOKIA F-Cell [29].....	15
Σχήμα 9: Η αρχιτεκτονική του NOKIA F-Cell [29].....	15
Σχήμα 10: Σενάριο εφαρμογής του NOKIA F-Cell [29].....	15
Σχήμα 11: Δομή του Deep Learning	28
Σχήμα 12: Δομή του Random Forest [50]	30
Σχήμα 13: Δομή του Reinforcement Learning.....	32
Σχήμα 14: Παρεμβολές Inter-cell και Intra-cell [79]	41
Σχήμα 15: Ο πίνακας Q.....	45
Σχήμα 16: Εύρεση του κατάλληλου μονοπατιού	45
Σχήμα 17: Το UAV αποτυγχάνει να βρει τον στόχο κατά το 4 ^ο επεισόδιο	46
Σχήμα 18: Το UAV βρίσκει τον στόχο του στο επεισόδιο 2000	46
Σχήμα 19: Δομή του Αλγορίθμου Q- Learning	47
Σχήμα 20: Το περιβάλλον εκμάθησης του Agent	47
Σχήμα 21: Παραμετροποίηση του Q-Learning	48
Σχήμα 22: Απεικόνιση Σεναρίου 4.....	49
Σχήμα 23: Σχεδίαση τροχιών UAV σε 3D	50
Σχήμα 24: 3D απεικόνιση της ισχύος εκπομπής του βέλτιστου μονοπατιού μετά την βελτιστοποίηση για την αντιμετώπιση παρεμβολών	51
Σχήμα 25: Απεικόνιση του RSRP ratio για τα states που αντιμετωπίζουν παρεμβολή	51
Σχήμα 26: Απεικόνιση παρεμβολής γειτονικών UEs με διαφορετικές βελτιστοποιήσεις.....	52
Σχήμα 27: Απεικόνιση επιπέδου SINR γειτονικών UEs για όλα τα states της τροχιάς.....	53
Σχήμα 28: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων γειτονικών UEs για τα states που αντιμετωπίζεται παρεμβολή	54
Σχήμα 29: Απεικόνιση τροχιάς και γειτονικών UAVs.....	54
Σχήμα 30: Πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρηστών κινούμενου UAV με επιπλέον βελτιστοποίηση του ύψους.....	55
Σχήμα 31: Φασματική απόδοση χρηστών κινούμενου UAV με επιπλέον βελτιστοποίηση του ύψους.....	55
Σχήμα 32: Outage Probability σε σχέση με το SINR των UEs του κινούμενου UAV με την εφαρμογή των 2 βελτιστοποιήσεων	56
Σχήμα 33: Τυχαία τοποθέτηση χρηστών	57
Σχήμα 34: Μέσο Pathloss χρηστών συναρτήσει του πλήθους των UAVs	58
Σχήμα 35: Ομαδοποίηση χρηστών και τοποθέτηση UAVs με εφαρμογή K-means.....	58
Σχήμα 36: SINR χρηστών που εξυπηρετούνται από το UAV 5 (ομάδα γαλάζια).....	59
Σχήμα 37: Απεικόνιση κάλυψης των UAV ομάδας 1 (κόκκινη) και 5 (γαλάζια)	59
Σχήμα 38: SINR χρηστών που παρεμβάλλονται από το UAV 5.....	60

Σχήμα 39: Χωρητικότητα καναλιού για κάθε UAV	60
Σχήμα 40: Bit Rate χρηστών που παρεμβάλλονται από το UAV 5.....	61
Σχήμα 41: Σενάριο αντιμετώπισης παρεμβολών από γειτονικό UAV	62
Σχήμα 42: Αξιολόγηση ακρίβειας μοντέλου πρόβλεψης ισχύος εκπομπής για διαφορετικούς αλγορίθμους	62
Σχήμα 43: Αξιολόγηση μοντέλου με την χρήση μετρικών F1Score, Precision και Recall	63
Σχήμα 44: Αξιολόγηση ακρίβειας μοντέλου πρόβλεψης ισχύος εκπομπής για διαφορετικούς αλγορίθμους	64
Σχήμα 45: Αξιολόγηση μοντέλου με την χρήση μετρικών F1Score, Precision και Recall	65

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση των διαφορετικών γενιών των ασύρματων επικοινωνιών από την 1 ^η στην 6 ^η γενιά ...	5
Πίνακας 2: Επικοινωνιακές απαιτήσεις των UAVs από την 3GPP [35]	17
Πίνακας 3: Επικοινωνιακές απαιτήσεις για εφαρμογές UAV [35]	17
Πίνακας 4: Σύγκριση των ασύρματων τεχνολογιών για επικοινωνίες UAV [34]	20
Πίνακας 5: Ευκαιρίες και προκλήσεις των κυψελωτών επικοινωνιών με τα UAV [34]	24
Πίνακας 6: Ανάλυση μεταβλητών της σχέσης ανανέωσης των τιμών Q	33
Πίνακας 7: Μετρικές Μηχανικής Μάθησης.....	35
Πίνακας 8: Πίνακας Συσχέτισης του RSRP ratio με την αντίστοιχη μείωση ισχύος εκπομπής [69]	50

Ακρωνύμια

2D	2 Dimension
3D	3 Dimension
4G	4 th Generation
5G	5 th Generation
6G	6 th Generation
ABC	Ambient Backscatter Communication
ACI	Adjacent Channel Interference
ATC	Air Traffic Control
BBU	Base Band Unit
BS	Base Station
CCI	Co-Channel Interference
CDM	Code Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
CNPC	Control and Non-Payload Communication
CR	Cognitive Radio
D2D	Device to Device
DL	Down Link
DSL	Digital Subscriber Line
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
HAPS	High Altitude Platforms
ISM	Industrial Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
KNN	K-Nearest Neighbors
LAPS	Low Altitude Platforms
LOS	Line Of Sight
MAI	Multiple Access Interference
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
NLOS	Non-Line Of Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OAA	One Against All
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PL	Path Loss
QoS	Quality of Service
RF	Random Forest
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RL	Reinforcement Learning
RRH	Remote Radio Head
RSRP	Reference Signal Received Power
SL	Supervised Learning
SVM	Support Vector Machines
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UAS	Unmanned Aircraft Systems
UAV	Unmanned Air Vehicle
UE	User Equipment
UL	Uplink
USL	Unsupervised Learning

Περίληψη

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν οι διάφορες τεχνικές Μηχανικής Μάθησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και τοποθέτησης UAV σε τρισδιάστατο χώρο με σκοπό την βέλτιστη κάλυψη των χρηστών σε δίκτυα 5G and beyond.

Τα μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) θεωρούνται ως μια από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις για ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας νέας γενιάς. Η ευελιξία τους και η ικανότητά τους να προσφέρουν απρόσκοπτη σύνδεση οπτικής επαφής (LOS) με χρήστες, επιλύσαν σοβαρά ζητήματα τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις, όπως η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και τοποθέτησης (optimal trajectory & placement design) σε τρισδιάστατο χώρο. Η αντιμετώπιση των προκλήσεων θα επιφέρει, ελαχιστοποίηση του χρόνου πτήσης και της ενεργειακής κατανάλωσης που απαιτείται, καθώς και βελτιστοποίηση της φασματικής απόδοσης. Η ανάπτυξη μεθόδων μηχανικής μάθησης αναβαθμίζουν με ραγδαίο ρυθμό την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η πρόβλεψη της βέλτιστης διαδρομής για μεγιστοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης καθώς και την ελαχιστοποίηση του χρόνου πτήσης, η οποία θα επιτευχθεί με τη χρήση Reinforcement Learning (RL) και Supervised Learning (SL) τεχνικών μηχανικής μάθησης. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε ο RL αλγόριθμος Q learning ο οποίος θα εκπαιδεύεται στο εκάστοτε περιβάλλον το οποίο αποτελείται από πολλαπλές διαδρομές και εμπόδια με απώτερο σκοπό την εύρεση διαδρομής που θα μεγιστοποιεί την απόδοση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Ο Q Learning αλγόριθμος θεωρείται από τους κορυφαίους αλγορίθμους RL για την εύρεση βέλτιστης λύσης. Αξίζει να σημειωθεί πως οι παρεμβολές από γειτονικά UAVs και χρήστες, είναι μία πρόκληση που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της εξυπηρέτησης των UAVs τόσο στην βέλτιστη διαδρομή όσο και στην βέλτιστη τοποθέτηση. Την λύση στην πρόκληση των παρεμβολών θα την δώσει η εφαρμογή ελέγχου ισχύος εκπομπής ώστε να μετριαστούν τα επίπεδα των παρεμβολών και να αυξηθεί με τον τρόπο αυτό το QoS των χρηστών.

Επιπλέον, κατασκευάστηκε σύνολο δεδομένων (dataset) με χρήση του περιβάλλοντος MATLAB με σκοπό την εκπαίδευση Supervised αλγορίθμων για την πρόβλεψη της ισχύος εκπομπής με σκοπό την αντιμετώπιση των παρεμβολών, καθώς και για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μέσω της πρόβλεψης του βέλτιστου μονοπατιού. Το dataset που θα χρησιμοποιηθεί περιλαμβάνει συγκεκριμένα labels (ετικέτες) σύμφωνα με τις οποίες θα γίνεται η διαδικασία της εκπαίδευσης. Επιπρόσθετα, για την βέλτιστη τοποθέτηση χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος Unsupervised Learning. Η φασματική απόδοση και η ενεργειακή κατανάλωση είναι οι κύριοι παράμετροι που θα επηρεάσουν την βέλτιστη διαδρομή και τοποθέτηση.

Η προσομοίωση θα εστιάσει στην σύγκριση και στην ανάδειξη τεχνικών που προσφέρουν αυτονομία, μέγιστη αποδοτικότητα, προσαρμοστικότητα και ευελιξία σε εφαρμογές πραγματικών σεναρίων.

Λέξεις Κλειδιά: Σχεδιασμός τροχιάς των μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων, Τοποθέτηση των μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων, Έλεγχος ισχύος, Ενισχυτική Εκμάθηση, Εποπτευόμενη Εκμάθηση, μη-εποπτευόμενη Εκμάθηση, Δίκτυα 5^{ης} Γενιάς και πάνω.

Abstract

In the framework of this dissertation, the various Machine Learning techniques that exist in the literature were studied to find the optimal route and UAV placement in three-dimensional space to optimally cover users in 5G and beyond networks.

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are one of the most promising solutions for the new generation wireless communication networks. Their flexibility and ability to provide seamless visual connection (LOS) to users has solved serious telecommunications coverage issues. However, there are challenges, such as finding the optimal route and placement (optimal trajectory & placement design) in 3D. Meeting the challenges will result in minimizing the flight time and energy consumption required, as well as optimizing spectral performance. The development of machine learning methods is rapidly upgrading the quality of services offered.

The purpose of this dissertation is to predict the optimal route to maximize telecommunications coverage as well as minimize flight time, which will be achieved using Reinforcement Learning (RL) and Supervised Learning (SL) machine learning techniques. More specifically, the RL Q learning algorithm was implemented which will be trained in the respective environment which consists of multiple routes and obstacles with the goal of finding a route that will maximize the efficiency of telecommunications coverage. The Q Learning algorithm is considered one of the top RL algorithms for finding the best solution. It is worth noting that interference from neighboring UAVs and users is a challenge that significantly affects the performance of UAVs in both optimal route and optimal placement. The solution to the interference challenge will be provided by the emission power control application to mitigate the interference levels and thus increase the QoS of the users.

In addition, a dataset was constructed using the MATLAB environment for the training of Supervised algorithms for predicting transmission power to deal with interference and also to find the optimal path by predicting the optimal path. The dataset that will be used includes specific labels (tags) according to which the training process will take place. In addition, the Unsupervised Learning algorithm was used for optimal placement. Spectral efficiency and energy consumption are the main parameters that will affect the optimal travel and placement.

The simulation will focus on comparing and highlighting techniques that offer autonomy, maximum efficiency, adaptability, and flexibility in real-world applications.

Keywords: *UAV Trajectory Design, UAV Placement, Power Control, Reinforcement Learning, Supervised Learning, Unsupervised Learning, 5G and beyond.*

1

Εισαγωγή

Η μετάδοση και η λήψη μεγάλων όγκων δεδομένων με υψηλή ταχύτητα με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος καθώς και η διαχείριση ετερογενών δικτύων αποτελούν μία σειρά απαιτήσεων που καλούνται να πληρούν. Είναι δεδομένο ότι οι βασικές τεχνολογίες του 4G αλλά με περαιτέρω βελτίωση θα υιοθετηθούν και στα δίκτυα νέας γενιάς. Η νέα προσέγγιση εναλλακτικών τρόπων βελτίωσης της ευφυΐας στο 5G είναι ο συνδυαστικός κρίκος μεταξύ των δικτύων νέας γενιάς και των υπηρεσιών που καλούνται να παρέχουν.

1.1 Δίκτυα 5G and Beyond

Η εμπορευματοποίηση του 5G ξεκίνησε το 2019 και η περαιτέρω υιοθέτηση του πραγματοποιήθηκε από το 2021 και μετά. Υπήρξε εξαιρετικό ερευνητικό ενδιαφέρον για το μελλοντικά ασύρματα 6G δίκτυα [1]. Η πανδημία του COVID-19 ανάγκασε τις περισσότερες επιχειρήσεις να λειτουργούν διαδικτυακά, δημιουργώντας μία νέα κανονικότητα με χώρο εργασίας χωρίς να υπάρχουν σύνορα. Η Ericsson έχει προβλέψει ότι θα υπάρξει γρηγορότερα εμπορευματοποίηση του 5G καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι υιοθετούν αυτή τη στροφή προς έναν χώρο εργασίας χωρίς σύνορα. Ως αποτέλεσμα αυτού οδηγούμαστε στην αύξηση της χρήσης του διαδικτύου που απαιτεί την ανάγκη για καλύτερη συνδεσιμότητα για την κάλυψη της αυξανόμενη ζήτησης για πιο αυστηρές απαιτήσεις δικτύου. Αυτό απαιτείται για να διευκολυνθούν αναδυόμενες τεχνολογίες όπως η εκτεταμένη πραγματικότητα [2], η απτική [3], τα συνδεδεμένα αυτόνομα συστήματα [4], τηλεϊατρική, Industrial Internet of Things (IIoT) [5], τα οποία είναι ευαίσθητα σε χρονική καθυστέρηση και απαιτούν εξαιρετικά γρήγορη ταχύτητα δεδομένων. Για παράδειγμα, η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και η εξαιρετικά γρήγορη μετάδοση δεδομένων μειώνει τους ρυθμούς σύγκρουσης και βελτιώνει την ασφάλεια των αυτόνομων οχημάτων. Αυτές οι εφαρμογές είναι απαραίτητες για τη διευκόλυνση της αυτόνομης και έξυπνης ζωής, της πολυαισθητηριακής εικονικής εμπειρίας, έξυπνες πόλεις, έξυπνη γεωργία και πολλά άλλα. Δυστυχώς, το πολλά υποσχόμενο κυψελωτό δίκτυο 5G δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε αυτές τις αυξανόμενες

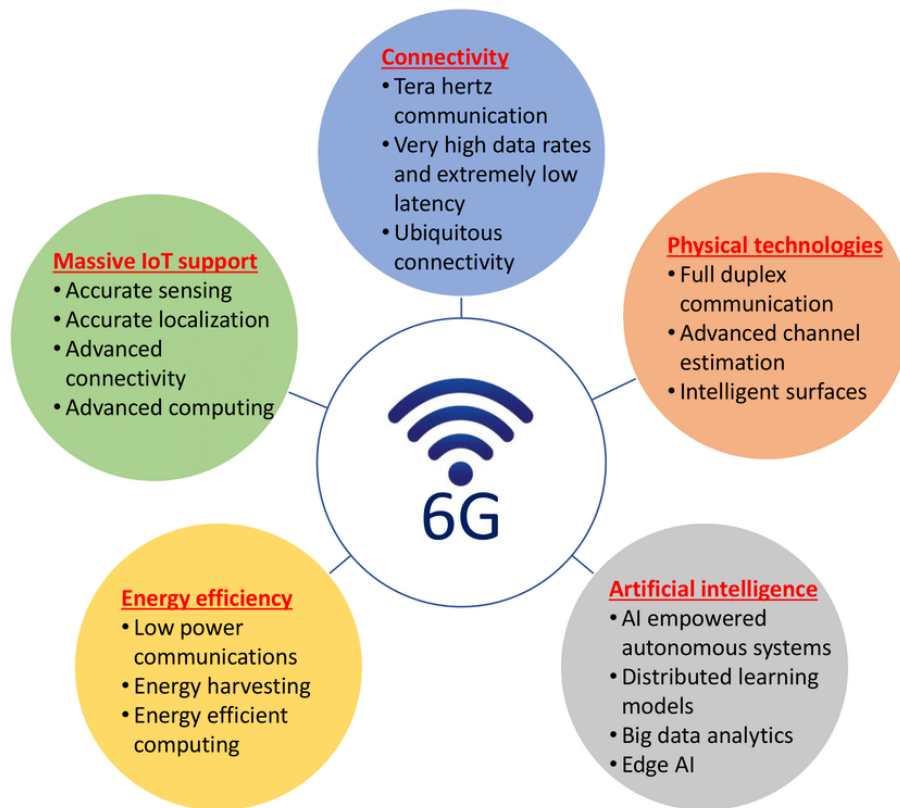
απαιτήσεις [6]. Επομένως, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για ανάπτυξη δικτύων επικοινωνίας 6G. Τα ασύρματα δίκτυα 6G προτείνονται επίσης για τη βελτίωση των κοινωνικών αναγκών, διευκολύνοντας έτσι την πραγματοποίηση των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) [7]. Οι προτεινόμενες απαιτήσεις δικτύου του 6G μπορούν να συνοψιστούν ως εξαιρετικά γρήγοροι ρυθμοί δεδομένων έως και 1 Tbps, εξαιρετικά χαμηλή χρονική καθυστέρηση (λιγότερο από 1ms), αυξημένη κινητικότητα και κάλυψη, ευέλικτη και αποτελεσματική σύνδεση σε τρισεκατομμύρια έξυπνες συσκευές, μέγιστη φασματική απόδοση που φτάνει τα 60 b/s/Hz, πολύ υψηλό σύστημα αξιοπιστίας και βελτιωμένη ασφάλεια δικτύου. Το 6G αναμένεται να έχει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των terabit ανά δευτερόλεπτο και χρονική καθυστέρηση λιγότερο από 1ms. Αναμένεται να δημιουργήσει το Internet of Everything, με πάνω από 100 συνδέσεις ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Για να επιτευχθεί αυτό, το 6G θα αξιοποιήσει το φάσμα των sub-terahertz και Terahertz (300 GHz έως 10 THz) [4], το οποίο παρέχει υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων σε σχέση με το φάσμα των Millimeter Waves (30–300 GHz) που υιοθετήθηκε στο 5G. Δημιουργείται η ανάγκη εξερεύνησης υψηλότερου φάσματος συχνότητας διότι είναι απαραίτητο επειδή η περιοχή κάτω των 6 GHz είναι ήδη κατειλημμένη. Εκτός από τον χώρο για περισσότερο φάσμα, το φάσμα των Terahertz οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων που είναι επιθυμητό στα μελλοντικά δίκτυα 6G. Ωστόσο, η μετάδοση σε φάσμα υψηλότερης συχνότητας είναι επιρρεπής σε υψηλή απώλεια διαδρομής (Pathloss), με αποτέλεσμα η απόσταση μετάδοσης να είναι περιορισμένη [5].

Επιπλέον, τεχνολογίες όπως οι αναδιαμορφώσιμες ευφυείς επιφάνειες (RIS), massive MIMO χωρίς κυψέλες, Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), που αναμένεται να οδηγήσει την πραγματοποίηση του 6G παρουσιάζονται παρακάτω. Ως RIS θεωρείται η τεχνολογία, η οποία θα αναπτυχθεί σε πόρτες, παράθυρα των κτιρίων ώστε να ανακλούν το λαμβανόμενο σήμα χωρίς παρεμβολές. Επιπλέον, θα αναλυθεί γιατί η τεχνολογία RIS είναι προτιμότερη έναντι των συμβατικών relays. Το massive MIMO εισάγεται στο κυψελωτό δίκτυο 5G με ένα πιο πυκνό δίκτυο σημείων πρόσβασης (APs). Αυτό αναπτύσσεται περαιτέρω στο 6G για να περιλαμβάνει ένα δίκτυο χωρίς κυψέλες (Cell-free). Τα οφέλη είναι τεράστια καθώς βελτιώνει τη φασματική απόδοση στα δίκτυα επικοινωνίας. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις με τη λήψη πληροφοριών για το κανάλι και ανησυχίες σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία που συνδέονται με ένα τόσο πυκνό δίκτυο από σημεία πρόσβασης. Επιπλέον το Pervasive AI θα παίξει κρίσιμο ρόλο για την πραγματοποίηση του 6G. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα (DNN) [8] θα έχουν καθοριστικό ρόλο για την ενεργοποίηση των ευφύων περιβαλλόντων στα δίκτυα της νέας γενιάς (5G and Beyond).

Τα δίκτυα μελλοντικής γενιάς είναι επιθυμητό να έχουν υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση και ασφαλή επικοινωνία. Η κβαντική επικοινωνία έχει προταθεί να επιτρέψει την ασφάλεια και να διευκολύνει την ταχύτερη επεξεργαστική ισχύ για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Ωστόσο, υπάρχουν αμφιβολίες εάν η έρευνα στην κβαντική επικοινωνία θα είναι αρκετά ώριμη για τη διευκόλυνση των συστημάτων επικοινωνίας 6G [3]. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία θα προσφέρει περισσότερα πέρα από το 6G, όταν η τεχνολογία θα οδεύει προς την εποχή του 7G. Το Blockchain είναι μια άλλη τεχνολογία η οποία εισήχθη στο κυψελωτό δίκτυο 5G που προτείνεται για τη διευκόλυνση της ασφάλειας και θα παρέχει την επιθυμητή ιδιωτικότητα και ακεραιότητα στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα.

Η ενεργειακή απόδοση είναι ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα για τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Θα πρέπει να κατασκευαστεί υλικό που είναι συμβατό με τις ενεργειακές απαιτήσεις του 6G. Το Ambient Backscatter Communication Systems (ABCS), είναι μια τεχνική Συγκομιδής Ενέργειας (EH), και προτείνεται για την ενεργοποίηση της ασύρματης φόρτισης. Αυτό δίνει χώρο για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η οποία έχει προταθεί ως απαίτηση για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα [4]. Με το ABCS, οι συσκευές έχουν μια εναλλακτική πηγή ενέργειας από την ασύρματη επικοινωνία. Αυτό είναι κατά συνέπεια επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των συσκευών. Η Ταυτόχρονη ασύρματη, μεταφορά ενέργειας και πληροφοριών (SWIPT), στο 6G, θα επιλύσει ζητήματα ενεργειακών απαιτήσεων στις συσκευές των χρηστών (UE) [9]. Ως

αποτέλεσμα αυτού θα επιτρέψει τα απτικά, το Internet of Bio-Nano Things και άλλες εφαρμογές με πολύ περιοριστικές ενεργειακές απαιτήσεις.



Σχήμα 1: Οι εφαρμογές που προσφέρει το δίκτυο της 6^{ης} Γενιάς [14]

1.2 Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από την 1η στην 6η Γενιά

Το αναλογικό ασύρματο κυψελωτό δίκτυο, το οποίο αποτέλεσε την πρώτη γενιά ασύρματης επικοινωνίας, ήταν σε χρήση τη δεκαετία του 1980. Αυτό διευκόλυνε τις φωνητικές κλήσεις μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Το Advanced Mobile Phone System (AMPS), International Mobile Telecommunications Standard (IMTS) και το Point to Call αποτέλεσαν τη βάση για το 1G. Επιπροσθέτως, ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες υιοθέτησαν το Nordic Mobile Radio System (NMR). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα σε προκλήσεις συμβατότητας. Το δίκτυο πρώτης γενιάς μονοπωλήθηκε και δεν ήταν προσιτό για πολλούς. Το 2G έφερε υψηλής ποιότητας και ασφαλή μετάδοση φωνής και βασικών δεδομένων για κινητές υπηρεσίες όπως φαξ και γραπτά μηνύματα. Το GSM βρίσκεται στον πυρήνα του 2G. Θεωρήθηκε ως το «Groupe Speciale Mobile» μια ομάδα τεχνικού προσωπικού που δημιουργήθηκε από την Διοίκηση Ταχυδρομικών και Τηλεπικοινωνιών (CEPT) για την ανάπτυξη ψηφιακής κινητής τεχνολογίας επικοινωνιών [10]. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε ως το ασύρματο αντίστοιχο της σταθερής γραμμής συστήματος Ψηφιακού Δικτύου Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (ISDN). Το ακρωνύμιο αργότερα άλλαξε σε «Παγκόσμιο σύστημα κινητής επικοινωνίας». Το πρότυπο GSM αναπτύχθηκε το 1991, χρησιμοποιώντας τη ζώνη των 900 MHz [11].

Η αρχιτεκτονική GSM περιλαμβάνει το υποσύστημα κινητής τηλεφωνίας, δικτύου και μεταγωγής, και το Υποσύστημα Σταθμού Βάσης (BSS), γνωστό και ως ραδιοδίκτυο. Επιπροσθέτως, περιλαμβάνεται ένα έξυπνο υποσύστημα δικτύου που επιτρέπει την έξυπνη λειτουργικότητα όπως οι προπληρωμένες υπηρεσίες και υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων (SMS). Το GSM χρησιμοποίησε την τεχνολογία Frequency Division Multiple Access (FDMA) και Time Division Multiple Access (TDMA) για ταυτόχρονη επικοινωνία μεταξύ του συνδρομητή και του σταθμού βάσης [11]. Η πρώτη επέτρεπε την επικοινωνία χρησιμοποιώντας πολλαπλές συχνότητες, ενώ η τελευταία επέτρεπε την επικοινωνία μέσω πολυπλεξίας με χρονοθυρίδες. Η υπηρεσία General Packet Radio Service (GPRS) αναπτύχθηκε για να διευκολύνει λειτουργίες όπως η υπηρεσία always-on, μεγαλύτερη χωρητικότητα, περιεχόμενο που βασίζεται στο Διαδίκτυο, δεδομένα υπηρεσιών που βασίζονται σε πακέτα, που ενεργοποιούν υπηρεσίες όπως έγχρωμη υπηρεσία διαδικτύου, email on the move και οπτικές επικοινωνίες, μηνύματα πολυμέσων και υπηρεσίες που βασίζονται στην τοποθεσία [12].

Στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα, το 3G αναπτύχθηκε ως αναβάθμιση των χαρακτηριστικών του 2G. Επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων στην περιοχή από 300 kbps–30 Mbps και υπηρεσίες όπως τηλεδιάσκεψη, συστήματα απομακρυσμένης εποπτείας και ενεργοποιημένες υπηρεσίες πληροφοριών. Τεχνολογίες όπως το Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), Universal Mobile Telephone Service (UMTS) ήταν το κλειδί για την επίτευξη του 3G. Το 3rd Generation Partnership Programme (3GPP) δημιουργήθηκε το 1998 για να επιβλέπει την εφαρμογή του UMTS και άλλων τεχνολογιών για το 3G. Το 3GPP2 δημιουργήθηκε επίσης στις Ηνωμένες Πολιτείες για να αναπτυχθούν οι παγκόσμιες προδιαγραφές για τα συστήματα 3G [12].

Το Long-Term Evolution (LTE) αναπτύχθηκε το 2009. Με τον πολλαπλασιασμό των smartphones και tablets, διαδικτυακών παιχνιδιών και άλλων υπηρεσιών, το 4G ήταν μια σημαντική επιτυχία, ενεργοποιώντας αυτές τις υπηρεσίες με ταχύτητα δεδομένων 100 Mbps–1000 Mbps. Αν και η πρώτη κυκλοφορία του LTE έγινε το 2005 από το 3GPP στην έκδοση 6, η πλήρης ανάπτυξη επιτεύχθηκε στην έκδοση 8 το 2008. Το LTE θεωρείται συχνά ως το 4G. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά του LTE-Advanced όπως ο αυξημένος ρυθμός δεδομένων αιχμής, η φασματική απόδοση, οι ταυτόχρονοι ενεργοί συνδρομητές, και η βελτιωμένη απόδοση του cell-edge καθιστούν το πραγματικό 4G. Επιτεύχθηκε υψηλότερος ρυθμός δεδομένων και χαμηλότερος χρονική καθυστέρηση σε 20 ms–100 ms, η οποία ήταν χαμηλότερη από αυτή που υπήρχε στο 3G. Βίντεο με διευκόλυνση 4G ροής, διαδικτυακά παιχνίδια και πολλά άλλα [13]. Η ανάγκη για υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χαμηλότερη χρονική καθυστέρηση έδωσε χώρο για τον οραματισμό και για τον σχεδιασμό του 5G.

Η εμπορευματοποίηση του 5G ξεκίνησε το 2019 και ανοίγει νέες περιπτώσεις χρήσης στο Internet of Things (IoT), ανοίγονται νέοι ορίζοντες για υπηρεσίες όπως, καθηλωτικό gaming, εικονική πραγματικότητα και πολλά άλλα. Το 6G αναμένεται να έχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στο εύρος 100 Gbps – 1 Tbps και καθυστέρηση μικρότερη από 1 ms. Αυτό ανοίγει εφαρμογές στην ολογραφική επικοινωνία, στο απτικό διαδίκτυο, στην εκτεταμένη πραγματικότητα και πολλά άλλα [7]. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει την τεχνολογία, τους ρυθμούς δεδομένων και τις εφαρμογές υποστήριξης από 1G έως 6G. Εμφανίζεται επίσης η οι μεταβολές στην χρονική καθυστέρηση από 1G σε 6G [14].

Πίνακας 1. Σύγκριση των διαφορετικών γενιών των ασύρματων επικοινωνιών από την 1^η στην 6^η γενιά

Χαρακτηριστικά	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Τεχνολογία	AMPS,IMT S,PTT	GSM,GPRS,CDMA ,EDGE	WCDMA UMTS, TD-SDMA, CDMA2000 WiMAX	LTE MIMO	Massive MIMO, network densification, millimeter-wave transmission	RIS , Cell-free Massive MIMO , Terahertz spectrum , AI
Εύρος Data-rate	>3 kbps	10 kbps–200 kps	300 kbps–30 Mbps	100 Mps–1000 Mbps	1–30 Gbps	100 Gbps–1 Tbs
Καθυστερήσι	>1000 ms	300 ms–1000 ms	100 ms–500 ms	20 ms–100 ms	1 ms–10 ms	<1 ms
Πολλαπλή πρόσβαση/ Πολυπλεξία συστημάτων	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	OFDMA	OFDM, GFDM FBMC,Adaptive Time-Frequency. Multiplexing	OMA, NOMA, OAM, Spatial Multiplexing
Εφαρμογές	Κλήσεις, Φαξ	Κρυπτογραφημένες υπηρεσίες και υπηρεσίες δεδομένων	Ταχύτερα δεδομένα, βιντεοκλήσεις, συστήματα απομακρυσμένης εποπτείας	Τηλεοπτικό περιεχόμενο HD, Online Gaming	Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Εικονική πραγματικότητα, Καθηλωτικό gaming	Αυτόνομα συστήματα, συσκευές αφής, Internet of Everything, BCI, Τηλεϊατρική

1.3 Τεχνολογίες του 6G

1.3.1 Διάχυτη Τεχνητή Νοημοσύνη

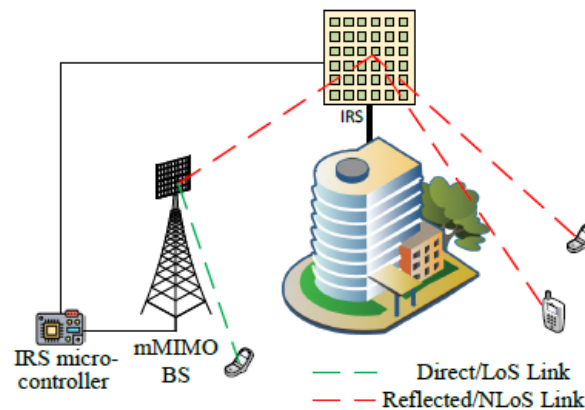
Την τελευταία δεκαετία, η πρόοδος στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης (AI) έχει επιταχυνθεί λόγω της εισαγωγής της βαθιάς μάθησης (DL) και της ευκολίας στην εφαρμογή της. Αυτές οι εξελίξεις, σε συνδυασμό με την ικανότητα επεξεργασίας δεδομένων και λήψης αποφάσεων του AI, το έχουν καταστήσει δημοφιλές εργαλείο σε διάφορους τομείς όπως η ασύρματες επικοινωνίες. Ένα από τα βασικά οράματα του 6G είναι η υποστήριξη της συνδεσιμότητας του σε δισεκατομμύρια ετερογενείς συσκευές στο δίκτυο. Αυτή η απαίτηση το καθιστά απαραίτητο να αντικαταστήσει τα παραδοσιακά μαθηματικά μοντέλα και αλγόριθμους με σύνθετα, βασισμένα σε δεδομένα τεχνικές μηχανικής μάθησης [15].

Επιπλέον, οι συμβατικές θεωρίες δεν μπορούν να προσαρμοστούν βέλτιστα στις διακυμάνσεις σε πραγματικό χρόνο σε συνθήκες λειτουργίας, μη γραμμικότητες και ατέλειες πρακτικών συστημάτων για ποιοι αλγόριθμοι DL και Reinforcement Learning ταιριάζουν καλύτερα [16]. Ως αποτέλεσμα αυτού, η τεχνητή νοημοσύνη θεωρείται μία από τις βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν την αντιμετώπιση των κρίσιμων προκλήσεων που προκύπτουν από το σύστημα επικοινωνίας 6G.

1.3.2 Ευφρείς επιφάνειες με δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης

Οι επαναδιαμορφώσιμες ευφρείς επιφάνειες (RIS) [17] αντιμετωπίζονται ως βασική τεχνολογία που θα εφαρμοστεί κατά κόρον στο 6G, ακριβώς όπως το massive MIMO στο 5G [18]. Έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνουν την απόδοση των δικτύων και ουσιαστικά χωρίς παρεμβολές.

Εγγυώνται τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης επειδή είναι σχετικά παθητικές και απαιτούν μόνο περιορισμένο αριθμό ενεργών κεραιών στο BS για να επιτευχθούν τεράστια κέρδη MIMO. Το πλεονέκτημα των RIS δεν είναι μόνο ότι έχουν παθητικά στοιχεία που βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση αλλά έχουν επίσης χαμηλό κόστος σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις. Έχουν παραλλαγές ονομάτων όπως ως μεγάλες, έξυπνες επιφάνειες, αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες και μετα-επιφάνειες ελεγχόμενες από λογισμικό. Το Σχήμα 2 δείχνει μια επικοινωνία υποβοηθούμενη από RIS σύστημα με το ανακλαστικό σήμα RIS, επιτρέποντας έτσι την επικοινωνία από το BS στο κινητή μονάδα.



Σχήμα 2: Ύπαρξη έξυπνης αναδιαμορφώσιμης επιφάνειας σε τηλεπικοινωνιακό σύστημα [14]

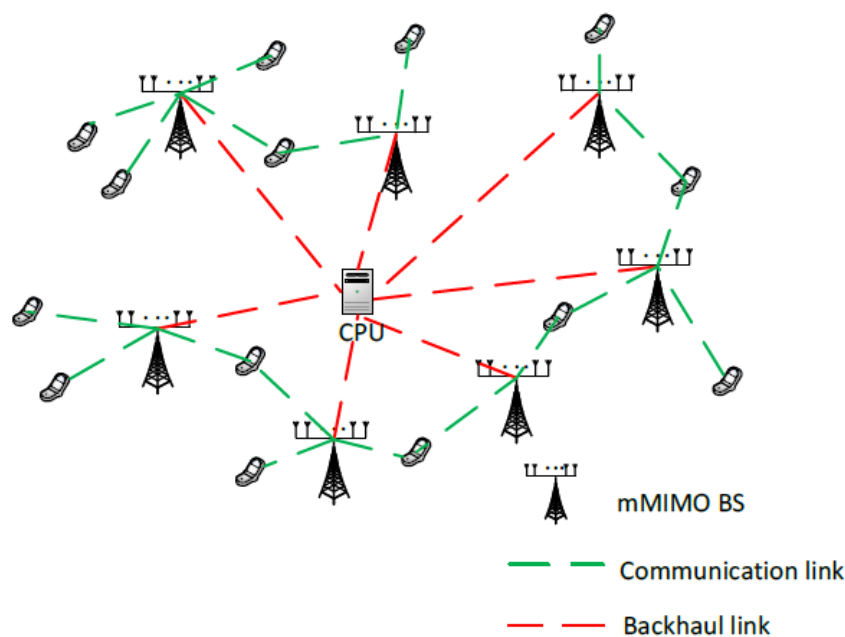
Οι μετα-επιφάνειες υλοποιούνται με συμβατικές συστοιχίες ανάκλασης, υγρές κρυσταλλικές συστοιχίες [19] ή μεταϋλικά που ορίζονται από λογισμικό. Τα RIS βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση από την στιγμή που δεν απαιτούν ενισχυτές ισχύος, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με άλλα συστήματα relays. Κατά συνέπεια, το RIS βελτιώνει το πρόβλημα της παρεμβολής σε ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο αφού το RIS είναι παθητικό. Επίσης το να είναι ένα σύστημα παθητικό καθιστά επίσης εύκολη την ανάπτυξη και μπορούν να αναπτυχθούν σε κτίρια και κατασκευές. Μπορεί επίσης να ρυθμιστεί για να παρέχει ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer). Το RIS υποστηρίζει επίσης επικοινωνία συσκευής με συσκευή χαμηλής κατανάλωσης (D2D), που βοηθά στην πραγματοποίηση της ταυτόχρονης ασύρματης μεταφοράς πληροφορίας και ισχύος (SWIPT).

Η φασματική και η ενεργειακή απόδοση μπορούν επίσης να βελτιωθούν με την από κοινού βελτιστοποίηση της ενεργητική μετάδοσης beamforming στο AP και το RIS να αντανakλά το beamforming στο RIS. Επομένως, το RIS βελτιώνει τη φασματική απόδοση. Λειτουργώντας παθητικά, τα RIS συμβάλλουν στη μείωση του κόστους υλοποίησης της μελλοντικής ασύρματης επικοινωνίας [20]. Αλλά πλεονεκτήματα του RIS είναι: η πιο ενεργειακά αποδοτικά και περιβαλλοντικά φιλική λύση σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα relays και επίσης συμβατό με τα πρότυπα και υλικά των προηγούμενων ασύρματων γενεών. Εξετάζεται επίσης η ανάπτυξη του RIS για την ασφάλεια ασύρματων δικτύων.

1.3.3 Massive MIMO χωρίς κυψέλες

Ο συνδυασμός της τεχνολογίας Time Division Duplex (TDD), της λειτουργίας Massive MIMO, του πυκνά κατανομημένου δικτύου και του δικτύου με επίκεντρο τον χρήστη αναφέρεται στην τεχνολογία της πανταχού παρούσας Massive MIMO χωρίς κυψέλες. Το Massive MIMO χωρίς κυψέλες, το οποίο είναι μία γενικά υιοθετημένη ορολογία, συνδυάζει τις κατανομημένες έννοιες MIMO και Massive MIMO έτσι ώστε να μην υπάρχουν όρια και κυψέλες στο δίκτυο. Αυτό

επιτρέπει στους χρήστες να κινούνται απρόσκοπτα από το ένα δίκτυο στο άλλο. Εξουδετερώνει προβλήματα παρεμβολών και μειώνει τις συχνές διαπομπές στα τρέχοντα δίκτυα, βελτιώνοντας έτσι την εμπειρία του τελικού χρήστη. Το Σχήμα 3 δείχνει μια εικονογραφική διάταξη του συστήματος επικοινωνίας Massive MIMO χωρίς κυψέλες [8]. Το Massive MIMO χωρίς κυψέλες έχει ξεπεράσει σημαντικά τα υπάρχοντα συστήματα μικρών κυψελών σε απόδοση και καθίσταται πιο ανθεκτικό στο φαινόμενο shadow fading correlation. Η χωρική πολυπλεξία στο Massive MIMO επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται πόρους φάσματος αποτελεσματικά. Το Massive MIMO χωρίς κυψέλες παρουσιάζει υψηλή φασματική απόδοση, επεκτασιμότητα συστήματος, και σχεδόν βέλτιστη γραμμική επεξεργασία [21]. Μπορεί επίσης να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της απανταχού, εξαιρετικά αξιόπιστης επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης η οποία είναι επιθυμητή στα δίκτυα 6G. Οι δυνατότητες των μεγαλύτερων ευφών επιφανειών (LIS) σε λειτουργία Massive MIMO έχουν σχεδιαστεί και επίσης στις δορυφορικές επικοινωνίες LEO με χρήση της πλήρους επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (FFR).



Σχήμα 3: Η απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του Cell-free Massive MIMO (Imoize et al., 2021)

1.3.4 Επικοινωνία Ambient Backscatter

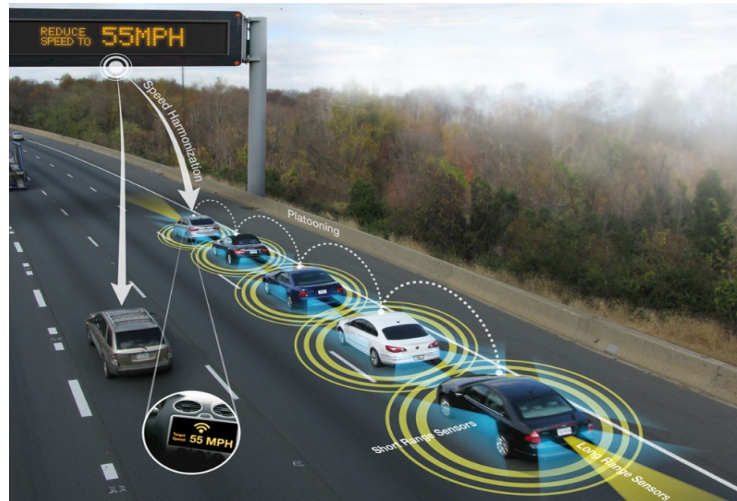
Το Ambient Backscatter (AB) προτάθηκε για να επιτρέψει τη λειτουργία μικροσκοπικών συσκευών χωρίς μπαταρία, έτσι ώστε να τροφοδοτούνται με ανακατεύθυνση σημάτων RF χωρίς να απαιτούν ενεργή μετάδοση RF. Η επικοινωνία Ambient Backscatter είναι μια μορφή επικοινωνίας που μπορεί να συλλέξει ενέργεια από συσκευές στο περιβάλλον, όπως το Wi-Fi, τηλέοραση και το σήμα RF για τη διαμόρφωση πληροφοριών. Όταν το παθητικό σύστημα Ambient Backscatter είναι ενσωματωμένο με ένα ενεργό σύστημα μετάδοσης, σχηματίζει το Symbiotic Radio (SR). Το SR αντιμετωπίζει τα προβλήματα ενεργειακής απόδοσης σε συσκευές κατανάλωσης χαμηλής ισχύος όπως δίκτυα αισθητήρων. Αυτό βοηθά στη μείωση του κόστους των συσκευών με εξαρτήματα χαμηλής κατανάλωσης και μειωμένη υποδομή [22]. Επίσης δεν χρειάζεται παραχώρηση διαφορετικού φάσματος συχνοτήτων για τα συστήματα Ambient Backscatter Communication (ABCS), βελτιώνοντας έτσι τη χρήση των πόρων του φάσματος. Όταν τελειοποιηθεί, Η επικοινωνία Backscatter θα ενισχύσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των

κινητών συσκευών. Επιπλέον αναπτύχθηκαν αισθητήρες Ambient Backscatter Communication (ABC) για την επίλυση του προβλήματος που προκύπτει από τη συγχώνευση τοπικών αποφάσεων σε κανάλια εξασθετισμού πολλαπλής πρόσβασης στο WSN, λαμβάνοντας υπόψη το IoT οι αισθητήρες ABC αναπτύσσονται για να ανιχνεύσουν την παρουσία ή απουσία ενός δεδομένου φαινομένου και μεταδίδουν τις αποφάσεις τους σε ένα πολλαπλών-κεραιών fusion center reader (FCR). Σε αυτή την περίπτωση, ανακλάται ένα μέρος ενός προσπίπτοντος σήματος των ραδιοσυχνοτήτων και με αυτό τον τρόπο διευκολύνει την ανάπτυξη κανόνων συγχώνευσης αποφάσεων σε κατάσταση πλήρους και στατιστικής κατάστασης καναλιού (CSI) για τη βελτίωση της υλοποίησής τους και τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Πρόσφατα αντιμετωπίστηκε το θέμα της ανίχνευσης συμβόλων στο ABCS με τον αναγνώστη πολλαπλών κεραιών. Αξιοποιώντας τη διαμόρφωση πλήκτρων ON-OFF, σχεδιάστηκε ο βέλτιστος ανιχνευτής, ο οποίος μπορεί να αποφύγει το φαινόμενο σφάλματος επιπέδου. Επιπλέον, οι πολλαπλές κεραίες χρησιμοποιούνται στη συσκευή ανάγνωσης για τη βελτίωση του ποσοστού σφάλματος bit (BER) [23] και την επέκταση του εύρους επικοινωνίας του αναγνώστη ετικετών.

1.4 Εφαρμογές του 6G

1.4.1 Οδήγηση με τηλεχειρισμό

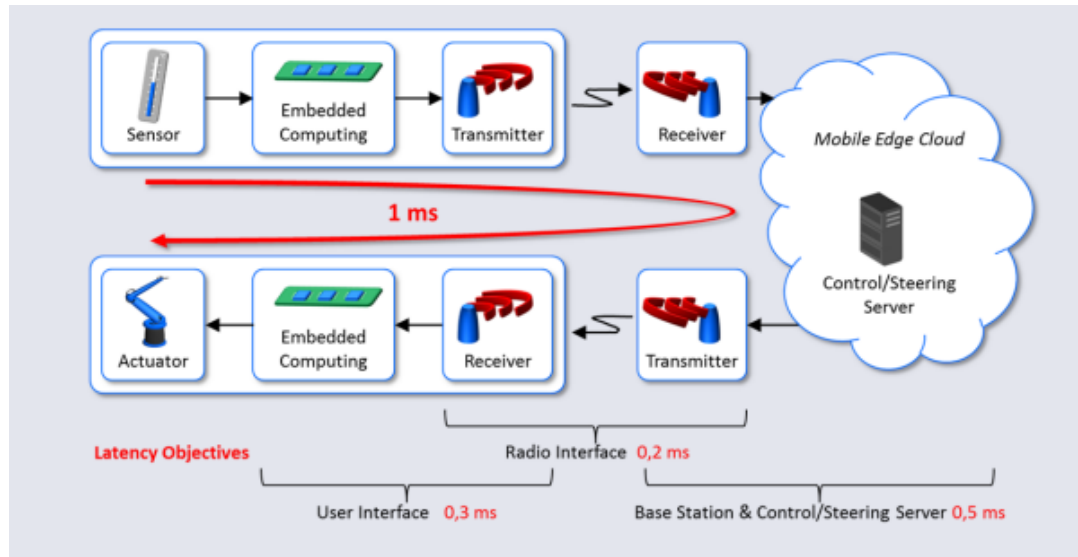
Το 6G προτείνεται για την αύξηση της λειτουργικότητας της Αυτόνομης Οδήγησης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Υπάρχει ενδιαφέρον σε τηλεχειριζόμενη οδήγηση (ή ημιαυτόνομα οχήματα) όπου ένας άνθρωπος ελέγχει το όχημα του από απόσταση. Η τηλεχειριζόμενη οδήγηση έχει χρησιμοποιηθεί στην εξερεύνηση βαθέων υδάτων και διαστήματος. Εταιρείες όπως η Ericsson και η Huawei έχουν δοκιμάσει τον τηλεχειρισμό σε δίκτυα 5G. Η τηλεχειριζόμενη οδήγηση απαιτεί εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση που μεταδίδει σήματα και οδηγίες μεταξύ του οδηγού και του οχήματος, ιδιαίτερα ενόψει του κινδύνου όπου χρειάζεται άμεση ανταπόκριση. Αυτό, εάν επιτευχθεί με τον βέλτιστο τρόπο, θα βελτιώσει τις υπηρεσίες ενοικίασης αυτοκινήτων του μέλλοντος. Κρίσιμο ρόλο παίζει επίσης το υψηλό επίπεδο ασφάλειας, ιδιωτικότητας και ακεραιότητας του δικτύου. Αν και η έρευνα στοχεύει στα πλήρως αυτόνομα οχήματα, ο τηλεχειρισμός είναι επιθυμητός όταν η αυτόνομη λειτουργία αποτυγχάνει ή ένα περίπλοκο σενάριο απαιτεί ανθρώπινη παρέμβαση. Τα αυτόνομα οχήματα εξετάζονται στο πλαίσιο του αναδυόμενου 5G [24]. Ωστόσο, το 5G στην τρέχουσα κατάσταση ανάπτυξής του δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις πραγματικές απαιτήσεις ενός πλήρους ανεπτυγμένου ασύρματου δικτύου 5G. Έτσι, ενισχύεται η ανάγκη για ανάπτυξη ασύρματου δικτύου 6G.



Σχήμα 4: Επικοινωνία μηχανής προς μηχανή στην αυτόνομη οδήγηση [24]

1.4.2 Απτικό Διαδίκτυο

Το απτικό διαδίκτυο επιτρέπει την απτική αλληλεπίδραση με μηχανές, δίνοντας αφορμή για οπτική ανατροφοδότηση και ρομποτικό έλεγχο. Αυτό διευκολύνει την αποτελεσματική αλληλεπίδραση ανθρώπου με μηχανή, μηχανή-μηχανή, με βασικά παραδείγματα που βρέθηκαν στη βιομηχανία, τη ρομποτική και την τηλεπαρουσία, την εικονική πραγματικότητα, την επαυξημένη πραγματικότητα, την υγειονομική περίθαλψη, την οδική κυκλοφορία, την εκπαίδευση, τον πολιτισμό και το smart grid. Αυτή η τεχνολογία είναι χρήσιμη όπου απαιτείται ανθρώπινη παρουσία για την πραγματοποίηση μίας δραστηριότητας. Μια πολύτιμη εφαρμογή του απτικού διαδικτύου είναι στην τηλεχειρουργική, που επιτρέπει στους χειρουργούς να πραγματοποιήσει χειρουργική επέμβαση εξ αποστάσεως όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Η κύρια πρόκληση με το απτικό διαδίκτυο είναι να υπάρχει ένα απρόσκοπτο δίκτυο και μια καθυστέρηση που δεν αντιλαμβάνονται οι άνθρωποι. Για να επιτευχθεί αυτό, η χαμηλή καθυστέρηση που απαιτείται είναι 1 ms - αυτή είναι η κύρια απαίτηση για το απτικό διαδίκτυο. Ωστόσο, οι δοκιμές έχουν δείξει ότι τα υπάρχοντα δίκτυα 5G έχουν καθυστέρηση των 10–16 ms. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι τα ασύρματα δίκτυα 6G, τα οποία προτείνονται να έχουν καθυστέρηση μικρότερη από 1 ms, θα επιτρέψουν την απτική σύνδεση στο διαδίκτυο και την απτική επικοινωνία. Επιπλέον, η πολύ υψηλή ακρίβεια είναι επιθυμητή και θα εγγυηθεί από το 6G. Ένα άλλο επιθυμητό χαρακτηριστικό του απτικού διαδικτύου είναι η ασφάλεια. Το blockchain, μια προτεινόμενη τεχνολογία για το 6G, έχει προταθεί για να επιτρέψει μία αξιόπιστη, ασφαλής και απτική αρχιτεκτονική Διαδικτύου [25].



Σχήμα 5: Σχήμα απεικόνισης καθυστέρησης στην αρχιτεκτονική του Tactile Internet [25]

2

Εισαγωγή στα UAVs

Τα μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), επίσης κοινώς γνωστά ως drones, αποτελούν αεροσκάφη τα οποία συνήθως χειρίζονται με τηλεχειρισμό ή με ενσωματωμένα προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών χωρίς την ανθρώπινη παρουσία εντός του αεροσκάφους. Τα UAV χρησιμοποιήθηκαν αρχικά κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές που είχαν ως σκοπό την απομακρυσμένη επιτήρηση του εχθρικού εδάφους, την ένοπλη απομακρυσμένη επίθεση και την μείωση των απωλειών των πιλότων [26].

Την τελευταία δεκαετία τα UAV κατασκευάζονται πλέον και για πολιτικές και εμπορικές εφαρμογές αφού η πρόοδος των τεχνολογιών κατασκευής οδήγησε σε οικονομικότερο κόστος κατασκευής των UAV. Έτσι λόγω της αύξησης της ζήτησης των UAVs, μία πληθώρα εφαρμογών τους έχει προκύψει στο επαγγελματικό και στον κοινωνικό τομέα. Τα UAV χρησιμοποιούνται πλέον στην δημόσια εναέρια επιθεώρηση, στην λήψη φωτογραφιών και βίντεο, στον έλεγχο της κυκλοφορίας στους δρόμους, στην γεωργία ακριβείας, στην έρευνα και στην διάσωση, στην παράδοση δεμάτων καθώς και στις τηλεπικοινωνίες [27].

Στην πράξη, υπάρχουν πολλοί τύποι UAV λόγω των πολυάριθμων και διαφοροποιημένων εφαρμογών τους. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ενιαίο πρότυπο για την κατηγοριοποίηση των UAVs. Τα UAVs πρακτικά χωρίζονται σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τα κριτήρια σύγκρισής τους, όπως η λειτουργικότητα, το ωφέλιμο φορτίο, το μέγεθος, η αντοχή, η διαμόρφωση των πτερυγίων, οι μέθοδοι τηλεχειρισμού τους, η ωφέλιμη εμβέλεια τους, το ύψος πτήσης τους, η μέγιστη ταχύτητα και παροχή ενέργειας τους. Για παράδειγμα όσο αφορά την μορφή των πτερυγίων υπάρχουν δύο κύριοι τύποι, τα UAVs σταθερών πτερυγίων και αυτά των κινούμενων (τετρακόπτερα). Τα UAVs σταθερών πτερυγίων έχουν υψηλότερη μέγιστη ταχύτητα πτήσης και διαθέτουν μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο για ταξίδια μεγαλύτερων αποστάσεων σε σύγκριση με τα UAVs κινούμενων πτερυγίων. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματά των UAVs σταθερών πτερυγίων είναι η ανάγκη ύπαρξης αεροδιάδρομου ώστε να απογειωθεί, σε αντίθεση με τα UAVs κινούμενων πτερυγίων τα οποία έχουν την δυνατότητα να απογειώνονται κατακόρυφα

και να παραμένουν σε στατικά στον αέρα. Από πρακτική άποψη το είδος του UAV που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής που πρόκειται να εξυπηρετήσει όπως η αντοχή, το ωφέλιμο φορτίο, το περιβάλλον και το κόστος [27].

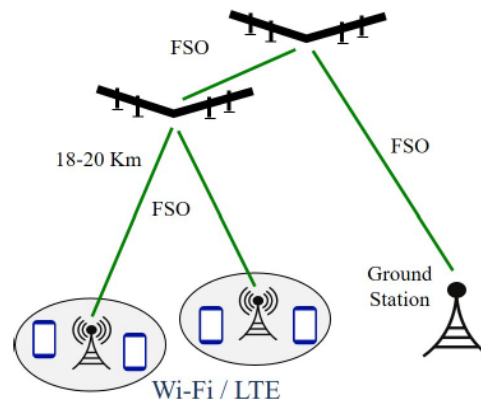
Συνολικά, Οι εναέριες πλατφόρμες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους ανάλογα με το υψόμετρο τους: Συνήθως χρησιμοποιούνται πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (LAPs) που βοηθούν τις κυψελωτές επικοινωνίες καθώς είναι πιο αποδοτικές και επιτρέπουν γρήγορη ανάπτυξη. Επιπλέον, τα LAPs συνήθως παρέχουν συνδέσεις οπτικής επαφής μικρής εμβέλειας (LOS), που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της επικοινωνίας [28]. Οι πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (HAPs) όπως τα αερόστατα μπορούν επίσης να παρέχουν κυψελωτή συνδεσιμότητα. Σε σύγκριση με τα LAP, Τα HAP έχουν ευρύτερη κάλυψη και μπορούν να παραμείνουν πολύ περισσότερο στον αέρα. Ωστόσο, η ανάπτυξη μίας πλατφόρμας HAP είναι πιο περίπλοκη και θεωρούνται κυρίως ως μέσο παροχής διαδικτύου συνδεσιμότητας σε μεγάλα τμήματα του παγκόσμιου πληθυσμού και επί του παρόντος δεν εξυπηρετούνται από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Κυρίως, η χρήση HAP σε κυψελωτά δίκτυα μπορεί να προκαλέσει ολική διακοπή δικτύου λόγω των εξαιρετικά μεγάλων παρεμβολών μεταξύ των κυψελών. Ως εκ τούτου, σπάνια εξετάζονται στη βιβλιογραφία για τα κυψελωτά δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV, αλλά περισσότερο επιδιώκονται από εταιρείες του Διαδικτύου [28].

2.1 Παραδείγματα εφαρμογών σε HAPs και LAPs

Έχουν ήδη κατασκευαστεί και παρουσιαστεί αρκετά πρωτότυπα επικοινωνίας drone στη λογοτεχνία ή και στο ευρύτερο κοινό κατά τη διάρκεια εκθέσεων και εμπορικών εκδηλώσεων. Το κύριο αντικείμενο τους είναι να επεκτείνουν την κάλυψη όπου δεν υπάρχουν επίγειες ασύρματες υποδομές ή για τη βελτίωση της απόδοσης του τελικού χρήστη με τη χρήση και την ανάπτυξη ευέλικτων και δυναμικών σταθμών βάσης εξυπηρέτησης όπου απαιτείται. Στην παράγραφο που ακολουθεί θα αναλυθούν οι πιο ενδιαφέροντες εφαρμογές που στοχεύουν τόσο σε μεγάλο υψόμετρο HAPs (Facebook Aquila και Google Loon) όσο και χαμηλό υψόμετρο LAPs (Nokia F-Cell και Eurecom Perfume) [29].

2.1.1 Facebook Aquila Project

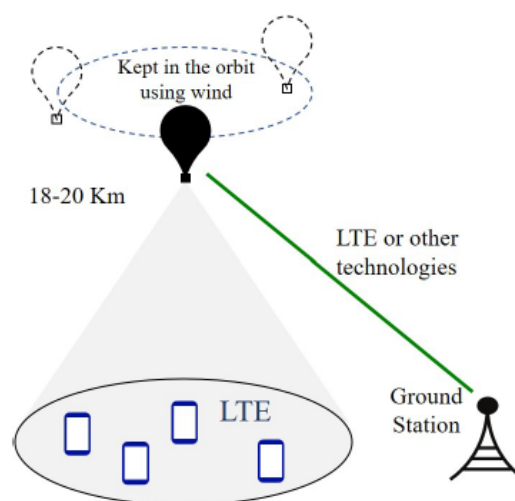
Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα UAV BS σε μεγάλο υψόμετρο είναι το Facebook Aquila project, που στοχεύει στην παροχή κάλυψης διαδικτύου σε απομακρυσμένες περιοχές απευθείας από τον ουρανό. Το κύριο συστατικό της αρχιτεκτονικής του συστήματος είναι ένα μη επανδρωμένο αυτόνομο αεροσκάφος, με το όνομα Aquila, το οποίο είναι ικανό να πετά σε υψόμετρο 18-20 km πάνω από μια καθορισμένη τροχιά και να δημιουργεί μια περιοχή επικοινωνιακής κάλυψης περίπου 100 km. Το Aquila αυτοτροφοδοτείται μέσω ηλιακών συλλεκτών ενσωματωμένων σε φαρδύτερα φτερά από ένα Boeing 737 και έχει μικρό βάρος για να αυξήσει το χρόνο της πτήσης του. Επιπλέον, με ένα σύστημα ελέγχου του δίνεται η δυνατότητα να προσαρμόσει τη διαδρομή που βασίζεται στο GPS και παρακολουθήσει τους πιο σημαντικούς παραμέτρους πτήσης (όπως κατεύθυνση, υψόμετρο, ταχύτητα αέρα κ.λπ. ...), και διαθέτει έλικες ικανές να λειτουργούν τόσο σε χαμηλά όσο και σε μεγάλα υψόμετρα, επομένως σε διαφορετικές πυκνότητες αέρα. Το Aquila χρησιμοποιεί οπτικά link ελεύθερου χώρου (FSO) για την πρόσβαση της σύνδεσης σε επίγεια Access Points, τα οποία με τη σειρά τους εξυπηρετούν τους επίγειους χρήστες χρησιμοποιώντας είτε Wi-Fi ή τεχνολογία LTE. Η αρχιτεκτονική του συστήματος Facebook Aquila είναι απεικονίζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Παρουσίαση της αρχιτεκτονικής Facebook Aquila [29]

2.1.2 Google Loon

Το Google Loon, ένα έργο παρόμοιο με το Facebook Aquila, [30] στοχεύει στην παροχή σύνδεσης στο διαδίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση στρατοσφαιρικών αερόστατων για αναμετάδοση ραδιοζεύξεων επικοινωνίας από επίγειους σταθμούς του LTE προς τους απομακρυσμένους επίγειους χρήστες που βρίσκονταν εκτός της κάλυψης των υπάρχοντων επίγειων κινητής τηλεφωνίας επικοινωνιακών υποδομών. Ωστόσο, το Loon της Google έχει μια σειρά από χαρακτηριστικά που το κάνουν διαφορετικό από αυτό του Facebook Aquila. Το πρώτο είναι ότι η επικοινωνία μπορεί να μεταδίδεται απευθείας στον τελικό χρήστη και όχι σε επίγεια Access Points. Το δεύτερο σχετίζεται με τον τρόπο τοποθέτησης των αερόστατων στον ουρανό ώστε να υπάρχει έλεγχος για να δημιουργηθεί η απαιτούμενη περιοχή κάλυψης στο έδαφος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αντί της χρήση ελικοφόρων κινητήρων χρησιμοποίησαν κατάλληλα τα υψόμετρα, εκμεταλλευόμενοι τα στρωματοποιημένα ρεύματα ανέμου στην στρατόσφαιρα. Στην πραγματικότητα, κάθε στρώμα της στρατόσφαιρας σχετίζεται με διαφορετική κατεύθυνση και ταχύτητα ανέμου που μπορεί να παρακολουθηθεί μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του αερόστατου γύρω από την ιδανική τοποθεσία η οποία χρήζει υποστήριξη. Το Σχήμα 7 δείχνει το σύστημα της αρχιτεκτονικής που υλοποιήθηκε από το έργο.



Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική του Google Loon [29]

2.1.3 NOKIA F-Cell

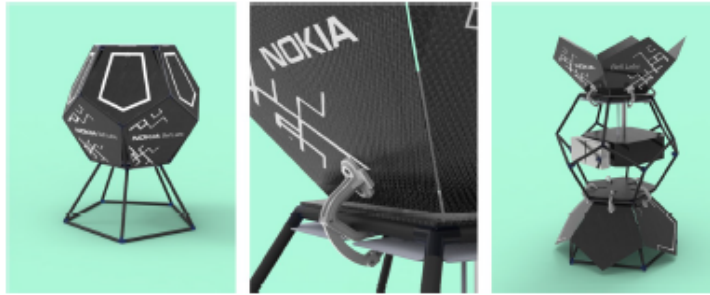
Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα πρωτοτύπων σταθμών βάσης UAV για εφαρμογές χαμηλού υψομέτρου είναι το έργο Nokia F-Cell [31]. Το θεμελιώδες πρόβλημα που προσπαθεί να λύσει η F-Cell είναι το υψηλό κόστος που σχετίζεται με την εγκατάσταση ενός μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών. Το F-Cell είναι ένα καινοτόμο ηλιακό, αυτόματα διαμορφωμένο και αυτόματα συνδεδεμένο μικρής κυψέλης UAV που εξυπηρετείται από ένα τεράστιο Multiple Input Multiple Output (MIMO) ασύρματο backhaul. Η αρχιτεκτονική F-Cell αποτελείται από έναν κλειστό βρόχο, 64 κεραιών μαζικής συστοιχίας MIMO τοποθετημένη σε μια κεντρική τοποθεσία δηλαδή χρησιμοποιείται για τη χωρική πολυπλεξία έως και οκτώ ενεργειακά αυτόνομων FCcells, καθένα από τα οποία έχει επανασχεδιαστεί ώστε να απαιτεί την ελάχιστη επεξεργαστική ισχύ και τοποθετείται ένα ηλιακό πάνελ όχι μεγαλύτερο από το ίδιο την κυψέλη. Οι βασικές καινοτομίες που προτείνει η F-Cell μπορεί να είναι συνοψίζονται στις ακόλουθες τρεις πτυχές:

Την απεξάρτηση από την ανάγκη για ενσύρματη τροφοδοσία μέσω του σχεδιασμού μιας ενεργειακά αποδοτικής μικρής κυψέλης που μειώνει στο ελάχιστο την επεξεργασία σήματος και την ισχύ κατανάλωσης των πομποδεκτών και των σχετικών εξαρτημάτων ώστε να μην καταναλώνονται πλέον πάνω από 15 Watts συνολικής ισχύος.

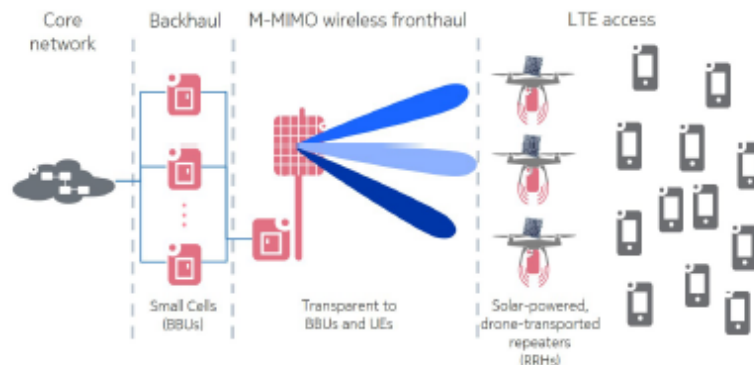
Απεξάρτηση της ανάγκης για ενσύρματο backhaul μέσω της αξιοποίησης τεράστιων δυνατοτήτων χωρικής πολυπλεξίας MIMO κάτω από την ζώνη των 6 GHz για παροχή ασύρματης υψηλής απόδοσης συνδέσεων σε συνθήκες NLOS.

Απεξάρτηση της ανάγκης για την ύπαρξη μιας σταθερής ανάπτυξης μέσω του ευελιξίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μαζί με μια βελτιστοποιημένη σχεδίαση της μικρής κυψέλης, η οποία ζυγίζει λιγότερο από 6 κιλά. Το Σχήμα 8 απεικονίζει τον σχεδιασμό του F-Cell πρωτοτύπου, συμπεριλαμβανομένης της εξωτερικής βάσης από ανθρακονήματα με ενσωματωμένα ηλιακά πάνελ και το εσωτερικό κουτί που περιέχει τους πομποδέκτες και τις πλακέτες επεξεργασίας του σήματος. Συνολικά, αυτή η εφαρμογή επιτρέπει τη μεταφορά και μετεγκατάσταση μικρών κυψελωτών δικτύων οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή.

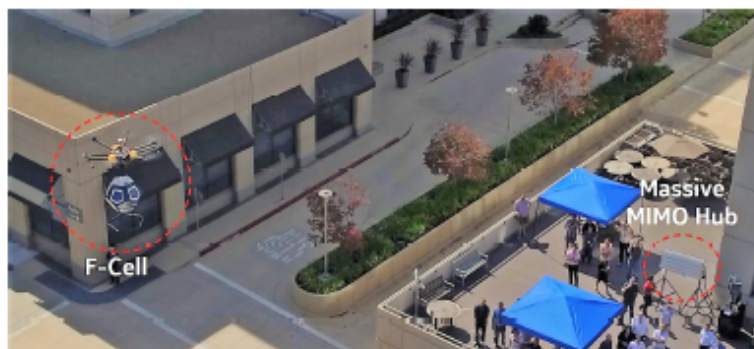
Προκειμένου να αρθούν αυτοί οι περιορισμοί, η F-Cell δημοσίευσε την νέα αρχιτεκτονική συστήματος, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 9. Το βασικό χαρακτηριστικό που εισήγαγε η F-Cell ήταν ο συνδυασμός ενός πλήρους ψηφιακού διανομέα massive MIMO με 64 ενεργούς πομποδέκτες, και αναλογικούς αναμεταδότες (repeaters). Αυτό μετατρέπει το ενσύρματο backhaul σε ένα πολύπλοκο ασύρματο fronthaul με αραιές Remote Radio Heads (RRHs). Το Σχήμα 10 παρουσιάζει μία δοκιμαστική επίδειξη του έργου F-cell, όπου το UAV μετέφερε το F-Cell και τον διανομέα massive MIMO με κόκκινη επισήμανση. Η προτεινόμενη λύση είναι απολύτως διαφανής και στις μονάδες βασικής ζώνης (BBU) και στον εξοπλισμό χρήστη (UEs). Είναι σημαντικό ότι η F-Cell υποστηρίζει ασύρματη δικτύωση NLOS σε λειτουργία frequency division duplex (FDD), όπου η κάτω (DL) και άνω (UL) ζεύξη εκτελούνται σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό γενικά συνεπάγεται για την ανάγκη εκτέλεσης σύνθετων εργασιών επεξεργασίας σήματος στον αναλογικό repeater κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτίμησης καναλιού. Ωστόσο, προκειμένου να απλοποιηθεί ο repeater και να μειωθεί τόσο η κατανάλωση ισχύος όσο και το σχετικό βάρος, το F-cell εφαρμόζει μια αρθρωτή διαδικασία εκτίμησης καναλιού άνω ζεύξης (UL) και κάτω ζεύξης (DL) μόνο στην πλευρά του διανομέα massive MIMO.



Σχήμα 8: Η όψη του NOKIA F-Cell [29]



Σχήμα 9: Η αρχιτεκτονική του NOKIA F-Cell [29]



Σχήμα 10: Σενάριο εφαρμογής του NOKIA F-Cell [29]

2.1.4 Eurecom Perfume

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Έρευνας (ERC), το έργο Perfume μελέτησε και ανέπτυξε την έννοια του "αυτόνομου εναέριου κυψελωτού relay ρομπότ", όπου τα UAV λειτουργούν ως σταθμοί βάσης αναμετάδοσης ικανά να βελτιώσουν την συνδεσιμότητα και την απόδοση των εμπορικών τερματικών. Ο βασικός στόχος του έργου Perfume είναι να σχεδιάσει αλγόριθμους μηχανικής μάθησης ικανούς για να βρίσκουν και να ενημερώνουν συνεχώς τη βέλτιστη τρισδιάστατη θέση πτήσης των ασύρματων relays χρησιμοποιώντας λεπτομερείς πληροφορίες των συνθηκών LOS μαζί με άλλες ραδιομετρήσεις [32].

2.1.5 *Huawei Wireless X Lab*

Το Wireless X Lab της Huawei δημιούργησε το 2017 το Digital Sky Initiative για την ενίσχυση των δοκιμών συγκεκριμένων περιπτώσεων χρήσης που αφορούν συνδεδεμένα UAV. Με αυτόν τον σκοπό η πόλη της Σαγκάης έχει δημιουργήσει ένα από άκρο σε άκρο οικοσύστημα που κατοικείται από βασικούς ενδιαφερόμενους φορείς όπως εταιρείες κινητής τηλεφωνίας, εταιρείες διαχείρισης cloud, μεταφορικές εταιρείες, ιδρύματα δημόσιων μεταφορών, ή ακόμα υπηρεσίες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Δύο εξουσιοδοτημένες ζώνες πτήσης διαμέτρου 6χλμ και μέγιστου ύψους 200μ δημιουργήθηκαν, με κατανομημένες ζώνες ασύρματης φόρτισης στο έδαφος. Σε αυτό το οικοσύστημα εμπλέκονται τα κυψελωτά δίκτυα ώστε να εξασφαλίσουν σύνδεση εντολών και ελέγχου (C&C) μεταξύ UAVs και επίγειων σταθμών ελέγχου. Συγκεκριμένα, μια ενδιαφέρουσα περίπτωση χρήσης είναι η τηλεχειριζόμενη UAV μεταφορά επιβατών (ένα ταξί UAV), το οποίο είναι ελεγχόμενο μέσω ζωντανής ροής βίντεο υψηλής ποιότητας που μεταδίδεται μέσω κυψελωτού δικτύου 4.5G απευθείας στο χώρο ελέγχου [33].

2.2 *Η Ασύρματη επικοινωνία των UAVs*

Μία βασική λειτουργία τις τεχνολογίας των αυτόνομων εναέριων συστημάτων είναι η ασύρματη επικοινωνία. Τα UAVs απαιτείται να ανταλλάσσουν πληροφορίες κρίσιμες και υψίστης σημασίας με μία πληθώρα από αποδέκτες, όπως για παράδειγμα: απομακρυσμένοι πιλότοι, γειτονικά εναέρια οχήματα και ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας, ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής, αξιόπιστη και αποδοτική πτήση. Αυτό το είδος επικοινωνίας ονομάζεται Control and non-payload communication (CNPC). Πέραν αυτού του είδους επικοινωνίας τα UAV ανάλογα με την εφαρμογή την οποία εξυπηρετούν απαιτείται να αποστέλλουν ή να λαμβάνουν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, που απαιτεί η εφαρμογή, δεδομένα τα οποία συνδέονται άρρητα με τον σκοπό τους, όπως αεροφωτογραφίες, βίντεο υψηλής ανάλυσης και διάφορα πακέτα δεδομένων προς διάφορες οντότητες όπως: χειριστές UAV, τελικοί χρήστες ή επίγεια gateways. Αυτό το είδος επικοινωνίας ονομάζεται επικοινωνία ωφέλιμου φορτίου [34].

Εφαρμόζοντας αξιόπιστους και ασφαλείς συνδέσμους CNPC είναι απαραίτητοι για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και εκτεταμένης χρήσης των UAVs. Η παγκόσμια ένωση τηλεπικοινωνιών (ITU) έχει καθορίσει 3 βασικές κατηγορίες CNPC με σκοπό την ασφαλή και εκτεταμένη χρήση των UAVs.

Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται Communication for UAV Command and Control και αφορά παραμέτρους τηλεμετρίας π.χ.(κατάσταση πτήσης) από το UAV προς τον απομακρυσμένο πιλότο, τα σήματα τηλεκατεύθυνσης από τον πιλότο προς το UAV και χρονικά τακτικές ενημερώσεις πορείας για τα ημιαυτόνομα UAVs [35].

Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται Air Traffic Control (ATC) relay και αποσκοπεί στην διασφάλιση ότι τα UAVs δεν θα αποτελέσουν απειλή ως προς οποιοδήποτε συμβατικό εναέριο μέσο και ειδικά σε εφαρμογές που λαμβάνουν μέρος σε περιοχές με πυκνή παρουσία των εναέριων μέσων. Για αυτό το λόγο απαιτείται ATC relay μεταξύ του επίγειου πύργου ελέγχου και του απομακρυσμένου πιλότου μέσω του UAV.

Η τρίτη κατηγορία ονομάζεται Επικοινωνία υποστήριξης της μεθόδου «Search and Avoid». Η προαναφερθείσα μέθοδος διασφαλίζει ότι το UAV διατηρεί επαρκή όρια ασφαλείας μεταξύ γειτονικών εναέριων οχημάτων, εδάφους και εμποδίων.

Οι ειδικές απαιτήσεις επικοινωνίας και φάσματος, γενικά, διαφέρουν για τις επικοινωνίες μεταξύ CNPC και ωφέλιμου φορτίου. Το Third-Generation Partnership Project (3GPP) έχει καθορίσει τις απαιτήσεις επικοινωνίας για αυτούς τους δύο τύπους επικοινωνιών οι οποίοι συνοψίζονται στον

Πίνακας 2. Το CNPC απαιτεί χαμηλό ρυθμό δεδομένων στην τάξη των kilobits ανά δευτερόλεπτο (kb/s) αλλά απαιτεί αυστηρή και υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση. Για παράδειγμα στον Πίνακα 2, ο ρυθμός των δεδομένων που απαιτείται για την τηλεκατεύθυνση του UAV κυμαίνεται μεταξύ 60-100 kb/s και για την άνω (UL) και για την κάτω ζεύξη (DL). Ενώ οι απαιτήσεις του CNPC είναι όμοιες για τους διαφορετικούς τύπους των UAVs, οι απαιτήσεις των επικοινωνιών ωφέλιμου φορτίου εξαρτώνται πλήρως από τις εφαρμογές τις οποίες εξυπηρετούν (Πίνακας 3).

Πίνακας 2: Επικοινωνιακές απαιτήσεις των UAVs από την 3GPP [35]

	Τύπος Δεδομένων	Ρυθμός Δεδομένων	Αξιοπιστία	Καθυστέρηση
Κάτω ζεύξη (Επίγειος Σταθμός Βάσης σε UAV)	Εντολή και έλεγχος	60-100 Kbps	10^{-3} ρυθμός σφάλματος πακέτου	50 ms
Άνω ζεύξη (UAV σε επίγειο σταθμό βάσης)	Εντολή και έλεγχος	60-100 Kbps	10^{-3} ρυθμός σφάλματος πακέτου	-
	Δεδομένα Εφαρμογής	Άνω των 50 Mbps	-	Παρόμοιο με επίγειος χρήστη

Πίνακας 3: Επικοινωνιακές απαιτήσεις για εφαρμογές UAV [35]

UAV Εφαρμογή	Ύψος κάλυψης σε μέτρα (m)	Καθυστέρηση κυκλοφορίας ωφέλιμου φορτίου σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms)	Ρυθμός δεδομένων ωφέλιμου φορτίου (Κάτω ζεύξη/ Άνω ζεύξη)
Παράδοση με Drone	100m	500 ms	300 Kbps/200 Kbps
Γυρίσματα ταινίας με drone	100m	500 ms	300 Kbps/30 Kbps
Σημείο Πρόσβασης	500m	500 ms	50 Mbps/50 Mbps
Επιτήρηση	100m	3000 ms	300 Kbps /10 Mbps
Έλεγχος Υποδομής	100m	3000 ms	300 Kbps /10 Mbps
Επίδειξη στόλου drones	200m	100 ms	200 Kbps/200 Kbps
Γεωργία	300m	500 ms	300 Kbps/200 Kbps
Έρευνα και διάσωση	100m	500 ms	300 Kbps/6 Mbps

Δεδομένου ότι η απώλεια της σύνδεσης CNPC μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές συνέπειες, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) έχει καθορίσει ότι οι συνδέσεις CNPC που αφορούν τα UAVs πρέπει λειτουργούν σε προστατευμένο φάσμα της αεροπορίας. Οι μελέτες της ITU έχουν αποκαλύψει ότι για την υποστήριξη του CNPC για τον προβλεπόμενο αριθμό UAV τα επόμενα χρόνια, απαιτείται επίγειο φάσμα 34 MHz και δορυφορικό φάσμα 56 MHz για την υποστήριξη τόσο Line of Sight (LoS) όσο και πέραν του Non Line of Sight (NLoS) εφαρμογές UAV. Για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση, η ζώνη συχνοτήτων C και συγκεκριμένα το φάσμα 5030–5091 MHz έχει διατεθεί για την σύνδεση UAV CNPC στο Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοεπικοινωνιών (WRC)-12. Πιο πρόσφατα, το WRC-15 αποφάσισε ότι τα δίκτυα γεωστατικών σταθερών δορυφορικών υπηρεσιών (FSS) μπορεί να είναι χρησιμοποιούνται για συνδέσεις UAS CNPC.

Σε σύγκριση με την επικοινωνία CNPC, η επικοινωνία ωφέλιμου φορτίου του UAV συνήθως έχει πολύ υψηλότερη απαίτηση ρυθμού δεδομένων. Για παράδειγμα, για την υποστήριξη της μετάδοσης πλήρους υψηλής ευκρίνειας (FHD) βίντεο από το UAV στον επίγειο χρήστη, ο ρυθμός μετάδοσης είναι περίπου αρκετά Mb/s, ενώ για 4k βίντεο, είναι υψηλότερο από 30 Mb/s. Η

απαιτήση ρυθμού δεδομένων για ένα UAV που χρησιμεύει ως πλατφόρμα εναέριας επικοινωνίας μπορεί να είναι ακόμη υψηλότερη, π.χ., έως και δεκάδες gigabit ανά δευτερόλεπτο για εφαρμογές προώθησης/λήψης δεδομένων.

2.3 Ασύρματες τεχνολογίες για την επικοινωνία των UAVs

Για να επιτευχθεί τόσο η επικοινωνία CNPC όσο και η επικοινωνία ωφέλιμου φορτίου για τις απαιτήσεις σε πολυάριθμες εφαρμογές UAV, απαιτούνται κατάλληλες ασύρματες τεχνολογίες για να επιτευχθεί απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και υψηλή αξιοπιστία για ασύρματες επικοινωνίες air to air και air to ground στον τρισδιάστατο χώρο. Προς το σκοπό αυτό, τέσσερις τεχνολογίες επικοινωνίας συγκρίνονται στον Πίνακα 4 που δεσπόζουν στις τεχνολογίες 5G and Beyond συμπεριλαμβανομένων της άμεσης διασύνδεσης (Direct Link), την δορυφορική ζεύξη, δίκτυο ad hoc και το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας [35]

2.3.1 Direct Links

Λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους, η απευθείας σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ UAV και του συσχετισμένου επίγειου κόμβου με χρήση μη-αδειοδοτημένης φασματικής ζώνης (ISM) 2,4 GHz χρησιμοποιήθηκε πιο συχνά για εμπορικά UAV στο παρελθόν, όπου ο επίγειος κόμβος μπορεί να είναι ένας απομακρυσμένος χρήστης ή επίγειος σταθμός. Ωστόσο, αυτού του είδους επικοινωνία είναι συνήθως περιορισμένη στην επικοινωνία LoS, γεγονός που την περιορίζει σημαντικά ως προς το εύρος λειτουργίας και εμποδίζει τις εφαρμογές στο πολύπλοκο περιβάλλον διάδοσης [35]. Για παράδειγμα, σε αστικές περιοχές, η επικοινωνία μπορεί εύκολα να αποκλειστεί από, π.χ., δέντρα και πολυώροφα κτίρια, με αποτέλεσμα να εντοπίζεται χαμηλή αξιοπιστία και υποβαθμισμένη ροή δεδομένων. Επιπλέον, μια τόσο απλή λύση είναι συνήθως ανασφαλής και ευάλωτη σε παρεμβολές. Λόγω των προαναφερθέντων περιορισμών, η άμεση διασύνδεση δεν μπορεί να είναι μια επεκτάσιμη λύση για την υποστήριξη μεγάλης κλίμακας εφαρμογών UAV στο μέλλον.

2.3.2 Δορυφορική ζεύξη

Η επικοινωνία των UAVs με την βοήθεια των δορυφόρων είναι μια βιώσιμη επιλογή λόγω της παγκόσμιας τους κάλυψης. Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι μπορούν να βοηθήσουν στην αναμετάδοση δεδομένων που μεταδίδονται μεταξύ ευρέως διαχωρισμένων UAVs και επίγειων gateways, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για UAV πάνω από απομακρυσμένες περιοχές όπου το χερσαίο δίκτυο π.χ. κινητή τηλεφωνία δεν είναι διαθέσιμο. Επιπλέον, η δορυφορική ζεύξη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την πλοήγηση και τον εντοπισμό του UAV [34]. Στο WRC 2015, η χρήση υπό όρους των συχνοτήτων δορυφορικής επικοινωνίας στις ζώνες συχνοτήτων Ku-/Kband έχει εγκριθεί για τη σύνδεση των UAVs με δορυφόρους. Ορισμένες δορυφορικές εταιρείες, όπως η Inmarsat, έχουν ξεκινήσει υπηρεσία δορυφορικής επικοινωνίας για UAVs. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα των δορυφορικών επικοινωνιών UAV. Πρώτον, η απώλεια διάδοσης και η καθυστέρηση είναι αρκετά σημαντική λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των δορυφόρων και των UAVs ή με τους χαμηλού υψομέτρου επίγειους σταθμούς. Έτσι, αυτό θέτει μεγάλες προκλήσεις για την εγγύηση εξαιρετικά αξιόπιστων και με ευαισθησία σε καθυστέρηση για επικοινωνία CNPC για τα UAVs. Δεύτερον, τα UAVs συνήθως έχουν περιορισμένο μέγεθος, βάρος και ισχύ, επομένως, μπορεί να μην είναι σε θέση να φέρει πάνω του, ογκώδη και ενεργοβόρο εξοπλισμό (π.χ. δορυφορική κεραία). Τρίτον, το υψηλό λειτουργικό κόστος των δορυφορικών επικοινωνιών επίσης εμποδίζει την ευρεία χρήση τους για εφαρμογές με πυκνά τοποθετημένα UAV.

2.3.3 Δίκτυο AdHoc

Το Mobile Ad hoc Network (MANET) είναι ένα χωρίς υποδομές και δυναμικά αυτόνομο δίκτυο για τη δυνατότητα επικοινωνίας peer-to-peer μεταξύ φορητών συσκευών, όπως φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και walkie-talkies. Τέτοιες συσκευές συνήθως επικοινωνούν σε περιορισμένου εύρους ζώνης συχνότητες π.χ., IEEE 802.11 a/b/g/n. Κάθε συσκευή σε ένα MANET μπορεί να κινηθεί τυχαία με την πάροδο του χρόνου και ως αποτέλεσμα, οι συνθήκες σύνδεσής του με άλλες συσκευές να ενδέχεται να αλλάζουν συχνά. Επιπλέον, για την υποστήριξη επικοινωνιών μεταξύ δύο κόμβων που βρίσκονται σε απόσταση, κάποιοι άλλοι κόμβοι αναλαμβάνουν τον ρόλο του διαμεσολαβητή και πρέπει να βοηθήσουν στην προώθηση των δεδομένων μέσω αναμετάδοσης multihop, με αποτέλεσμα περισσότερη να καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια, να παρουσιάζεται χαμηλή απόδοση φάσματος και μεγάλη διάρκεια διάδοσης των πληροφοριών από άκρο σε άκρο. Το δίκτυο ad hoc οχημάτων (VANET) και το ιπτάμενο δίκτυο adhoc (FANET) είναι δύο εφαρμογές της MANET για την υποστήριξη των επικοινωνιών μεταξύ οντοτήτων υψηλής κινητικότητας επίγειων οχημάτων και UAV σε δίκτυα 2-D και 3-D, αντίστοιχα. Η τοπολογία ή η διαμόρφωση ενός FANET για UAVs μπορεί να έχει διαφορετικές μορφές, όπως τοπολογία πλέγματος, δακτυλίου, αστέρα, ή ακόμη μια ευθεία τοπολογία, ανάλογα με το σενάριο της εφαρμογής. Αν και το FANET είναι ένα στιβαρό και ευέλικτο σε αρχιτεκτονική για την υποστήριξη επικοινωνιών UAV σε ένα μικρό δίκτυο, γενικά δεν είναι σε θέση να παρέχει μια επεκτάσιμη λύση για την εξυπηρέτηση πολυάριθμων UAV που αναπτύσσονται σε μια ευρεία περιοχή λόγω της πολυπλοκότητας και των δυσκολιών για την υλοποίηση ενός αξιόπιστου πρωτοκόλλου δρομολόγησης συνολικά σε όλο το δίκτυο [34].

2.3.4 Δίκτυο Κινητής Τηλεφωνίας

Είναι προφανές ότι οι προαναφερθέντες τεχνολογίες γενικά δεν μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλης κλίμακας επικοινωνίες UAV με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Από την άλλη πλευρά, είναι επίσης οικονομικά μη βιώσιμη η κατασκευή νέων και ειδικών επίγειων δικτύων για την επίτευξη αυτού του στόχου. Ως εκ τούτου, υπήρξε σημαντικό αυξανόμενο ενδιαφέρον πρόσφατα στη εκμετάλλευση της υπάρχουσας αλλά και της μελλοντικής γενιάς κυψελωτών δικτύων για την πραγματοποίηση UAV to ground επικοινωνίες. Λόγω της σχεδόν παγκόσμιας κάλυψης του κυψελωτού δικτύου παγκοσμίως καθώς και αυτού του οπτικών επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας για την επικοινωνία με το δίκτυο κορμού (Core Network), τόσο η επικοινωνία CNPC όσο και επικοινωνία ωφέλιμου φορτίου σε απαιτήσεις για επικοινωνίες UAV μπορούν ενδεχομένως να ικανοποιηθούν, ανεξάρτητα από την πυκνότητα των UAV καθώς και τις αποστάσεις τους με τους αντίστοιχους επίγειους κόμβους. Για παράδειγμα, το κυψελωτό δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G) υποστηρίζει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των 10 Gb/s με καθυστέρηση μόνο 1 ms μετάδοσης μετ' επιστροφής, η οποία, καταρχήν, είναι επαρκής για εφαρμογές επικοινωνίας UAV με απαίτηση σε υψηλή ταχύτητα και εξαιρετικά μικρή καθυστέρηση, όπως ροή βίντεο σε πραγματικό χρόνο και αναμετάδοση δεδομένων.

2.3.5 Υβριδικό Σύστημα

Παρά τα πολλά υποσχόμενα πλεονεκτήματα της δυνατότητας κυψελωτών επικοινωνιών UAV, εξακολουθούν να υπάρχουν σενάρια όπου οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας δεν είναι διαθέσιμες, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως σε ωκεανοί, έρημοι και δάση. Σε τέτοια σενάρια, τεχνολογίες, όπως η απευθείας σύνδεση, η δορυφορική ζεύξη και το FANET, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη επικοινωνιών UAV πέρα από την επίγεια κάλυψη κυψελωτού δικτύου. Επομένως, αναμένεται ότι το μελλοντικό ασύρματο δίκτυο για την υποστήριξη μεγάλης

κλίμακας επικοινωνιών UAV θα έχουν μία ολοκληρωμένη 3-D αρχιτεκτονική που αποτελείται από UAV-to-UAV, UAV-to-satellite, και επικοινωνίες UAV-εδάφους (air-to-ground), όπου κάθε UAV μπορεί να συνυπάρξει με μία ή περισσότερες τεχνολογίες επικοινωνιών για την εκμετάλλευση της πλούσιας ποικιλόμορφης συνδεσιμότητας σε ένα τέτοιο υβριδικό δίκτυο.

Πίνακας 4: Σύγκριση των ασύρματων τεχνολογιών για επικοινωνίες UAV [34]

Τεχνολογία	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απευθείας σύνδεσμος	Απευθείας από σημείο σε σημείο επικοινωνία με επίγειο κόμβο	Απλό, Χαμηλό κόστος	Περιορισμένο εύρος, χαμηλός ρυθμός δεδομένων, ευάλωτα σε παρεμβολές, μη επεκτάσιμη
Δορυφόρος	Επικοινωνία και Πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω δορυφόρου	Παγκόσμια κάλυψη	Δαπανηρή, βαριά / ογκώδης / ενεργοβόρα επικοινωνία εξοπλισμού, υψηλή καθυστέρηση, μεγάλη εξασθένηση σήματος
Ad-hoc δίκτυο	Δυναμικά Αυτό-οργανωμένο και χωρίς υποδομές δίκτυο	Ενισχυμένο και προσαρμόσιμο, υποστήριξη για υψηλή κινητικότητα	Δαπανηρή, χαμηλή απόδοση φάσματος, διακοπτόμενη συνδεσιμότητα, σύνθετο πρωτόκολλο δρομολόγησης
Κυψελωτό Δίκτυο	UAV επικοινωνίες χρησιμοποιώντας κυψελωτές υποδομές και τεχνολογίες	Σχεδόν πανταχού παρών προσιτότητα, οικονομικά αποδοτικό, απόδοση και επεκτασιμότητα	Μη διαθέσιμο σε απομακρυσμένες περιοχές, πιθανή παρεμβολή με επίγειες επικοινωνίες

2.4 Διασυνδεδεμένα UAV με κυψελωτά δίκτυα

Με την ενσωμάτωση των UAVs ως νέος εξοπλισμός χρήστη (UE) στο κυψελωτό δίκτυο, μπορούν να επιτευχθούν τα ακόλουθα οφέλη. Πρώτον, λόγω της παγκόσμιας προσβασιμότητας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τα UAVs που είναι συνδεδεμένα με μία κυψέλη, καθιστά δυνατό για τον απομακρυσμένο πιλότο τον εξ αποστάσεως χειρισμό και έλεγχο του UAV σε ένα πρακτικά απεριόριστο εύρος λειτουργίας. Άλλωστε παρέχει και μια αποτελεσματική λύση για τη διατήρηση της ασύρματης συνδεσιμότητας μεταξύ UAV και διαφόρων άλλων ενδιαφερόμενων οντοτήτων, όπως οι τελικοί χρήστες και οι ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας, ανεξάρτητα από τις τοποθεσίες τους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα πολλές νέες εφαρμογές UAV στο μέλλον [26]. Δεύτερον, με τις προηγμένες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας και μηχανισμού ελέγχου ταυτότητας, το συνδεδεμένο UAV με το κυψελωτό δίκτυο αναμένεται να επιτύχει σημαντική βελτίωση της απόδοσης σε αξιοπιστία, αδιάλειπτη μετάδοση δεδομένων και ασφάλεια σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες που προαναφέρθηκαν [34].

Σε αντίθεση με το κυψελωτό δίκτυο, το WiFi χρησιμοποιεί μηχανισμό με τον οποίο επιτρέπει στους χρήστες πρόσβαση στα κανάλια τα οποία είναι σε κατάσταση αδράνειας. Ως τούτου η πολλαπλή πρόσβαση χρηστών με κεντριοποιημένο σύστημα δρομολόγησης καθιστά το κυψελωτό δίκτυο να είναι πιο αποτελεσματικό ως προς την χρήση του φάσματος από το πρωτόκολλο επικοινωνίας του WiFi, ειδικά όταν υπάρχει πυκνή παρουσία χρηστών. Επιπλέον, η

επικοινωνία UAV-to-UAV μπορεί επίσης να υλοποιηθεί με τη εκμετάλλευση της τεχνολογίας επικοινωνίας συσκευής σε συσκευή (D2D) σε συστήματα LTE και 5G [35]. Η υπηρεσία εντοπισμού μέσω του κυψελωτού δικτύου κινητής τηλεφωνίας μπορεί να παρέχει στα UAVs υποβοήθηση εκτός από τα συμβατικό βασισμένο σε δορυφόρους παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) για την επίτευξη πιο ισχυρής ή βελτιωμένης πλοήγησης σε σενάρια χρήσης UAV. Επιπρόσθετα αλλά εξίσου σημαντικό, τα συνδεδεμένα UAV με κυψελωτό δίκτυο είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση αφού επαναχρησιμοποιεί τους εκατομμύρια σταθμούς βάσης (BS) παγκοσμίως χωρίς την ανάγκη κατασκευής νέα υποδομής αποκλειστικά για συστήματα UAS. Έτσι, η σύνδεση των UAVs με τα κυψελωτά δίκτυα χαρακτηρίζεται μία τεχνολογία win to win τόσο για βιομηχανίες UAV όσο και για κινητής τηλεφωνίας, με ευκαιρίες δραστηριότητας για εξερεύνηση [34].

2.4.1 Ασύρματες επικοινωνίες υποβοηθούμενες από UAVs

Λόγω της συνεχής μείωσης του κόστους στην κατασκευή UAV και την σμίκρυνση των συσκευών σε εξοπλισμό επικοινωνίας, καθίσταται πιο εφικτή η τοποθέτηση συμπαγών BS ή relay σε UAVs για να επιτρέψουν στις ιπτάμενες εναέριες πλατφόρμες να βοηθήσουν σε επίγειες ασύρματες επικοινωνίες. Για παράδειγμα, διατίθενται εμπορικά LTE BS με βάρος λιγότερο από 4 κιλά στην αγορά, τα οποία είναι κατάλληλα για τοποθέτηση σε UAV με μέτριο ωφέλιμο φορτίο. Σε σύγκριση με τις συμβατικές επίγειες επικοινωνίες με τυπικά στατικά BS/relays που αναπτύσσονται σε σταθερές θέσεις, οι επικοινωνίες με τη βοήθεια των UAVs φέρει τα ακόλουθα κύρια πλεονεκτήματα [33]. Πρώτον, τα BS/relays που είναι τοποθετημένα σε UAVs μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα κατόπιν ζήτησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για σενάρια εφαρμογών, όπως προσωρινά ή απροσδόκητα γεγονότα π.χ.(φυσικές καταστροφές, μεγάλες αθλητικές δραστηριότητες) Δεύτερον, λόγω του μεγάλου υψόμετρου πάνω από το έδαφος, τα UAV-BS/relays είναι πιο πιθανό να έχουν σύνδεση LoS με τους επίγειους χρήστες σε σύγκριση με τους επίγειους BS τους, παρέχοντας έτσι πιο αξιόπιστη επικοινωνία καθώς και δρομολόγηση πολυάριθμων χρηστών και κατανομή πόρων. Τρίτον, λόγω της ελεγχόμενης υψηλής κινητικότητας UAV, UAV-BS/relays διαθέτουν επιπλέον βαθμό ελευθερίας (DoF) για την βελτίωση της απόδοσης της επικοινωνίας, επιτυγχάνοντας το με δυναμική προσαρμογή τις τοποθεσίες τους σε 3-D για να εξυπηρετήσουν τις επίγειες επικοινωνιακές απαιτήσεις [34].

Τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα κάνουν την επικοινωνία με την βοήθεια των UAVs μια πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία για την υποστήριξη της διαρκώς αυξανόμενης και εξαιρετικά δυναμικής ασύρματης κίνησης δεδομένων στα μελλοντικά κυψελωτά συστήματα 5G and Beyond. Υπάρχει μία πληθώρα νέων εφαρμογών, όπως η εκφόρτωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας (cellular data offloading) σε περιοχές hot-spot (π.χ. γήπεδο κατά τη διάρκεια αθλητικού γεγονότος), μετάδοση πληροφοριών και συλλογή δεδομένων στα δίκτυα των ασύρματων αισθητήρων και στο Internet-of-Things (IoT), μεταφορά μεγάλων δεδομένων μεταξύ ανεξάρτητων γεωγραφικών κέντρων δεδομένων, γρήγορη ανάκτηση υπηρεσιών μετά από βλάβη της υποδομής, αναμετάδοση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας σε περίπτωση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης ή προσαρμοσμένων επικοινωνιών [33].

2.5 Ευκαιρίες και προκλήσεις στις υποβοηθούμενες επικοινωνίες με UAVs

Η ενσωμάτωση των UAVs σε κυψελωτά δίκτυα, είτε ως εναέριοι χρήστες είτε ως πλατφόρμες επικοινωνίας, προσφέρουν νέες ευκαιρίες σχεδιασμού δικτύων καθώς και προκλήσεις. Η

κυψελωτή επικοινωνία UAV και η ασύρματη υποβοήθηση με UAV διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες των επίγειων επικοινωνιών, λόγω του μεγάλου υψομέτρου και της υψηλής κινητικότητας των UAVs, η υψηλή πιθανότητα UAV- εδάφους LoS καναλιών, οι απαιτήσεις της διακριτής ποιότητας εξυπηρέτησης της επικοινωνίας (QoS) για CNPC έναντι του ωφέλιμου φορτίου που σχετίζεται με την αποστολή δεδομένων, οι αυστηροί περιορισμοί SWAP των UAV, καθώς και η νέα σχεδίαση DoF εκμεταλλευόμενοι από κοινού της κινητικότητας των UAVs και ο προγραμματισμός επικοινωνίας (scheduling) / κατανομή των πόρων (resource allocation). Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τις κύριες σχεδιαστικές ευκαιρίες και προκλήσεις των κυψελωτών επικοινωνιών με UAV, τα οποία αναλύονται περαιτέρω.

2.5.1 Υψηλό υψόμετρο

Σε σύγκριση με τους συμβατικούς επίγειους σταθμούς βάσης (BS) ή χρήστες, τα UAV BS ή χρήστες συνήθως έχουν πολύ υψηλότερο υψόμετρο. Για παράδειγμα, ένα τυπικό ύψος ενός επίγειου BS είναι περίπου 10 μέτρα για την ανάπτυξη ενός αστικού Micro (UMi) δικτύου και 25 m για ανάπτυξη αστικού Macro (UMa) δικτύου (3GPP, 2017), λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ισχύων κανονισμός επιτρέπει ήδη στα UAV να πετούν μέχρι 122 m. Για UAV που συνδέονται με κυψελωτό δίκτυο, το υψηλό υψόμετρο των UAVs απαιτεί τα κυψελωτά BS να προσφέρουν με την κεραία τους μία 3-διάστατη κάλυψη για χρήστες UAV, σε αντίθεση με την συμβατική δισδιάστατη κάλυψη για επίγειους χρήστες. Ωστόσο, στα υφιστάμενα BS, οι κεραίες συνήθως έχουν κλίση προς τα κάτω, είτε μηχανικά είτε ηλεκτρονικά, για την εξυπηρέτηση της εδαφικής κάλυψης ως καθώς και την καταστολή της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών. Παρόλο που στην αστική περιοχή, το κυψελωτό δίκτυο μπορεί επίσης να παρέχει υπηρεσίες για χρήστες σε ένα πολυώροφο κτίριο (π.χ., δεκάδες μέτρα πάνω από το έδαφος), ενδέχεται να μην ισχύει άμεσα για την υποστήριξη χρηστών UAV, οι οποίοι συνήθως πρέπει να πετούν ψηλότερα από τα κτίρια για λόγους ασφαλείας. Οι προκαταρκτικές δοκιμές μέτρησης πεδίου έχουν αποδειχθεί ενθαρρυντικές με ικανοποιητική εναέρια κάλυψη να ανταποκρίνεται στις βασικές απαιτήσεις επικοινωνίας από τους πλευρικούς λοβούς της κεραίας των BS για χρήστες UAV έως 122 m. Ωστόσο, καθώς το υψόμετρο αυξάνεται περαιτέρω, η κάλυψη σήματος εξασθενεί, και επομένως απαιτείται νέος σχεδιασμός κεραίων BS και τεχνικών κυψελωτής επικοινωνίας για την επίτευξη ικανοποιητικής Κάλυψης των UAVS έως το μέγιστο υψόμετρο των 300 m όπως ορίζεται επί του παρόντος από το 3GPP [36]. Αφ' ετέρου, για ασύρματες επικοινωνίες με τη βοήθεια UAV, το υψηλό υψόμετρο επιτρέπει στο UAV-BS/relay να επιτύχει ευρύτερο εδαφική κάλυψη σε σύγκριση με τους επίγεια αντίστοιχα BS.

2.5.2 Υψηλή πιθανότητα LoS

Το υψηλό υψόμετρο των UAVs οδηγεί σε μοναδικά χαρακτηριστικά καναλιού αέρα-εδάφους (air-to-ground) σε σύγκριση με επίγεια κανάλια επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, σε σύγκριση με τα επίγεια κανάλια που γενικά υποφέρουν σοβαρά από απώλειες διαδρομών σήματος λόγω σκίασης και εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών, τα κανάλια air-to-ground, συμπεριλαμβανομένων των UAV-BS και τα κανάλια χρηστών UAV παρουσιάζουν συνήθως περιορισμένη διασπορά και, ως εκ τούτου, έχουν μια κυρίαρχη σύνδεση LoS με υψηλή πιθανότητα. Το κανάλι air-to-ground με κυρίαρχο LoS προσφέρει ευκαιρίες αλλά και προκλήσεις στο σχεδιασμό επικοινωνιών UAV σε σύγκριση με τις υπάρχουσες επίγειες επικοινωνίες. Από τη μια πλευρά, προσφέρει πιο αξιόπιστη σύνδεση και απόδοση μεταξύ του UAV και της υπηρεσίας/εξυπηρέτησής του στα επίγεια BS/χρήστες, καθώς και μια έντονη μακρό-ποικιλομορφία από την άποψη των πιο ευέλικτων συσχετισμών UAV-BS/χρήστη. Επιπλέον, καθώς οι κυρίαρχες LoS συνδέσεις έχουν λιγότερη διακύμανση του καναλιού στο χρόνο και στη συχνότητα, το scheduling της επικοινωνίας και η κατανομή πόρων μπορεί να εφαρμοστεί πιο αποτελεσματικά με πολύ πιο αργό ρυθμό σε σύγκριση

με την εξασθένιση των επίγειων καναλιών. Από την άλλη όμως, προκαλεί επίσης ισχυρή παρεμβολή air-to-ground, η οποία είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που μπορεί να περιορίσει σοβαρά την χωρητικότητα στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με συνυπάρχοντες εναέριους και επίγειους BS/χρήστες. Για παράδειγμα, στην επικοινωνία UL ενός χρήστη UAV, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή παρέμβαση σε πολλά γειτονικές κυψέλες στην ίδια ζώνη συχνοτήτων λόγω της μεγάλης πιθανότητας LoS καναλιών με τα BS τους. Κατά την επικοινωνία DL, ο χρήστης UAV υφίσταται επίσης σε ισχυρές παρεμβολές από συν-διαλυτικά BS. Ο μετριασμός των παρεμβολών είναι ζωτικής σημασίας και για τα δύο σενάρια UAV που συνδέονται με το κυψελωτό δίκτυο και τις επίγειες επικοινωνίες με τη βοήθεια των UAVs. Επιπλέον, οι κυρίαρχες LoS ζεύξεις air-to-ground παρέχουν επίσης επικοινωνίες πιο επιρρεπής σε επιθέσεις από κακόβουλους κόμβους εδάφους σε σύγκριση με τις επίγειες επικοινωνίες μέσω εξασθενημένων καναλιών, επιβάλλοντας έτσι μια νέα απειλή για την ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο [34].

2.5.3 Υψηλή 3-D κινητικότητα

Σε αντίθεση από τα επίγεια δίκτυα όπου συνήθως αναπτύσσονται τα BS/relays σε σταθερές τοποθεσίες και οι χρήστες μετακινούνται σποραδικά και τυχαία, τα UAV μπορούν να κινούνται με υψηλή ταχύτητα σε τρισδιάστατο χώρο με μερικώς ή πλήρως ελεγχόμενη κινητικότητα. Αφενός, η υψηλή κινητικότητα των UAV έχει γενικά ως αποτέλεσμα περισσότερες συχνότερες διαπομπές (handovers) και μεταβαλλόμενες χρονικά ασύρματες συνδέσεις με επίγειους BS/χρήστες. Από την άλλη, οδηγεί επίσης σε μια νέα σχεδίαση DoF με σκοπό την βελτιστοποίηση της τροχιάς. Σε αυτή την περίπτωση, η κινητικότητα του UAV δεν διαμορφώνεται πλέον στοχαστικά αλλά σκόπιμα ώστε να βελτιώνει την επικοινωνιακή απόδοση με τους επίγειους BS/χρήστες [37].

2.5.4 Περιορισμοί SWAP

Σε αντίθεση με τα επίγεια επικοινωνιακά συστήματα όπου οι επίγειοι BS/χρήστες συνήθως έχουν σταθερή παροχή ρεύματος από το δίκτυο ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, Οι περιορισμοί SWAP των UAV θέτουν κρίσιμα όρια για την αντοχή και τις επικοινωνιακές τους ικανότητες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ασύρματων επικοινωνιών με τη βοήθεια UAV, προσαρμοσμένα BS/relays, γενικά μικρότερου βάρους και πιο συμπαγούς υλικού σε σύγκριση με το αυτά των επίγειων, πρέπει να σχεδιαστούν για να καλύπτουν τους περιορισμούς σε ωφέλιμο φορτίο και μέγεθος των UAVs. Επιπλέον, εκτός από το συμβατική κατανάλωση ενέργειας του πομποδέκτη επικοινωνίας, τα UAVs ξοδεύουν πρόσθετη ενέργεια προώθησης ώστε παραμένουν ψηλά και να κινούνται ελεύθερα στον αέρα [38], που είναι συνήθως πολύ πιο επιβαρυνμένη από την ενέργεια που καταναλώνεται για την επικοινωνία (π.χ. της τάξης των Kilowatts έναντι των Watts) για εμπορικά UAV. Έτσι, ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός των τηλεπικοινωνιακών UAVs εμπλέκεται περισσότερο από ότι για τα συμβατικά επίγεια συστήματα λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ενεργειακή κατανάλωση [39]. Αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ οι επικοινωνίες UAV μοιράζονται ορισμένες ομοιότητες με οχήματα και αεροναυτικές επικοινωνίες, αλλά έχουν επίσης κάποιες σημαντικές διαφορές, οι οποίες γενικά οδηγούν σε διαφορετικές εκτιμήσεις για την σχεδίαση των συστημάτων [40]. Πρώτον, τα διαφορετικά υψόμετρα των οχημάτων εδάφους, των UAVs και των αεροσκαφών οδηγούν σε διαφορετικά χαρακτηριστικά καναλιών για τις ζεύξεις επικοινωνίας τους. Ενώ οι επικοινωνίες οχημάτων συνήθως αντιμετωπίζουν σοβαρή εξασθένιση μικρής κλίμακας λόγω της διασποράς (scattering) στο έδαφος, οι αεροναυτικές επικοινωνίες που υποστηρίζονται από δορυφόρους είναι συνήθως μέσω LoS συνδέσεων λόγω του σχετικά μεγάλου ύψους των αεροσκαφών. Ωστόσο, τα κανάλια επικοινωνίας air-to-ground είναι ποικιλόμορφα ανάλογα με τα ύψη πτήσεων των UAVs. Ως εκ τούτου, Τα κυψελωτά συνδεδεμένα UAV γενικά προκαλούν πιο σοβαρές παρεμβολές στα επίγεια δίκτυα παρά στα επίγεια οχήματα, ενώ τα

αεροσκάφη γενικά δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα κυψελωτά δίκτυα. Δεύτερον, όσον αφορά την κινητικότητα, τα αεροσκάφη έχουν πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες πτήσης από τα οχήματα εδάφους και τα UAVs, αποδίδοντας έτσι την τοπολογία των αεροναυτικών δικτύων πιο δυναμική σε σύγκριση με την αντίστοιχη των οχημάτων και των UAVs. Οι τροχιές των οχημάτων εδάφους γενικά περιορίζονται από δρόμους και κτίρια, επίσης όταν πετά αεροσκάφος ακολουθεί αυστηρά σχεδιασμένες τροχιές από τις αρχικές τοποθεσίες προς τους αντίστοιχους προορισμούς. Αντίθετα, τα UAV μπορούν να κινούνται τρισδιάστατα στο χώρο πιο ευέλικτα γενικά. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός του συστήματος στο πλαίσιο των επικοινωνιών UAVs (π.χ., δικτύωση τεχνολογία, σχεδιασμός κινητικότητας και μετριάσμός παρεμβολών) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σοβαρά για να αξιοποιηθούν οι νέες ευκαιρίες καθώς και την αντιμετώπιση των νέων προκλήσεων.

Πίνακας 5: Ευκαιρίες και προκλήσεις των κυψελωτών επικοινωνιών με τα UAV [34]

Χαρακτηριστικά	Ευκαιρίες	Προκλήσεις
Υψηλό υψόμετρο	Ευρεία κάλυψη εδάφους ως εναέρια BS/relay	Απαιτείται τρισδιάστατη κάλυψη κινητής τηλεφωνίας για εναέριους χρήστες
Υψηλή πιθανότητα LoS	Ισχυρή και αξιόπιστη επικοινωνία Σύνδεσμος; υψηλή μακρο-ποικιλομορφία· αργός προγραμματισμός επικοινωνίας και κατανομή των πόρων	Σοβαρές εναέριες-εδαφικές παρεμβολές. ευπαθή σε επίγεια jamming/eavesdropping
Υψηλή 3D κινητικότητα	Traffic-adaptive movement; QoS-aware trajectory design	Διαχείριση Handover; ασύρματο backhaul
Περιορισμός SWAP	-	Περιορισμένο ωφέλιμο φορτίο και αντοχή. ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός, συμπαγής και ελαφρύ BS/relay και σχεδίαση κεραίας

2.5.5 Βελτιστοποίηση τοποθέτησης των UAVs

Ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει το QoS των χρηστών που λαμβάνουν υπηρεσία από τα UAVs, είναι η βέλτιστη τοποθέτηση του UAV προκειμένου να καλύψει όσους περισσότερους χρήστες μπορεί.

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης είναι πιο δύσκολο για τα εναέρια BS σε σύγκριση με τα συμβατικά επίγεια BS γιατί μια κεραία BS μπορεί να τοποθετηθεί σε πολλά διαφορετικά ύψη [41]. Ωστόσο, η κάλυψη καθώς και τα κανάλια UL και DL αλλάζουν ανάλογα με το υψόμετρο του BS. Διαφορετικοί ερευνητές χρησιμοποίησαν διαφορετικούς αλγόριθμους για να επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης τοποθέτησης για τα εναέρια BS. Ορισμένοι ερευνητές θεώρησαν το ύψος του εναέριου BS ως μια μεταβλητή στη διατύπωση βελτιστοποίησής τους, αντιμετωπίζοντάς την έτσι ως ένα πρόβλημα τοποθέτησης 3D, ενώ άλλοι έλυσαν ουσιαστικά το 2D πρόβλημα τοποθέτησης για σταθερά ύψη. Οι βελτιστοποιήσεις επίσης διαφέρουν ως προς το εάν το backhaul, και οι παρεμβολές από άλλα BS, και η ύπαρξη επίγειων BS στην ίδια περιοχή κάλυψης λαμβάνονται υπόψη στη διατύπωση του προβλήματος.

Οι [42] χρησιμοποίησαν αναζήτηση brute force για την μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος, σε βελτιστοποιημένες 2D τοποθετήσεις μικρού αριθμού «βοηθητικών» εναέριων BS για τη βελτίωση της κάλυψης μιας μεγάλης περιοχής εξυπηρέτησης όπου ορισμένα από τα

επίγεια BS έχουν καταστραφεί από φυσικές καταστροφές ή κακόβουλες επιθέσεις. Παρατηρήθηκε ότι οι βέλτιστες θέσεις για τα UAVs προτάθηκαν να βρίσκονται κατά μήκος των άκρων των κυψελών, το οποίο έχει και την μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Μία λιγότερο διαισθητική παρατήρηση ήταν ότι το ύψος είχε μικρή επίδραση στο συνολικό αποτέλεσμα της απόδοσης, αλλά μειώνοντας σημαντικά το ύψος των UAVs παρατηρήθηκε βελτιωμένη απόδοση του συστήματος. Αυτό αποδόθηκε σε μάλλον περιβάλλοντα LOS στις προσομοιώσεις, τα οποία προσέφεραν καλύτερο SNR για τους χρήστες που βρίσκονταν στην ακμή της κυψέλης λόγω της μικρότερης απόστασης στα UAVs. Παρόμοιες βελτιστοποιήσεις τοποθέτησης 2D επίσης μελετήθηκαν από τους [43], αλλά αντί για αναζήτηση brute force, χρησιμοποίησαν γενετικό αλγόριθμο και K-means αλγόριθμο ομαδοποίησης, αντίστοιχα, για την επίλυση της βελτιστοποίησης του προβλήματος.

2.5.6 Βελτιστοποίηση κινητικότητας για UAVs

Οι μελέτες βελτιστοποίησης τοποθέτησης που ερευνήθηκαν δεν περιλαμβάνουν την κινητικότητα των εναέριων BS στη διατύπωση προβλημάτων. Η κινητικότητα, ωστόσο, είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό και ικανότητα των UAVs, τα οποία παρέχουν πρόσθετες ευκαιρίες και δυναμικά βελτιώνουν τις τοποθετήσεις τους ως απάντηση στις κινήσεις των χρηστών στο έδαφος. Για την εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών κινητικότητας των εναέριων BS, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πρακτικοί περιορισμοί υλικού των UAV. Βασισμένοι στις μεθόδους μεταφοράς των εναέριων BS, υπάρχουν δύο τύποι κινητικότητας που εξετάζονται στη βιβλιογραφία:

- 1) Τα UAV χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά ενός εναέριου BS σε μία συγκεκριμένη επίγεια τοποθεσία όπου το εναέριο BS ξεκινά αυτόματα να εξυπηρετεί τους χρήστες. Εάν το BS πρέπει να μεταφερθεί, πρέπει να απενεργοποιηθεί πρώτα πριν μεταφερθεί στη νέα τοποθεσία. Αυτός ο τύπος εναέριων BS δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τους επίγειους χρήστες όσο είναι σε κίνηση, αλλά μπορεί να ξαναρχίσει την υπηρεσία του μόλις αυτό φτάσει σε μια τοποθεσία-στόχο. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει το NOKIA F-Cell [31].
- 2) Τα UAV συνεχίζουν να μεταφέρουν τα εναέρια BS και τα BS μπορούν συνεχώς εξυπηρετούν τους χρήστες στο έδαφος ενώ πετούν. Για παράδειγμα, τα πρωτότυπα από την Eurecom, που περιεγράφηκαν ανήκουν σε αυτή την κατηγορία [32].

3

Ευφυή Κυψελωτά Δίκτυα Νέας Γενιάς

Τα κυψελωτά δίκτυα 5G ορίζονται ως βασική υποδομή παροχής πρωτοπόρων υπηρεσιών, ωστόσο μία σειρά προκλήσεων δημιουργεί εμπόδια στους στόχους των δικτύων νέας γενιάς. Η δημιουργία δικτύων ευέλικτων και οικονομικά αποδοτικών αποτελεί πρωταρχικό στόχο των εταιρειών κινητής τηλεφωνίας. Οι τεχνικές Μηχανικής Μάθησης διευκολύνουν το έργο των εταιρειών καθώς διαχειρίζονται αποτελεσματικά το σύνολο των προκλήσεων που καλούνται οι ίδιες να αντιμετωπίσουν.

Η τεχνητή νοημοσύνη με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνικές ΑΙ. Η εκμάθηση, η βελτιστοποίηση, η ανάλυση όγκου δεδομένων των συστημάτων γίνεται με χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, εξυπηρετώντας και διευκολύνοντας τον άνθρωπο. Με τις συγκεκριμένες μεθόδους δεν αρκούμαστε μόνο στην αποφυγή ενός προβλήματος αλλά στην πρόβλεψη του με ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο.

3.1 Η Μηχανική Μάθηση

Όπως είναι κατανοητό ο άνθρωπος καλείται να μελετήσει και να εξάγει συμπεράσματα από μεγάλα σύνολα δεδομένων που αντλεί από το περιβάλλον του. Καλείται να εφεύρει τεχνικές οι οποίες θα τον διευκολύνουν σε αυτή τη διαδικασία. Η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης αποτελεί βασικό θεμέλιο για την πληρότητα των απαιτήσεων της εποχής. Η αυτόματη εκμάθηση από την εμπειρία του συστήματος, η πρόβλεψη μελλοντικών σεναρίων και η προσαρμογή σε νέα περιβάλλοντα καθορίζουν και διαφοροποιούν τις τεχνικές μηχανικής μάθησης. Η ποικιλία των προκλήσεων που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα νέας γενιάς προκαλούν την ανάγκη δημιουργίας διαφορετικών τεχνικών ανάλογα με το είδος του κάθε προβλήματος. Οι τρεις βασικές κατηγορίες αντιμετώπισης προκλήσεων είναι Supervised Learning, Unsupervised Learning και Reinforcement Learning, η κάθε μία από αυτές διαθέτει δικές της υποκατηγορίες [44].

3.1.1 Supervised Learning

Supervised Learning (SL) ή αλλιώς εποπτευόμενη μάθηση, χρησιμοποιήθηκε για να προβλέπει, να υπολογίζει καθώς και να ταξινομεί μία μεταβλητή. Τα αποτελέσματα της μάθησης προκύπτουν από εισερχόμενα δεδομένα, από τα οποία προκύπτει ένας γενικός κανόνας συσχέτισης εισερχόμενων και εξερχόμενων δεδομένων με γνωστά και λυμένα παραδείγματα του προβλήματος. Το μοντέλο μάθησης εκπαιδεύεται και προσπαθεί να εξάγει ένα όσο γίνεται πιο προσεγγιστικό κανόνα [44]. Μόλις το μοντέλο έχει εκπαιδευτεί καλείται να ανακαλύψει την βέλτιστη λύση σε ένα καινούριο παράδειγμα του προβλήματος βασιζόμενο στο κανόνα συσχέτισης που έχει προαναφερθεί. Δύο βασικές κατηγορίες μάθησης είναι η ταξινόμηση (classification) και η παλινδρόμηση (regression) [45].

Η ταξινόμηση εκτιμά τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών και προβλέπει μια τιμή μιας ή περισσότερων συνεχών τιμών που έχει ως στόχο. Η παλινδρόμηση προβλέπει τα ακριβή αποτελέσματα με ελάχιστα σφάλματα. Υπάρχουν δύο είδη παλινδρόμησης: γραμμική όταν η συνάρτηση παλινδρόμησης είναι γραμμική και πολυωνυμική παλινδρόμηση που είναι πιο αξιόπιστη όταν η καμπύλη βασίζεται σε μεγάλο αριθμό των παρατηρήσεων που κατανέμονται σε μη γραμμική καμπύλη. Η ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιείται για να προβλέψει μια συνεχή ποσότητα για ένα δεδομένο παράδειγμα. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί είναι ο SVM και ο Gaussian Process [44].

Classification ή αλλιώς ταξινόμηση είναι ο παράγοντας πρόβλεψης μιας διακριτής κλάσης δεδομένου μιας εισόδου προκειμένου να ομαδοποιηθούν τα δεδομένα με βάση προκαθορισμένα κριτήρια. Αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας είναι οι: SVM, K-NN, NB, Random Forest και άλλοι [45].

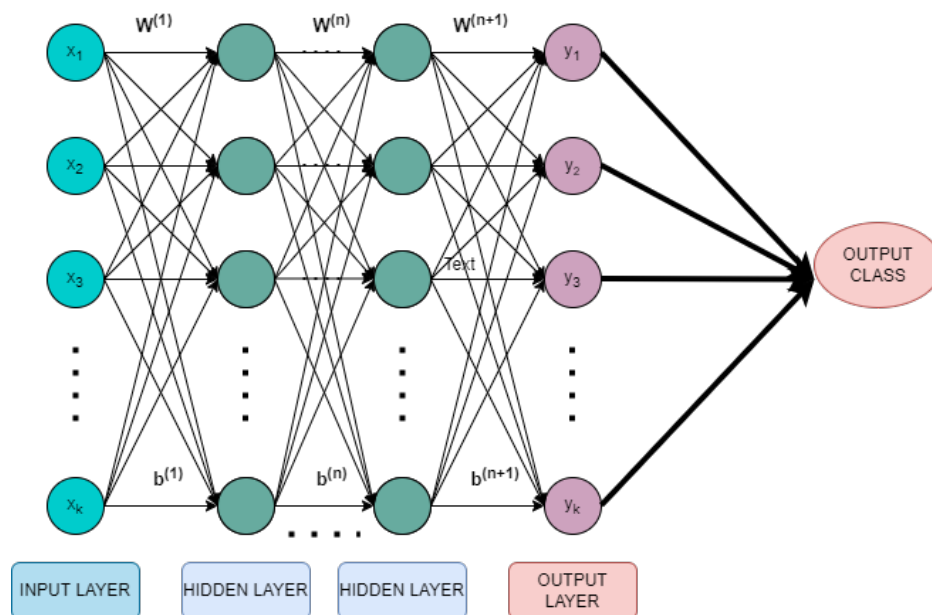
Στη προσομοίωσή μας, χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν οι εξής αλγόριθμοι SL Deep Learning, SVM και KNN.

3.1.1.1 Deep Learning

Deep Learning ή αλλιώς βαθιά μάθηση είναι η βασική πτυχή της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης. Τις τελευταίες δεκαετίες οι μέθοδοι που εισήχθησαν από την έρευνα των εννοιών βαθιάς μάθησης επηρεάζουν ένα εκτεταμένο εύρος εργασιών επεξεργασίας πληροφοριών και σήματος. Τα ιεραρχικά μοντέλα στη βαθιά μάθηση έχουν τη δυνατότητα να μάθουν διάφορα επίπεδα αναπαράστασης δεδομένων που αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης που επιτρέπουν την έννοια της αναπαράστασης με πυκνό τρόπο. Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης χρησιμοποιούνται εκτενώς τις τελευταίες δεκαετίες σε διάφορες διαδικασίες αυτόματης ταξινόμησης [46].

Η βαθιά εκμάθηση είναι το όνομα που χρησιμοποιούμε για τα «στοιβαγμένα νευρωνικά δίκτυα», δηλαδή δίκτυα που αποτελούνται από πολλά επίπεδα.

Τα στρώματα είναι κατασκευασμένα από κόμβους. Ένας κόμβος σε έναν νευρώνα στον ανθρώπινο εγκέφαλο, ο οποίος ενεργοποιείται όταν συναντά επαρκή ερεθίσματα. Ένας κόμβος συνδυάζει την είσοδο από τα δεδομένα με ένα σύνολο συντελεστών ή βαρών, που είτε ενισχύουν είτε μειώνουν αυτήν την είσοδο, αποδίδοντας έτσι σημασία στις εισόδους σε σχέση με την εργασία που προσπαθεί να μάθει ο αλγόριθμος. Αυτά τα βάρη εισόδου αθροίζονται και στη συνέχεια το άθροισμα διοχετεύεται μέσω της λεγόμενης συνάρτησης ενεργοποίησης ενός κόμβου, για να καθοριστεί εάν και σε ποιο βαθμό αυτό το σήμα πρέπει να προχωρήσει περαιτέρω μέσω του δικτύου για να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα, ας πούμε, μια πράξη ταξινόμησης. Εάν τα σήματα περάσουν, ο νευρώνας έχει «ενεργοποιηθεί» [47].



Σχήμα 11: Δομή του Deep Learning

Τα δίκτυα βαθιάς μάθησης διακρίνονται από τα πιο συνηθισμένα νευρωνικά δίκτυα ενός κρυφού επιπέδου ως προς το βάθος τους, δηλαδή ο αριθμός των επιπέδων κόμβου μέσω των οποίων πρέπει να περάσουν δεδομένα σε μια διαδικασία πολλαπλών βημάτων αναγνώρισης προτύπων [47].

Οι προηγούμενες εκδόσεις των νευρωνικών δικτύων, όπως τα πρώτα perceptrons αποτελούνταν από ένα επίπεδο εισόδου και ένα επίπεδο εξόδου, και το πολύ ένα κρυφό επίπεδο ενδιάμεσα. Περισσότερα από τρία επίπεδα (συμπεριλαμβανομένης της εισόδου και της εξόδου) χαρακτηρίζονται ως «βαθιά» μάθηση. Η έννοια του Deep είναι ένας αυστηρά καθορισμένος όρος που σημαίνει περισσότερα από ένα κρυφά επίπεδα [47].

Στα δίκτυα βαθιάς μάθησης, κάθε επίπεδο κόμβων εκπαιδεύεται σε ένα ξεχωριστό σύνολο χαρακτηριστικών με βάση την έξοδο του προηγούμενου επιπέδου. Όσο περισσότερο εισχωρούμε στο νευρωνικό δίκτυο, τόσο πιο πολύπλοκα είναι τα χαρακτηριστικά που μπορούν να αναγνωρίσουν, καθώς συγκεντρώνουν και συνδυάζουν χαρακτηριστικά από το προηγούμενο επίπεδο [47].

3.1.1.2 SVM

Το Support Vector Machines (SVM) είναι μια μηχανή εκμάθησης τελευταίας τεχνολογίας που βασίζεται στην αρχή επαγωγής ελαχιστοποίησης δομικών κινδύνων και έχει επιτύχει πολύ καλές αποδόσεις σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ωστόσο, ο SVM αρχικά σχεδιάστηκε για δυαδική ταξινόμηση ωστόσο η επέκτασή του στο σενάριο πολλαπλών τάξεων είναι ακόμη ένα θέμα αρκετά σημαντικό και διευκολύνει σε προβλήματα πολλαπλών κλάσεων ταξινόμησης. Ο τρόπος μετάβασης σε multi-class classification είναι να διασπαστεί η M-class σε μια σειρά προβλημάτων δύο τάξεων και στη κατασκευή αρκετών δυαδικών ταξινομητών. Ουσιαστικά η ταξινόμηση one-against-all είναι μια μέθοδος που περιλαμβάνει την εκπαίδευση διακριτών δυαδικών ταξινομητών, ο καθένας που έχει σχεδιαστεί για την αναγνώριση μιας συγκεκριμένης κλάσης [48].

Η μέθοδος One-Against-All (OAA) χρησιμοποιείται για εφαρμογή του αλγορίθμου SVM για προβλήματα ταξινόμησης πολλαπλών κλάσεων. Η ταξινόμηση m αριθμών κλάσεων ανάγεται ουσιαστικά σε m δυαδικές SVM μεθόδους. Έχοντας N δείγματα εκπαίδευσης

$\{x_1, y_1\}, \dots, \{x_n, y_n\}$

Το $x_i \in R^k$, όπου k είναι θετικός ακέραιος δηλαδή είναι το feature vector και το y_i , με $y_i \in \{1, 2, \dots, m\}$ είναι η αντίστοιχη ετικέτα κλάσης.

Η προσέγγιση κατασκευάζει m δυαδικούς SVM ταξινομητές, καθένας από τους οποίους χωρίζει μια κλάση από όλες τις υπόλοιπες. Το i_{th} SVM εκπαιδεύεται με όλα τα παραδείγματα εκπαίδευσης του i_{th} class με θετικές ετικέτες, και όλες οι άλλες με αρνητικές ετικέτες. Μαθηματικά το i_{th} SVM λύνει το ακόλουθο πρόβλημα που δίνει τη συνάρτηση i_{th} απόφασης (1):

$$f_i(x) = w_i^T * \varphi(x) + b_i \quad (1)$$

όπου w είναι το κανονικό διάνυσμα που ρυθμίζει το διεύθυνση του υπέρ-επίπεδου, $\varphi(\cdot)$ είναι η μη γραμμική συνάρτηση χαρτογράφησης και το b είναι η αμεροληψία [48].

3.1.1.3 KNN

Ο αλγόριθμος KNN πρόκειται για έναν από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους ταξινόμησης στον οποίο ένα νέο σημείο δεδομένων ταξινομείται με βάση την ομοιότητα στη συγκεκριμένη ομάδα γειτονικών σημείων του συνόλου δεδομένων.

Για ένα δεδομένο σημείο του συνόλου δεδομένων, ο αλγόριθμος βρίσκει τις αποστάσεις μεταξύ αυτού και όλων των άλλων K κοντινότερων σημείων του συνόλου δεδομένων κοντά στο αρχικό σημείο. Συνήθως, η Ευκλείδεια απόσταση λαμβάνεται ως μέτρο της απόστασης. Άρα εάν δύο σημεία είναι κοντινά τότε ανήκουν σε παρόμοιες κλάσεις. Η διαδικασία αυτή γίνεται για όλο το σύνολο δεδομένων. Αυτός ο αλγόριθμος είναι ευρέως γνωστός για διάφορες εφαρμογές όπως η γενετική, η πρόβλεψη κ.λπ. [49].

Η κύρια ιδέα πίσω από το kNN για εφαρμογή σε multi-class classification είναι η εύρεση των K κοντινότερων δειγμάτων εκπαίδευσης στο δείγμα που θέλουμε να προβλέψουμε χρησιμοποιώντας ως μετρική την ευκλείδεια απόσταση και στη συνέχεια η πρόβλεψη γίνεται με βάση τη πλειοψηφία των K γειτόνων. Η $F(x)$ είναι η κλάση στην οποία ανήκει το δεδομένο σημείο x για το οποίο αναζητούμε την κλάση στην οποία ανήκει και δίνεται από την (2) [49].

$$F(x) = \operatorname{argmax} \sum_{i=1}^K I(f_i(x) = y) \quad (2)$$

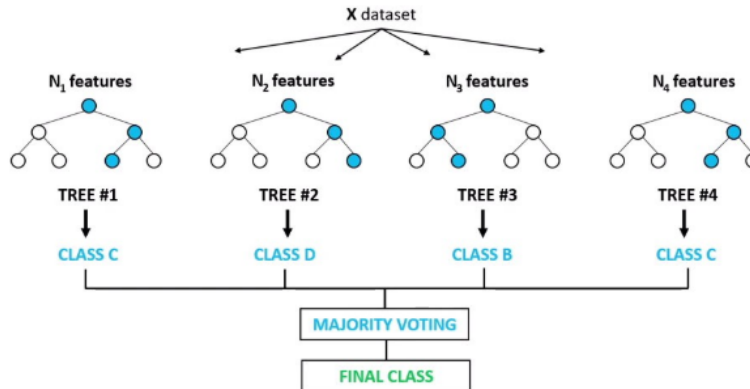
Όπου $f_i(x) \in \{1, \dots, K\}$, K : πλήθος των K κοντινότερων γειτόνων και $f_i(x)$ είναι η αντίστοιχη κλάση του x και y είναι ένα υποσύνολο του Y , όπου περιλαμβάνει τις κλάσεις ταξινόμησης. Όπου I είναι η συνάρτηση Kronecker.

Η επιλογή της παραμέτρου του βέλτιστου K είναι μία τιμή που πρέπει να βρεθεί. Ουσιαστικά πρέπει να βρεθεί μια βέλτιστη τιμή καθώς η χαμηλότερη τιμή μπορεί να οδηγήσει σε υπερπροσαρμογή και η υψηλότερη τιμή μπορεί να απαιτεί υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα σε απόσταση [49].

3.1.1.4 Random Forest

Ο Random Forest είναι ένας εποπτευόμενος αλγόριθμος μηχανικής μάθησης που κατασκευάζεται από αλγόριθμους δέντρων αποφάσεων. Αυτός ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε διάφορους κλάδους όπως η τραπεζική και το ηλεκτρονικό εμπόριο για την πρόβλεψη συμπεριφοράς και αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος Random Forest αποτελείται από πολλά δέντρα απόφασης. Τα δέντρα απόφασης είναι αυτά που καθορίζουν το αποτέλεσμα με βάση τις προβλέψεις τους.

Προβλέπει λαμβάνοντας τον μέσο όρο ή τον μέσο όρο της παραγωγής από διάφορα δέντρα. Η αύξηση του αριθμού των δέντρων αυξάνει την ακρίβεια του αποτελέσματος [50].



Σχήμα 12: Δομή του Random Forest [50]

Ένα τυχαίο δάσος εξαλείφει τους περιορισμούς ενός αλγορίθμου δέντρου αποφάσεων. Μειώνει την υπερπροσαρμογή των συνόλων δεδομένων και αυξάνει την ακρίβεια.

Τα δέντρα απόφασης είναι τα δομικά στοιχεία ενός αλγορίθμου τυχαίων δασών. Ένα δέντρο αποφάσεων είναι μια τεχνική υποστήριξης αποφάσεων που σχηματίζει μια δομή που μοιάζει με δέντρο.

Ένα δέντρο αποφάσεων αποτελείται από τρία συστατικά: τους κόμβους απόφασης, τα φύλλα απόφασης και τον κόμβο της ρίζας. Ένας αλγόριθμος δέντρου αποφάσεων διαιρεί ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης σε κλάδους, οι οποίοι διαχωρίζονται περαιτέρω σε άλλους κλάδους. Αυτή η ακολουθία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί ένας κόμβος φύλλου. Ο κόμβος φύλλου δεν μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω [50].

Οι κόμβοι στο δέντρο αποφάσεων αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του αποτελέσματος. Οι κόμβοι απόφασης παρέχουν μια σύνδεση με τα φύλλα.

Ένα τυχαίο δάσος είναι ένα σύνολο από έναν ορισμένο αριθμό τυχαίων δέντρων, που καθορίζονται από την παράμετρο number of trees. Αυτά τα δέντρα δημιουργούνται/εκπαιδεύονται σε υποσύνολα με bootstrap του Συνόλου Δεδομένων που παρέχεται στην είσοδο. Κάθε κόμβος ενός δέντρου αντιπροσωπεύει έναν κανόνα διαχωρισμού για ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Μόνο ένα υποσύνολο χαρακτηριστικών, που καθορίζεται με το subset ratio criterion, λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή κανόνα διαχωρισμού. Αυτός ο κανόνας διαχωρίζει τις τιμές με βέλτιστο τρόπο για το επιλεγμένο criterion. Για την ταξινόμηση, ο κανόνας είναι ο διαχωρισμός τιμών που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις, ενώ για την παλινδρόμηση τις διαχωρίζει προκειμένου να μειωθεί το σφάλμα που γίνεται από την εκτίμηση. Η κατασκευή νέων κόμβων επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια διακοπής [50].

Ως προς την εφαρμογή, κάθε τυχαίο δέντρο δημιουργεί μια πρόβλεψη για κάθε παράδειγμα ακολουθώντας τα κλαδιά του δέντρου σύμφωνα με τους κανόνες διαχωρισμού και αξιολογώντας το φύλλο. Οι προβλέψεις τάξης βασίζονται στην πλειονότητα των παραδειγμάτων, ενώ οι εκτιμήσεις λαμβάνονται μέσω του μέσου όρου των τιμών που φτάνουν σε ένα φύλλο. Το μοντέλο που προκύπτει είναι ένα μοντέλο ψηφοφορίας όλων των δημιουργημένων τυχαίων δέντρων. Δεδομένου ότι όλες οι μεμονωμένες προβλέψεις θεωρούνται εξίσου σημαντικές και βασίζονται σε υποσύνολα παραδειγμάτων, η προκύπτουσα πρόβλεψη τείνει να διαφέρει λιγότερο από τις μεμονωμένες προβλέψεις.

Η πρόβλεψη ουσιαστικά αποδίδεται ως η πιο συχνά προβλεπόμενη («ψηφοφορία») απάντηση από όλα τα ανεξάρτητα εκπαιδευμένα δέντρα [50].

3.1.2 *Unsupervised Learning*

Η κατηγορία Unsupervised Learning είναι η μάθηση χωρίς επίβλεψη (USL) δεν απαιτεί επόπτη, επομένως το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι άγνωστο. Η μη εποπτευόμενη μάθηση έχει ως σκοπό να βρίσκει αποτελεσματικά συμπεράσματα από δείγματα δεδομένων με ετικέτα για να περιγράψει ένα κρυφό χαρακτηριστικό ή τη δομή των δεδομένων. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό μοτίβων και σχέσεων στο σύνολο δεδομένων. Ο εντοπισμός μιας ανωμαλίας, η αναγνώριση ενός μοτίβου, η ελαχιστοποίηση της διάστασης των δεδομένων προσδιορίζουν την χρησιμότητα του συγκεκριμένου είδους μηχανικής μάθησης. Γνωστά μοντέλα UL είναι η ομαδοποίηση (Clustering), μείωση διάστασης, καθώς και άλλα. Με την ομαδοποίηση γίνεται συλλογή δεδομένων που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά, ο αλγόριθμος K-means εξυπηρετεί τέτοιου είδους ανάγκες. Η μείωση διαστάσεων είναι μια μέθοδος η οποία εξυπηρετεί στη μείωση υπολογιστικής πολυπλοκότητας καθώς και απαιτήσεων αποθήκευσης. Η μέθοδος PCA εφαρμόζεται για να επιτευχθεί η μείωση διαστάσεων ενός μεγάλου συνόλου δεδομένων [51].

3.1.2.1 *K-means*

Ο αλγόριθμος K-means είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος που προσπαθεί να χωρίσει το σύνολο δεδομένων σε προκαθορισμένες από το K διακριτές μη επικαλυπτόμενες υποομάδες (συμπλέγματα) όπου κάθε σημείο δεδομένων ανήκει σε μία μόνο ομάδα. Προσπαθεί να κάνει τα σημεία δεδομένων εντός του συμπλέγματος όσο το δυνατόν πιο όμοια, ενώ παράλληλα διατηρεί τα συμπλέγματα όσο το δυνατόν πιο διαφορετικά (μακριά). Εκχωρεί σημεία δεδομένων σε ένα σύμπλεγμα έτσι ώστε το άθροισμα της τετραγωνικής απόστασης μεταξύ των σημείων δεδομένων και του κέντρου του συμπλέγματος (αριθμητικός μέσος όρος όλων των σημείων δεδομένων που ανήκουν σε αυτό το σύμπλεγμα) να είναι στο ελάχιστο. Όσο λιγότερη διακύμανση έχουμε μέσα σε συστάδες, τόσο πιο ομοιογενή (παρόμοια) τα σημεία δεδομένων βρίσκονται μέσα στην ίδια συστάδα [52].

Ο τρόπος που λειτουργεί ο αλγόριθμος K-means είναι ο εξής: 1) Αφού καθοριστεί ο αριθμός των συστάδων K, 2) γίνεται αρχικοποίηση των κεντροειδή ανακατεύοντας πρώτα το σύνολο δεδομένων και, στη συνέχεια, επιλέγοντας τυχαία K σημεία δεδομένων για τα κεντροειδή χωρίς αντικατάσταση. 3) Η επανάληψη συνεχίζεται μέχρι να μην υπάρξει αλλαγή στα κεντροειδή, δηλαδή η εκχώρηση σημείων δεδομένων σε συμπλέγματα να μην αλλάζει.

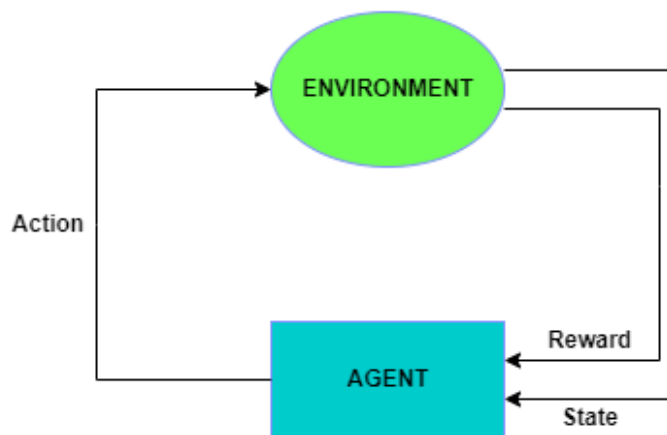
Στο βήμα 3 γίνεται υπολογισμός του αθροίσματος της τετραγωνικής απόστασης μεταξύ των σημείων δεδομένων και όλων των κεντροειδών. Έπειτα αντιστοιχίζεται κάθε σημείο δεδομένων στο πλησιέστερο σύμπλεγμα (κεντροειδές) και γίνεται υπολογισμός των κεντροειδών για τα συμπλέγματα λαμβάνοντας τον μέσο όρο όλων των σημείων δεδομένων που ανήκουν σε κάθε σύμπλεγμα [52].

3.1.3 *Reinforcement Learning*

Η επόμενη κατηγορία μηχανικής μάθησης διαφέρει από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες (SL και USL) καθώς ούτε ανακατασκευάζει το μοντέλο του συστήματος ούτε προσπαθεί να βρει κρυφές δομές.

Η ενισχυτική μάθηση είναι η εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης για τη λήψη μιας σειράς αποφάσεων. Στόχος της είναι να βρει τη βέλτιστη λύση δεδομένου των περιορισμών που του επιβάλλονται καθώς στο περιβάλλον το οποίο βρίσκεται είναι περίπλοκο. Για την λήψη αποφάσεων η μάθηση περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες. Το περιβάλλον του στο οποίο καλείται να εκπαιδευτεί αποτελείται από τις καταστάσεις και τις επιλογές. Ο Agent ο οποίος αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του, επιλέγει την κατάλληλη για εκείνον κατάσταση διαμέσου του βέλτιστης επιλογής που θεωρεί. Το μοντέλο οφείλει να καταλάβει πως πρέπει να εκτελέσει

την εργασία για να μεγιστοποιήσει την ανταμοιβή του. Η επιλογή του θα τον επιβραβεύσει ή θα τον τιμωρήσει αν εξυπηρετεί ή όχι (αντίστοιχα) τον στόχο που έχει θέσει εξ αρχής. Ξεκινάει με τυχαίες επιλογές και στη συνέχεια εκπαιδεύεται από την πληροφορία που δέχεται από το περιβάλλον του. Στόχος του είναι η μεγιστοποίηση των ανταμοιβών του. Παρατηρείται ότι η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να συγκεντρώσει πολλαπλή εμπειρία από ένα ανθρώπινο ον, χαρακτηρίζοντας την ισχυρή, δημιουργική και αποτελεσματική. Αλγόριθμους της ενισχυμένης μάθησης αποτελούν ο Q Learning, ο Deep RL και άλλοι. Μία εφαρμογή ενισχυτικής μάθησης είναι η εκπαίδευση των μοντέλων που ελέγχουν αυτόνομα αυτοκίνητα. Οι στόχοι που πρέπει να εκπληρώσει το μοντέλο είναι αρκετοί όπως η ασφάλεια, η μειωμένη ρύπανση κ.α. Άρα μέσω αμοιβών και ποινών θα εκπαιδεύεται και να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις-στόχους [53].



Σχήμα 13: Δομή του Reinforcement Learning

3.1.3.1 Αλγόριθμος Q-learning

Ο Q-learning είναι ένας αλγόριθμος μάθησης ενίσχυσης που επιδιώκει να βρει την καλύτερη ενέργεια που πρέπει να λάβει, δεδομένης της τρέχουσας κατάστασης. Θεωρείται εκτός πολιτικής, επειδή η συνάρτηση Q-learning μαθαίνει από ενέργειες που είναι εκτός της τρέχουσας πολιτικής, όπως η λήψη τυχαίων ενεργειών, και επομένως δεν απαιτείται πολιτική. Πιο συγκεκριμένα, το Q-learning επιδιώκει να μάθει μια πολιτική που μεγιστοποιεί τη συνολική ανταμοιβή. Αποτελεί μια σταδιακή μέθοδο για δυναμικό προγραμματισμό που επιβάλλει περιορισμένες υπολογιστικές απαιτήσεις.

Βασίζεται στην έννοια του Quality Matrix, γνωστό και ως Q-Matrix. Το μέγεθος αυτού του πίνακα είναι $N \times Z$ όπου N είναι το αριθμός των πιθανών καταστάσεων του περιβάλλοντος και Z είναι ο αριθμός των πιθανών επιλογών που μπορεί να εκτελέσει. Αυτό σημαίνει ότι ο Q-Learning λειτουργεί σε έναν διακριτό χώρο ενεργειών $S \times A$. Λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά του Q-Matrix που αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη κατάσταση, την καλύτερη ενέργεια που πρέπει να πραγματοποιηθεί επιλέγεται υπολογίζοντας τη μέγιστη τιμή στη σειρά [53].

Στην αρχή της εκπαιδευτικής διαδικασίας, το Q-Matrix αρχικοποιείται με τυχαίες ή μηδενικές τιμές και ανανεώνεται χρησιμοποιώντας την (3) :

$$Q_{new}(s_t, a_t) = (1 - \alpha) * Q(s_t, a_t) + \alpha(r_t + \gamma * \max(s_{t+1}, :)) \quad (3)$$

Πίνακας 6: Ανάλυση μεταβλητών της σχέσης ανανέωσης των τιμών Q

s_t, s_{t+1}	τρέχον και επόμενο State
a_t	τρέχον action
γ	Discount factor (πόσο πρέπει να λάβει τις μακροπρόθεσμες ανταμοιβές)
α	Learning rate (πόσο η πιο πρόσφατη γνώση πρέπει να αντικαταστήσει την παλαιότερη)
r_t	Τρέχουσα ανταμοιβή

3.1.4 Προ-επεξεργασία δεδομένων στην Μηχανική Μάθηση

Το πιο σημαντικό μέρος του Αλγόριθμου Μηχανικής Μάθησης είναι η προ-επεξεργασία δεδομένων. Ο καθαρισμός και η προ-επεξεργασία δεδομένων είναι σημαντικά ζητήματα για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συνόλου δεδομένων. Παρακάτω αναλύονται προβλήματα που μπορούν να προκύψουν και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την δημιουργία ενός κατάλληλου μοντέλου μηχανικής μάθησης.

Ένα απλό μοντέλο Μηχανικής Μάθησης μπορεί να κατασκευαστεί σε λίγες μόνο εκατοντάδες εγγραφές. Τα πιο σύνθετα συστήματα, ωστόσο, απαιτούν μεγάλα σύνολα δεδομένων και μοντέλα όπως είναι η αναγνώριση εικόνας, που μπορεί να χρειάζονται ακόμη και εκατομμύρια εγγραφές [53].

Ωστόσο η μη επάρκεια δεδομένων φέρει εμπόδια στη δημιουργία ενός κατάλληλου συστήματος μάθησης. Το πραγματικό πρόβλημα με τα ανεπαρκή δεδομένα έγκειται στο γεγονός ότι με λιγότερα δεδομένα, η διακύμανση αυξάνεται. Η διακύμανση, η οποία μπορεί εύκολα να οριστεί ως η μεταβλητότητα της πρόβλεψης του μοντέλου για ένα δεδομένο σημείο ή μια τιμή που μας λέει πώς διαδίδονται τα δεδομένα. Η υψηλή μεταβλητότητα στα μοντέλα, σημαίνει ότι το μοντέλο θα ταιριάζει τέλεια στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά θα σταματήσει να λειτουργεί μόλις τροφοδοτηθούν με νέα δεδομένα.

Προκειμένου να γενικευτεί καλά το μοντέλο, είναι σημαντικό τα δεδομένα εκπαίδευσης να είναι μια ακριβής αναπαράσταση του πληθυσμού ή στην δική μας περίπτωση μία καλή αναπαράσταση. Με άλλα λόγια, κάθε φορά που προκύπτει ένα νέο δείγμα από τον πληθυσμό, είναι σημαντικό το δείγμα να απεικονίζει με ακρίβεια μια εικόνα του πληθυσμού. Ένα εκπαιδευτικό σύνολο δεδομένων πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό των περιπτώσεων στις οποίες απαιτείται να γενικευτεί. Εάν το δείγμα είναι πολύ μικρό, θα υπάρξει θόρυβος δειγματοληψίας, που είναι τα μη αντιπροσωπευτικά δεδομένα ως αποτέλεσμα της τύχης, αλλά ακόμη και τα μεγάλα δείγματα μπορεί να είναι μη αντιπροσωπευτικά εάν η μέθοδος δειγματοληψίας είναι εσφαλμένη. Αυτό ονομάζεται Sampling Bias [54].

Είναι σημαντικό εδώ να σημειωθεί ότι εάν πρέπει να υπάρξει μείωση της μεροληψίας δειγματοληψίας, η διακύμανση αυξάνεται, ενώ εάν η διακύμανση πρόκειται να μειωθεί, η μεροληψία αυξάνεται. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό και ως Bias-Variance Tradeoff, είναι η διαδικασία εύρεσης ενός ισορροπημένου σημείου που διατηρεί τόσο τη διακύμανση όσο και τη μεροληψία χαμηλά στο σύνολο δεδομένων.

Για να αντιμετωπίσουμε τα ακραία στοιχεία, μπορεί να είναι καλύτερα εάν μπορούμε είτε να απορρίψουμε αυτές τις παρατηρήσεις, κάτι που μειώνει το μέγεθος του συνόλου δεδομένων, είτε

να τις αξιοποιήσουμε. Τα κενά σε ένα σύνολο δεδομένων μπορεί να έχουν τη μορφή τιμών που λείπουν ή ανύπαρκτων τιμών [54].

3.1.4.1 *Overfitting*

Η υπερβολική προσαρμογή των δεδομένων προκύπτει όταν το μοντέλο έχει προσπαθήσει να ταιριάζει απόλυτα στα δεδομένα εκπαίδευσης. Ουσιαστικά όταν ένα μοντέλο μαθαίνει τις λεπτομέρειες και τον θόρυβο στα δεδομένα εκπαίδευσης στο βαθμό που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του μοντέλου σε νέα δεδομένα αναφερόμαστε στην έννοια του Overfitting. Κάθε φορά που σε ένα τέτοιο μοντέλο εισέρχονται νέα δεδομένα, το μοντέλο θα έχει κακές επιδόσεις. Η διαδικασία κανονικοποίησης με την οποία τα μοντέλα μπορούν να απλοποιηθούν επιλέγοντας ένα με λιγότερες παραμέτρους, μειώνοντας τον αριθμό των χαρακτηριστικών στα δεδομένα εκπαίδευσης ή περιορίζοντας το μοντέλο είναι μία πιθανή λύση στο υπάρχον πρόβλημα. Η κανονικοποίηση που θα εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια της εκμάθησης μπορεί να ελεγχθεί από μια υπερπαραμέτρο. Τόσο η συλλογή περισσότερων δεδομένων εκπαίδευσης όσο και η μείωση του θορύβου στα δεδομένα εκπαίδευσης είναι λύσεις που θα οδηγήσουν σε καλύτερα αποτελέσματα [55].

3.1.4.2 *Underfitting*

Η υποπροσαρμογή είναι το αντίθετο της υπερπροσαρμογής. Συγκεκριμένα συμβαίνει όταν ένα μοντέλο είναι πολύ απλό για να μάθει την υποκείμενη δομή των δεδομένων. Αυτό οδηγεί συχνά σε υψηλή ανεξήγητη διακύμανση, καθώς ένα μοντέλο δεν είναι σε θέση να εξηγήσει τη διακύμανση. Οι λύσεις σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να είναι η επιλογή περισσότερων παραμέτρων, η χρήση καλύτερων χαρακτηριστικών και η μείωση υπερπαραμέτρων [55].

Τα παραπάνω προβλήματα των δεδομένων δημιουργούν εμπόδια στη δημιουργία κατάλληλου και αποτελεσματικού μοντέλου μηχανικής μάθησης, συνεπώς είναι υψίστης σημασίας να αντιμετωπιστούν.

3.1.5 *Μετρικές της Μηχανικής Μάθησης*

Τα μοντέλα ταξινόμησης χρησιμοποιούνται σε προβλήματα ταξινόμησης για την πρόβλεψη της κατηγορίας στόχου του δείγματος δεδομένων. Το μοντέλο ταξινόμησης προβλέπει την πιθανότητα κάθε στιγμιότυπου να ανήκει στη μία ή στην άλλη κατηγορία. Είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου ταξινομήσεων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα στην παραγωγή για την επίλυση προβλημάτων. Τα μέτρα απόδοσης στα μοντέλα ταξινόμησης μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων ταξινόμησης μηχανικής μάθησης σε ένα δεδομένο πλαίσιο. Αυτές οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν τα παρακάτω: Accuracy, Precision, Recall, F1-score. Η απόδοση του μοντέλου είναι απαραίτητη για τη μηχανική μάθηση, καθώς βοηθά στην κατανόηση των δυνατών σημείων και των περιορισμών των μοντέλων σε προβλέψεις νέων καταστάσεων [56].

Ο υπολογισμός των παραπάνω μετρικών απόδοσης αυξάνει την προγνωστική δύναμη του μοντέλου και δίνει ένα μεγάλο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

Πίνακας 7: Μετρικές Μηχανικής Μάθησης

Accuracy	$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}$
Precision	$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$
Recall	$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$
F1-score	$F1\ score = \frac{2 * precision * recall}{precision + recall}$

True Positive (TP): Μετρά τον βαθμό στον οποίο το μοντέλο προβλέπει σωστά τη θετική κλάση. Δηλαδή, το μοντέλο προβλέπει ότι το παράδειγμα είναι θετικό, και το παράδειγμα είναι πραγματικά θετικό. True Positive είναι όταν θέλουμε να μάθουμε πόσα σωστά θετικά προβλέπει το μοντέλο. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα δυαδικής ταξινόμησης με κλάσεις "Α" και "Β", εάν ο στόχος μας είναι να προβλέψουμε σωστά την κατηγορία "Α", τότε ένα true positive θα ήταν ο αριθμός των περιπτώσεων της κατηγορίας "Α" που το μοντέλο μας προέβλεψε σωστά, ως κατηγορία «Α». Λαμβάνοντας ένα πραγματικό παράδειγμα, εάν το μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να προβλέπει εάν ένα μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου είναι ανεπιθύμητο ή όχι, θα πρόκυπτε ένα πραγματικό θετικό όταν το μοντέλο προβλέψει σωστά ότι ένα μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου είναι ανεπιθύμητο. Το πραγματικό θετικό ποσοστό είναι το ποσοστό όλων των περιπτώσεων που ταξινομούνται σωστά ως ανήκουν σε μια συγκεκριμένη κατηγορία. Τα αληθή θετικά είναι σημαντικά επειδή υποδεικνύουν πόσο καλά αποδίδει το μοντέλο μας σε θετικές περιπτώσεις [57].

False Positive (FP): Τα ψευδώς θετικά εμφανίζονται όταν το μοντέλο προβλέπει ότι ένα στιγμιότυπο ανήκει σε μια κλάση που στην πραγματικότητα όμως δεν ανήκει. Τα ψευδώς θετικά μπορεί να είναι προβληματικά επειδή μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, εάν ένα μοντέλο ιατρικής διάγνωσης έχει υψηλό ψευδώς θετικό ποσοστό, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα οι ασθενείς να υποβάλλονται σε περιττή θεραπεία. Τα ψευδώς θετικά μπορεί να είναι επιζήμια για τα μοντέλα ταξινόμησης επειδή μειώνουν τη συνολική ακρίβεια του μοντέλου. Υπάρχουν μερικοί τρόποι μέτρησης των ψευδώς θετικών, συμπεριλαμβανομένων των ψευδώς θετικών ποσοστών. Το ποσοστό ψευδών θετικών είναι το ποσοστό όλων των αρνητικών παραδειγμάτων που προβλέπονται ως θετικά. Αν και τα ψευδώς θετικά μπορεί να φαίνονται ότι θα ήταν κακά για το μοντέλο, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι επιθυμητά. Για παράδειγμα, στις ιατρικές εφαρμογές, είναι συχνά καλύτερο να κάνουμε λάθος με την προσοχή και να έχουμε μερικά ψευδώς θετικά αποτελέσματα παρά να χάνουμε εντελώς μια διάγνωση. Ωστόσο, σε άλλες εφαρμογές, όπως το φιλτράρισμα ανεπιθύμητων μηνυμάτων, τα ψευδώς θετικά μπορεί να είναι πολύ δαπανηρά [57].

True Negative (TN): Τα αληθή αρνητικά είναι τα αποτελέσματα που το μοντέλο σωστά προβλέπει ως αρνητικά. Για παράδειγμα, εάν το μοντέλο προβλέπει εάν ένα άτομο έχει ασθένεια ή όχι, ένα πραγματικό αρνητικό θα ήταν όταν το μοντέλο προβλέπει ότι το άτομο δεν έχει τη νόσο και ότι στην πραγματικότητα δεν έχει τη νόσο. Τα αληθινά αρνητικά είναι ένα από τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μοντέλου ταξινόμησης. Γενικά, ένας μεγάλος αριθμός αληθινών αρνητικών υποδηλώνει ότι το μοντέλο έχει καλή απόδοση. Το αληθινό αρνητικό χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το ψευδώς αρνητικό, το αληθινό θετικό και το ψευδώς θετικό για τον υπολογισμό μιας ποικιλίας μετρήσεων απόδοσης όπως accuracy, precision, recall και F1-Score. Ενώ το αληθινό αρνητικό παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση

του μοντέλου ταξινόμησης, θα πρέπει να ερμηνεύεται στο πλαίσιο άλλων μετρήσεων για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της ακρίβειας του μοντέλου [57].

False Negative (FN): Ένα ψευδώς αρνητικό εμφανίζεται όταν ένα μοντέλο προβλέπει ένα παράδειγμα ως αρνητικό όταν είναι πραγματικά θετικό. Τα ψευδώς αρνητικά μπορεί να είναι πολύ δαπανηρά, ειδικά στον τομέα της ιατρικής. Για παράδειγμα, εάν ένα τεστ προ συμπτωματικού ελέγχου για τον καρκίνο προβλέπει ότι ένας ασθενής δεν έχει καρκίνο ενώ στην πραγματικότητα έχει, αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στην εξέλιξη της νόσου χωρίς θεραπεία [58]. Τα ψευδώς αρνητικά μπορούν επίσης να προκύψουν σε άλλα πεδία, όπως η ασφάλεια ή ο εντοπισμός απάτης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένα ψευδώς αρνητικό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παραχώρηση πρόσβασης σε κάποιον ή την έγκριση μιας συναλλαγής που δεν θα έπρεπε να είχε επιτραπεί. Τα ψευδώς αρνητικά είναι συχνά πιο σοβαρά από τα ψευδώς θετικά και επομένως είναι σημαντικό να τα λαμβάνουμε υπόψη κατά την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μοντέλου ταξινόμησης [57].

3.1.5.1 Accuracy

Η ακρίβεια μοντέλου είναι μια μέτρηση απόδοσης του μοντέλου μηχανικής εκμάθησης που ορίζεται ως η αναλογία των αληθινών θετικών και των αληθινών αρνητικών προς όλες τις θετικές και αρνητικές παρατηρήσεις. Με άλλα λόγια, η ακρίβεια ερμηνεύει πόσο συχνά μπορούμε να περιμένουμε ότι το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης θα προβλέψει σωστά ένα αποτέλεσμα από τον συνολικό αριθμό των φορών που έκανε προβλέψεις. Για παράδειγμα: Ας υποθέσουμε ότι δοκιμάζεται το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης με ένα σύνολο δεδομένων 100 εγγράφων και ότι το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης προέβλεψε σωστά και τις 90 αυτές περιπτώσεις. Η μέτρηση ακρίβειας, σε αυτήν την περίπτωση, θα ήταν: $(90/100) = 90\%$. Το ποσοστό ακρίβειας είναι εξαιρετικό, αλλά δεν μας λέει τίποτα για τα σφάλματα που κάνουν τα μοντέλα μηχανικής εκμάθησης σε νέα δεδομένα που δεν έχουμε ξαναδεί [59].

3.1.5.2 Recall

Η βαθμολογία ανάκλησης μοντέλου αντιπροσωπεύει την ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει σωστά τα θετικά από τα πραγματικά θετικά. Αυτό είναι σε αντίθεση με την ακρίβεια που μετρά πόσες προβλέψεις που γίνονται από μοντέλα είναι πραγματικά θετικές από όλες τις θετικές προβλέψεις που έγιναν. Για παράδειγμα: Εάν το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης προσπαθεί να εντοπίσει θετικές κριτικές, το recall θα είναι το ποσοστό αυτών των θετικών κριτικών που το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης προέβλεψε σωστά ως θετικές. Με άλλα λόγια, μετρά πόσο καλό είναι το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης που διαθέτουμε στον εντοπισμό όλων των πραγματικών θετικών από όλα τα θετικά που υπάρχουν σε ένα σύνολο δεδομένων. Όσο υψηλότερη είναι η βαθμολογία ανάκλησης, τόσο καλύτερα το μοντέλο μηχανικής μάθησης εντοπίζει τόσο θετικά όσο και αρνητικά παραδείγματα. Η ανάκληση είναι επίσης γνωστή ως ευαισθησία (sensitivity) ή πραγματικό θετικό ποσοστό. Μια υψηλή βαθμολογία ανάκλησης δείχνει ότι το μοντέλο είναι καλό στον εντοπισμό θετικών παραδειγμάτων. Αντίθετα, μια χαμηλή βαθμολογία ανάκλησης δείχνει ότι το μοντέλο δεν είναι καλό στον εντοπισμό θετικών παραδειγμάτων. Μαθηματικά, αντιπροσωπεύει την αναλογία του αληθινού θετικού προς το άθροισμα του αληθινού θετικού και του ψευδώς αρνητικού [59],[60].

3.1.5.3 Precision

Το precision score μετρά το ποσοστό των θετικά προβλεπόμενων ετικετών που είναι πραγματικά σωστές. Το precision είναι επίσης γνωστό ως θετική προγνωστική αξία. Το precision χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την ανάκληση για αντιστάθμιση ψευδώς θετικών και ψευδώς

αρνητικών. Το precision επηρεάζεται από την κατανομή της κλάσης. Εάν υπάρχουν περισσότερα δείγματα στην κατηγορία μειοψηφίας, τότε το precision θα είναι μικρότερο. Το precision μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο ακρίβειας ή ποιότητας. Αν θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε τα ψευδώς αρνητικά, θα επιλέγαμε ένα μοντέλο με υψηλό precision. Αντίθετα, εάν θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε τα ψευδώς θετικά, θα επιλέγαμε ένα μοντέλο με υψηλή ανάκληση. Το precision χρησιμοποιείται κυρίως όταν χρειάζεται να προβλέψουμε τη θετική κατηγορία και υπάρχει μεγαλύτερο κόστος που σχετίζεται με τα ψευδώς θετικά παρά με τα ψευδώς αρνητικά, όπως στην ιατρική διάγνωση ή το φιλτράρισμα ανεπιθύμητων μηνυμάτων. Για παράδειγμα, εάν ένα μοντέλο είναι 99% ακριβές αλλά έχει μόνο 50% precision, αυτό σημαίνει ότι οι μισές φορές που προβλέπει ότι ένα email είναι ανεπιθύμητο, στην πραγματικότητα δεν είναι ανεπιθύμητο [59].

Το precision score είναι ένα χρήσιμο μέτρο της επιτυχίας της πρόβλεψης όταν οι τάξεις είναι πολύ ανισόρροπες. Μαθηματικά, αντιπροσωπεύει την αναλογία του αληθινού θετικού προς το άθροισμα του αληθινού θετικού και του ψευδώς θετικού [60].

3.1.5.4 F1-score

Το F1-score αντιπροσωπεύει τη βαθμολογία μοντέλου ως συνάρτηση της βαθμολογίας precision και ανάκλησης. Το F1-score είναι μια μέτρηση απόδοσης μοντέλου μηχανικής εκμάθησης που δίνει ίση βαρύτητα τόσο στο precision όσο και στην ανάκληση για τη μέτρηση της απόδοσής της. Συχνά χρησιμοποιείται ως ενιαία τιμή που παρέχει πληροφορίες υψηλού επιπέδου σχετικά με την ποιότητα εξόδου του μοντέλου. Αυτό είναι ένα χρήσιμο μέτρο του μοντέλου στα σενάρια όπου κάποιος προσπαθεί να βελτιστοποιήσει είτε το precision είτε τη βαθμολογία ανάκλησης και ως αποτέλεσμα, η απόδοση του μοντέλου να υποφέρει [60].

4

Μελέτη των Παρεμβολών στα Δίκτυα Νέας Γενιάς

Η ασύρματη επικοινωνία είναι ένα σύστημα επικοινωνίας που υποστηρίζει τη μετάδοση πληροφοριών (φωνής, βίντεο και δεδομένων) σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας τον ελεύθερο χώρο ως κανάλι επικοινωνίας. Ο όρος Global System for Mobile Communication (GSM) αναφέρεται σε μια μορφή ασύρματης επικοινωνίας που περιλαμβάνει έναν αριθμό χρηστών κινητής τηλεφωνίας που αλληλοεπιδρούν με Σταθμούς Βάσης (BS) για μετάδοση και λήψη δεδομένων σήματος σε πραγματικό χρόνο όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Οι πάροχοι υπηρεσιών δικτύου έχουν άδεια λειτουργίας σε καθορισμένο φάσμα για την εξυπηρέτηση των συνδρομητών τους. Ένα εκχωρημένο φάσμα μπορεί να χωριστεί σε ένα σύνολο ασυνεχών ή μη παρεμβαλλόμενων ραδιοσημάτων. Τεχνικές όπως διαίρεση συχνότητας (FD), διαίρεση χρόνου (TD) και διαίρεση κωδικών (CD) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαίρεση ενός ραδιοφάσματος σε διαφορετικά κανάλια [39].

Στη σύγχρονη εποχή, οι τεχνολογίες επικοινωνιών χρησιμεύουν ως μοχλοί των κοινωνικών, οικονομικών και πολιτικών εξελίξεων. Όμως, οι παρεμβολές στα δίκτυα επικοινωνίας περιορίζουν τα οφέλη που προκύπτουν από αυτή τη σημαντική τεχνολογία. Η παρεμβολή αποτελεί μείζον πρόβλημα στα δίκτυα GSM για τους παρόχους υπηρεσιών καθώς μειώνει την ποιότητα των υπηρεσιών για τους παρόχους υπηρεσιών που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εσόδων. Οι συνήθεις τύποι παρεμβολών σε κυψελωτά δίκτυα είναι: αυτο-παρεμβολές, παρεμβολές πολλαπλής πρόσβασης, παρεμβολές ομοδιαυλικού καναλιού (CCI) και παρεμβολή καναλιού (ACI). Οι παρεμβολές πολλαπλής πρόσβασης προκαλούνται από τη μετάδοση από πολλαπλά σήματα χρησιμοποιώντας το ίδιο συχνότητα. Το CCI εμφανίζεται σε διαύλους που επαναχρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι συχνότητας. Το ACI είναι η παρεμβολή που προκαλείται μεταξύ δίαυλων που επικοινωνούν στην ίδια γεωγραφική τοποθεσία χρησιμοποιώντας γειτονικές ζώνες συχνοτήτων. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές για τον μετριασμό των παρεμβολών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι κοινές μέθοδοι περιλαμβάνουν: έλεγχος ισχύος, αποτελεσματική εκχώρηση συχνότητας χρησιμοποιώντας έξυπνες τεχνικές και λύσεις ενδοδιαμόρφωσης [42].

Προκλήσεις όπως η εκρηκτικά αυξανόμενη ζήτηση υπηρεσιών από UEs στα κυψελωτά δίκτυα που βασίζονται σε σταθερούς σταθμούς βάσης (BS) καλούνται να αντιμετωπιστούν. Η πυκνωση δικτύου, δηλαδή η προσθήκη περισσότερων BS στο δίκτυο, είναι μια λύση για τη βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου. Ωστόσο, είναι αναποτελεσματική ως προς τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και λειτουργικές δαπάνες. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, η αξιοποίηση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) όπως θα μπορούσαν να είναι τα εναέρια BS θεωρείται μια ευέλικτη λύση καθώς τα UAV είναι εύκολα στην ανάπτυξη ανάλογα με τις απαιτήσεις [39].

4.1 Είδη παρεμβολών στα κυψελωτά δίκτυα

4.1.1 Αυτό-παρεμβολή

Η αυτό-παρεμβολή οφείλεται σε παρεμβολές που προκαλούνται μεταξύ των σημάτων που μεταδίδονται από ένα κοινόχρηστο πομπό. Το μέγεθος της παρεμβολής που προκαλείται εξαρτάται από τον τύπο διαμόρφωσης. Στο OFDM, αυτό-παρεμβολές μεταξύ δευτερευόντων φορέων λόγω μετατοπίσεων συχνότητας φορέα που προκαλούνται από αναντιστοιχίες του ταλαντωτή, φαινόμενο Doppler και γρήγορη εξασθένηση που προκαλείται από την κίνηση των πομποδεκτών. Η παρεμβολή μεταξύ των μεταδόσεων άνω και κάτω ζεύξης σε ένα σύστημα διπλής όψης FD μπορεί επίσης να ταξινομηθεί ως αυτό-παρεμβολή, καθώς συμβαίνει μεταξύ σημάτων που αποστέλλονται στην ίδια αμφίδρομη σύνδεση. Αυτή η παρέμβαση μετριάζεται με τη χρήση φίλτρων διπλής όψης [61].

Η αυτό-παρεμβολή ή η διαρροή πομπού αναφέρεται στο σήμα που διαρρέει από τον πομπό της συσκευής στον δικό του δέκτη. Γενικά, το σήμα του πομπού είναι περίπου 100 dB ισχυρότερο από το επίπεδο ευαισθησίας αναφοράς του δέκτη. Ένα σημαντικό μέρος αυτού του μεταδιδόμενου σήματος διαρρέει στην αλυσίδα του δέκτη, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στην αποκωδικοποίηση του επιθυμητού σήματος, το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί θορυβώδες, με ένα δραματικά επηρεασμένο SNR [61].

4.1.2 Παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης

Οι δραματικοί ρυθμοί αύξησης των απαιτήσεων χωρητικότητας σε ασύρματα και άλλα ευρυζωνικά συστήματα έχουν οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης δικτύων επικοινωνίας στα οποία πολλοί χρήστες μοιράζονται κοινούς πόρους επικοινωνίας. Μια σημαντική συνέπεια αυτής της τάσης είναι η αυξανόμενη παρουσία παρεμβολών πολλαπλής πρόσβασης (MAI), η οποία προκύπτει σε συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν μη ορθογώνια πολυπλεξία, δηλαδή σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης [61]. Αυτό το ζήτημα προκύπτει φυσικά, για παράδειγμα, σε συστήματα επικοινωνίας πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA) που χρησιμοποιούν μη ορθογώνιους κώδικες διασποράς. Προκύπτει επίσης σε ορθογώνια πολυπλεξικά ασύρματα κανάλια, όπως τα κανάλια πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA) και πολλαπλής πρόσβασης με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (OFDMA), λόγω επιδράσεων όπως η πολυδοκική ή μη ιδανική καναλοποίηση συχνότητας και σε ενσύρματα κανάλια όπως αυτά που προκύπτουν σε συστήματα ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (DSL) ή σε επικοινωνίες γραμμών ισχύος (PLC) στα οποία η αλληλεπίδραση και άλλοι τύποι παρεμβολών αποτελούν σημαντικές βλάβες. Το MAI προκύπτει επίσης σε συστήματα πολυπλεξίας οπτικής διαίρεσης κυμάτων (WDM) λόγω αλληλεπιδράσεων του τρόπου λειτουργίας που προκαλούνται από μη γραμμικότητες [64].

4.1.3 Ομοδιαυλική παρεμβολή

Co Channel Interference ή αλλιώς ομοδιαυλική παρεμβολή μεταξύ διαύλων που επαναχρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων (κανάλι). Αναφέρεται επίσης ως διακυβελωτή παρεμβολή στα κυψελωτά συστήματα. Η επίδραση του CCI μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας σταθερή συχνότητα επαναχρησιμοποιούμενη. Οι συνήθειες μέθοδοι για τη διαχείριση CCI σε κυψελωτά δίκτυα περιλαμβάνουν: Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, τεχνικές MIMO, ευθυγράμμιση παρεμβολών και προσαρμογή σε παραλλαγή παρεμβολών [64]. Για την μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής, οι ομοδιαυλικές κυψέλες πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά μια ελάχιστη απόσταση, ώστε να διασφαλίζεται κατάλληλη απομόνωση στα φαινόμενα διάδοσης ραδιοκυμάτων. Ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης υψηλής συχνότητας συνεπάγεται σε σταθερό ρυθμό δεδομένων σε όλη την περιοχή εξυπηρέτησης. Μια άλλη μέθοδος αντιμετώπισης του CCI είναι η εξέταση της συνεργασίας μεταξύ των πομπών. Στο δίκτυο MIMO, το κανάλι παρεμβολής μετατρέπεται σε κανάλι εκπομπής θεωρώντας τον συνεργαζόμενο πομπό ως έναν μόνο πομπό [65]. Η κίνηση δεδομένων μπορεί να μοιράζεται μεταξύ πολλών συνεργαζόμενων πομπών από τους οποίους μπορεί στη συνέχεια να είναι μεταδίδεται με συνέπεια στον δέκτη προορισμού.

Η παρεμβολή ομοδιαυλικού καναλιού ή CCI είναι η διαφωνία από δύο διαφορετικούς ραδιοπομπούς που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Οι παρεμβολές μεταξύ των καναλιών μπορεί να προκληθούν από πολλούς παράγοντες, από καιρικές συνθήκες έως διοικητικά και σχεδιαστικά ζητήματα.

4.1.4 Παρεμβολή γειτονικού καναλιού

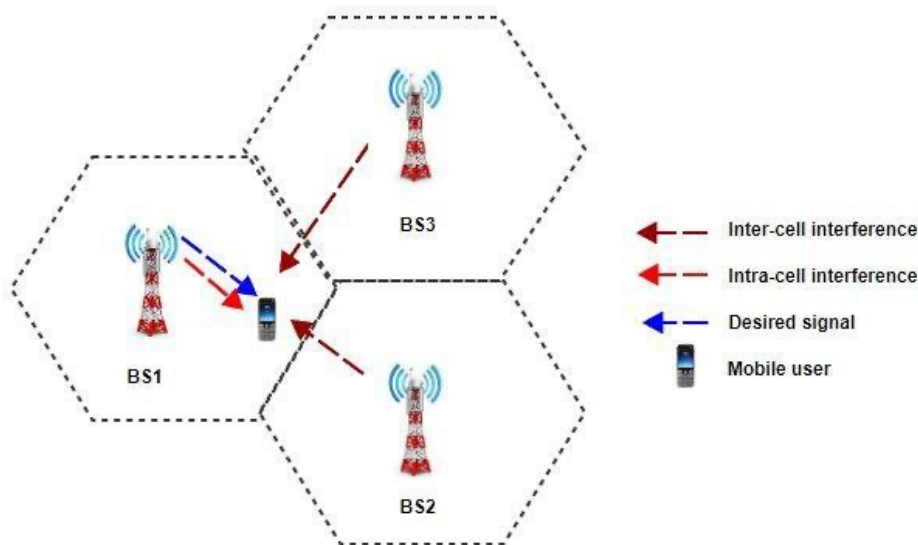
Το ACI ή αλλιώς παρεμβολή γειτονικού καναλιού είναι η παρεμβολή που προκαλείται μεταξύ διαύλων που επικοινωνούν στην ίδια γεωγραφική τοποθεσία χρησιμοποιώντας γειτονικές ζώνες συχνοτήτων. Για παράδειγμα όταν ένας πομπός καταλαμβάνει μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων σε συχνότητα δίπλα σε αυτή τη ζώνη. Οι εκπομπές εκτός ζώνης εκλαμβάνονται ως παρεμβολές από άλλους δέκτες. Η επίδραση των εκπομπών εκτός ζώνης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον παρακείμενο λόγο ισχύος καναλιού (ACPR). Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού οφείλεται στην ύπαρξη μη ιδανικών φίλτρων που επιτρέπουν την λήψη γειτονικών συχνοτήτων εντός της ζώνης λήψης συχνοτήτων του δέκτη [65]. Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού μπορεί να μειωθεί με την προσεκτική επιλογή φίλτρων και στρατηγικές ανάθεσης καναλιών.

4.1.5 Inter-Cell Interference

Παρεμβολές μεταξύ κυψελών εμφανίζονται στα επίπεδα του συστήματος δικτύου ως αποτέλεσμα του λαμβάνει χώρα αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών κυψελών. Αυτή η αλληλεπίδραση οφείλεται είτε σε λειτουργία στο ίδιο κανάλι που αναφέρεται ως παρεμβολή Co-Channel (CCI), ή λόγω της επικάλυψης μεταξύ γειτονικών καναλιών που αναφέρεται ως Adjacent Channel Interference (ACI) [66].

4.1.6 Intra-Cell Interference

Οι χρήστες στο περιβάλλον NLOS εκτίθενται σε άλλο τύπο παρεμβολών λόγω των φαινομένων πολλαπλών διαδρομών που αντιπροσωπεύουν οι ISI και ICI. Τα ληφθέντα σήματα από πολλαπλές διαδρομές έχουν διαφορετικά πλάτη και φάσεις, εξ ου και η άθροιση αυτών. Αυτά τα σήματα μπορεί να παράγουν είτε εποικοδομητικό είτε καταστροφικό πεδίο που έχει ως αποτέλεσμα μία σύνθετη περίπτωση που αναφέρεται ως "fading" [66].



Σχήμα 14: Παρεμβολές Inter-cell και Intra-cell [79]

4.2 Παρεμβολές και UAV

Για την υποστήριξη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) στο μέλλον, μια νέα ασύρματη επικοινωνία για παράδειγμα, UAV συνδεδεμένο με κυψέλη, έλαβε πρόσφατα μια έξαρση ενδιαφέροντος τόσο στον ακαδημαϊκό χώρο όσο και στη βιομηχανία. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί βάσης (BS) και η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος καθιστούν τα UAV ως νέοι εξοπλισμοί εναέριων χρηστών (UEs) για την ικανοποίησή των απαιτήσεων επικοινωνίας. Ωστόσο, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά επίγεια UE, το μεγάλο υψόμετρο των UAV έχει ως αποτέλεσμα σε πιο συχνά κανάλια οπτικής επαφής (LoS) τόσο με τα συνδεδεμένα όσο και με τα μη συνδεδεμένα BS σε μια πολύ ευρύτερη περιοχή, γεγονός που προκαλεί ισχυρότερες παρεμβολές τόσο σε UAV όσο και σε επίγεια UEs.

Έχουν σχεδιαστεί τεχνικές για την εξισορρόπηση των επίγειων παρεμβολών. Για την αντιμετώπιση αυτού, στο άρθρο [63] προτείνεται εναλλακτικές λύσεις για την μείωση των παρεμβολών και για την επίτευξη μιας φασματικά αποδοτικής λειτουργίας του κυψελωτού δικτύου με συνύπαρξη UAV και επίγειων UEs.

Μια κύρια πρόκληση είναι η παροχή συνδεσιμότητας στα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα χαμηλού υψομέτρου (LAPS) λόγω της αυξημένης παρεμβολής στο δίκτυο. Το αυξημένο υψόμετρο και η κατάσταση διάδοσης αναγκάζουν τα UAVs να δημιουργούν περισσότερες παρεμβολές σε γειτονικές κυψέλες, και ταυτόχρονα να βιώνουν περισσότερες παρεμβολές από τις μεταδόσεις κάτω ζεύξης των γειτονικών κυψελών. Το πρόβλημα παρεμβολής της κάτω ζεύξης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την υποβαθμισμένη απόδοση των γειτονικών UAV που εξυπηρετούν δικούς τους επίγειους χρήστες.

Στο άρθρο [64] οι συγγραφείς εστιάζουν στο πρόβλημα της ανάπτυξης UAVs για εξυπηρέτηση κινητών χρηστών σε κυψελωτό δίκτυο, με στόχο τη μεγιστοποίηση της κάλυψης και τη μείωση των παρεμβολών.

Υπάρχουν αρκετές μελέτες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων όπως οι παρεμβολές των UAVs και ως προς άλλους σταθερούς σταθμούς βάσεις, ή άλλα UAVs ή ακόμα και ως προς χρήστες που εξυπηρετούνται από άλλη κυψέλη. Η ανάπτυξη UAVs τέτοιων ώστε να μπορούν να

εξυπηρετούν τον μεγαλύτερο αριθμό UE και να επιβάλλουν τις λιγότερες παρεμβολές στα UEs σε μια δεδομένη περιοχή είναι μία από τις προκλήσεις.

Τα κυρίαρχα κανάλια αέρος-εδάφους οπτικής επαφής (LoS) έχουν θέσει κρίσιμα ζητήματα παρεμβολών σε επικοινωνίες μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) που συνδέονται με κυψέλη.

Η ενσωμάτωση των UAVs σε μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα αντιμετωπίζει νέες προκλήσεις. Ειδικότερα, ο τρόπος μετριάσμού της σοβαρής παρεμβολής αέρος-εδάφους θεωρείται ως μια σημαντική πρόκληση για την πρακτική υλοποίηση UAV που συνδέονται με κυψελωτά δίκτυα [65]. Σε σύγκριση με τα επίγεια ασύρματα κανάλια που γενικά υποφέρουν από πιο σοβαρή απώλεια διαδρομής, σκίαση, το μεγάλο υψόμετρο των UAV γενικά οδηγεί σε κανάλια που κυριαρχούν στο LoS με επίγεια BS. Λόγω των LoS καναλιών, το UAV μπορεί να προκαλέσει/υποστεί σοβαρότερες παρεμβολές άνω/κάτω ζεύξης προς/από έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό BS από ότι τα επίγεια UEs, τα οποία θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν σημαντικά την απόδοση της επικοινωνίας των UAV στην κάτω ζεύξη καθώς και αυτή των επίγειων UEs στην άνω ζεύξη. Αν και διάφορες τεχνικές μετριάσμού παρεμβολών έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία μεταξύ των οποίων ορισμένα εφαρμόστηκαν στα επίγεια δίκτυα (όπως ο συντονισμός παρεμβολών μεταξύ κυψελών (ICIC) [66] για συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (CoMP) [67] και μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) [68], μπορεί να είναι αναποτελεσματικές ή ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση νέων και πιο σοβαρών προβλημάτων παρεμβολών που φέρνουν τα UAV, λόγω του μοναδικού τους LoS-dominant καναλιών αέρα-εδάφους. Ως εκ τούτου, νέες και πιο εξελιγμένες τεχνικές μετριάσμού παρεμβολών απαιτούνται για την επίτευξη αποτελεσματικής κατανομής φάσματος μεταξύ των υπάρχοντων επίγειων UE και των νέων εναέριων UE σε μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα. Έχουν γίνει αρκετές πρόσφατες εργασίες [69] σε αυτή τη νέα κατεύθυνση. Οι συγγραφείς αξιολόγησαν την απόδοση αρκετών υπάρχουσών τεχνικών, όπως η τρισδιάστατη (3D) διαμόρφωση δέσμης, ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου και μαζική πολλαπλή έξοδος πολλαπλών εισόδων (MIMO) για επικοινωνίες UAV μέσω προσομοιώσεων ή/και μετρήσεων. Αντίθετα, οι συγγραφείς στο [70] πρότειναν νέες και ενισχυμένες τεχνικές μετριάσμού παρεμβολών για επικοινωνίες UAV που συνδέονται με κυψελωτό δίκτυο. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στο [71] πρότειναν για πρώτη φορά μία δομή επικοινωνίας UAV πολλαπλών δεσμών για κυψελωτή άνω ζεύξη, όπου μία νέα μορφή ακύρωσης συνεργατικής παρεμβολής με εκμετάλλευση των αδρανών/διαθέσιμων επίγειων BS εφαρμόζεται από κοινού με τη διαμόρφωση δέσμης μετάδοσης του UAV για να μετριάσει την ισχυρή παρεμβολή άνω ζεύξης στα επίγεια UEs. Επιπλέον προτάθηκαν νέα σχέδια ICIC αέρος-εδάφους για άνω ζεύξη UAV επικοινωνία για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου αντιμετωπίζοντας τις παρεμβολές ως θόρυβο [24]. Έχει προταθεί μια νέα στρατηγική συνεργασίας NOMA για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του ICIC [70], χρησιμοποιώντας την ακύρωση παρεμβολής στα συνεργατικά BS.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως κανένα από τα παραπάνω έργα [70], [71] δεν έχει ασχοληθεί με τον τρόπο αντιμετώπισης του ζητήματος παρεμβολών στην επικοινωνία κινητής τηλεφωνίας με UAV.

4.3 Έλεγχος ισχύος για την αντιμετώπιση παρεμβολών

Σε πρακτικά συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών η ισχύς που εκπέμπουν οι κινητοί χρήστες ελέγχονται διαρκώς από τον εκάστοτε σταθμό βάσης που εξυπηρετούνται. Αυτό γίνεται ώστε κάθε κινητός χρήστης να διατηρεί άνω ζεύξη καλής ποιότητας με το σταθμό βάσης εκπέμποντας την ελάχιστη δυνατή ισχύ εκπομπής. Ο έλεγχος της ισχύος εκπομπής όχι μόνο

επιμηκύνει την ζωή της μπαταρίας του κινητού του συνδρομητή, αλλά επίσης μειώνει σημαντικά το λόγο S/I στο ανοδικό κανάλι του συστήματος.

Ο έλεγχος ισχύος είναι μια από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις σε συστήματα κινητής επικοινωνίας. Η βελτιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης των UAVs βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση και μειώνει αποτελεσματικά τις παρεμβολές [72]. Με στόχο το πρόβλημα ελέγχου ισχύος του Cognitive Radio (CR) με ισχύ εκπομπής και περιορισμούς παρεμβολής, προτάθηκε η συνεταιριστική θεωρία παιγνίων για πρόβλημα ελέγχου ισχύος κυψελωτού δικτύου [73]. Επίσης έχουν εξεταστεί τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ετερογενών κυψελωτών δικτύων και έχει προταθεί ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος με βάση το παιχνίδι Stackelberg [74]. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχει προταθεί μέθοδος γρήγορης διαμόρφωσης δέσμης που βασίζεται στη βαθιά εκμάθηση για την επίλυση του προβλήματος κατανομής ισχύος και διαμόρφωσης δέσμης σε πολλαπλές εισόδους και συστήματα πολλαπλών εξόδων (MIMO) [75]. Εν τω μεταξύ, υπάρχουν κάποιες μελέτες που διερευνούν το πολύπλοκο σύστημα των UAVs. Έχει προταθεί [76] ένα μοντέλο κάλυψης UAV για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας βελτιστοποιώντας το εύρος κάλυψης και την ισχύ του UAV. Τέλος έχει προταθεί ένα αποτελεσματικό σύστημα πολλαπλών στόχων κατανομής πόρων στο υποβοηθούμενο από UAV σύστημα επικοινωνίας έκτακτης ανάγκης, το οποίο ρυθμίζει την κατανομή ισχύος και την κατανομή υποκαναλιού για μεγιστοποίηση των χρηστών σε αθροιστικό ποσοστό [77].

Σύμφωνα με το άρθρο [72] ένα πρόβλημα ελέγχου ισχύος κάτω ζεύξης του εξαιρετικά πυκνού δικτύου UAV περιγράφει την ανταγωνιστική σχέση μεταξύ των UAVs. Το UAV υιοθετεί τεχνολογία επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, η οποία επηρεάζει άμεσα τη μετάδοση του σήματος της κάτω ζεύξης, ο χρήστης υποφέρει από μια μεγάλη ποσότητα παρεμβολών co-channel.

Επομένως, η εργασία μας διερευνά τη βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος του UAV για μείωση των παρεμβολών και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του καναλιού του UAV προς τους χρήστες, αναλύεται ο αντίκτυπος των υψών του UAV στην απόδοση του συστήματος.

4.4 Προσομοίωση Βέλτιστης Διαδρομής και Τοποθέτησης UAV σε 3D χώρο

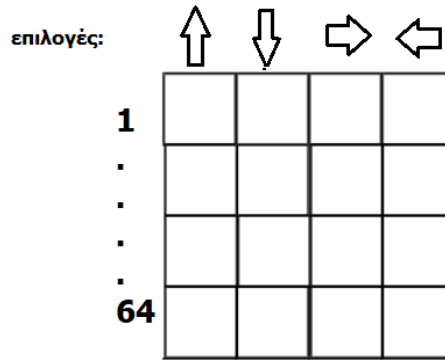
Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα μελετηθούν οι διάφορες τεχνικές Μηχανικής Μάθησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και τοποθέτησης UAV σε τρισδιάστατο χώρο με σκοπό την βέλτιστη κάλυψη των χρηστών σε δίκτυα 5G and beyond. Συγκεκριμένα σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η δημιουργία περιβάλλοντος και κατάλληλων μοντέλων για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής εξαρτώμενο από τηλεπικοινωνιακές παραμέτρους για την μέγιστη κάλυψη των χρηστών κατά τη διάρκεια της τροχιάς του κινούμενου UAV. Με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης το μοντέλο εκπαιδεύεται στο περιβάλλον και καταφέρνει να βρει το στόχο του χωρίς να κάνει άσκοπες μετακινήσεις οι οποίες θεωρούνται οικονομικά και ενεργειακά επιζήμιες. Η δημιουργία επιπλέον σεναρίων με προκλήσεις που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε έχουν ως στόχο τη δημιουργία ενός ισχυρού μοντέλου το οποίο να προσαρμόζεται σε αλλαγές και νέες προκλήσεις και να επιτυγχάνει τους κείμενους στόχους του. Ο συνδυασμός του κλάδου Artificial Intelligent με το κλάδο των Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων φέρεται να δημιουργεί μία νέα εποχή στον κλάδο των Τηλεπικοινωνιών με πολλές δυνατότητες και ερευνητικές αναζητήσεις. Η χρήση των γλωσσών προγραμματισμού python και MATLAB αποτέλεσε σημαντικό τμήμα για την εκπόνηση

της διπλωματικής εργασίας καθώς και η χρήση του εργαλείου RapidMiner [80] για την αξιολόγηση των μοντέλων. Το RapidMiner αποτελεί ένα λογισμικό περιβάλλον για την επεξεργασία και την εξαγωγή πληροφορίας από ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων. Η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης αποτελεί σημαντικό εργαλείο για μια ποιοτική και ολοκληρωμένη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης χρησιμοποιήθηκαν είτε για τη δημιουργία κατάλληλων μοντέλων είτε ως βοηθητικές τεχνικές σε σενάρια που υλοποιήθηκαν. Σημαντικό τμήμα της παρούσας διπλωματικής ήταν η υλοποίηση αλγορίθμου Reinforcement Learning για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής σε περιβάλλον που είχαμε ορίσει. Πιο συγκεκριμένα υλοποιήσαμε τον αλγόριθμο Q-Learning για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος. Για την υλοποίηση, αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα python. Το Gym της Python είναι μια εργαλειοθήκη για την ανάπτυξη και τη σύγκριση αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης. Επιπλέον χρησιμοποιήσαμε γλώσσα MATLAB με σκοπό την τοποθέτηση UAVs για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη χρηστών καθώς και την υλοποίηση σεναρίου για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προκλήσεων. Επιπλέον με χρήση του MATLAB εξάγουμε δεδομένα για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής η οποία σε συνδυασμό με την δημιουργία μοντέλου μέσω supervised learning προβλέπει τη βέλτιστη διαδρομή με ένα εναλλακτικό τρόπο από τη χρήση reinforcement learning το οποίο θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Η χρήση μεθόδων unsupervised learning υλοποιήθηκε με το εργαλείο MATLAB για την ομαδοποίηση των χρηστών. Η χρήση του εργαλείου rapid miner χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση δύο μοντέλων. Το σενάριο του πρώτου μοντέλου έχει ως στόχο την μείωση της παρεμβολής που δημιουργεί ένα κινούμενο UAV το οποίο καλύπτει τους δικούς του χρήστες αλλά ταυτόχρονα παρεμβάλλει σε σταθερά UAVs τα οποία εξυπηρετούν δικούς τους χρήστες. Σκοπός του μοντέλου είναι να προβλέψει κατά πόσα dB πρέπει να μειωθεί η ισχύς εκπομπής του κινούμενου UAV όταν συνορεύει με γειτονικά UAVs που εξυπηρετούν δικούς τους χρήστες. Το μοντέλο έχει πολύ υψηλά ποσοστά ακρίβειας όπως αξιολογήθηκε με το εργαλείο rapid miner. Το σενάριο του δεύτερου μοντέλου αφορά εύρεση της βέλτιστης διαδρομής με τη χρήση μονοπατιού και τη δημιουργία μοντέλου που να προβλέπει την σωστή διαδρομή για την εύρεση του στόχου. Το μοντέλο έχει καλά ποσοστά ακρίβειας όπως αξιολογήθηκε με το εργαλείο rapid miner.

4.5 Υλοποίηση Reinforcement Learning για τη βέλτιστη διαδρομή UAV

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου RL χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον της python. Αρχικά το περιβάλλον στο οποίο υλοποιήθηκε η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής θα πρέπει να αποτελείται από δυνατές επιλογές καταστάσεων ή αλλιώς states. Για να αυξηθεί η δυσκολία του αλγορίθμου υλοποίησης και να δημιουργηθεί ένα προσαρμόσιμο και αξιόλογο μοντέλο, ουσιαστικά το περιβάλλον υλοποίησης περιλαμβάνει κάποια εμπόδια. Τα εμπόδια είναι states στα οποία το κινούμενο UAV δεν μπορεί να επιλέξει ή αλλιώς απαγορευμένες περιοχές και συμβολίζονται με «H». Επιπλέον υπάρχουν δύο ακόμα states που είναι η αρχή της διαδρομής, ονομάζεται «Start» και συμβολίζεται με «S» και ο τελικός στόχος που ονομάζεται «Goal» και συμβολίζεται με «G». Το κινούμενο UAV πρέπει να εκπαιδευτεί να αποφεύγει τα εμπόδια επιλέγοντας τη γρηγορότερη διαδρομή για αυτό. Τα δυνατά states τα οποία μπορεί να επιλέξει συμβολίζονται με «F». Για την επιλογή των states χρησιμοποιεί τα actions, δηλαδή τις δυνατές επιλογές που έχει για να επιλέξει το επόμενο state, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Ο πίνακας Q

Δημιουργήσαμε χάρτη 64 θέσεων όπου το UAV έχει 4 δυνατές επιλογές. Οι τέσσερις διαθέσιμες επιλογές που έχει στην κατοχή του το UAV έτσι ώστε να μεταβεί στο κατάλληλο state, είναι πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά. Ανάλογα την επιλογή που κάνει το UAV, επιβραβεύεται ή τιμωρείται και έτσι εκπαιδεύεται από τις επιλογές του. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε είναι ο Q-learning. Με την βοήθεια του Q-learning το κινούμενο UAV αρχικά κινείται στον χώρο τυχαία αφού δεν διαθέτει εμπειρία ακόμη έως ότου βρει τον στόχο «G» ή εξαντλήσει τον αριθμό βημάτων του (100) ή επιλέξει κάποιο state «H». Το Σχήμα 16, Σχήμα 17 και το Σχήμα 18 είναι ένα στιγμιότυπο από το τέταρτο επεισόδιο της εκπαίδευσης του μοντέλου, πάνω στον 8x8 πίνακα. Στο Σχήμα 16 φαίνεται με επισημασμένο κόκκινο χρώμα το State που έχει επιλέξει το UAV εκείνη τη στιγμή το οποίο έχει την επιλογή «F». Πάνω από τον 8x8 πίνακα αναγράφεται η κίνηση που έχει κάνει τη δεδομένη στιγμή το UAV που είναι «(Down)». Στο Σχήμα 17 φαίνεται με επισημασμένο κόκκινο χρώμα το State που έχει επιλέξει το UAV εκείνη τη στιγμή το οποίο έχει την επιλογή «H». Πάνω από τον 8x8 πίνακα αναγράφεται η κίνηση που έχει κάνει τη δεδομένη στιγμή το UAV που είναι «(Down)». Παρατηρείται πόσο μειώνεται η επιβράβευση του UAV όταν επιλέγει το state «H» στο Σχήμα 17, ουσιαστικά αφαιρούνται 10 μονάδες από τους συνολικούς του πόντους. Έτσι το UAV μαθαίνει από τις επιλογές του, μέσω των επιβραβεύσεων ή της τιμωρίας του. Πλέον στο επεισόδιο 2000, έχει μάθει από τις επιλογές του και βρίσκει το τελικό στόχο επιλέγοντας το State «G».

(Down)
SFFFFHFF
FFFFFFFFFF
HFFFFFFFFFF
FFFFFHFF
FFFFFFFFFF
FHFFFFHF
HFHFFFFFF
FFFHFFFG
reward is 1.0076928729870418

**Our UAV
starts it's
trajectory**

Σχήμα 16: Εύρεση του κατάλληλου μονοπατιού

```
(Down)
SFFFFHFF
FFFFFFFF
HFFFFFFFF
FFFFFHFF
FFFFFFFF
FHFFFFHF
HFHFFFFF
FFFHFFFG
reward is -10
steps done: 4
episode : 4
Total episode reward: -6.9769213810
```

**Our UAV
FAILED
to find
it's UEs!**

Σχήμα 17: Το UAV αποτυγχάνει να βρει τον στόχο κατά το 4^ο επεισόδιο

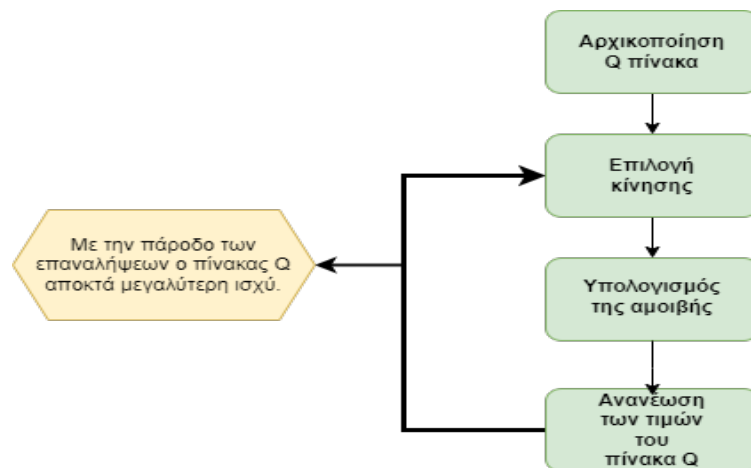
```
SFFFFHFF
FFFFFFFF
HFFFFFFFF
FFFFFHFF
FFFFFFFF
FHFFFFHF
HFHFFFFF
FFFHFFFG
```

**Our UAV
found
its Users**

Σχήμα 18: Το UAV βρίσκει τον στόχο του στο επεισόδιο 2000

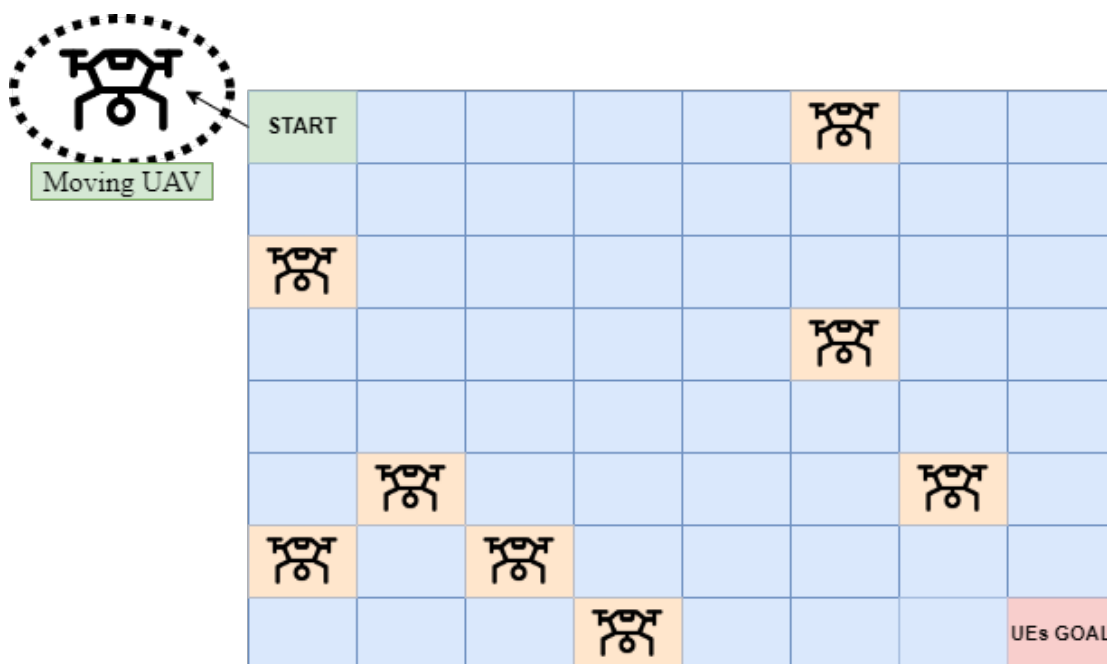
Βασικός κλάδος των μαθηματικών με εφαρμογές σε πληθώρα τομέων του Μαθηματικού κλάδου είναι ο δυναμικός προγραμματισμός. Η χρήση του γίνεται αντιληπτή και στο κλάδο της μηχανικής μάθησης και συγκεκριμένα στην υλοποίηση του Q-Learning αλγορίθμου. Ο Bellman με την εξίσωση που έχει αναπτύξει για τον υπολογισμό συναρτήσεων κέρδους ή αντίστοιχα κόστους αναδρομικά φαίνεται να έχει δώσει λύσεις σε προβλήματα μέσω μίας ακολουθίας από ενέργειες. Η διαδικασία κατά την οποία επιλέγει τις ενέργειες είναι ένας κανόνας βελτιστοποίησης.

Ο πίνακας Q είναι ένας lookup πίνακας στον οποίο υπολογίζουμε την μέγιστη αναμενόμενη μελλοντική αμοιβή (rewards) για κάθε επιλογή σε κάθε κατάσταση. Στον Q-Table πίνακα οι στήλες αφορούν τις επιλογές και οι σειρές τις καταστάσεις. Με την πάροδο των επεισοδίων ο πίνακας ανανεώνεται συνεχώς με νέα rewards και με αυτό τον τρόπο το UAV αποκτά εμπειρία στο περιβάλλον. Οι τιμές του πίνακα ανανεώνονται επαναληπτικά με την βοήθεια της εξίσωσης του Bellman. Έτσι παρατηρείται ότι προς το τέλος των επεισοδίων το UAV γνωρίζει το περιβάλλον (χρησιμοποιεί τον πίνακα Q) και φτάνει στον στόχο του.



Σχήμα 19: Δομή του Αλγορίθμου Q- Learning

Το βασικό σενάριο υλοποίησης είναι η εύρεση βέλτιστης διαδρομής για ένα κινούμενο UAV που έχει ως στόχο την κάλυψη των χρηστών κατά τη διάρκεια της πτήσης του που είναι τοποθετημένοι στο σημείο «G» του περιβάλλοντος που έχουμε ορίσει. Ως σημεία «H» θεωρούμε τοποθετημένα UAVs που εξυπηρετούν δικούς τους χρήστες.



Σχήμα 20: Το περιβάλλον εκμάθησης του Agent

Πιο συγκεκριμένα, τα σενάρια για την υλοποίηση του Q-learning αλγορίθμου είναι τα παρακάτω με την ύπαρξη επιπλέον προκλήσεων και την αντιμετώπιση αυτών :

Αρχικά τα εμπόδια δεν είναι απλά απαγορευμένες περιοχές όπως συνηθίζεται σε ένα απλό Q learning σενάριο, αλλά απαγορευμένες περιοχές με τηλεπικοινωνιακή υπόσταση καθώς περιλαμβάνουν UAVs τα οποία καλύπτουν δικούς τους χρήστες. Η ενσωμάτωση επιπλέον UAVs αυξάνει την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος αφού πλέον το κινούμενο UAV καλείται να αντιμετωπίσει και να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις του όπως είναι η επιλογή κατάλληλων states

ώστε να μην υπάρξει το ενδεχόμενο παρεμβολής αλλά και του σεναρίου της αντιμετώπισης παρεμβολών όταν πλησιάζει αρκετά κοντά σε γειτονικά UAVs.

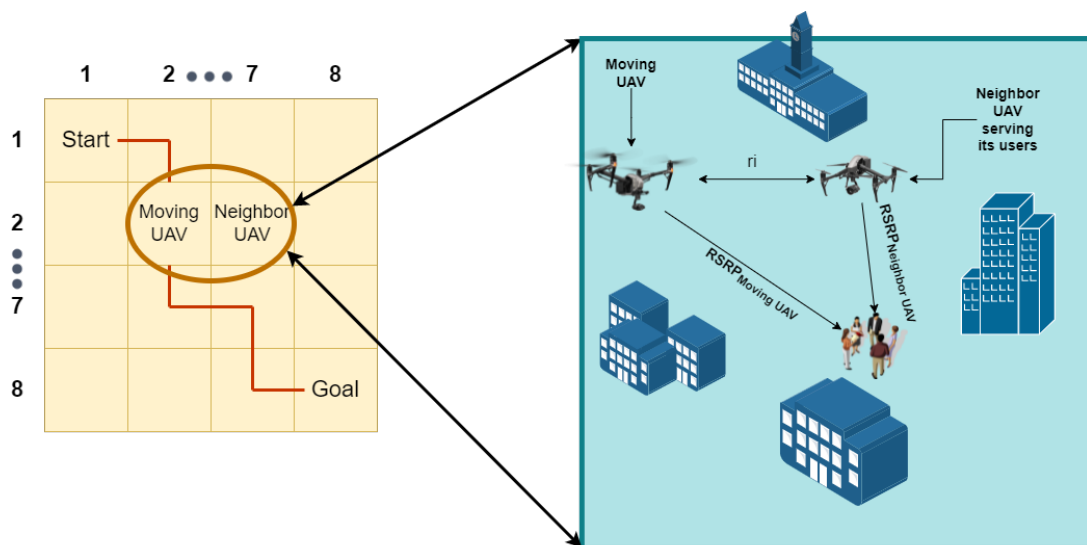
- 1) Εύρεση στόχου που εξαρτάται μόνο από την απόσταση και την αποφυγή εμποδίων χωρίς τηλεπικοινωνιακούς παράγοντες (ευκλείδεια απόσταση μεταξύ UAV και χρηστών). Σκοπός είναι η εύρεση του στόχου και η αποφυγή εμποδίων, άρα όσο UAV πλησιάζει στο στόχο επιβραβεύεται θετικά ενώ όταν απομακρύνεται τιμωρείται και το επεισόδιο τερματίζεται. Η επιλογή του κατάλληλου reward δηλαδή της κατάλληλης μαθηματικής σχέσης που θα οδηγήσει το UAV στο στόχο του έχει καθοριστικό ρόλο για την εύρεση του στόχου. Παρακάτω υπάρχουν τα reward εξαρτώμενα από την επιλογή που κάνει σε κάθε περίπτωση.

```
if tile_type == b'S':  
    reward=0  
elif tile_type == b'H':  
    reward=-10  
  
elif tile_type == b'G':  
    reward = 100
```

Σχήμα 21: Παραμετροποίηση του Q-Learning

- 2) Εύρεση στόχου που εξαρτάται από τηλεπικοινωνιακούς παράγοντες και πιο συγκεκριμένα το SINR των χρηστών που βρίσκονται στο στόχο με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας κάλυψης. Το UAV επιβραβεύεται όσο πλησιάζει το στόχο αλλά η επιλογή των κατάλληλων states εξαρτάται από εκείνα που το SINR των χρηστών είναι πιο ισχυρό. Αποφεύγει τα states που συνορεύουν από τα γειτονικά UAV, έτσι ώστε να αποφύγει τυχόν παρεμβολές.
- 3) Εύρεση στόχου που εξαρτάται από τηλεπικοινωνιακούς παράγοντες και πιο συγκεκριμένα από το Path Loss των χρηστών που βρίσκονται στο στόχο με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας κάλυψης. Το UAV επιβραβεύεται όσο πλησιάζει το στόχο αλλά η επιλογή των κατάλληλων states εξαρτάται από εκείνα που το Path Loss των χρηστών είναι πιο ασθενές. Αποφεύγει τα states που συνορεύουν από τα γειτονικά UAV, έτσι ώστε να αποφύγει τυχόν παρεμβολές.

- 4) Εύρεση στόχου που εξαρτάται από το Path Loss και την Ισχύ Εκπομπής του κινούμενου UAV με αποτέλεσμα οι επιλογές κατάλληλου state να είναι περισσότερες και έτσι να αυξάνεται η δυσκολία εύρεσης του στόχου. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, το κινούμενο UAV δεν αποφεύγει τα states που συνορεύουν από τα γειτονικά UAVs. Το κινούμενο UAV έχει τη δυνατότητα να επιλέξει state το οποίο συνορεύει με γειτονικό UAV το οποίο εξυπηρετεί δικούς του χρήστες. Η αντιμετώπιση παρεμβολής που υφίστανται οι γειτονικοί χρήστες από το κινούμενο UAV είναι μία πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Επιπλέον η αντιμετώπιση των επιπτώσεων των χρηστών που εξυπηρετούνται από το κινούμενο UAV μετά την αντιμετώπιση της παρεμβολής είναι επίσης μία πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί.



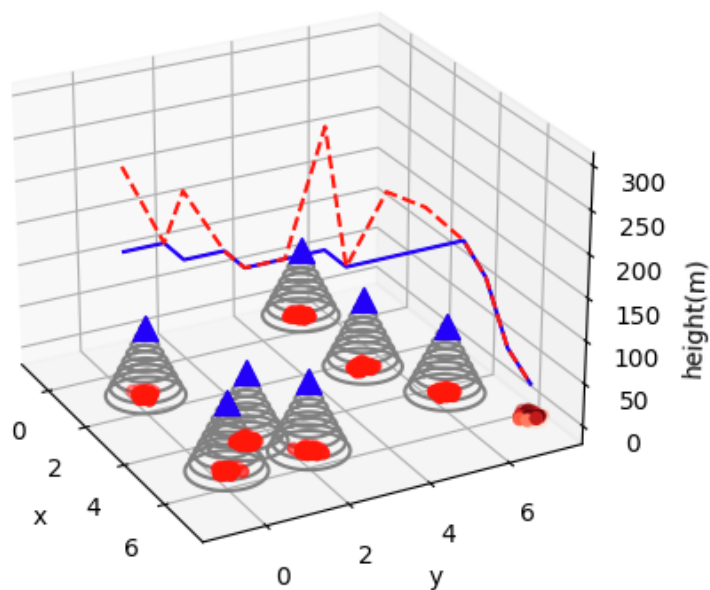
Σχήμα 22: Απεικόνιση Σεναρίου 4

Η αντιμετώπιση των παρεμβολών γίνεται με τη μείωση ισχύος εκπομπής του κινούμενου UAV όπου απαιτείται. Ο υπολογισμός του λόγου του RSRP των γειτονικών χρηστών από το κινούμενο UAV προς το RSRP των γειτονικών χρηστών από UAV που εξυπηρετούνται εξυπηρετεί το παραπάνω ζήτημα. Η συσχέτιση μεταξύ του λόγου των RSRP και των dbm μείωσης ισχύος δίνεται από το παρακάτω πίνακα. Το RSRP είναι ο γραμμικός μέσος όρος του λαμβανόμενου επιπέδου σήματος αναφοράς. Αυτά τα σήματα αναφοράς, τα οποία είναι συγκεκριμένα για κάθε κυψέλη, μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τα στοιχεία πηγής. Σε κυψελωτά δίκτυα, όταν μια κινητή συσκευή μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη και εκτελεί επιλογή/επαναεπιλογή και παράδοση κυψέλης, πρέπει να μετρήσει την ισχύ/ποιότητα του σήματος των γειτονικών κυψελών.

Πίνακας 8: Πίνακας Συσχέτισης του RSRP ratio με την αντίστοιχη μείωση ισχύος εκπομπής [69]

$\Delta\text{RSRP (dBm)}$	Additional Power Adjustment (β) (dBm)
0	-6
1	-5
2	-4
3	-3
4	-2
5	-1
>5	0

Με τη μείωση της ισχύος εκπομπής για την αντιμετώπιση της παρεμβολής, το SINR των χρηστών που εξυπηρετεί το κινούμενου UAV υποβαθμίστηκε. Δεύτερη πρόκληση που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι η επαναφορά του SINR στα επίπεδα που βρίσκονταν πριν τη μείωση της ισχύος. Σκοπός είναι η αύξηση του ύψους του κινούμενου UAV, έτσι ώστε να επαναφέρουμε το SINR των χρηστών του στόχου στα ίδια επίπεδα.

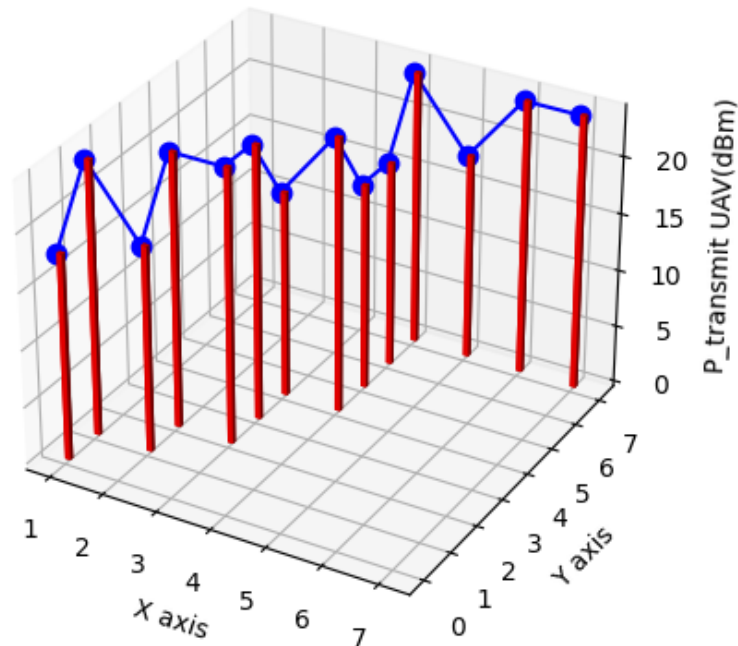


Σχήμα 23: Σχεδίαση τροχιών UAV σε 3D

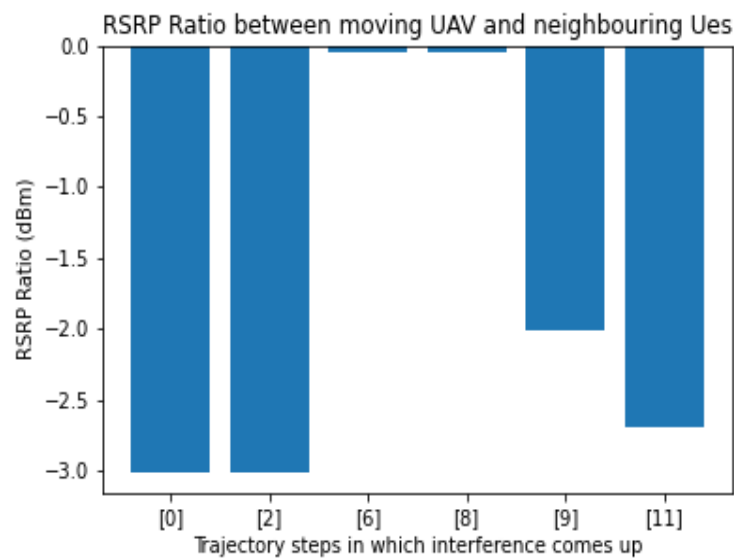
Οι κώνοι έχουν στις κορυφές τα γειτονικά UAVs ενώ στη βάση με κόκκινο χρώμα είναι οι χρήστες που εξυπηρετούν. Οι δύο τροχιές του κινούμενου UAV είναι με μπλε και κόκκινο χρώμα. Στο Σχήμα 23 με μπλε τροχιά απεικονίζεται η τροχιά του UAV με το βέλτιστο ύψος για μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Ενώ με την κόκκινη η τροχιά του UAV με το βέλτιστο ύψος για μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, δεδομένου ότι έχει γίνει μείωση της ισχύος εκπομπής και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του ύψους του κινούμενου UAV.

Στο Σχήμα 24 αποτυπώνεται η μείωση της ισχύος εκπομπής σε συγκεκριμένα state, όπου σε γειτονικές περιοχές υπάρχουν σταθερά UAVs που εξυπηρετούν δικούς τους χρήστες.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 25 εμφανίζονται οι τιμές του RSRP ratio για τα συγκεκριμένα state.



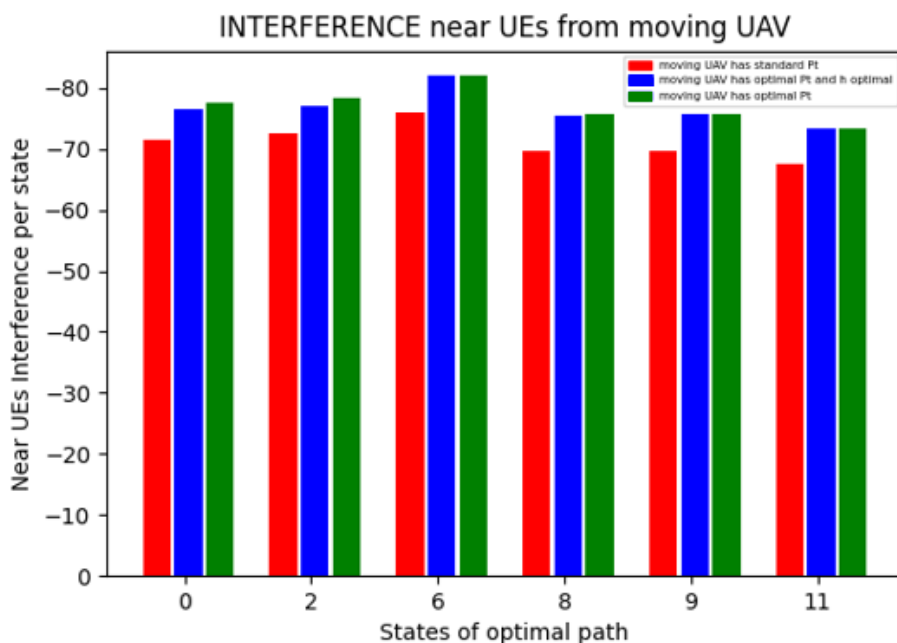
Σχήμα 24: 3D απεικόνιση της ισχύος εκπομπής του βέλτιστου μονοπατιού μετά την βελτιστοποίηση για την αντιμετώπιση παρεμβολών



Σχήμα 25: Απεικόνιση του RSRP ratio για τα states που αντιμετωπίζουν παρεμβολή

Η μείωση της παρεμβολής για τα συγκεκριμένα state παρουσιάζεται στο παρακάτω ραβδόγραμμα. Οι τρεις διαφορετικές μπάρες οι οποίες απεικονίζονται με τρία διαφορετικά χρώματα είναι εξίσου σημαντικές για τις διαφορετικές παραμέτρους που υπάρχουν στο σενάριο καλύπτοντας έτσι τις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις του σεναρίου. Η κόκκινη ράβδος δείχνει την παρεμβολή που υφίστανται τα γειτονικά UEs από το κινούμενο UAV δεδομένου ότι η ισχύ εκπομπής είναι συγκεκριμένη στα 24 dBm. Η μπλε ράβδος δείχνει την παρεμβολή που υφίστανται τα γειτονικά UEs από το κινούμενο UAV δεδομένου ότι η ισχύ εκπομπής έχει μειωθεί και το ύψος του κινούμενου UAV έχει βελτιστοποιηθεί για την κάλυψη των τηλεπικοινωνιακών απαιτήσεων, δηλαδή η προσαρμογή του ύψους του κινούμενου UAV ώστε να υπάρξει μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη των χρηστών του στόχου. Η πράσινη ράβδος δείχνει την παρεμβολή που υφίστανται τα γειτονικά UEs από το κινούμενο UAV δεδομένου ότι η ισχύ εκπομπής έχει μειωθεί.

Παρατηρείται στο Σχήμα 26 ότι η παρεμβολή μειώνεται αρκετά κατά την μείωση ισχύος, η αύξηση του ύψους είτε ενισχύει τη μείωση είτε την διατηρεί σταθερή. Η βελτίωση αυτή οδηγεί στην αντιμετώπιση επιπτώσεων λόγω παρεμβολής.



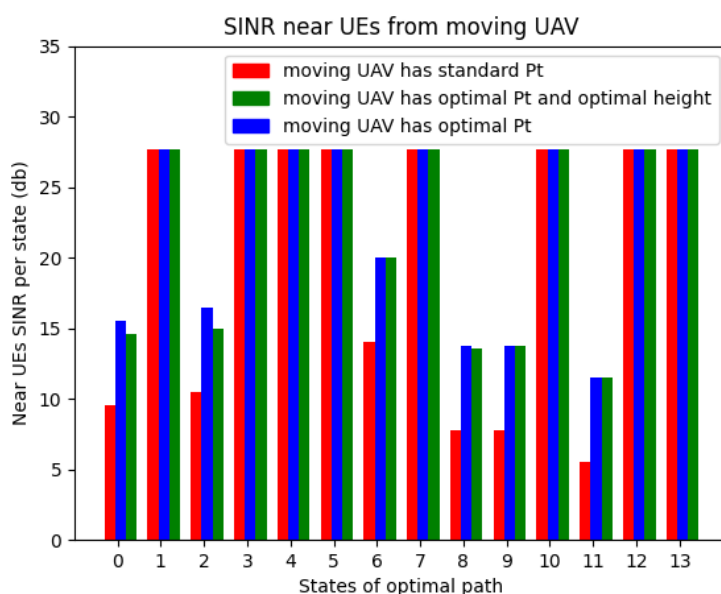
Σχήμα 26: Απεικόνιση παρεμβολής γειτονικών UEs με διαφορετικές βελτιστοποιήσεις

Το SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) μετρά την ποιότητα του σήματος δηλαδή την ισχύ του επιθυμητού σήματος σε σύγκριση με τις ανεπιθύμητες παρεμβολές και το θόρυβο. Οι πάροχοι δικτύων κινητής τηλεφωνίας επιδιώκουν να μεγιστοποιήσουν το SINR σε όλες τις τοποθεσίες για να προσφέρουν την καλύτερη δυνατή εμπειρία πελατών, είτε μεταδίδοντας σε υψηλότερη ισχύ είτε ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές και τον θόρυβο. Στη θεωρία των επικοινωνιών, το όριο του Shannon είναι το θεωρητικό μέγιστο εύρος ζώνης ενός καναλιού και είναι συνάρτηση του SINR.

Η μελέτη του επιπέδου του SINR των γειτονικών χρηστών παρουσιάζεται στο παρακάτω ραβδόγραμμα. Οι τρεις διαφορετικές μπάρες οι οποίες απεικονίζονται με τρία διαφορετικά

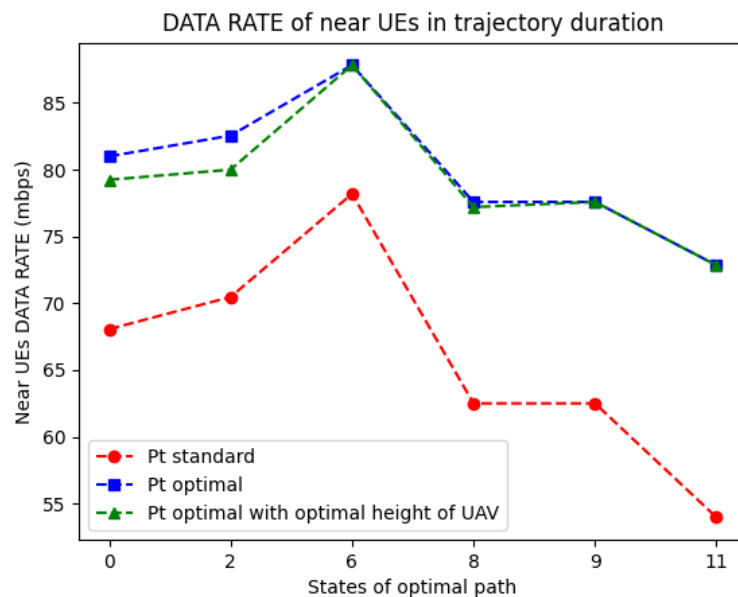
χρώματα είναι εξίσου σημαντικές για τις διαφορετικές παραμέτρους που υπάρχουν στο σενάριο καλύπτοντας έτσι τις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις του σεναρίου. Η κόκκινη ράβδος παρουσιάζει τις τιμές του SINR των γειτονικών χρηστών από το UAV που εξυπηρετούνται δεδομένου ισχύ εκπομπής είναι συγκεκριμένη στα 24 dBm. Η μπλε ράβδος παρουσιάζει τις τιμές του SINR των γειτονικών χρηστών από το UAV που εξυπηρετούνται δεδομένου δεδομένου ότι η ισχύ εκπομπής έχει μειωθεί. Η πράσινη ράβδος παρουσιάζει τις τιμές του SINR των γειτονικών χρηστών από το UAV που εξυπηρετούνται δεδομένου ότι η ισχύ εκπομπής έχει μειωθεί και το ύψος του κινούμενου UAV έχει βελτιστοποιηθεί για την κάλυψη των τηλεπικοινωνιακών απαιτήσεων, δηλαδή η προσαρμογή του ύψους του κινούμενου UAV ώστε να υπάρξει μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη των χρηστών του στόχου.

Στο Σχήμα 27 αυξάνεται το SINR των χρηστών του στόχου κατά τη μείωση της ισχύος εκπομπής του κινούμενου UAV. Η βελτιστοποίηση του ύψους του μειώνει ελάχιστα το SINR των γειτονικών χρηστών ή το διατηρεί σταθερό, αυτό όμως δεν επηρεάζει την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη των χρηστών.

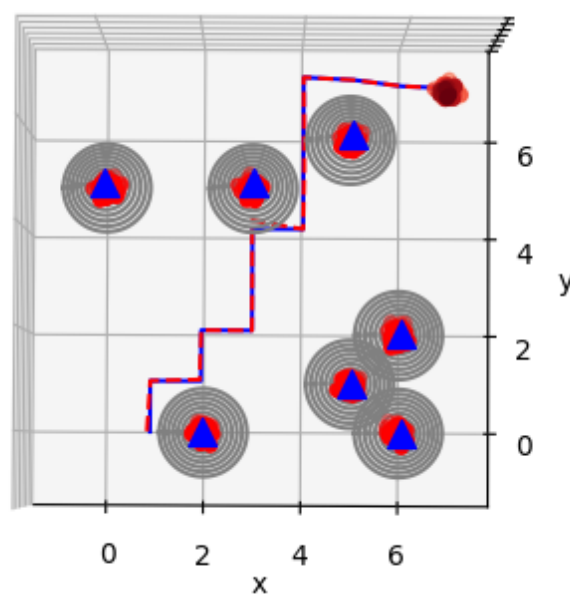


Σχήμα 27: Απεικόνιση επιπέδου SINR γειτονικών UEs για όλα τα states της τροχιάς

Μία σημαντική τηλεπικοινωνιακή παράμετρος που αξίζει να μελετηθεί είναι ο ρυθμός των δεδομένων. Συγκεκριμένα ο ρυθμός δεδομένων (data rate) αφορά την ταχύτητα μετάδοσης ή τον αριθμό των bit ανά δευτερόλεπτο που μεταφέρονται σε ένα δίκτυο. Υπάρχει μια ταχέως αυξανόμενη ανάγκη για αυξημένες ταχύτητες δεδομένων και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών στην απόδοση των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Έχουν γίνει συνεχείς προσπάθειες από τους μηχανικούς επικοινωνίας για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δεδομένων. Είναι η μέγιστη ικανότητα του καναλιού να μεταδίδει bits σε ένα δευτερόλεπτο.

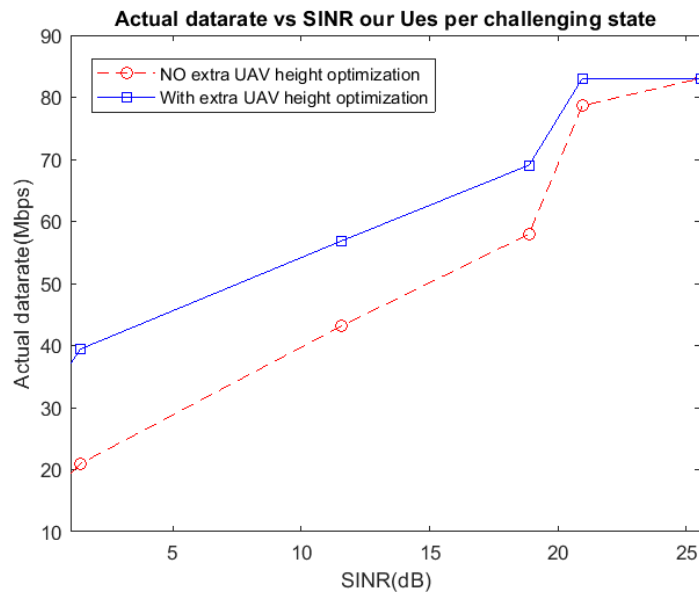


Σχήμα 28: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων γειτονικών UEs για τα states που αντιμετωπίζεται παρεμβολή



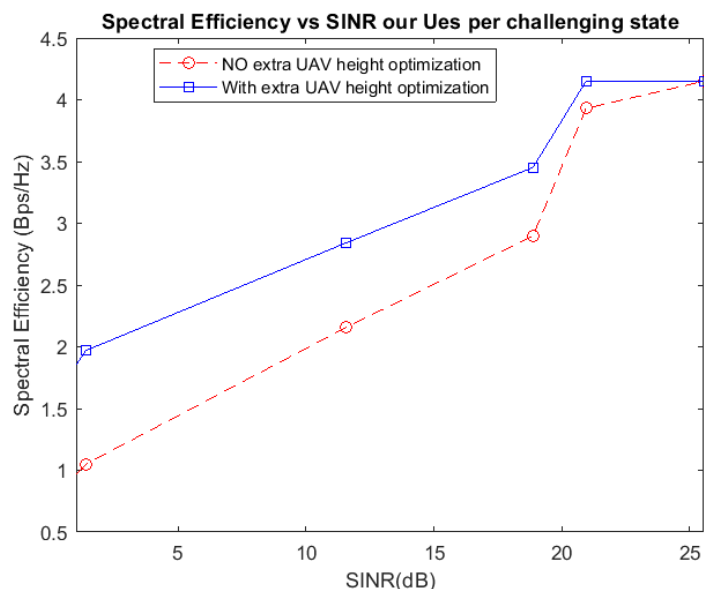
Σχήμα 29: Απεικόνιση τροχιάς και γειτονικών UAVs

Το Σχήμα 28 παρουσιάζει την αύξηση του ρυθμού δεδομένων των γειτονικών UEs σε συγκεκριμένα state. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 29 τα συγκεκριμένα states συνορεύουν με γειτονικά UAVs που εξυπηρετούν δικούς τους χρήστες. Για παράδειγμα το state 2 συνορεύει με την ομάδα του UAV στη θέση (x,y) που είναι αντίστοιχα η (2,0) ενώ το state 6 συνορεύει με την ομάδα του UAV στη θέση (3,5). Όσον αφορά το ρυθμό δεδομένων των γειτονικών χρηστών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 28 παρατηρούμε πόσο αυξάνεται για κάθε state μετά την μείωση της ισχύος εκπομπής.



Σχήμα 30: Πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρηστών κινούμενου UAV με επιπλέον βελτιστοποίηση του ύψους

Το Σχήμα 30 παρουσιάζει το actual data rate συναρτήσει του SINR των χρηστών που εξυπηρετούνται από το κινούμενο UAV. Παρατηρούμε πόσο αυξάνεται το data rate όταν βελτιστοποιούμε το ύψος του κινούμενου UAV, συγκριτικά με το να μην προχωρήσουμε σε επιπλέον βελτιστοποίηση.

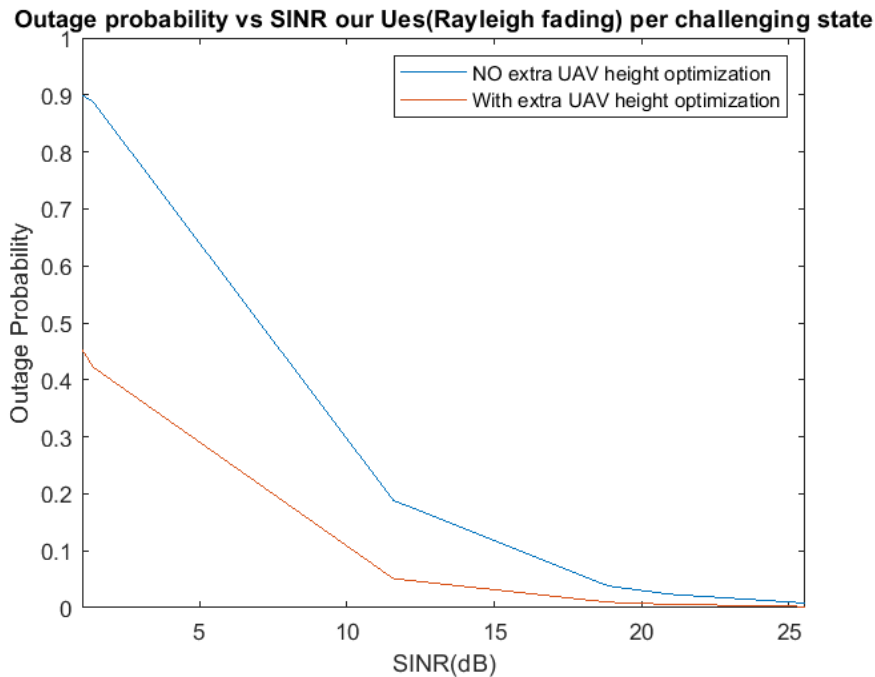


Σχήμα 31: Φασματική απόδοση χρηστών κινούμενου UAV με επιπλέον βελτιστοποίηση του ύψους

Η φασματική απόδοση περιγράφει την ποσότητα των δεδομένων που μεταδίδονται σε ένα δεδομένο φάσμα ή εύρος ζώνης με ελάχιστα σφάλματα μετάδοσης. Γνωστή και ως φασματική απόδοση ή απόδοση εύρους ζώνης, η φασματική απόδοση ενός κυψελωτού δικτύου ισοδυναμεί με τον μέγιστο αριθμό δυαδικών ψηφίων δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν σε έναν

καθορισμένο αριθμό χρηστών ανά δευτερόλεπτο, διατηρώντας παράλληλα μια αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας.

Στο Σχήμα 31 απεικονίζεται το spectral efficiency συναρτήσει του SINR των χρηστών που εξυπηρετούνται από το κινούμενο UAV. Παρατηρούμε πόσο αυξάνεται το spectral efficiency όταν βελτιστοποιούμε το ύψος του κινούμενου UAV, συγκριτικά με το να μην προχωρήσουμε σε επιπλέον βελτιστοποίηση.



Σχήμα 32: Outage Probability σε σχέση με το SINR των UEs του κινούμενου UAV με την εφαρμογή των 2 βελτιστοποιήσεων

Η πιθανότητα διακοπής (Outage Probability) λόγω σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR), δηλαδή η πιθανότητα το SINR που πέφτει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, είναι μία από τις κύριες μετρήσεις απόδοσης για την ανάλυση ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας. Η απλότητα του ορισμού του καθώς και του σύνδεση με άλλες παραμέτρους απόδοσης, όπως ο ρυθμός σφάλματος bit/συμβόλου και η εργοδοτική χωρητικότητα, καθιστούν σημαντικό ενδιαφέρον για τους ερευνητές [78].

Στο Σχήμα 32 παρατηρούμε πόσο μειώνεται το outage probability για το SINR όταν επιλέγουμε βελτιστοποίηση του ύψους του UAV.

Το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh χρησιμοποιεί μια στατιστική προσέγγιση για την ανάλυση της διάδοσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα περιβάλλοντα. Το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh είναι ιδανικό για καταστάσεις όπου υπάρχει μεγάλος αριθμός σημάτων και ανακλάσεων. Τυπικά σενάρια περιλαμβάνουν κυψελωτές τηλεπικοινωνίες όπου υπάρχει μεγάλος αριθμός αντανακλάσεων από κτίρια.

Το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε σενάρια όπου το σήμα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι διασκορπισμένο μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Σε αυτή τη μορφή σεναρίου δεν υπάρχει καμία ενιαία διαδρομή σήματος που κυριαρχεί και απαιτείται μια στατιστική προσέγγιση για την ανάλυση της συνολικής φύσης του καναλιού ραδιοεπικοινωνιών.

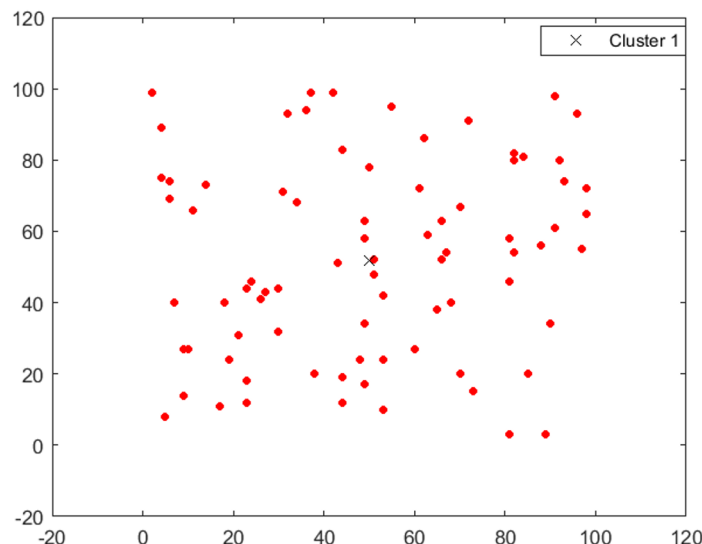
Το Rayleigh Fading είναι ένα μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη μορφή εξασθένισης που συμβαίνει όταν υπάρχει διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Σε οποιοδήποτε

επίγειο περιβάλλον, ένα σήμα θα ταξιδέψει μέσω μιας σειράς διαφορετικών διαδρομών από τον πομπό στον δέκτη. Ωστόσο, θα υπάρχουν πάρα πολλά αντικείμενα γύρω από την απευθείας διαδρομή. Αυτά τα αντικείμενα μπορεί να χρησιμεύουν για την ανάκλαση, τη διάθλαση κ.λπ. του σήματος. Ως αποτέλεσμα αυτού, υπάρχουν πολλές άλλες διαδρομές μέσω των οποίων το σήμα μπορεί να φτάσει στον δέκτη.

Το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της διάδοσης του σήματος σε στατιστική βάση. Λειτουργεί καλύτερα σε συνθήκες όπου δεν υπάρχει κυρίαρχο σήμα (π.χ. σήμα άμεσης οπτικής επαφής) και σε πολλές περιπτώσεις τα κινητά τηλέφωνα που χρησιμοποιούνται σε πυκνό αστικό περιβάλλον εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία.

4.6 Βέλτιστη Τοποθέτηση UAVs

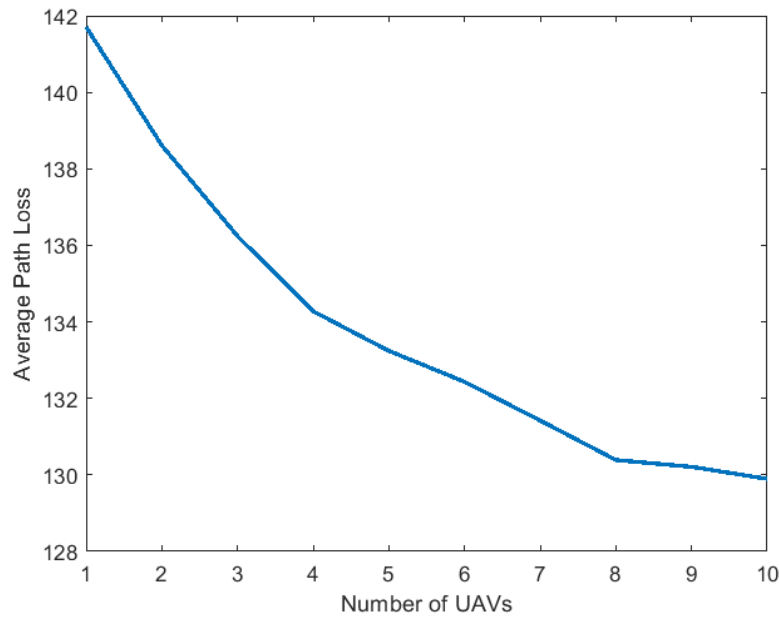
Το συγκεκριμένο σενάριο αφορά ένα σύνολο χρηστών και την τοποθέτηση UAVs για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψή τους. Το σύνολο των χρηστών είναι τυχαία τοποθετημένο σε μία περιοχή 100 x 100 (Σχήμα 33).



Σχήμα 33: Τυχαία τοποθέτηση χρηστών

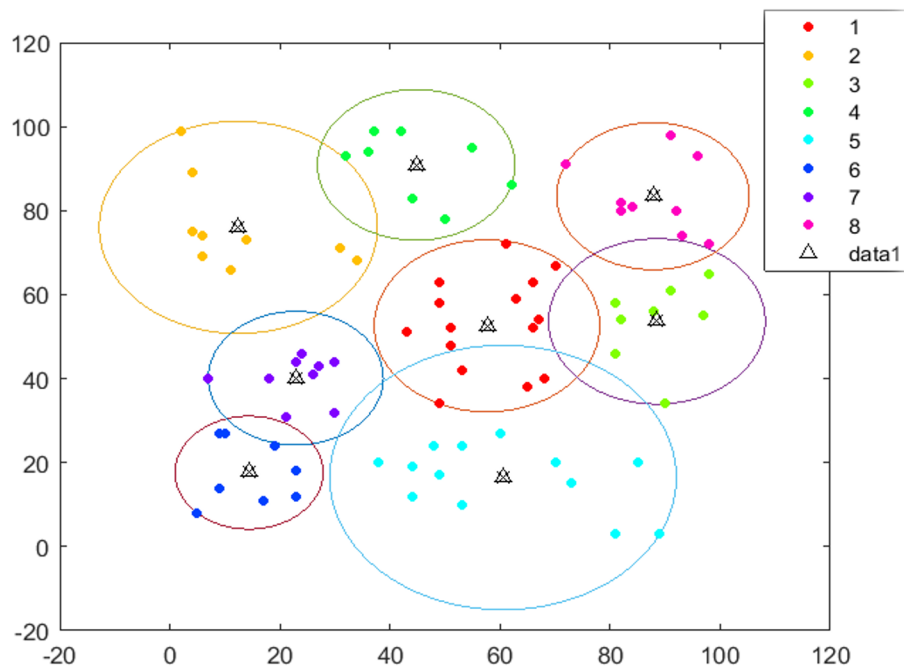
Χρησιμοποιούμε Unsupervised τεχνική για την ομαδοποίηση των χρηστών. Τοποθετούμε τα UAVs στις αντίστοιχες ομάδες στο 3D χώρο. Γίνεται μελέτη για το αν υπάρχει παρεμβολή μεταξύ γειτονικών UAVs. Σε περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής χρησιμοποιούμε την μέθοδο μείωσης ισχύος που έχουμε ήδη αναφέρει. Τέλος, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα με την απεικόνιση διαγραμμάτων.

Γίνεται τυχαία τοποθέτηση των χρηστών στο επίπεδο. Στη συνέχεια ομαδοποιούμε τους χρήστες με σκοπό τη τοποθέτηση των UAVs για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη των χρηστών με χρήση του αλγορίθμου K-Means. Με την χρήση του αλγορίθμου, έχουμε ως αποτέλεσμα τις τελικές ομάδες των χρηστών καθώς και τις ακριβείς συντεταγμένες των UAVs στον 3-διάστατο χώρο.



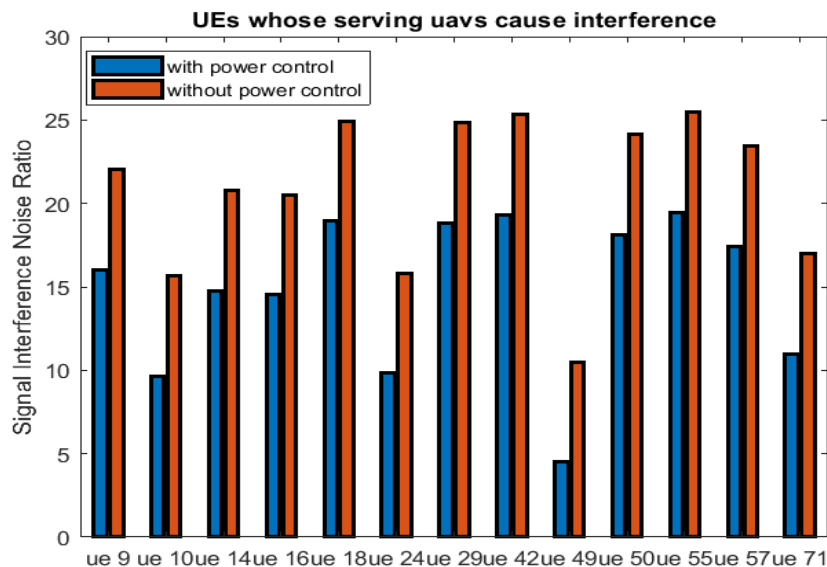
Σχήμα 34: Μέσο Pathloss χρηστών συναρτήσει του πλήθους των UAVs

Στο Σχήμα 34 απεικονίζεται το μέσο path loss των χρηστών ανάλογα με το πλήθος των UAVs που έχουν τοποθετηθεί. Παρατηρούμε ότι μετά τα 8 UAVs, το path loss δεν έχει μεγάλες αυξομειώσεις. Άρα είναι ένα καλό πλήθος δεδομένου των χρηστών που πρέπει να καλύπτουν.

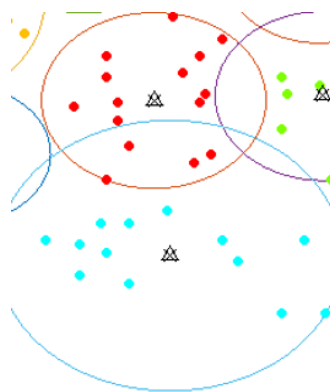


Σχήμα 35: Ομαδοποίηση χρηστών και τοποθέτηση UAVs με εφαρμογή K-means

Στο Σχήμα 35 απεικονίζεται η ομαδοποίηση των χρηστών και η κάλυψή τους από 8 UAVs. Με την ομαδοποίηση χρηστών και την τοποθέτηση UAVs, παρατηρείται ύπαρξη παρεμβολής σε γειτονικούς χρήστες. Με τη χρήση του πίνακα μείωσης ισχύος εκπομπής για την αντιμετώπιση της παρεμβολής επιτυγχάνουμε την αύξηση του SINR στους χρήστες που βιώνουν παρεμβολή, καθώς τη μείωση της παρεμβολής και την αύξηση του bit rate των χρηστών που παρεμβάλλονται.

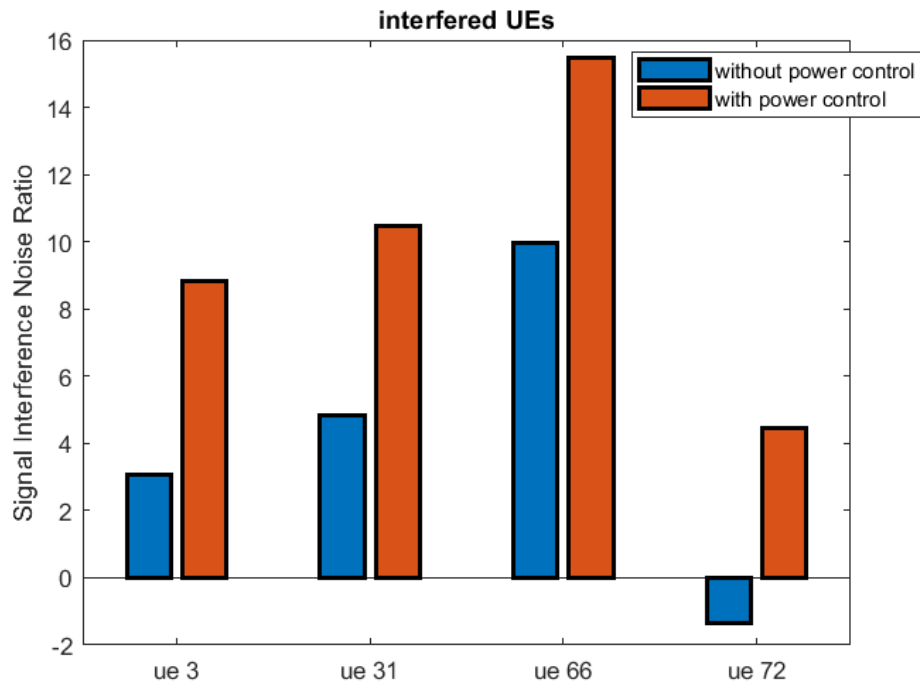


Σχήμα 36: SINR χρηστών που εξυπηρετούνται από το UAV 5 (ομάδα γαλάζια)



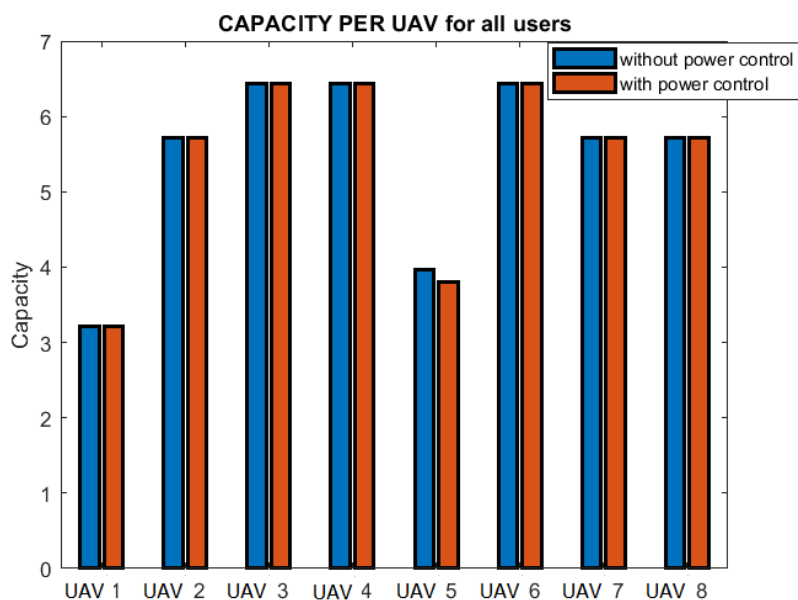
Σχήμα 37: Απεικόνιση κάλυψης των UAV ομάδας 1 (κόκκινη) και 5 (γαλάζια)

Στο Σχήμα 37 παρατηρούμε τη γαλάζια ομάδα που καλύπτεται από το UAV 5. Το UAV 5 παρεμβάλλει σε χρήστες της κόκκινης ομάδας. Στο Σχήμα 36 παρουσιάζεται το SINR των χρηστών που καλύπτεται από το UAV 5. Παρατηρείται μείωση του SINR με τη μείωση της ισχύος εκπομπής.



Σχήμα 38: SINR χρηστών που παρεμβάλλονται από το UAV 5

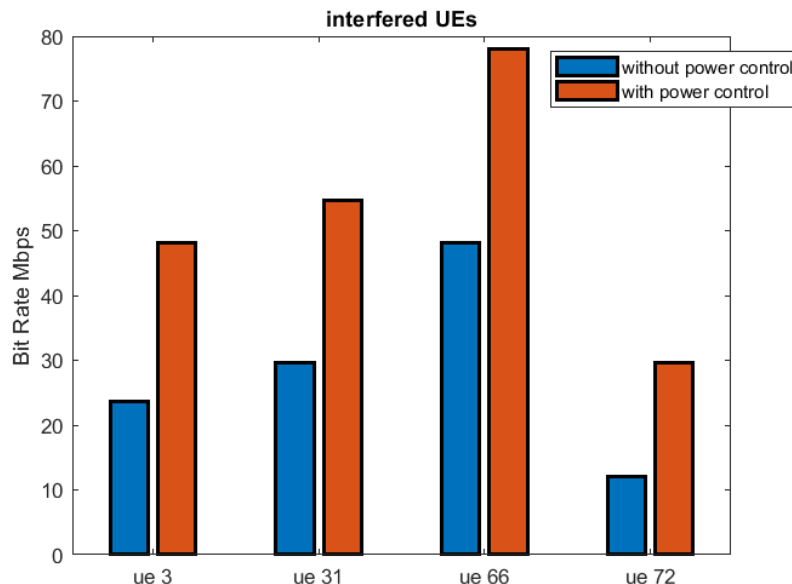
Στο Σχήμα 38 απεικονίζεται το SINR των χρηστών που παρεμβάλλονται από το SINR 5. Με την μείωση της ισχύος εκπομπής παρατηρείται μεγάλη αύξηση του SINR των γειτονικών-παρεμβαλλόμενων χρηστών.



Σχήμα 39: Χωρητικότητα καναλιού για κάθε UAV

Στο Σχήμα 39 απεικονίζεται η χωρητικότητα του καναλιού για κάθε UAV. Η χωρητικότητα του καναλιού είναι επίσης μια ντετερμινιστική τιμή το οποίο δίνει ένα ανώτερο όριο στο ποσοστό

πληροφόρησης για αξιόπιστη επικοινωνία, όπως αναφέρει το Θεώρημα Shannon. Με άλλα λόγια, η χωρητικότητα είναι η μέγιστη δυνατή αμοιβαία πληροφόρηση μεταξύ της εισόδου-εξόδου του καναλιού. Παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα διατηρείται σχεδόν στα ίδια επίπεδα ανεξαρτήτως αλλαγών ισχύος εκπομπής.

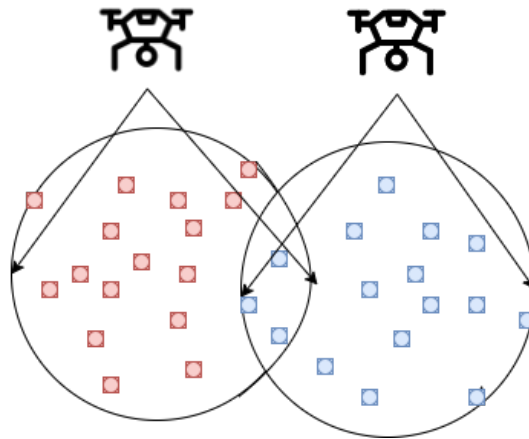


Σχήμα 40: Bit Rate χρηστών που παρεμβάλλονται από το UAV 5

Ο ρυθμός μετάδοσης bit (Bit Rate) είναι ένας ρυθμός μεταφοράς δεδομένων. Επίσης, αυτός ο όρος χρησιμοποιείται για να υποδείξει τη χωρητικότητα του καναλιού, δηλαδή τη μέγιστη ποσότητα πληροφοριών που μπορεί να μεταδοθεί σε ένα δεδομένο κανάλι χωρίς καθυστέρηση. Στο Σχήμα 40 παρατηρείται μεγάλη αύξηση του bit rate των γειτονικών-παρεμβαλλόμενων χρηστών μετά την μείωση της ισχύος εκπομπής του UAV που παρεμβάλλει.

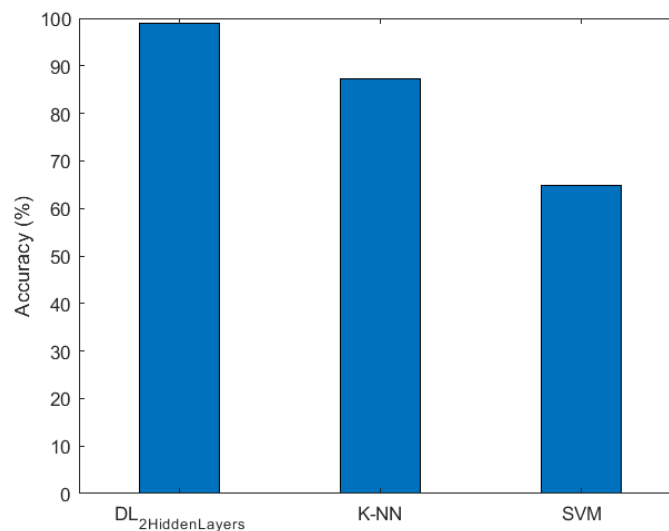
4.7 Αποτελέσματα Σεναρίου αντιμετώπισης παρεμβολών από γειτονικό UAV

Η υλοποίηση σεναρίου είχε ως στόχο την πρόβλεψη ισχύος εκπομπής του UAV για αντιμετώπιση παρεμβολών από γειτονικά UAVs που εξυπηρετούν δικούς τους χρήστες (Σχήμα 41). Δημιουργήσαμε dataset από κώδικα στο MATLAB και έχουμε εξάγει περίπου 7000 δείγματα.



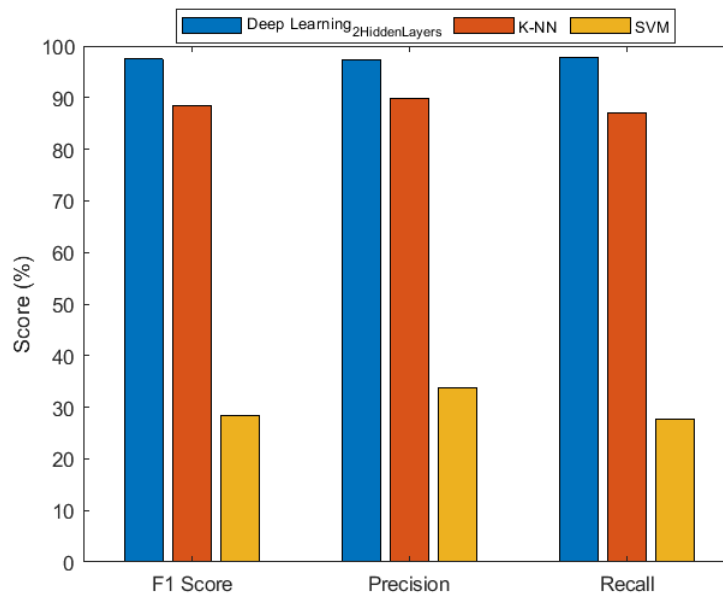
Σχήμα 41: Σενάριο αντιμετώπισης παρεμβολών από γειτονικό UAV

Το κάθε δείγμα αποτελείται από την απόσταση μεταξύ UE που παρεμβάλλεται και UAV που παρεμβάλλει, το RSRP του UE από το UAV που εξυπηρετείται, το RSRP του UE από το UAV που παρεμβάλλει και το RSRP ratio που είναι η διαφορά μεταξύ του RSRP του UE από το UAV που εξυπηρετείται και του UAV που παρεμβάλλει αντίστοιχα. Σκοπός είναι η πρόβλεψη του ακριβή αριθμού dBm μείωσης της ισχύος εκπομπής που απαιτείται.



Σχήμα 42: Αξιολόγηση ακρίβειας μοντέλου πρόβλεψης ισχύος εκπομπής για διαφορετικούς αλγορίθμους

Υψηλά ποσοστά ακρίβειας απεικονίζονται στο Σχήμα 42. Την πρώτη θέση έχει ο deep learning με δύο κρυφά επίπεδα τα οποία δίνουν υψηλά ποσοστά ακρίβειας της τάξεως 98%. Την δεύτερη θέση καταλαμβάνει ο K-NN με εξίσου καλά ποσοστά της τάξεως 87%. Τέλος στην Τρίτη θέση ο SVM έχει τα χαμηλότερα ποσοστά περίπου στο 62%. Η ακρίβεια δείχνει πόσο συχνά μπορούμε να περιμένουμε ότι το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης θα προβλέψει σωστά ένα αποτέλεσμα από τον συνολικό αριθμό των φορών που έκανε προβλέψεις. Το ποσοστό ακρίβειας είναι εξαιρετικό, αλλά δεν μπορούμε να αποφανθούμε για τα σφάλματα που κάνουν τα μοντέλα μηχανικής μάθησης σε νέα δεδομένα που δεν έχουμε ξαναδεί.



Σχήμα 43: Αξιολόγηση μοντέλου με την χρήση μετρικών *F1Score*, *Precision* και *Recall*

Σημαντικές μετρικές για την αξιολόγηση του μοντέλου είναι το Precision, Recall και F1-score. Η μετρική recall είναι το ποσοστό των θετικών κριτικών που το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης προέβλεψε σωστά ως θετικές, αξιολογεί πόσο καλό είναι το μοντέλο μηχανικής μάθησης που διαθέτουμε στον εντοπισμό όλων των πραγματικών θετικών από όλα τα θετικά που υπάρχουν σε ένα σύνολο δεδομένων. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό recall, τόσο καλύτερα το μοντέλο μηχανικής μάθησης εντοπίζει τα θετικά και τα αρνητικά παραδείγματα. Υψηλά ποσοστά απεικονίζονται στο Σχήμα 43 για τη μετρική recall. Ο deep learning και ο KNN έχουν τα πιο ισχυρά ποσοστά ενώ ο SVM έχει αρκετά χαμηλά.

Σχετικά με το precision, η οποία είναι εξίσου σημαντική μετρική καθώς μας δείχνει αν υπάρχει σφάλμα στο μοντέλο μας. Εδώ τα υψηλά ποσοστά precision στους αλγόριθμους deep learning και K-NN μας δείχνει ότι το μοντέλο μας προβλέπει σωστά περίπου στο 98% και 87-88% για κάθε αλγόριθμο αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος SVM δεν έχει τόσο καλά αποτελέσματα.

Η μετρική F1-score μετράει την απόδοση μοντέλου μηχανικής μάθησης και δίνει ίση βαρύτητα τόσο στο precision όσο και στο recall για τη μέτρηση της απόδοσής της. Υψηλά ποσοστά παρατηρούνται τόσο στο deep learning όσο και στον KNN.

4.8 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης διαδρομής με τη χρήση

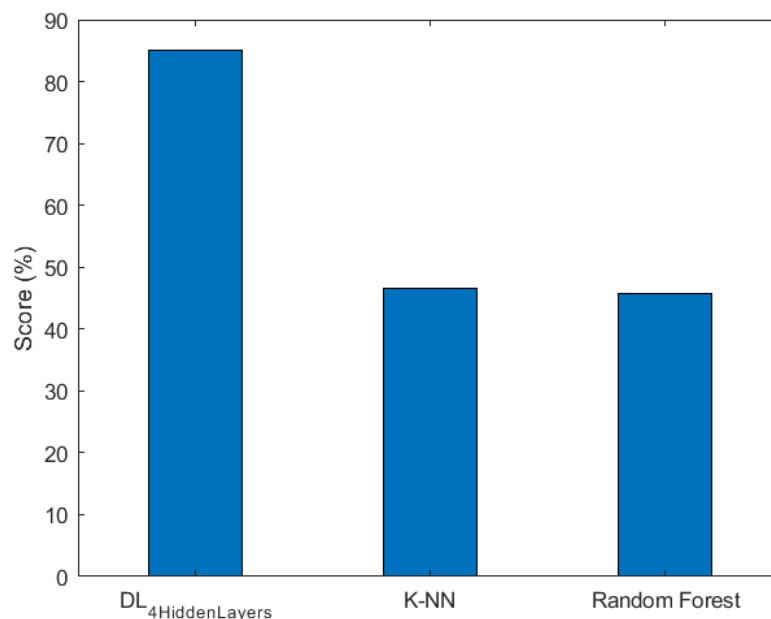
Supervised Learning

Η υλοποίηση σεναρίου εύρεση βέλτιστης τροχιάς με χρήση τεχνικών supervised learning υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά υλοποιήθηκε κώδικας στο περιβάλλον MATLAB για εύρεση βέλτιστης διαδρομής δημιουργώντας ομάδες από μονοπάτια οι οποίες αποτελούνταν από ψηφία. Σκοπός ήταν η πρόβλεψη trajectory χωρίς τη χρήση Reinforcement Learning αλλά με τη χρήση συνόλου δεδομένων για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Η πρόβλεψη της βέλτιστης διαδρομής όπως είναι κατανοητό αποτελείται από ένα πλήθος βημάτων. Άρα καλούμαστε να προβλέψουμε όχι μία τιμή όπως συνηθίζεται σε

προβλήματα classification αλλά ένα σύνολο από βήματα (σύνολο από τιμές). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, ανάγουμε την πρόβλεψη μίας τιμής που υφίσταται σε περιπτώσεις classification, στη πρόβλεψη ενός string. Το string αποτελείται από εκείνα τα path που ορίζουν τη βέλτιστη διαδρομή.

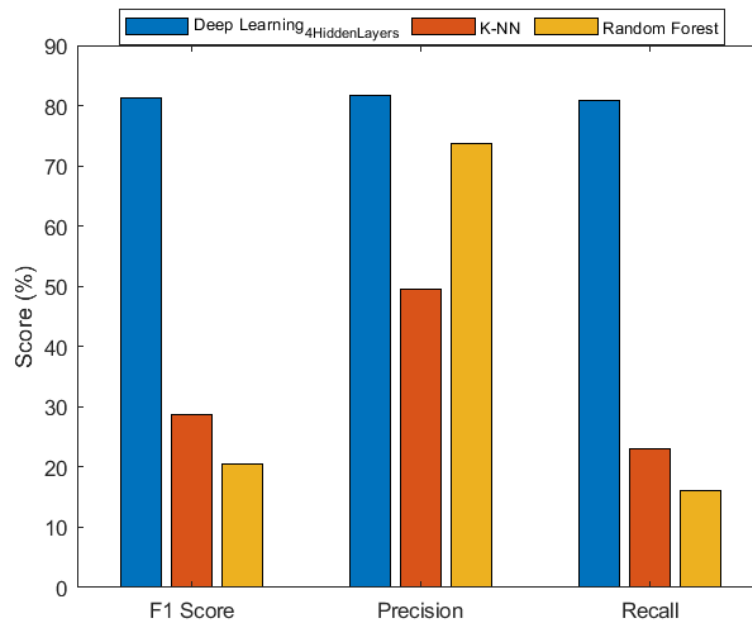
Για να επιτευχθεί αυτό, σκοπεύουμε στη δημιουργία string χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό από «0» (κάτω), «1»(δεξιά), «2» (αριστερά) και «3» (πάνω) δημιουργώντας έτσι το βέλτιστο μονοπάτι, όπου το κάθε ένα αντίστοιχα υποδηλώνει συγκεκριμένη κίνηση. Το πλήθος των ψηφίων υποδηλώνει τον ακριβή αριθμό των βημάτων για την εύρεση του στόχου. Η μορφή που έχουν τα string είναι η παρακάτω: «1011001101».

Το σύνολο δεδομένων αποτελείται από 5000 δείγματα. Το κάθε δείγμα αποτελούνταν από τα states αρχής, τέλους και εμποδίων. Σκοπός είναι η πρόβλεψη της βέλτιστης διαδρομής δεδομένου των εμποδίων που υπάρχουν.



Σχήμα 44: Αξιολόγηση ακρίβειας μοντέλου πρόβλεψης ισχύος εκπομπής για διαφορετικούς αλγορίθμους

Το Σχήμα 44 παρουσιάζει τα ποσοστά ακρίβειας για τους αλγορίθμους deep learning, kNN και Random Forest. Τα πιο υψηλά ποσοστά της τάξεως 85% εμφανίζονται στον deep learning με τέσσερα κρυφά επίπεδα.



Σχήμα 45: Αξιολόγηση μοντέλου με την χρήση μετρικών *F1Score*, *Precision* και *Recall*

Σημαντικές μετρικές για την αξιολόγηση του μοντέλου είναι το Precision, Recall και F1-score (Σχήμα 45). Η μετρική recall είναι το ποσοστό των θετικών κριτικών που το μοντέλο μηχανικής εκμάθησης προέβλεψε σωστά ως θετικές, αξιολογεί πόσο καλό είναι το μοντέλο μηχανικής μάθησης που διαθέτουμε στον εντοπισμό όλων των πραγματικών θετικών από όλα τα θετικά που υπάρχουν σε ένα σύνολο δεδομένων. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό recall, τόσο καλύτερα το μοντέλο μηχανικής μάθησης εντοπίζει τα θετικά και τα αρνητικά παραδείγματα.

Σχετικά με το precision, η οποία είναι εξίσου σημαντική μετρική καθώς μας δείχνει αν υπάρχει σφάλμα στο μοντέλο μας. Εδώ τα υψηλά ποσοστά precision στους αλγορίθμους deep learning και K-NN μας δείχνει ότι το μοντέλο μας προβλέπει σωστά περίπου στο 81% για τον αλγόριθμο Deep Learning. Ο αλγόριθμος kNN και random forest δεν έχουν καλά αποτελέσματα.

Η μετρική F1-score μετράει την απόδοση μοντέλου μηχανικής μάθησης και δίνει ίση βαρύτητα τόσο στο precision όσο και στο recall για τη μέτρηση της απόδοσής της. Υψηλά ποσοστά παρατηρούνται στον deep learning. Αρκετά χαμηλά είναι τα ποσοστά στους αλγορίθμους random forest και kNN.

5

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν και υλοποιήθηκαν εφαρμογές τεχνικών Μηχανικής Μάθησης σε διαφορετικά σενάρια που αφορούν την βέλτιστη διαδρομή και τοποθέτηση εναέριων οχημάτων. Σκοπός μας ήταν η υλοποίηση μεθόδου RL η οποία να προσαρμόζεται εύκολα σε οποιοδήποτε σενάριο εξυπηρετώντας χρήστες κυψελωτών δικτύων 5G and Beyond για μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη αυτών. Η υλοποίηση πολλαπλών σεναρίων μας απέδειξε την χρησιμότητα και την προσαρμοστικότητα της μεθόδου RL.

Όσο αφορά την βέλτιστη τοποθέτηση εναέριων οχημάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Unsupervised Learning για την ομαδοποίηση χρηστών και την κάλυψή τους από UAVs.

Παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη πολλών UAVs σε ένα χώρο αυξάνει την πιθανότητα διακυψελωτής παρεμβολής, επομένως κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε αυτήν την πρόκληση. Εφαρμόζοντας μείωση ισχύος εκπομπής καταφέραμε να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο της παρεμβολής αλλά ταυτόχρονα οδηγηθήκαμε σε περεταίρω βελτιστοποιήσεις για την αντιμετώπιση πιθανών προκλήσεων που προκύπτουν μετά την μείωση της παρεμβολής.

Τα σενάρια που υλοποιήσαμε είχαν ως σκοπό την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και τοποθέτησης του UAV που εξαρτάται από τηλεπικοινωνιακές παραμέτρους SINR, PathLoss, Ισχύ εκπομπής και το συνδυασμό αυτών επιτυγχάνοντας μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Παράλληλα μειώσαμε τις παρεμβολές που αντιμετωπίζουν οι γειτονικοί χρήστες από το κινούμενο UAV με τη μείωση ισχύος εκπομπής καθώς και προσαρμόσαμε το ύψος του κινούμενου UAV ώστε να διατηρηθεί το SINR των χρηστών που εξυπηρετεί.

Παρουσιάσαμε αναλυτικά τα αποτελέσματα και ως προς του χρήστες που εξυπηρετούνταν από το κινούμενο UAV και ως προς τους χρήστες που εξυπηρετούνταν από τα γειτονικά UAVs με τη δημιουργία διαγραμμάτων. Αρχικά αναπαραστήσαμε σε 3D χώρο την βέλτιστη διαδρομή και τοποθέτηση του κινούμενου UAV, αλλά και των γειτονικών UAVs με τις βελτιστοποιήσεις που υλοποιήσαμε για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της παρεμβολής. Παρουσιάσαμε

διαγράμματα που αφορούν τηλεπικοινωνιακές παραμέτρους όπως η παρεμβολή, το SINR των χρηστών, το RSRP, κατά τη διάρκεια της κίνησης του UAV. Διαγράμματα όπως το Data Rate-SINR, Spectral Efficiency-SINR, Outage Probability-SINR δείχνουν πως οι επιπλέον βελτιστοποιήσεις που υλοποιήθηκαν αυξάνουν την απόδοση του συστήματός μας.

Στο σενάριο τοποθέτησης των UAVs, παρουσιάστηκαν διαγράμματα που αφορούν συγκεκριμένους χρήστες τόσο για τους χρήστες που εξυπηρετούνταν από το UAV τους όσο και για τους χρήστες που υφίστανται παρεμβολή από γειτονικό UAV. Για την ομαδοποίηση χρηστών όπου κάθε ομάδα θα εξυπηρετούνταν από ένα UAV χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος K-means. Δημιουργήθηκαν διαγράμματα που αφορούν το SINR των χρηστών όπου οι χρήστες εξυπηρετούνται από το UAV που προκαλεί παρεμβολή, καθώς και διαγράμματα που αφορούν το SINR και το Bit Rate των χρηστών που παρεμβάλλονται από το γειτονικό UAV. Επιπλέον δημιουργήθηκε διάγραμμα Capacity ανά UAV που αναπαριστά τη χωρητικότητα για κάθε UAV και προσδιορίζουν πως οι επιπλέον βελτιστοποιήσεις αυξάνουν το QoS των χρηστών.

Με την υλοποίηση των παραπάνω δημιουργήσαμε σύνολο δεδομένων που είχε ως στόχο την πρόβλεψη των dBm μείωσης ισχύος εκπομπής, έχοντας ως input παραμέτρους που αφορούν την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Το μοντέλο μας εκπαιδεύτηκε με χρήση των παρακάτω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης Deep Learning, kNN και SVM, καταφέροντας έτσι να έχει αρκετά υψηλά ποσοστά ακρίβειας. Επιπλέον υλοποιήσαμε μοντέλο για την εύρεση βέλτιστης διαδρομής με χρήση supervised learning, εξάγοντας ένα σύνολο δεδομένων παρουσιάζοντας και εκεί μια καλή εικόνα πρόβλεψης όσο αφορά με τη χρήση του αλγορίθμου deep learning, αλλά πιο χαμηλά ποσοστά όσο αφορά τους αλγορίθμους kNN και Random Forest.

Η υλοποίηση πολλαπλών σεναρίων είχε ως στόχο να αναδείξει τη δημιουργία αληθοφανών σεναρίων προβάλλοντας τις προκλήσεις που δύνανται να παρουσιαστούν και κατά πόσο μπορούμε να προσαρμόσουμε έναν αλγόριθμο σε αυτές τις απαιτήσεις. Η δημιουργία μίας σειράς ενεργειών για την αντιμετώπιση των προκλήσεων στο δεδομένο σενάριο έχει ως στόχο την πολλαπλή επίβλεψη του σεναρίου από διαφορετικές οπτικές έτσι ώστε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο πλήρως υλοποιήσιμο και τεχνικά άρτιο. Η χρήση τεχνικών Μηχανικής Μάθησης Supervised Learning έχει ως στόχο την αξιολόγηση των μοντέλων με χρήση διαφορετικών αλγορίθμων. Τα υψηλά ποσοστά αποδεικνύουν την ισχύ των μοντέλων μας δεδομένου ενός άρτιου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης. Αξίζει να σημειωθεί πως τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν στην πραγματική ζωή σε περιπτώσεις όπου δεν επαρκεί η κάλυψη του επίγειου κυψελωτού δικτύου π.χ. (υπερβολική προσέλευση κόσμου σε έναν συγκεκριμένο χώρο) ή σε ακραίες περιπτώσεις όπου η επίγεια κυψελωτή υποδομή του δικτύου έχει καταστραφεί π.χ. (φυσικές καταστροφές, πόλεμος).

6

Μελλοντική Έρευνα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αποτελούν βάση για τη δημιουργία μίας σειράς σεναρίων με συνδυασμούς ετερογενών δικτύων πέραν του κυψελωτού, άριστα προσαρμόσιμο στις απαιτήσεις οποιουδήποτε σεναρίου και στόχου υλοποίησης.

Η προσαρμοστικότητα του σεναρίου θα εξαρτάται από τον στόχο που καλούμαστε κάθε φορά να υλοποιήσουμε και πως μπορούμε να τον εκφράσουμε στους κώδικες που έχουμε υλοποιήσει.

Ως μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να υπάρξει ο συνδυασμός UAVs τόσο με επίγειους σταθμούς βάσης όσο και με την ύπαρξη δορυφόρων με σκοπό την παγκόσμια και απρόσκοπτη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Επιπλέον η συνύπαρξη και μίας πληθώρας ετερογενών συσκευών θα οδηγήσει σε περαιτέρω εμβάθυνση και έρευνα.

Η χρήση δικτύων 6^{ης} γενιάς όπως είναι το RIS και τα mmWaves σε συνδυασμό με χρήση εναέριων οχημάτων θα δημιουργήσει μία πληθώρα σεναρίων που έχουν ως στόχο την βελτίωση της φασματικής απόδοσης και την μεγιστοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης καθώς και την αντιμετώπιση προκλήσεων που κάθε τεχνολογία έχει μεμονωμένα. Ο συνδυασμός τεχνολογιών θα βελτιώσει την απόδοση του συστήματος αποφεύγοντας προβλήματα διάδοσης και σε συνδυασμό με την ευελιξία των εναέριων οχημάτων θα ενισχύσει την κάλυψη των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Επίσης η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης τόσο με τη δημιουργία συνόλων δεδομένων όσο και με την εκπαίδευση σε πραγματικό περιβάλλον δημιουργεί μοντέλα αληθοφανή τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικά σενάρια. Για την επίλυση πραγματικών προκλήσεων σε πραγματικά σενάρια όπως είναι οι αναγκαίες υπηρεσίες του δήμου προς τους πολίτες π.χ. άμεση δράση ασθενοφόρων, πυροσβεστικών οχημάτων, της αστυνομίας όπου με την επικοινωνία υψηλής ταχύτητας, τα προβλήματα της σημερινής εποχής θα αποτελούν πλέον παρελθόν.

Βιβλιογραφία

- [1] You, X., Wang, C.-X., Huang, J., Gao, X., Zhang, Z., Wang, M., Huang, Y., Zhang, C., Jiang, Y., Wang, J., Zhu, M., Sheng, B., Wang, D., Pan, Z., Zhu, P., Yang, Y., Liu, Z., Zhang, P., Tao, X., ... Liang, Y.-C. (2021). Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Science China Information Sciences*, 64(1), 110301. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6>
- [2] Muñoz-Saavedra, L., Miró-Amarante, L., & Domínguez-Morales, M. (2020). Augmented and Virtual Reality Evolution and Future Tendency. *Applied Sciences*, 10(1), 322. <https://doi.org/10.3390/app10010322>
- [3] Murphy, K., & Darrah, M. (2015). Haptics-Based Apps for Middle School Students with Visual Impairments. *IEEE Transactions on Haptics*, 8(3), 318–326. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2401832>
- [4] Elliott, D., Keen, W., & Miao, L. (2019). Recent advances in connected and automated vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(2), 109–131. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.005>
- [5] Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106522. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>
- [6] Calvanese Strinati, E., Barbarossa, S., Gonzalez-Jimenez, J. L., Ktenas, D., Cassiau, N., Maret, L., & Dehos, C. (2019). 6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence

- Using Subterahertz and Visible Light Communication. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3), 42–50. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921162>
- [7] Elmeadawy, S., & Shubair, R. M. (2019). 6G Wireless Communications: Future Technologies and Research Challenges. *2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICECTA48151.2019.8959607>
- [8] Hu, S., Rusek, F., & Edfors, O. (2018). Beyond Massive MIMO: The Potential of Data Transmission With Large Intelligent Surfaces. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66(10), 2746–2758. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2816577>
- [9] Ponnimbaduge Perera, T. D., Jayakody, D. N. K., Sharma, S. K., Chatzinotas, S., & Li, J. (2018). Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 264–302. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901>
- [10] Rahnama, M. (1993). Overview of the GSM system and protocol architecture. *IEEE Communications Magazine*, 31(4), 92–100. <https://doi.org/10.1109/35.210402>
- [11] Gu, G., & Peng, G. (2010). The survey of GSM wireless communication system. *2010 International Conference on Computer and Information Application*, 121–124. <https://doi.org/10.1109/ICCIA.2010.6141552>
- [12] Jung, K. (2009). Transition from circuit-switched to packet-switched 3G mobile multimedia telephony. *2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/WOWMOM.2009.5282410>
- [13] Adegbite, O.D., I., A. L. (2018). *Measurements-Based Performance Analysis of a 4G Lte Network in and Around shopping malls and Campus Environments in Lagos Nigeria*.
- [14] Imoize, A. L., Adedeji, O., Tandiya, N., & Shetty, S. (2021). 6G Enabled Smart Infrastructure for Sustainable Society: Opportunities, Challenges, and Research Roadmap. *Sensors*, 21(5), 1709. <https://doi.org/10.3390/s21051709>

- [15] Chowdhury, M. Z., Shahjalal, Md., Ahmed, S., & Jang, Y. M. (2019). *6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1909.11315>
- [16] O'Shea, T., & Hoydis, J. (2017). An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 3(4), 563–575. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2017.2758370>
- [17] Wang, J., Tang, W., Han, Y., Jin, S., Li, X., Wen, C.-K., Cheng, Q., & Cui, T. J. (2021). *Interplay between RIS and AI in Wireless Communications: Fundamentals, Architectures, Applications, and Open Research Problems*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2101.00250>
- [18] Zhao, J. (2019). *A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs): Towards 6G Wireless Communication Networks*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1907.04789>
- [19] Foo S. (n.d.). *Liquid Crystal Reconfigurable Metasurface Reflector Antenna* (Patent No. U.S. Patent 10,490,903).
- [20] Wu, Q., & Zhang, R. (2019). Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(11), 5394–5409. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936025>
- [21] Interdonato, G., Björnson, E., Quoc Ngo, H., Frenger, P., & Larsson, E. G. (2019). Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1), 197. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1507-0>
- [22] Padamvathi, V., Vardhan, B. V., & Krishna, A. V. N. (2016). Quantum Cryptography and Quantum Key Distribution Protocols: A Survey. *2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC)*, 556–562. <https://doi.org/10.1109/IACC.2016.109>
- [23] Ajose, S. O., Bakare, R. A., & Imoize, A. L. (2017). BER comparison of different modulation schemes over AWGN and Rayleigh fading channels for MIMO-OFDM system. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 18(2), 129. <https://doi.org/10.1504/IJCND.2017.082102>

- [24] Raissi, F., Yangui, S., & Camps, F. (2019). Autonomous Cars, 5G Mobile Networks and Smart Cities: Beyond the Hype. *2019 IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*, 180–185. <https://doi.org/10.1109/WETICE.2019.00046>
- [25] Xie, J., Tang, H., Huang, T., Yu, F. R., Xie, R., Liu, J., & Liu, Y. (2019). A Survey of Blockchain Technology Applied to Smart Cities: Research Issues and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2794–2830. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2899617>
- [26] Zeng, Y., Wu, Q., & Zhang, R. (2019). *Accessing From The Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1903.05289>
- [27] FFA. (2019, February 18). *Summary of Small Unmanned Aircraft Rule*. https://www.faa.gov/uas/media/Part_107_Summary.pdf
- [28] Ding, T., Ding, M., Mao, G., Lin, Z., Lopez-Perez, D., & Zomaya, A. Y. (2017). Uplink Performance Analysis of Dense Cellular Networks With LoS and NLoS Transmissions. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(4), 2601–2613. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2669023>
- [29] Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, M., Hassan, M., Giordano, L. G., Garcia-Rodriguez, A., & Yuan, J. (2019). Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3417–3442. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228>
- [30] Google. (n.d.). *Google X. Balloon-powered Internet for everyone*. <https://www.google.com/intl/en-US/loon/>.
- [31] NOKIA. (2016, October). *F-Cell technology from Nokia Bell Labs revolutionizes small cell deployment by cutting wires, costs and time*. <https://www.nokia.com/news/releases/2016/10/03/f-cell-technologyfrom-nokia-bell-labs-revolutionizes-small-cell-deployment-by-cuttingwires- costs-and-time/>

- [32] Junting Chen, D. G. (2017). Optimal Positioning of Flying Relays for Wireless Networks: A LOS Map Approach. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6.
- [33] Huawei. (n.d.). *Connected Aerial Vehicle*. Retrieved May 20, 2018, from <http://www.huawei.com/en/industry-insights/innovation/xlabs/usecases/mbbf2017-connected-aerial-vehicle-live>
- [34] Zeng, Y., Lyu, J., & Zhang, R. (2019). Cellular-Connected UAV: Potential, Challenges, and Promising Technologies. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 120–127. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800023>
- [35] Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). *Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1602.03602>
- [36] 3GPP. (2017, December). *Technical Specification Group Radio Access Network: Study on enhanced LTE Support for Aerial Vehicles, document 3GPP TR 36.777 V15.0.0*.
- [37] Xie, J., Wan, Y., Kim, J. H., Fu, S., & Namuduri, K. (2014). A Survey and Analysis of Mobility Models for Airborne Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3), 1221–1238. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.111313.00138>
- [38] Zeng, Y., Xu, J., & Zhang, R. (2019). Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(4), 2329–2345. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2902559>
- [39] Hasan, Z., Boostanimehr, H., & Bhargava, V. K. (2011). Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(4), 524–540. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.092311.00031>
- [40] Liu, D., Cui, J., Zhang, J., Yang, C.-Y., & Hanzo, L. (2021). Deep Reinforcement Learning Aided Packet-Routing for Aeronautical Ad-Hoc Networks Formed by Passenger Planes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(5), 5166–5171. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3074015>

- [41] Liu, C., Ding, M., Ma, C., Li, Q., Lin, Z., & Liang, Y.-C. (2018). Performance Analysis for Practical Unmanned Aerial Vehicle Networks with LoS/NLoS Transmissions. *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403635>
- [42] Merwaday, A., & Guvenc, I. (2015). UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications. *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 329–334. <https://doi.org/10.1109/WCNCW.2015.7122576>
- [43] Galkin, B., Kibilda, J., & DaSilva, L. A. (2016). Deployment of UAV-mounted access points according to spatial user locations in two-tier cellular networks. *2016 Wireless Days (WD)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WD.2016.7461487>
- [44] El Naqa, I., & Murphy, M. J. (2015). What Is Machine Learning? In I. El Naqa, R. Li, & M. J. Murphy (Eds.), *Machine Learning in Radiation Oncology* (pp. 3–11). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18305-3_1
- [45] Cunningham, P., Cord, M., & Delany, S. J. (2008). Supervised Learning. In M. Cord & P. Cunningham (Eds.), *Machine Learning Techniques for Multimedia* (pp. 21–49). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75171-7_2
- [46] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- [47] Rusk, N. (2016). Deep learning. *Nature Methods*, 13(1), 35–35. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3707>
- [48] SHUJUN HUANG, NIANGUANG CAI, PEDRO PENZUTI PACHECO, SHAVIRA NARRANDES, YANG WANG, & WAYNE XU. (2018). Applications of Support Vector Machine (SVM) Learning in Cancer Genomics. *Cancer Genomics & Proteomics*, 15(1). <https://doi.org/10.21873/cgp.20063>
- [49] Guo, G., Wang, H., Bell, D., Bi, Y., & Greer, K. (2003). KNN Model-Based Approach in Classification. In R. Meersman, Z. Tari, & D. C. Schmidt (Eds.), *On The Move to Meaningful*

- Internet Systems 2003: CoopIS, DOA, and ODBASE* (Vol. 2888, pp. 986–996). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39964-3_62
- [50] Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *TEST*, 25(2), 197–227. <https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>
- [51] Ghahramani, Z. (2004). Unsupervised Learning. In O. Bousquet, U. von Luxburg, & G. Rätsch (Eds.), *Advanced Lectures on Machine Learning* (Vol. 3176, pp. 72–112). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28650-9_5
- [52] Krishna, K., & Narasimha Murty, M. (1999). Genetic K-means algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 29(3), 433–439. <https://doi.org/10.1109/3477.764879>
- [53] Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* (Second edition). The MIT Press.
- [54] Fan, C., Chen, M., Wang, X., Wang, J., & Huang, B. (2021). A Review on Data Preprocessing Techniques Toward Efficient and Reliable Knowledge Discovery From Building Operational Data. *Frontiers in Energy Research*, 9, 652801. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.652801>
- [55] Swathi Pothuganti. (2018). Review on over-fitting and under-fitting problems in Machine Learning and solutions. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 7(9), 3692–3695.
- [56] AlZoman, R. M., & Alenazi, M. J. F. (2021). A Comparative Study of Traffic Classification Techniques for Smart City Networks. *Sensors*, 21(14), 4677. <https://doi.org/10.3390/s21144677>
- [57] Kourou, K., Exarchos, T. P., Exarchos, K. P., Karamouzis, M. V., & Fotiadis, D. I. (2015). Machine learning applications in cancer prognosis and prediction. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 13, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2014.11.005>

- [58] Wenge Zhu, Nancy F. Zeng, & Ning Wang. (n.d.). Sensitivity , Specificity , Accuracy , Associated Confidence Interval and ROC Analysis with Practical SAS. *NESUG 2010*.
- [59] Bansal, A., & Singhrova, A. (2021). Performance Analysis of Supervised Machine Learning Algorithms for Diabetes and Breast Cancer Dataset. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 137–143. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396043>
- [60] Adediran, Y. A., Lasisi, H., & Okedere, O. B. (2017). Interference management techniques in cellular networks: A review. *Cogent Engineering*, 4(1), 1294133. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1294133>
- [61] Andreadis, A., & Giambene, G. (2002). Multiple access techniques for wireless systems. In *Protocols for High-Efficiency Wireless Networks* (pp. 1–16). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-306-47795-5_1
- [62] Jänis & Pekka. (2013). *Interference Management Techniques for Cellular Wireless Communication Systems*.
- [63] Lopez-Perez, D., Xiaoli Chu, Vasilakos, A. V., & Claussen, H. (2014). Power Minimization Based Resource Allocation for Interference Mitigation in OFDMA Femtocell Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(2), 333–344. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.141213>
- [64] Huang, H., & Savkin, A. V. (2019). A Method for Optimized Deployment of Unmanned Aerial Vehicles for Maximum Coverage and Minimum Interference in Cellular Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(5), 2638–2647. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2875041>
- [65] Mei, W., & Zhang, R. (2020). Cooperative Downlink Interference Transmission and Cancellation for Cellular-Connected UAV: A Divide-and-Conquer Approach. *IEEE Transactions on Communications*, 68(2), 1297–1311. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2955953>

- [66] Kosta, C., Hunt, B., Quddus, A. U., & Tafazolli, R. (2013). On Interference Avoidance Through Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) Based on OFDMA Mobile Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 973–995. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.121112.00037>
- [67] Lee, D., Seo, H., Clerckx, B., Hardouin, E., Mazzaresse, D., Nagata, S., & Sayana, K. (2012). Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: Deployment scenarios and operational challenges. *IEEE Communications Magazine*, 50(2), 148–155. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6146494>
- [68] Islam, S. M. R., Avazov, N., Dobre, O. A., & Kwak, K. (2017). Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 721–742. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2621116>
- [69] Yajnanarayana, V., Eric Wang, Y.-P., Gao, S., Muruganathan, S., & Lin Ericsson, X. (2018). Interference Mitigation Methods for Unmanned Aerial Vehicles Served by Cellular Networks. 2018 *IEEE 5G World Forum (5GWF)*, 118–122. <https://doi.org/10.1109/5GWF.2018.8517087>
- [70] Liu, L., Zhang, S., & Zhang, R. (2019). Multi-Beam UAV Communication in Cellular Uplink: Cooperative Interference Cancellation and Sum-Rate Maximization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(10), 4679–4691. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2926981>
- [71] Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., Galati Giordano, L., Lopez-Perez, D., & Bjornson, E. (2018). Understanding UAV Cellular Communications: From Existing Networks to Massive MIMO. *IEEE Access*, 6, 67853–67865. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876700>
- [72] Li, L., Cheng, Q., Xue, K., Yang, C., & Han, Z. (2020). Downlink Transmit Power Control in Ultra-Dense UAV Network Based on Mean Field Game and Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(12), 15594–15605. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3043851>

- [73] Junhui, Z., Tao, Y., Yi, G., Jiao, W., & Lei, F. (2013). Power control algorithm of cognitive radio based on non-cooperative game theory. *China Communications*, 10(11), 143–154. <https://doi.org/10.1109/CC.2013.6674218>
- [74] Xu, H., Zhang, L., Zhou, X., & Han, Z. (2018). Stackelberg differential game based power control in small cell networks powered by renewable energy. *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2018.8376996>
- [75] Huang, H., Peng, Y., Yang, J., Xia, W., & Gui, G. (2020). Fast Beamforming Design via Deep Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 1065–1069. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2949122>
- [76] Ruan, L., Wang, J., Chen, J., Xu, Y., Yang, Y., Jiang, H., Zhang, Y., & Xu, Y. (2018). Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework. *China Communications*, 15(10), 194–209. <https://doi.org/10.1109/CC.2018.8485481>
- [77] Liu, M., Yang, J., & Gui, G. (2019). DSF-NOMA: UAV-Assisted Emergency Communication Technology in a Heterogeneous Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5508–5519. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2903165>
- [78] Guruacharya, S., Tabassum, H., & Hossain, E. (2018). SINR Outage Evaluation: Saddle Point Approximation Using Normal Inverse Gaussian Distribution. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(1), 591–605. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2768424>
- [79] Karim, B. A., & Rahaman Othman, B. (2020). Study of Uplink Interference in UMTS Network: ASIACELL Company, Iraq. *Kurdistan Journal of Applied Research*, 5(1), 137–148. <https://doi.org/10.24017/science.2020.1.7>
- [80] RapidMiner. (n.d.). <https://rapidminer.com/platform/educational/>