



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ
ΣΕ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΠΙΓΕΙΑ, ΕΝΑΕΡΙΑ ΚΑΙ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ 6ης ΓΕΝΙΑΣ»



Του φοιτητή
Βέλλιου Γεώργιου
Αρ. Μητρώου: 518019

Επιβλέπουσα
Δρ. Αγάπη Μεσοδιακάκη
Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό

17 Ιουνίου 2025

Τίτλος Δ.Ε.: Βελτιστοποίηση ανάθεσης πόρων με χρήση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης
σε ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και δορυφορικά δίκτυα 6ης γενιάς

Κωδικός Δ.Ε.: 24153

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Γεώργιος Βέλλιος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Δρ. Αγάπη Μεσοδιακάκη

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 16-03-2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 31-05-2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Βέλλιου Γεώργιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην οικογένεια μου που με υποστήριξε και άντεξε την γκρίνια μου.»

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την εμβάθυνση των γνώσεων μου στο κομμάτι των δορυφορικών επικοινωνιών, των τεχνητών νοημοσυνών και των επόμενων γενεών κινητής τηλεφωνίας. Το θέμα επιλέχθηκε μετά από διεξοδικές συζητήσεις με την Δρ. Μεσοδιακάκη με στόχο την επίτευξη μίας διπλωματικής εργασίας ερευνητικού επιπέδου μέσα στο εύλογο πλαίσιο ενός ενσωματωμένου μεταπτυχιακού προγράμματος. Μετά από έναν χρόνο εργασίας πάνω στην διπλωματική - με τον κυριότερο φόρτο εντός του δεύτερου εξαμήνου του εγχειρήματος - κατανόησα το πόσο δύσκολη, αναπάντεχη και μη-γραμμική είναι η πορεία απόκτησης γνώσεων για την σύνθεση των αποτελεσμάτων στο κομμάτι της έρευνας. Με βεβαιότητα μπορώ να πω ότι οι γνώσεις που απέκτησα κατά τη διάρκεια αυτού του έτους δεν περιορίστηκαν μόνο στις τεχνικές - όπως στην ανάγνωση και κατανόηση επιστημονικών άρθρων, δημιουργία κώδικα MATLAB στην εργαλειοθήκη Reinforcement Learning, στην ανάστροφη μηχανική κώδικα από τον πηγαίο του, κλπ., αλλά και σε ήπιες γνώσεις όπως διαχείριση χρόνου, πόρων και υπομονής. Η παρούσα εργασία πέραν από έναν ικανότερα καταρτισμένο μηχανικό με μετέτρεψε από έναν ονειροπόλο φοιτητή σε έναν άνθρωπο που μπορεί να προσεγγίσει ένα πρόβλημα πολυεπίπεδα - μηχανικής φύσης και μη.

Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει τα δίκτυα επόμενης γενιάς (6G), των οποίων η εμφάνιση προβλέπεται από το 2030 και μετά, φέρνοντας μαζί τους ένα ευρύ φάσμα καινοτόμων τεχνολογιών και δυνατοτήτων. Τα αρχικά κεφάλαια εξερευνούν την εξέλιξη των δικτύων κινητής επικοινωνίας, ξεκινώντας από τους βασικούς ασύρματους πομποδέκτες που χρησιμοποιούνταν σε αστυνομικές υπηρεσίες κατά τα μέσα του 20ού αιώνα, φτάνοντας μέχρι τα σύγχρονα δίκτυα πέμπτης γενιάς που χρησιμοποιούμε σήμερα. Στο κλείσιμο αυτής της ενότητας, περιγράφονται οι δυνατότητες των δικτύων 6G καθώς και οι συναφείς τεχνολογίες που θα εξελιχθούν παράλληλα με τις καινοτομίες της νέας γενιάς. Στη συνέχεια, γίνεται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας από άλλους ερευνητές σχετικά με το υπό εξέταση θέμα, όπου παρουσιάζονται ποικίλες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ειδικότερα, σε διαφοροποίηση από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, η συγκεκριμένη εργασία εξετάζει διεξοδικά και ολοκληρωμένα τις προκλήσεις που αφορούν τη σύνδεση χρηστών με σταθμούς βάσης, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση τόσο της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος όσο και του ποσοστού αποδοχής χρηστών από το δίκτυο. Με στόχο τη βελτίωση της επιτυχημένης πρόσβασης των χρηστών στο δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή απόδοση και την αποτελεσματική διαχείριση πόρων, αναπτύχθηκε ένα σύστημα τεχνητής νοημοσύνης. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB για σύγκριση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία.

«RESOURCE ALLOCATION OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN INTEGRATED TERRESTRIAL, AERIAL AND SATELLITE 6TH GENERATION NETWORKS»

«Georgios Vellios»

Abstract

This thesis examines next-generation networks (6G), whose emergence is anticipated from 2030 onwards, bringing with them a broad spectrum of innovative technologies and capabilities. The initial chapters explore the evolution of mobile communication networks, starting from basic wireless transceivers used in police services during the mid-20th century, reaching up to the modern fifth-generation networks we use today. At the conclusion of this section, the capabilities of 6G networks are described along with the related technologies that will evolve in parallel with the innovations of the new generation. Subsequently, a review of existing literature by other researchers regarding the examined topic is presented, where various approaches to addressing the problem are introduced. Specifically, in differentiation from existing literature, this particular work examines thoroughly and comprehensively the challenges concerning user connection to base stations, aiming to optimize both the system's energy efficiency and the user acceptance rate by the network. With the goal of improving successful user access to the network, taking into account energy efficiency and effective resource management, an artificial intelligence system was developed. This system was designed and implemented in a MATLAB environment for comparison with existing approaches in the literature.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την Δρ. Μεσοδιακάκη για την γνωστική υποστήριξη της και την απόθμενη υπομονή της με έμένα, τον Δρ. Kibalya γιατί τούτο το έργο δε θα περατωνόταν χωρίς την επιστημονική αρωγή του, τους φίλους μου που πίστεψαν σε εμένα, και τον καλύτερο μου φίλο, τον Αλέξανδρο, γιατί ήταν βράχος.

Περιεχόμενα

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| Πρόλογος | iv |
| Περίληψη | v |
| Abstract | vi |
| Ευχαριστίες | vii |
| Περιεχόμενα | viii |
| Κατάλογος Σχημάτων | x |
| Κατάλογος Πινάκων | x |
| Συντομογραφίες | xi |
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 Συστήματα κινητών επικοινωνιών | 2 |
| 1.3 Εξέλιξη ασύρματων δικτύων | 3 |
| 1.3.1 Δίκτυα Μηδενικής Μέχρι Τέταρτης Γενιάς (0G - 4G) | 3 |
| 1.3.2 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς 5G | 7 |
| 1.4 Δίκτυα Έκτης Γενιάς 6G | 10 |
| 1.4.1 Πιθανές Υπηρεσίες 6ης | 13 |
| 1.4.2 Τεχνολογίες 6ης Γενιάς | 15 |
| 1.5 Θέμα και στόχοι παρούσας διπλωματικής εργασίας | 16 |
| 1.6 Μεθοδολογία | 17 |
| 1.7 Επίλογος | 17 |
| 2 Σύγχρονη Βιβλιογραφική Έρευνα και Προσεγγίσεις | 18 |
| 2.1 Εισαγωγή | 18 |
| 2.2 Σχετικές Εργασίες και Έρευνες | 18 |
| 2.2.1 Σχετικές Εργασίες για τα Επίγεια Δίκτυα | 19 |
| 2.2.2 Σχετικές Εργασίες για τα Εναέρια Δίκτυα | 19 |
| 2.2.3 Σχετικές Εργασίες για τα Ενοποιημένα Δίκτυα | 19 |
| 2.3 Επίλογος | 23 |
| 3 Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση | 24 |
| 3.1 Εισαγωγή | 24 |
| 3.2 Μοντέλο Συστήματος (System Model) | 24 |
| 3.2.1 Σηματοθορυβική Σχέση | 24 |
| 3.2.2 Δορυφορικό τμήμα | 26 |
| 3.2.3 Power Model Συστήματος | 34 |
| 3.2.4 Εύρεση Δορυφόρου στην Τροχιά | 36 |
| 3.3 Πρόβλημα προς Επίλυση και Αρχιτεκτονική Άκτορα/Κριτή | 38 |
| 3.3.1 Ενισχυτική Μάθηση | 38 |
| 3.3.2 Αλγόριθμος Proximal Policy Optimization (PPO) | 38 |
| 3.3.3 Generalized Advantage Estimation (GAE) | 39 |
| 3.3.4 Forward και Backward Propagation με ADAM Optimizer | 39 |
| 3.3.5 Παρών Νευρωνικό Δίκτυο | 40 |
| 3.4 Συνάρτηση Ανταμοιβής | 42 |
| 3.5 Περιβάλλον Εκπαίδευσης | 45 |
| 3.6 Επίλογος | 45 |
| 4 Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση | 47 |
| 4.1 Διαδικασία εκπαίδευσης | 47 |
| 5 Συμπεράσματα ή/και Προτάσεις Βελτίωσης | 50 |
| 5.1 Συμπεράσματα | 50 |
| 5.2 Κατευθύνσεις για Περαιτέρω Έρευνα | 51 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 52 |
| Α□ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ | 58 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | | |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Ο παγκόσμιος χάρτης των υποβρύχιων καλωδίων. | 1 |
| 1.2 | Μέση αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου 5ης γενιάς. | 2 |
| 1.3 | Η παγκόσμια πιθανή αύξηση του όγκου πληροφορίας εντός αυτής της δεκαετίας στις κινητές συσκευές. | 3 |
| 1.4 | Το σύστημα μεταγωγής κυκλώματος. | 5 |
| 1.5 | Το σύστημα μεταγωγής πακέτου. | 5 |
| 1.6 | Η απεικόνιση της λειτουργίας του MIMO. | 6 |
| 1.7 | Τα KPIs του 5G σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά, το 4G. | 9 |
| 1.8 | Τα τρία κύρια σενάρια χρήσης του 5G σε συνάρτηση με τις προδιαγραφές του. | 9 |
| 1.9 | Η πορεία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από το 2023 και αργότερα. | 10 |
| 1.10 | Οι δυνατότητες του 6G. [38] | 11 |
| 1.11 | Οι μεταβολές στην καθυστέρηση, στην χωρητικότητα και στην κάλυψη συναρτήσει της αύξησης της συχνότητας. | 13 |
| 1.12 | Επικοινωνία μεταξύ οχήματος - οχήματος και οχήματος - δικτύου σε δίκτυο 6ης γενιάς. | 14 |
| 1.13 | Η επανάσταση του IoE που θα έρθει με το 6G. | 15 |
| 1.14 | Ο δορυφόρος εκπέμπει προς την RIS η οποία έχει τοποθετηθεί σε UAV. Στην προκειμένη περίπτωση το RIS έχει την δυνατότητα να ανακλάσει το προσπίπτον σήμα, αλλά και να το αναμεταδώσει. | 16 |
| 1.15 | Τα σενάρια χρήσης των δορυφορικών επικοινωνιών. | 16 |
| 3.1 | Αναλυτικό σχεδιάγραμμα του ενοποιημένου δορυφορικού, εναέριου και επίγειου δικτύου στην παρούσα εργασία. | 24 |
| 3.2 | Αναλυτικό σχεδιάγραμμα υπολογισμού απόστασης ενός δορυφόρου από τη Γη. | 26 |
| 3.3 | Τα στοιχεία που απαρτίζουν μία τροχιά και που χρησιμοποιούνται για την εύρεση των δορυφόρων σε αυτήν. | 37 |
| 3.4 | Τα στοιχεία του δορυφόρου HellasSat4 στην μορφή TLE. | 38 |
| 3.5 | Αρχιτεκτονική άκτορα PPO με Layer Normalization και ReLU. | 41 |
| 3.6 | Διαφορές στην εκπαίδευση DQN και PPO στο ίδιο σενάριο (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέσος όρος ανταμοιβών ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0). Παρατηρείται γρηγορότερη σύγκλιση του PPO, μέχρι και φαινόμενα overfit, σε λιγότερα επεισόδια. | 43 |
| 4.1 | Πρώτη εκπαίδευση με 40 διαφορετικούς χρήστες, συνολικά 4000 (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέση ανταμοιβή ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0). | 47 |
| 4.2 | Δεύτερη εκπαίδευση με 40 διαφορετικούς χρήστες τυχαία ανατεθειμένων επεισοδίων. Οι συνολικές διαφορετικές διατάξεις χρηστών είναι 10 και τα συνολικά επεισόδια είναι 9999(μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέση ανταμοιβή ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0). | 48 |
| 4.3 | Τρίτη και τελευταία εκπαίδευση με 40 διαφορετικούς χρήστες τυχαία ανατεθειμένων επεισοδίων. Οι συνολικές διαφορετικές διατάξεις χρηστών είναι όσες και τα συνολικά επεισόδια - σχεδόν 4750 (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέση ανταμοιβή ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0). | 49 |
| 4.4 | Προσομοίωση 40 διαφορετικών χρηστών τυχαία ανατεθειμένων επεισοδίων. Οι συνολικές διαφορετικές διατάξεις χρηστών είναι όσες και τα συνολικά επεισόδια - 100. Η προσομοίωση έγινε σε σενάρια στα οποία ο πράκτορας δεν έχει εκπαιδευτεί προηγουμένως. | 49 |

Κατάλογος Πινάκων

| | | |
|-----|---------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. | 8 |
| 2.1 | Βιβλιογραφική Έρευνα. | 18 |

Συνομογραφίες

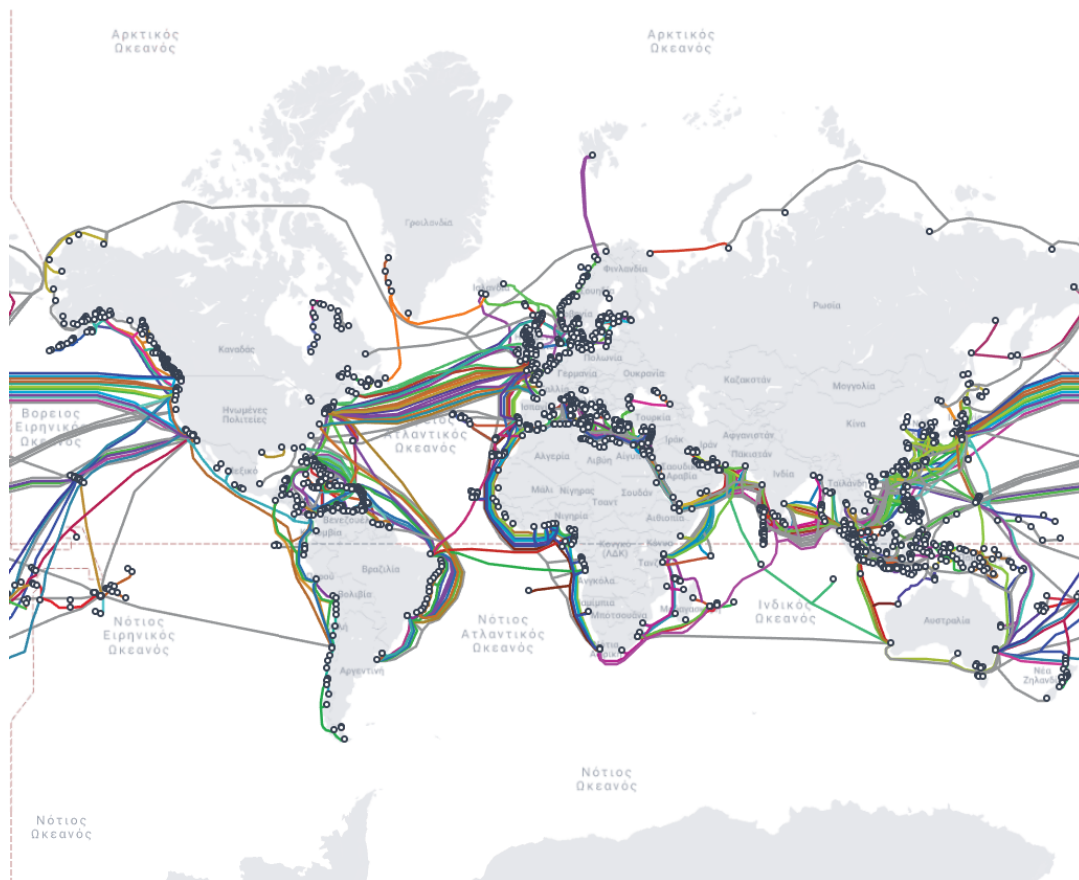
| | |
|--------|----------------------------------------|
| 1G | First Generation |
| 2G | Second Generation |
| 3G | Third Generation |
| 4G | Fourth Generation |
| 5G | Fifth Generation |
| 6G | Sixth Generation |
| AI | Artificial Intelligence |
| AMPS | Advanced Mobile Phone System |
| AN | Access Network |
| CDMA | Code-Division Multiple Access |
| CPU | Central Power Unit |
| CS | Circuit Switch |
| E2E | End to End |
| EDGE | Enhanced Data rates for GSM Evolution |
| eMBB | enhanced Mobile Broadband |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| FM | Frequency Modulation |
| FW | Firewall |
| Gbps | Giga bit per second |
| GEO | Geostationary Earth Orbit |
| gNB | gNodeB |
| GPRS | General Packet Radio Services |
| GSM | Global System for Mobile communication |
| HAPS | High Altitude Platform Station |
| HSPA | High Speed Packet Access |
| HSPA+ | Evolved High-Speed Packet Access |
| IDPS | Intrusion Detection/Prevention System |
| IoE | Internet of Everything |
| IoT | Internet of Things |
| ITU | International Telecommunication Union |
| Kbps | Kilo bits per second |
| KHz | Kilo Hertz |
| KPI | Key Performance Indicators |
| LEO | Low Earth Orbit |
| LTE | Long Term Evolution |
| LTE-A | Long Term Evolution Advanced |
| Mbps | Mega bits per second |
| MEC | Mobile Edge Computing |
| MEO | Medium Earth Orbit |
| MHz | Mega Hertz |
| mMTC | Massive machine type communications |
| mmWAVE | Millimeter wave |
| NAT | Network Address Translation |
| NFV | Network Functions Virtualization |

| | |
|--------|-----------------------------------------------|
| NMT | Nordic Mobile Telephone |
| NTT | Nippon Telegraph and Telephone |
| OFDMA | Orthogonal Frequency-Division Multiple Access |
| PS | Packet Switch |
| QoS | Quality of Service |
| RB | Resource Block |
| RIS | Reconfigurable Intelligent Surfaces |
| RL | Reinforcement Learning |
| SC | Small Cells |
| SFC | Service Function Chain |
| SINR | Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio |
| SoA | State of the Art |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| THz | Tera Hertz |
| TM | Traffic Monitor |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| UE | User Equipment |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunication System |
| URLLC | Ultra-reliable and low latency communications |
| VNF | Virtual Network Functions |
| VOC | Video Optimization Controller |
| W-CDMA | Wideband-Code Division Multiple Access |
| WOC | WAN Optimization Controller |

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η επικοινωνία είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης φύσης - ένας τομέας που βελτιώνεται και εξελίσσεται διαρκώς από τεχνολογική αλλά και ανθρωπολογική άποψη. Από τα σήματα καπνού έως την αλληλογραφία, οι άνθρωποι, κάθε αιώνα, προσαρμόζουν τους τρόπους που έρχονται σε επαφή, με τα πρώτα γραπτά μηνύματα να διαδίδονται το 1792 από τους αδερφούς Charpe με τον οπτικό τους σημαφόρο [1]. Βέβαια, η πρώτη πετυχημένη διάδοση με την χρήση ραδιοκυμάτων έγινε σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, το 1895, όταν ο Ιταλός εφευρέτης Γουλιέλμο Μαρκόνι κατάφερε να διαδώσει σήματα Μορς σε απόσταση 3.2 χιλιομέτρων [2]. Το γεγονός αυτό υπήρξε αφετηρία για την μοντέρνα έννοια των τηλεπικοινωνιών. Αν και όπως προαναφέρθηκε υπήρχαν τηλεγράφοι, είτε οπτικοί, είτε ηλεκτρικοί, υπήρχαν σημαντικοί περιορισμοί, όπως η εξάρτηση στις γραμμές μεταφοράς ως απαραίτητες υποδομές για ένα δίκτυο τηλεφωνίας. Με την ένταξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως εργαλείο στις τηλεπικοινωνίες ο όρος παίρνει την σημερινή του μορφή: μεταφορά πληροφοριών σε απόσταση με ηλεκτρική, ηλεκτρομαγνητική, ραδιοηλεκτρική, ή οπτική μέθοδο. Κατά τη διάρκεια του 20ου και 21ου αιώνα παρατηρήθηκε μια τεχνολογική "έκρηξη" σε όλους τους τομείς, αλλά κυρίως στις τηλεπικοινωνίες. Τα τηλέφωνα εξελίχθηκαν και έγιναν αναπόσπαστο μέλος της καθημερινότητας μαζί με το ραδιόφωνο, την τηλεόραση και τέλος το ίντερνετ [3].

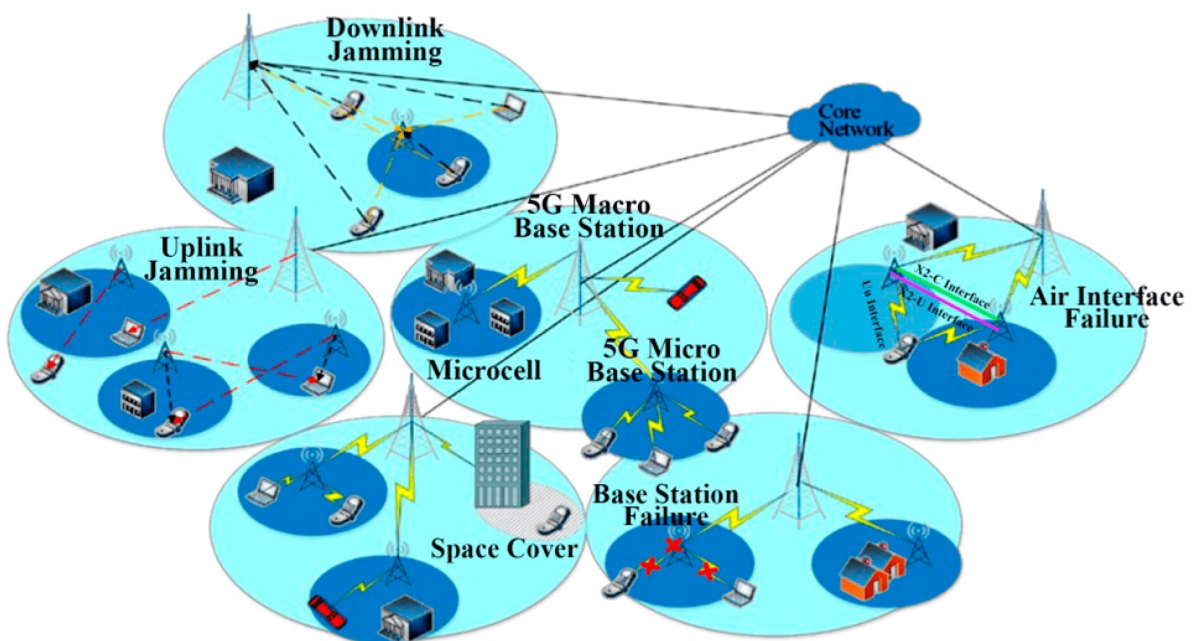


Σχήμα 1.1: Ο παγκόσμιος χάρτης των υποβρύχιων καλωδίων. [4]

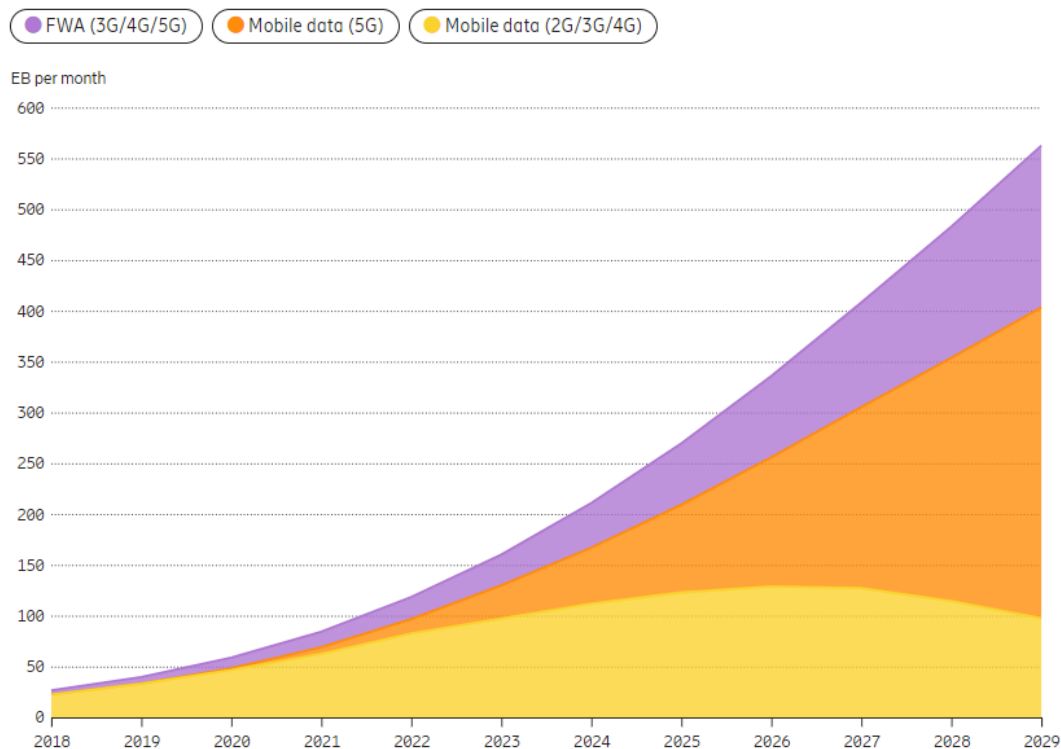
1.2 Συστήματα κινητών επικοινωνιών

Τα τελευταία 100 χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική εξέλιξη στην τηλεφωνία, με το πιο αξιοσημείωτο βήμα στον τομέα η εφεύρεση του κινητού τηλεφώνου. Η καθημερινότητα του σημερινού ανθρώπου, ανεξαιρέτως της γεωγραφικής τοποθεσίας του, της κουλτούρας του και της γλώσσας που μιλάει έχει μεταβληθεί ραγδαία από τις εμπειρίες που είχε ο μέσος άνθρωπος πριν την κινητή τηλεφωνία. Από το απλό κινητό τηλέφωνο μέχρι και τις έξυπνες συσκευές τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζονται από την πολυμορφία των μελών τους, αποτελούνται από διάφορων ειδών συσκευές οι οποίες συνολικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως εξοπλισμοί χρηστών (User Equipment). Μια πιο γενικευμένη μορφή των δικτύων κινητών επικοινωνιών είναι ο συνδυασμός των σταθμών βάσης με τον εξοπλισμό των χρηστών και το κεντρικό δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης αποτελούν τον κύριο φορέα της επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών του δικτύου και το κεντρικό δίκτυο/δίκτυο κορμού όπου μεταδίδουν και λαμβάνουν τα δεδομένα για μεταφορά από και προς τους τελικούς χρήστες και το κεντρικό δίκτυο. Οι εξοπλισμοί χρηστών είναι, όπως προαναφέρθηκε, όλοι οι τελικοί χρήστες/τελικές συσκευές που μπορούν να υφίστανται σε ένα δίκτυο κινητών επικοινωνιών. Το δίκτυο κορμού αποτελεί τον πυρήνα του δικτύου όπου θα συνδέσει τελικώς όλους τους χρήστες μίας ευρύτερης περιοχής μεταξύ τους.

Η πιο ευρέως διαδεδομένη αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος είναι τα κυψελωτά δίκτυα (1.2), χρησιμοποιώντας ασύρματες συνδέσεις υψηλής ισχύος και ευρείας κάλυψης μέσω των σταθμών βάσης, που σχηματίζουν κυψέλες, εξυπηρετούν πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα. Με κάθε τελευταία γενιά κινητών επικοινωνιών εφαρμόζονται καινούριες τεχνικές και τεχνολογίες για την βελτίωση της κάλυψης, της ταχύτητας και της γενικότερης απόδοσης του δικτύου έτσι ώστε να παρέχονται όλο και περισσότερες υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες.



Σχήμα 1.2: Μέση αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου 5ης γενιάς. [5]



Σχήμα 1.3: Η παγκόσμια πιθανή αύξηση του όγκου πληροφορίας εντός αυτής της δεκαετίας στις κινητές συσκευές. [6]

1.3 Εξέλιξη ασύρματων δικτύων

Με την εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει επιτευχθεί ευρύτερη κάλυψη σε πολλαπλά σημεία του πλανήτη. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες προσφέρουν ταχύτητα, αξιοπιστία και ασφάλεια κατά την μεταφορά των δεδομένων, ως αποτέλεσμα ο όγκος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από κάθε έξυπνη συσκευή προβλέπεται να ανελιχτεί από τα 21GB το 2023 έως τα 56GB το 2029. Επιπλέον η ολική κίνηση των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, εξαιρώντας τα δεδομένα που παράχθηκαν από τα FWA (Fixed Wireless Access), ανέρχονται στα 130EB μηνιαία μέχρι το τέλος του 2023 και πιθανολογείται ότι θα ανελιχτούν στα 403EB τον μήνα μέχρι το 2029 (σχήμα 1.3).

1.3.1 Δίκτυα Μηδενικής Μέχρι Τέταρτης Γενιάς (0G - 4G)

Πριν ακόμα και από την πρώτη γενιά των κινητών δικτύων υπήρξε ευρεία χρήση ασύρματων επικοινωνιών στα αστυνομικά οχήματα και τα ταξί των ΗΠΑ. Το 1933 το αστυνομικό τμήμα Bayonne του New Jersey ήταν το πρώτο που χρησιμοποίησε αμφίδρομο ασύρματο με διαμόρφωση AM [7]. Αυτά αποτέλεσαν την μηδενική γενιά (0G) κινητών επικοινωνιών ή αλλιώς προ-κυβελωτά συστήματα.

Η πρώτη γενιά κινητών δικτύων με εμπορική εφαρμογή έκανε την εμφάνισή της στο Τόκιο το 1979 από την Nippon Telephone and Telegraph company (NTT), με το πρώτο μοντέλο κινητού τηλεφώνου το TZ-801 [8]. Με την τεχνολογία AMPS (Advanced Mobile Phone System) η επικοινωνία μεταξύ των κινητών τηλεφώνων και των σταθμών βάσης επιτυγχάνονταν μέσω αναλογικών σημάτων [9]. Η διαμόρφωση του φέροντος κύματος ήταν διαμόρφωση συχνότητας FM (Frequency Modulation) και χρησιμοποιούσε FDMA (Frequency Division Multiple Access) για πολλαπλή πρόσβαση χρηστών στο δίκτυο. Στο FDMA

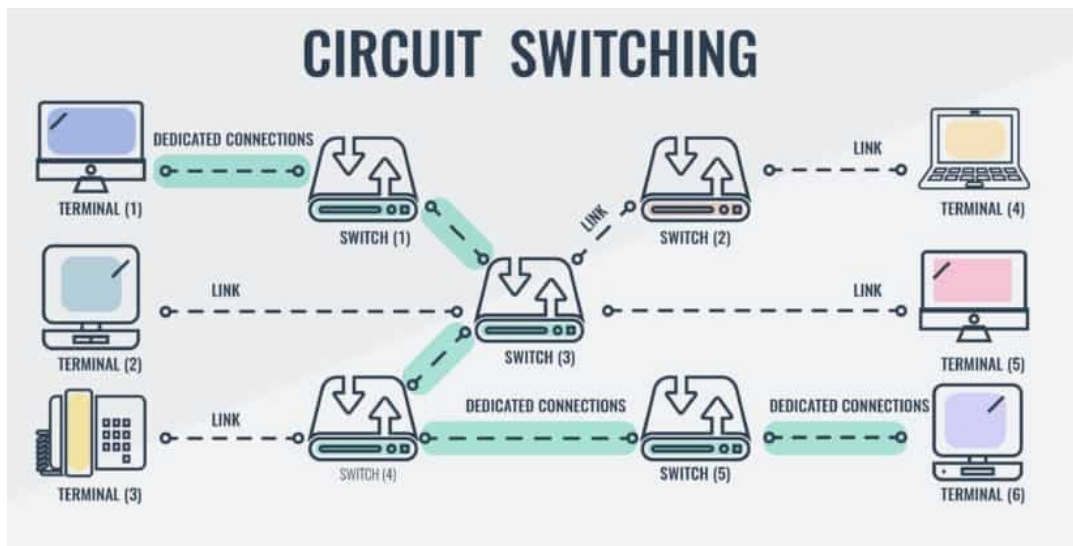
ένας μόνο χρήστης καταλαμβάνει ένα μόνο κανάλι ενώ η κλήση είναι σε εξέλιξη, και το ένα κανάλι είναι στην πραγματικότητα δύο κανάλια simplex τα οποία είναι διπλής συχνότητας (duplexed) με διαχωρισμό 45 MHz. Λειτουργούσε στο εύρος ζώνης συχνοτήτων 800 MHz και 900 MHz, κάθε κανάλι είχε έως 30 KHz εύρος ζώνης και πρόσφερε ταχύτητα 2.4 kbps ενώ ήταν δυνατή η μετάδοση μόνο φωνητικών σημάτων.

Το 1991, η Radiolinja εισήγαγε για πρώτη φορά το 2G στη Φινλανδία, με την ονομασία GSM (Global System for Mobile communication) [10]. Το 2G σε αντίθεση με τον προκάτοχο του, χρησιμοποιούσε ψηφιακές διαμορφώσεις για την μετάδοση σημάτων, με ονομαστικές ταχύτητες που έφταναν μέχρι και τα 64 kbps, επαρκείς για την αποστολή SMS και e-mail. Επιπρόσθετα του FDMA για την πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιούσε και την τεχνική TDMA (Time Division Multiple Access). Η κομβική διαφορά του TDMA σε σχέση με το FDMA είναι η μετάδοση σε πολλαπλούς χρήστες στην ίδια συχνότητα, απλώς σε άλλη χρονική στιγμή (time slots) επιτρέποντας ένα χρονικό περιθώριο ανάμεσα σε διαδοχικές μεταδόσεις. Έγινε χρήση της τεχνικής διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplex) για λόγους πολυπλεξίας και κάθε κανάλι είχε εύρος ζώνης 200 kHz. Το 2G αναβαθμίστηκε σε τρεις βελτιωμένες εκδοχές με την πρώτη να είναι το 2.5G, γνωστό ως GPRS (General Packet Radio Service), με μέγιστη ταχύτητα 171.2 kbps, το 2.75G, γνωστό ως EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), με μέγιστη ταχύτητα 384 kbps και τέλος το 2.9G (σε αρκετές βιβλιογραφίες αναφέρεται ως τεχνολογία 3G) γνωστό ως CDMA2000 1X (IS-2000) με θεωρητικές ταχύτητες 153.6 kbps οι οποίες άγγιζαν τα 2.4 mbps με την εξέλιξη του σε CDMA2000 1xEV-DO (τεχνολογία 3G) [11] [12] [13].

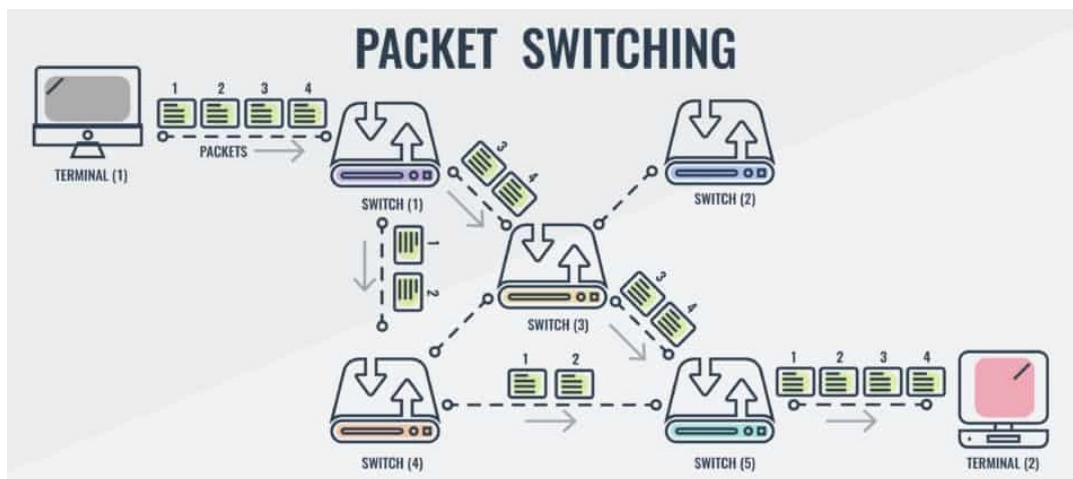
Η σημαντική αλλαγή που έφερε η δεύτερη γενιά κινητών δικτύων είναι ότι μεταβήκαμε από την μεταγωγή κυκλώματος (circuit switching) (1.4) στην μεταγωγή πακέτου (packet switching) (1.5), η οποία επιτρέπει τη γρήγορη βελτίωση της απόδοσης των κινητών δικτύων. Στην μεταγωγή κυκλώματος, το δίκτυο δεσμεύεται εξ ολοκλήρου για την αποκλειστική σύνδεση δύο χρηστών (αναλογική μετάδοση της φωνής) με πλεονέκτημα την χαμηλή καθυστέρηση και το σταθερό εύρος ζώνης, όμως εμποδίζοντας τη χρήση του από άλλους χρήστες, παραμένοντας κατειλημμένο όσο διαρκεί η επικοινωνία. Αντίθετα, στην μεταγωγή πακέτου, η μεταφορά δεδομένων γίνεται εξ ολοκλήρου στο λογικό επίπεδο έτσι ώστε το ίδιο δίκτυο να έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται από πολλούς χρήστες, με τον καθένα να καταλαμβάνει μέρος του συνολικού εύρους ζώνης (ψηφιακή μετάδοση της φωνής), χάρη στην πακετοποίηση, η οποία επιτρέπει την μετατροπή της αναλογικής φωνής σε μικρότερα ψηφιακά κομμάτια, γνωστά ως πακέτα [14].

Το 2001 παρουσιάστηκε η τρίτη γενιά κινητών δικτύων, το 3G, γνωστό ως UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [16]. Με μέγιστη θεωρητική ταχύτητα τα 2 Mbps, επέτρεψε για πρώτη φορά την περιήγηση στο διαδίκτυο, διατηρώντας παράλληλα όλα τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων γενιών. Για πολλαπλή πρόσβαση, χρησιμοποιούσε την ευρυζωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα W-CDMA (Wideband-Code Division Multiple Access), με το εύρος του καναλιού να φτάνει τα 5 MHz [17]. Η διαφορά του W-CDMA από το FDMA και το TDMA είναι ότι λειτουργεί στην ίδια συχνότητα και στον ίδιο χρόνο, αλλά τα σήματα διακρίνονται μέσω κωδίκων και εν προκειμένω σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το κλασικό CDMA (2 MHz bandwidth).

Στα τέλη της δεκαετίας του 2000, εμφανίστηκαν δύο νέες εκδοχές του 3G: το 3.5G με την ονομασία HSPA (High Speed Packet Access) και το HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access) [18]. Το HSPA



Σχήμα 1.4: Το σύστημα μεταγωγής κυκλώματος. [15]



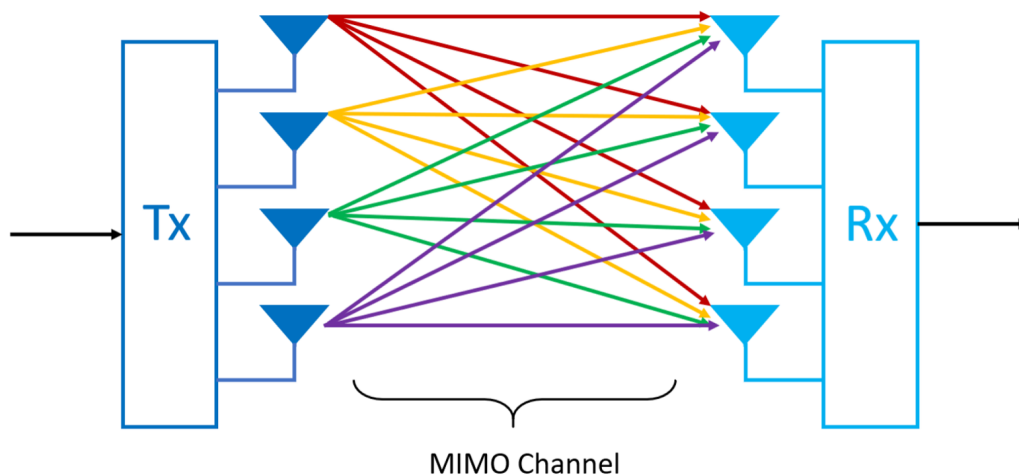
Σχήμα 1.5: Το σύστημα μεταγωγής πακέτου. [15]

είχε μέγιστη ταχύτητα 14 Mbps και παρουσίαζε σημαντικές βελτιώσεις στην ασύρματη διεπαφή. Το HSPA+ ήταν η ουσιαστική αναβάθμιση για την πλοήγηση στο διαδίκτυο, το οποίο, εκτός από τη μέγιστη ταχύτητα των 42 Mbps, εισήγαγε την τάξη διαμόρφωσης 64QAM αντί για 16QAM, αυξάνοντας τον ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας κατά 50%. Τέλος, εισήχθηκε η τεχνολογία MIMO (Multiple Input-Multiple Output), και χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κανάλια των 5 MHz, αυξάνοντας το συνολικό εύρος ζώνης από 5 MHz σε 20 MHz [19].

Η τεχνολογία MIMO (1.6), δίνει τη δυνατότητα σε κάθε συσκευή να μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, επιτρέποντας την αποστολή και λήψη πολλαπλών ροών σημάτων ταυτόχρονα, αυξάνοντας έτσι τη δυνατότητα σύνδεσης με περισσότερες συσκευές. Αυτή η σημαντική τεχνολογία έχει αντιμετωπιστεί πολύ θετικά από την επιστημονική κοινότητα λόγω των βασικών της πλεονεκτημάτων, και για αυτό έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια.

Η τεχνολογία MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τρία διαφορετικά σενάρια:

- Χώρο-χρονική κωδικοποίηση (Space-Time Coding): Στις μεθόδους χωρικής πολυπλεξίας ή ποικιλομορφίας, μεταδίδεται μια μοναδική ροή (σε αντίθεση με τις πολλαπλές ροές της χωρικής πολυπλεξίας), αλλά το σήμα κωδικοποιείται με τεχνικές που ονομάζονται κωδικοποίηση χώρου-χρόνου. Το σήμα εκπέμπεται από κάθε κεραία εκπομπής με πλήρη ή σχεδόν ορθογώνια κωδικοποίηση. Η κωδικοποίηση ποικιλομορφίας αξιοποιεί την ανεξάρτητη εξασθένιση στα ζεύγη πολλαπλών κεραιών για να ενισχύσει την ποικιλομορφία του σήματος. Επειδή δεν υπάρχει γνώση του καναλιού, δεν επιτυγχάνεται κέρδος διαμόρφωσης δέσμης ή συστοιχίας μέσω της κωδικοποίησης ποικιλομορφίας.
- Χωρική πολυπλεξία (Spatial Multiplexing): Στη χωρική πολυπλεξία, ένα σήμα υψηλής ταχύτητας διαχωρίζεται σε πολλές ροές χαμηλότερης ταχύτητας, με κάθε ροή να μεταδίδεται από διαφορετική κεραία εκπομπής στο ίδιο συχνοτικό κανάλι. Εάν αυτά τα σήματα φτάσουν στις κεραίες του δέκτη με επαρκώς διαφορετικές χωρικές υπογραφές και ο δέκτης διαθέτει ακριβή πληροφορία κατάστασης καναλιού (CSI), μπορεί να διαχωρίσει αυτές τις ροές σε σχεδόν παράλληλα κανάλια. Η χωρική πολυπλεξία είναι πολύ αποτελεσματική για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού σε υψηλές αναλογίες σήματος προς θόρυβο (SNR). Ο μέγιστος αριθμός χωρικών ροών περιορίζεται από το μικρότερο αριθμό κεραιών είτε στον πομπό είτε στο δέκτη.
- Προκωδικοποίηση (Pre-coding): Η προκωδικοποίηση είναι μια τεχνική που αξιοποιεί την εκπομπή με διαφοροποίηση μέσω της στάθμισης της ροής πληροφοριών. Αυτό σημαίνει ότι ο πομπός αποστέλλει κωδικοποιημένες πληροφορίες στον δέκτη, επιτρέποντας την εκ των προτέρων γνώση του καναλιού. Ο δέκτης λειτουργεί ως ένας απλός ανιχνευτής, όπως ένα προσαρμοσμένο φίλτρο, και δεν χρειάζεται να έχει πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού. Αυτή η τεχνική συμβάλλει στη μείωση της αλλοίωσης που προκαλεί το κανάλι επικοινωνίας.



Σχήμα 1.6: Η απεικόνιση της λειτουργίας του MIMO. [20]

Το 2009, στη Σκανδιναβία, παρουσιάστηκε το 4G με την ονομασία LTE (Long Term Evolution). Αυτή η τεχνολογία προσέφερε ταχύτητες έως και 100 Mbps στην καθοδική ζεύξη [21]. Μία από τις σημαντικές βελτιώσεις ήταν η μείωση της καθυστέρησης, επιτρέποντας νέες υπηρεσίες για κινητές συσκευές, όπως η παρακολούθηση βίντεο και ζωντανών μεταδόσεων χωρίς διακοπές. Όπως στο 3G, έτσι και στο 4G,

χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές MIMO με δύο κεραιές στον πομπό και τον δέκτη, ενώ η κινητικότητα των χρηστών βελτιώθηκε, με ταχύτητες μέχρι και 350 χλμ/ώρα και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ταχύτητες έως και 500 χλμ/ώρα [22] [23]. Ακόμα και όταν ο εξοπλισμός χρήστη ήταν σε κατάσταση αδράνειας και δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός της από τους σταθμούς βάσης (eNode-Bs) κατά την μετακίνηση της συσκευής μεταξύ των κυψελών, η Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας (MME) αναλάμβανε να εντοπίσει την συσκευή γνωρίζοντας την τελευταία γνωστή τοποθεσία της και με την βοήθεια των εγγύτερων σταθμών βάσης [24]. Το 4G χρησιμοποίησε την τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) για πολλαπλή πρόσβαση, βελτιώνοντας την φασματική αποδοτικότητα και τη διαχείριση του εύρους ζώνης [25]. Σημαντική ήταν επίσης η εφαρμογή της ποιότητας υπηρεσίας QoS (Quality of Service), επιτρέποντας την προτεραιότητα των πακέτων δεδομένων βάσει της σημαντικότητάς τους. Το 2013, έγινε διαθέσιμο για τον μέσο καταναλωτή το 4G+ ή LTE+ (LTE Advanced), το οποίο παρείχε ταχύτητες έως και 1 Gbps στην καθοδική ζεύξη και ακόμη καλύτερους χρόνους απόκρισης. Το σύστημα MIMO αναβαθμίστηκε για να υποστηρίζει έως και 8 κεραιές, επιτρέποντας υψηλότερους ρυθμούς πληροφορίας και πιο προχωρημένες τάξεις διαμόρφωσης, όπως η 256QAM.

1.3.2 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς 5G

Η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, γνωστή ως 5G, ξεκίνησε να εφαρμόζεται εμπορικά σε παγκόσμια κλίμακα το 2019, με την πρώτη εμφάνισή της στην Ελλάδα να γίνεται το 2018 στην πόλη των Τρικάλων [26]. Η τεχνολογία 5G αποτελεί εξέλιξη των προηγούμενων γενιών ασύρματων δικτύων, προσφέροντας υπερυψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, υψηλή ευαισθησία στη συνδεσιμότητα και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Αυτά τα χαρακτηριστικά του 5G ανοίγουν νέες δυνατότητες, όπως οι επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως οι έξυπνες πόλεις και τα αυτόνομα οχήματα. Ωστόσο, η επιτυχία της τεχνολογίας 5G συνεπάγεται την αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η ασφάλεια των δεδομένων, η διαχείριση μεγάλου όγκου πληροφορίας και η βιωσιμότητα του δικτύου. Στο διάγραμμα φαίνεται η συνεχής εξέλιξη του 5G, το οποίο αναμένεται να αποτελεί την κύρια γενιά ασύρματων δικτύων μέχρι το 2030, με τουλάχιστον 5 δισεκατομμύρια συνδέσεις και καλύπτοντας πάνω από το 50% των συνολικών συνδέσεων παγκοσμίως (σχήμα 1.7).

Σύμφωνα με την ITU-R, το 5G προβλέπει τρία κύρια σενάρια χρήσης (σχήμα 1.8) [27]. Το πρώτο σενάριο αφορά τη βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση για κινητές συσκευές (enhanced Mobile Broadband - eMBB) [28]. Αυτό σημαίνει ότι τα δίκτυα 5G θα προσφέρουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και βελτιωμένη χωρητικότητα σε σχέση με τα προηγούμενα δίκτυα όπως το 4G, επιτρέποντας στους χρήστες να απολαμβάνουν καλύτερες εμπειρίες σε εφαρμογές κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης με γρηγορότερη αποστολή και λήψη δεδομένων.

Το δεύτερο σενάριο αφορά τις εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες με χαμηλές καθυστερήσεις (Ultra-reliable and low latency communications - URLLC) [29]. Εδώ, το επίκεντρο είναι οι εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστες υπηρεσίες με συνεχές και προβλέψιμο επίπεδο απόδοσης, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές που χρειάζονται στιγμιαίους χρόνους απόκρισης και ελάχιστη καθυστέρηση.

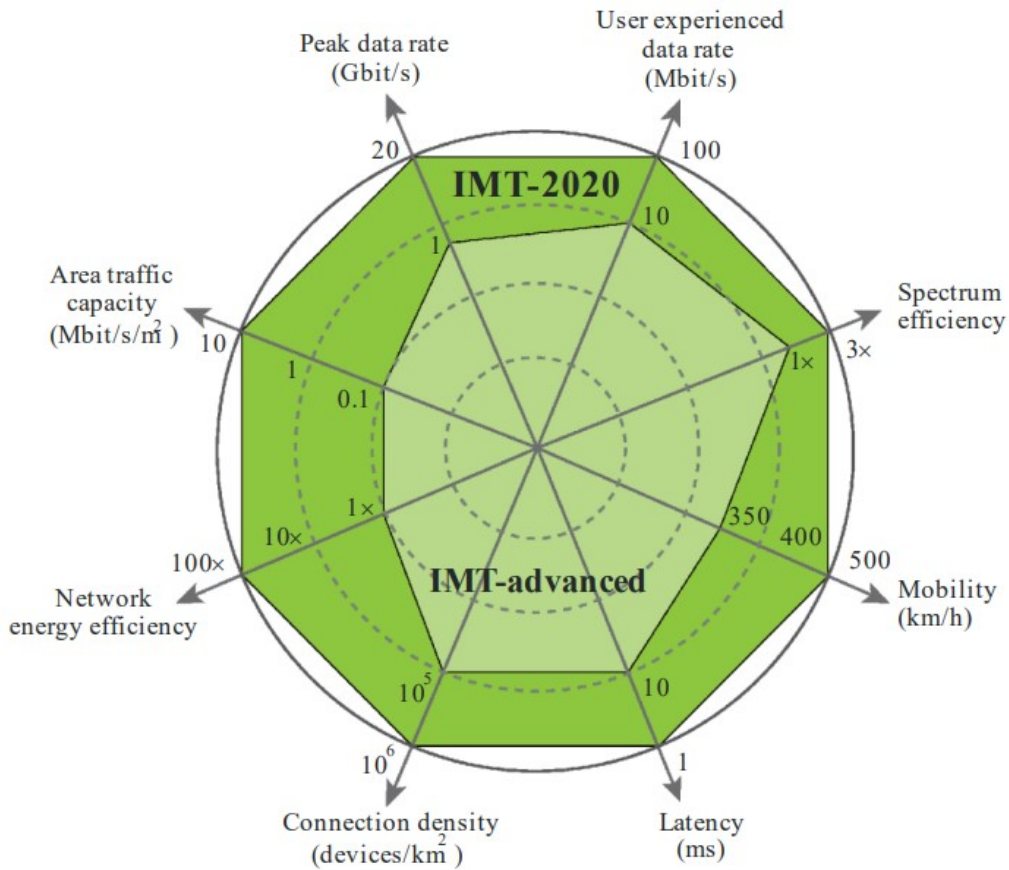
Το τρίτο σενάριο σχετίζεται με τις μαζικές επικοινωνίες μεταξύ συσκευών (Massive machine type communications - mMTC) [30]. Αυτή η περίπτωση στοχεύει στη σύνδεση ενός τεράστιου αριθμού χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους συσκευών IoT. Το mMTC είναι σχεδιασμένο για να υποστηρίζει εφαρ-

| | 1G | 2G | 3G | 4G | 5G | 6G |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Χρονολογία | 1980s | 1990s | 2000s | 2010s | 2020s | 2030s |
| Προδιαγραφές | AMPS, NMT, TACS | GSM, GPRS, EDGE | UMTS, HSPA, HSPA+ | LTE, LTE+ | NR | N/A |
| Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης | FDMA | TDMA, CDMA | W-CDMA | OFDMA, SC-FDMA | OFDMA | NOMA, OTFS |
| Μέθοδοι Πολυπλεξίας | FDD | FDD | FDD,TDD | FDD,TDD | FDD,TDD | N/A |
| Τεχνικές Μεταγωγής | CS | CS, PS | CS, PS | PS | PS | PS |
| Μέγιστη Ρυθμαπόδοση | 2.4 Kbps | 384 Kbps | 30, 84, 168 Mbps | 1 Gbps | 20 Gbps | 1 Tbps |
| Μέγιστη Ρυθμαπόδοση Χρήστη | N/A | N/A | N/A | up to 90 Mbps | up to 100 Mbps | up to 1 Gbps |
| Συχνότητα | 800-900 MHz | 850-1900 MHz | 1.6-2.5 GHz | 2-8 GHz | 3-300 GHz | THz Bands |
| Εύρος Ζώνης Καναλιού | 30 KHz | 200 KHz | 5 MHz | 20, 40, 100 MHz | 400 MHz, 1 GHz | N/A |
| Κωδικοποίηση | N/A | GMSK, 8PSK | 8PSK, 16QAM, 64QAM | up to 256 QAM | up to 256 QAM | up to 1024 QAM |
| MIMO | N/A | N/A | 2x2 | 8x8 | N/A | N/A |
| Υποστήριξη Μέγιστης Ταχύτητας Χρήστη | N/A | N/A | N/A | 350 km/h | 500 km/h | 1000 km/h |
| E2E Καθυστέρηση | N/A | N/A | N/A | 50 ms | 1 ms | <<1ms |
| Αξιοπιστία | N/A | N/A | N/A | 99.99 % | 99.999 % | 99.99999 % |

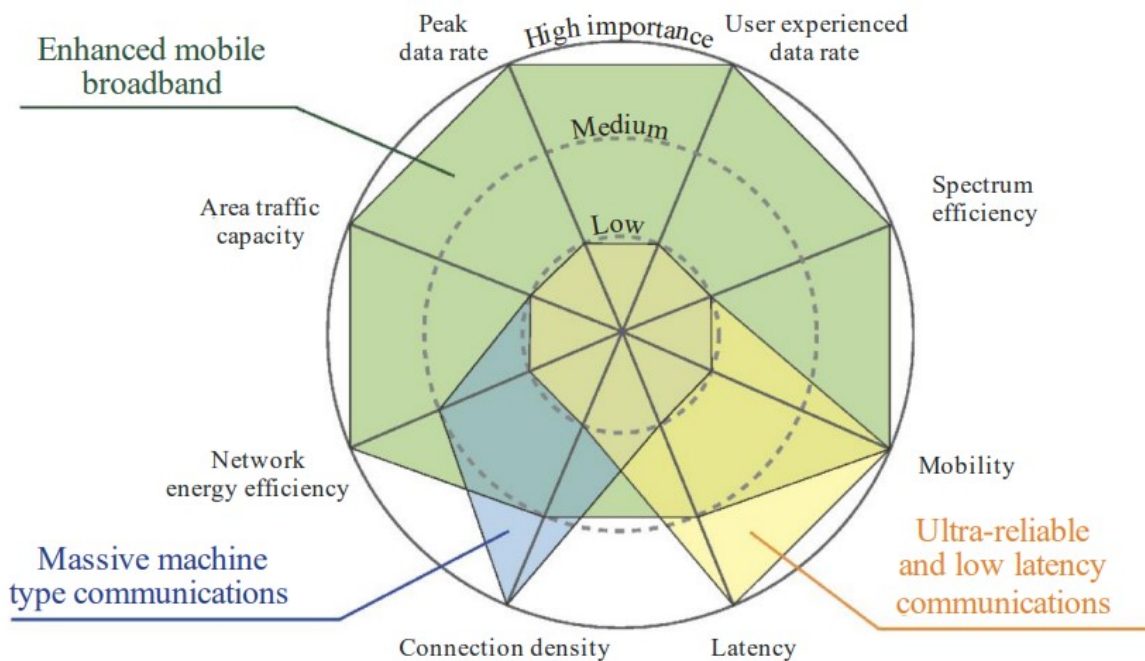
Πίνακας 1.1: Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

μογές όπως έξυπνες πόλεις, έξυπνη γεωργία και περιβαλλοντική παρακολούθηση, προσφέροντας μια επεκτάσιμη και αποδοτική λύση για τη συλλογή δεδομένων από πολλές πηγές, επιτρέποντας εφαρμογές όπως η προγνωστική συντήρηση και η βελτιστοποίηση των υποδομών.

Σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές (1.7), το 5G προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις και αλλαγές στη λειτουργία του (1.8). Μία από αυτές τις αλλαγές είναι η χρήση υψηλών συχνοτήτων, όπως τα κύματα



Σχήμα 1.7: Τα KPIs του 5G σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά, το 4G. [27]



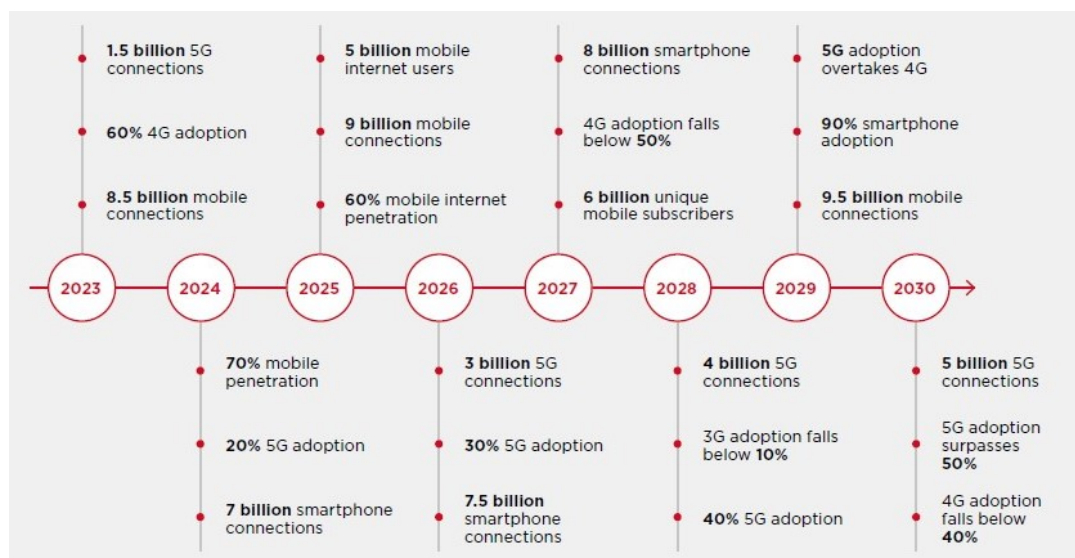
Σχήμα 1.8: Τα τρία κύρια σενάρια χρήσης του 5G σε συνάρτηση με τις προδιαγραφές του. [27]

χιλιοστόμετρο (mmWave) στην περιοχή 30-300 GHz, με δυνατότητα φάσματος έως και 1 GHz ανά φορέα [31]. Οι υψηλότερες συχνότητες επιτρέπουν την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων, αλλά εις βάρος

της διαπεραστικότητας του σήματος και της ανθεκτικότητας στις καιρικές συνθήκες. Το σήμα επηρεάζεται περισσότερο από εμπόδια όπως δέντρα ή τοίχους και οι ατμοσφαιρικές απώλειες αυξάνονται.

Μια άλλη σημαντική καινοτομία του 5G είναι η μαζική χρήση κεραιών στο πομπό και τον δέκτη (massive MIMO) [32]. Η τεχνολογία massive MIMO απαιτεί τη χρήση από 96 έως 128 κεραιές σε έναν σταθμό βάσης για εκπομπή και λήψη. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τεχνολογία αυτή ξεκίνησε από το 3G, προσφέροντας αρχικά τη δυνατότητα για έως και 2 κεραιές στον πομπό και τον δέκτη. Η αύξηση των κεραιών είναι δυνατή λόγω του μικρότερου μεγέθους τους στις υψηλότερες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στο 5G (1.9).

Για να αντισταθμιστούν οι απώλειες των υψηλότερων συχνοτήτων, αναμένεται η πολλαπλασιασμός των σταθμών βάσης μικρότερης εμβέλειας, γνωστοί και ως small cells (SCs) [33]. Αυτό είναι ιδιαίτερα αναγκαίο στις αστικές περιοχές, όπου η πυκνότητα του πληθυσμού και η ζήτηση για δεδομένα είναι υψηλότερες. Η ανάπτυξη των small cells θα επιτρέψει καλύτερη κατανομή του φόρτου εργασίας μεταξύ των σταθμών βάσης, διατηρώντας τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε φυσιολογικά επίπεδα.



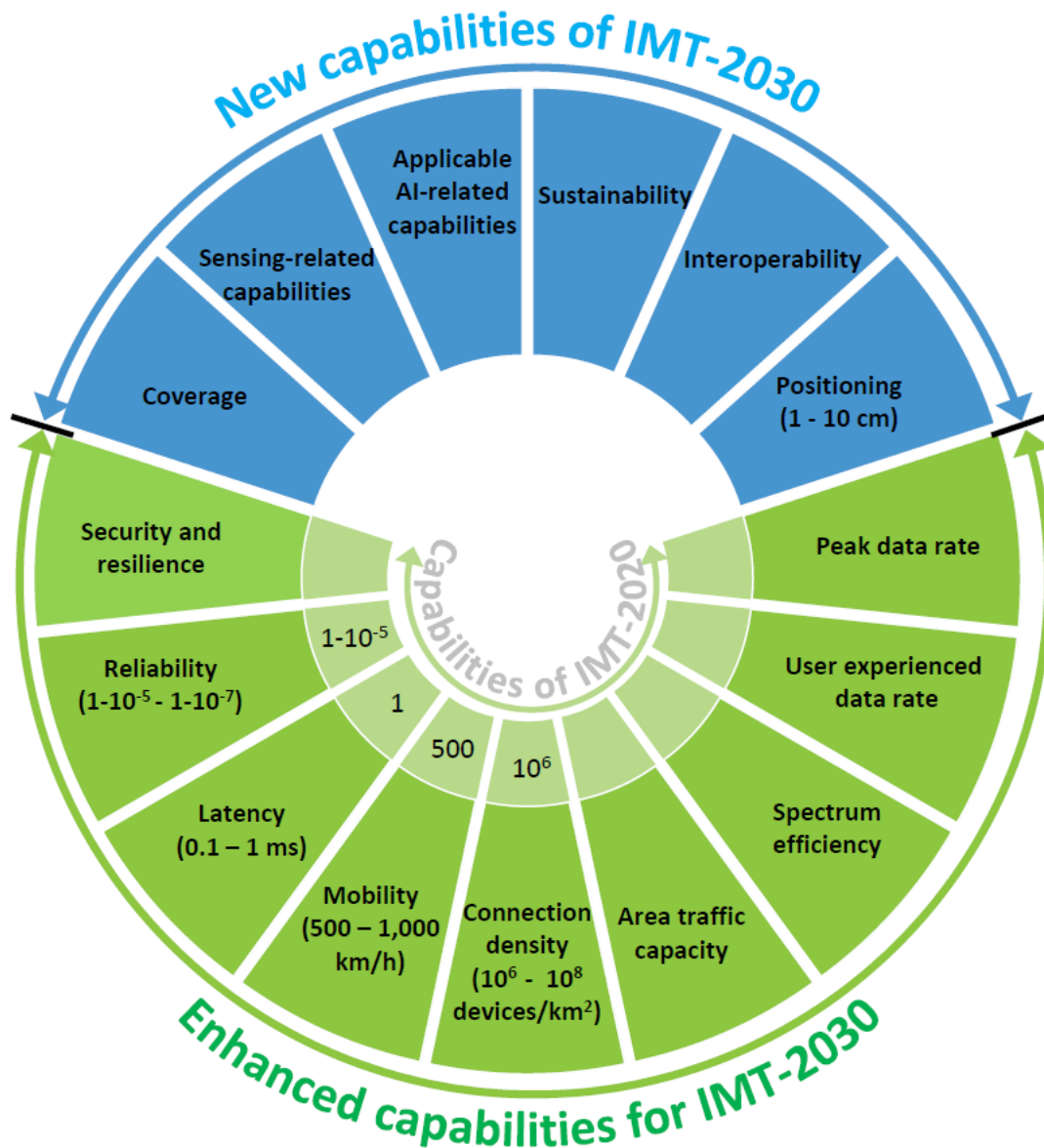
Σχήμα 1.9: Η πορεία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από το 2023 και αργότερα. [34]

1.4 Δίκτυα Έκτης Γενιάς 6G

Παρόλο που η υλοποίηση των δικτύων 6ης γενιάς (6G) αναμένεται να πραγματοποιηθεί μετά το 2030, οι έρευνες σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν ήδη ξεκινήσει [35]. Το 6G υπόσχεται να φέρει σημαντικές αλλαγές και νέες δυνατότητες, ενθαρρύνοντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών (1.10). Μερικοί από τους στόχους του 6G περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση της εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας στην καθημερινή ζωή χωρίς καθυστερήσεις, την αναβάθμιση της απομακρυσμένης επικοινωνίας μέσω ολογραμμάτων, και τη μετατροπή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) σε ένα μαζικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Massive IoT) ή Διαδίκτυο των Πάντων (Internet of Everything - IoE). Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του 6G είναι η συνδυασμένη χρήση επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δικτύων [36]. Αυτή η προσέγγιση θα παρέχει καλύτερη υποστήριξη στους υπάρχοντες επίγειους σταθμούς βάσης σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, δημιουργώντας ένα αξιόπιστο μη επίγειο backhaul δίκτυο [37]. Επιπλέον, θα προσφέρει παγκόσμια κάλυψη, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων ή α-

γροτικών περιοχών που δεν έχουν αξιόπιστες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, και θα βελτιώσει σημαντικά τις θαλάσσιες επικοινωνίες.

Συνολικά, το 6G αναμένεται να υπερβεί κατά πολύ τις δυνατότητες των προηγούμενων γενιών, υποστηρίζοντας νέες τεχνολογίες και υπηρεσίες, και συμβάλλοντας στην εξέλιξη και βελτίωση της καθημερινής μας ζωής.



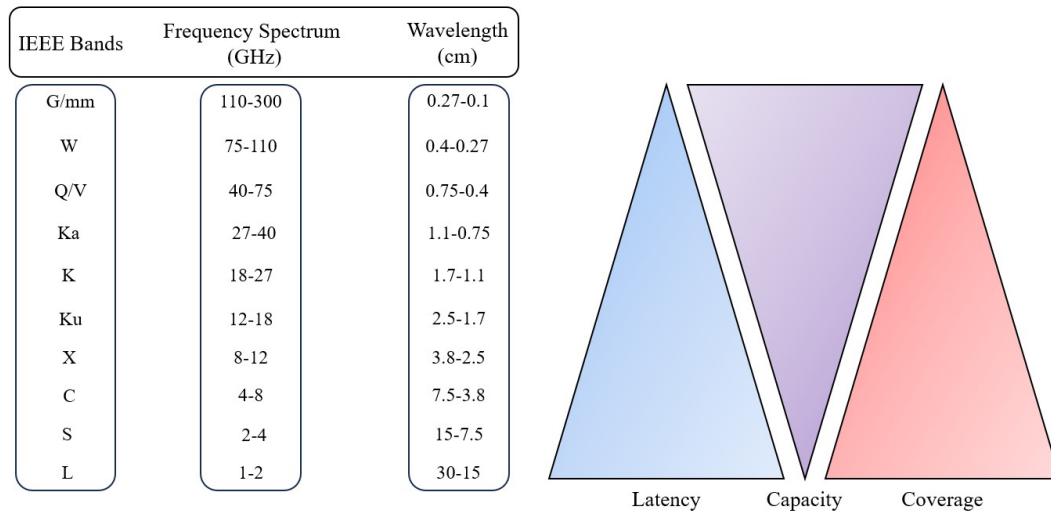
Σχήμα 1.10: Οι δυνατότητες του 6G. [38]

Οι προδιαγραφές του 6G, με βάση το IMT-2030, θα ξεπερνάνε κατά πολύ τις προηγούμενες γενιές κινητών επικοινωνιών (1.11). Οι δυνατότητες θα είναι οι εξής:

- Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων θα αυξηθεί από 50 Gbit/s έως και 200 Gbit/s, πιθανώς και περισσότερο, αναλόγως των απαιτήσεων των χρηστών και των συσκευών τους.
- Ο ρυθμός δεδομένων που βιώνει ο χρήστης στο πεδίο θα κυμαίνεται από 300 Mbit/s έως και 500 Mbit/s.

- Ο συνολικός ρυθμός κυκλοφορίας δεδομένων που εξυπηρετείται ανά γεωγραφική περιοχή θα φέρει τιμές μεταξύ των 30Mbit/s/m^2 .
- Ο ερευνητικός στόχος της πυκνότητας σύνδεσης θα μπορούσε να είναι $10^6 - 10^8/\text{km}^2$.
- Ο συνολικός αριθμός συνδεδεμένων ή/και προσβάσιμων συσκευών ανά μονάδα επιφάνειας θα μπορούσε να είναι $10^6 - 10^8/\text{km}^2$.
- Η μέγιστη ταχύτητα, με την οποία μπορεί να επιτευχθεί καθορισμένο QoS και απρόσκοπτη μεταφορά μεταξύ ραδιοκόμβων που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά στρώματα ή/και τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (multi-layer/multi-RAT) και η κινητικότητα θα μπορούσε να είναι 500 - 1000 km/h.
- Η καθυστέρηση (μέσω αέρα) μπορεί να είναι 0,1 - 1 ms.
- Η αξιοπιστία (μέσω αέρα) μπορεί να κυμαίνεται από $1 - 10^{-5}$ έως $1 - 10^{-7}$.
- Η κάλυψη αναφέρεται στην ικανότητα παροχής πρόσβασης σε υπηρεσίες επικοινωνίας για τους χρήστες σε μια επιθυμητή περιοχή εξυπηρέτησης. Στο πλαίσιο αυτής της δυνατότητας, η κάλυψη ορίζεται ως η απόσταση άκρου κυψέλης μιας μεμονωμένης κυψέλης μέσω ανάλυσης του προϋπολογισμού σύνδεσης.
- Η ακρίβεια εντοπισμού μπορεί να είναι 1 - 10 cm.
- Οι ικανότητες που σχετίζονται με την ανίχνευση αναφέρονται στην ικανότητα παροχής λειτουργιών στη ραδιοδιεπαφή, συμπεριλαμβανομένης της εκτίμησης εμβέλειας/ταχύτητας/γωνίας, της ανίχνευσης αντικειμένων, του εντοπισμού, της απεικόνισης, της χαρτογράφησης κ.λπ. Οι δυνατότητες αυτές μπορούν να μετρηθούν με βάση την ακρίβεια, την ανάλυση, το ποσοστό ανίχνευσης, το ποσοστό ψευδών συναγεργμών κ.λπ.
- Οι εφαρμοστέες ικανότητες που σχετίζονται με την TN αναφέρονται στην ικανότητα παροχής ορισμένων λειτουργιών σε όλο το IMT-2030 για την υποστήριξη εφαρμογών με TN. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων, κατανεμημένη μάθηση, υπολογισμό TN, εκτέλεση μοντέλων TN και εξαγωγή συμπερασμάτων από μοντέλα TN, κ.λπ.
- Η ασφάλεια αναφέρεται στη διατήρηση της εμπιστευτικότητας, της ακεραιότητας και της διαθεσιμότητας των πληροφοριών και η ανθεκτικότητα αναφέρεται στις ικανότητες των δικτύων και των συστημάτων να συνεχίσουν να λειτουργούν σωστά κατά τη διάρκεια και μετά από μια φυσική ή ανθρωπογενή διαταραχή.
- Η βιωσιμότητα, ή πιο συγκεκριμένα η περιβαλλοντική βιωσιμότητα, αναφέρεται στην ικανότητα τόσο του δικτύου όσο και των συσκευών να ελαχιστοποιούν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, ενώ η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι μια μετρήσιμη μετρική της βιωσιμότητας. Αναφέρεται στην ποσότητα των bits πληροφορίας που μεταδίδονται ή λαμβάνονται, ανά μονάδα κατανάλωσης ενέργειας (σε bit/Joule). Η ενεργειακή απόδοση αναμένεται να βελτιωθεί κατάλληλα με την αύξηση της χωρητικότητας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας.

- Η διαλειτουργικότητα αναφέρεται στη ραδιοδιεπαφή που βασίζεται στη συμμετοχικότητα και τη διαφάνεια, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία (ή οι λειτουργίες) μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων του συστήματος.



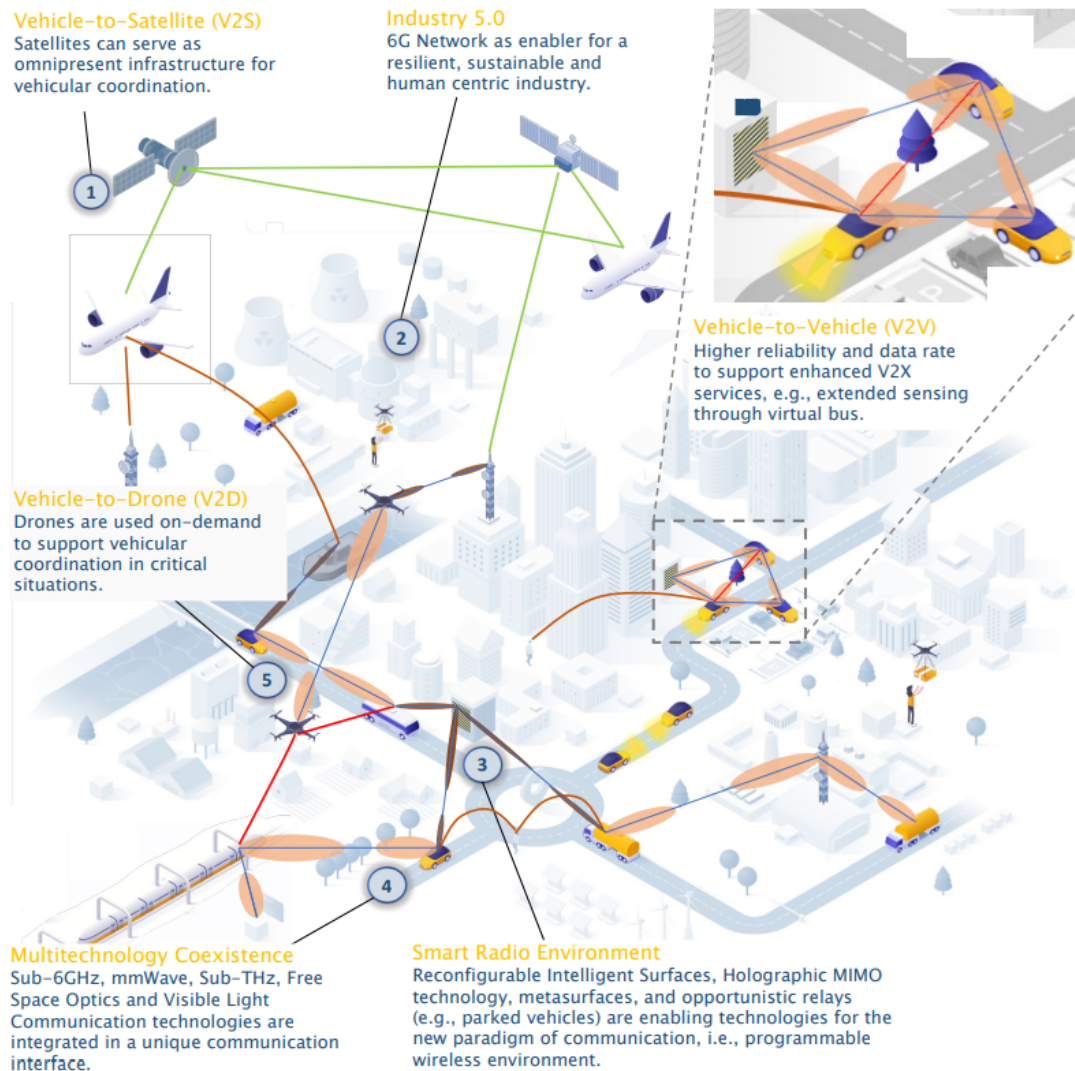
Σχήμα 1.11: Οι μεταβολές στην καθυστέρηση, στην χωρητικότητα και στην κάλυψη συναρτήσει της αύξησης της συχνότητας.

1.4.1 Πιθανές Υπηρεσίες 6ης

Η επικοινωνία μέσω ολογραμμάτων είναι μια από τις σύγχρονες τεχνολογίες που απαιτεί εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και ελάχιστες χρονοκαθυστερήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ολόγραμμα αποτελείται από πολλαπλές τρισδιάστατες εικόνες που συνδυάζονται για να δημιουργήσουν μια πλήρη τρισδιάστατη εικόνα, όπως αυτή ενός ανθρώπου. Για την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, οι αλλαγές στην εικόνα πρέπει να γίνονται άμεσα, και για ένα πλήρους μεγέθους ανθρώπινο ολόγραμμα απαιτούνται τουλάχιστον 100 Gbps με 1 Tbps [39]. Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης αυτής της τεχνολογίας είναι στις εφαρμογές που απαιτούν ακριβή χρονομέτρηση και ελάχιστη χρονοκαθυστερήση. Στην ιατρική, για παράδειγμα, οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις χρειάζονται άμεση μετάδοση της εικόνας στον χειρουργό και ταυτόχρονη ακριβή μετάδοση των εντολών για τις κινήσεις των εργαλείων, με μηδενική καθυστέρηση (<0.1 μικροδευτερόλεπτα) [40]. Επιπλέον παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών περιλαμβάνουν την αυτοματοποίηση στη βιομηχανία, όπου οι μηχανές πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους και με τους επιτηρητές χωρίς διακοπές, και την αυτόνομη οδήγηση, που γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής στην καθημερινότητά μας.

Όσον αφορά την αυτόνομη οδήγηση, ο στόχος είναι τα οχήματα, ανεξαρτήτως μάρκας, να επικοινωνούν μεταξύ τους, ανταλλάσσοντας δεδομένα από τους αισθητήρες και την τοποθεσία τους με τα γύρω οχήματα, αλλά και ταυτόχρονα να έχουν άμεση επικοινωνία με κεντρικούς εξυπηρετές που σώζουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα των αισθητήρων, ως αποτέλεσμα θα αυξηθεί η αποτελεσματικότητα των αυτόνομων οχημάτων [41]. Αυτό θα συμβάλλει στη σημαντική μείωση των τροχαίων ατυχημάτων, καθώς όλα τα οχήματα θα έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες όπως η ταχύτητα και η κατάσταση των άλλων οχημάτων στην περιοχή. Επιπλέον, θα βελτιωθεί η διαχείριση της κυκλοφορίας, διότι τα οχήματα θα

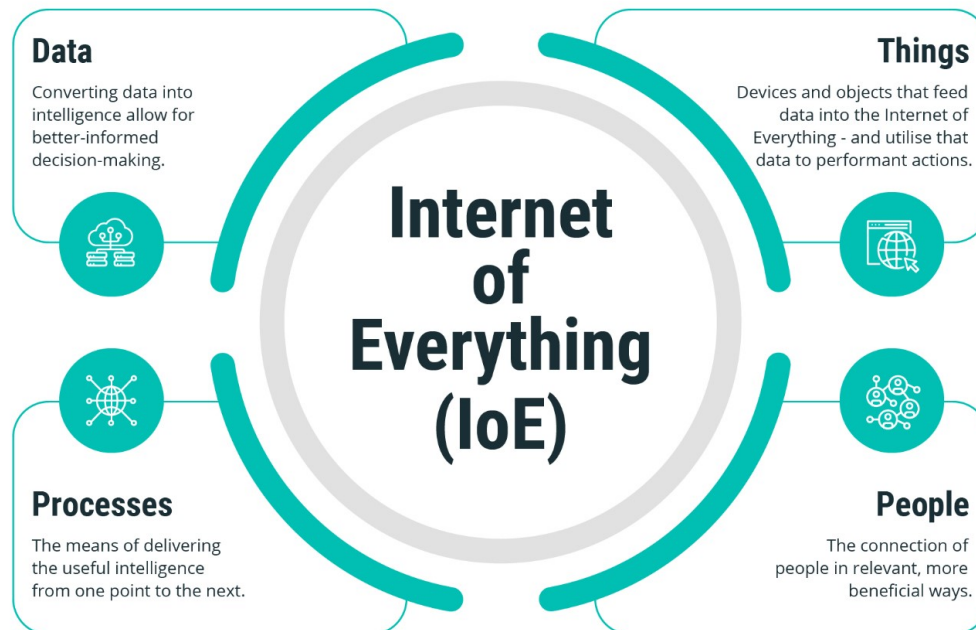
επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους και με το κεντρικό δίκτυο, ως αποτέλεσμα κάθε σύστημα θα ενημερώνει τους οδηγούς σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση στους δρόμους, κάτι που θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις μεγάλες πόλεις όπου το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι έντονο (σχήμα 1.12). Ένα άλλο πιθανό σενάριο χρήσης για το 6G είναι οι τοπικοί σταθμοί βάσης τύπου κίοσκια, οι οποίοι θα μπορούν να παρέχουν ταχύτητες έως και 1 Tbps, χάρη στις πολύ υψηλές συχνότητες mmWave (συχνότητες 30-300 GHz). Αυτοί οι τοπικοί σταθμοί θα μπορούν να λειτουργούν ως σταθμοί βάσης για χρήστες σε πολυσύχναστα μέρη, όπως το μετρό, τα λιμάνια και τα αεροδρόμια, καθώς και ως δίκτυα backhaul, διευκολύνοντας την κυκλοφορία των δεδομένων [42].



Σχήμα 1.12: Επικοινωνία μεταξύ οχήματος - οχήματος και οχήματος - δικτύου σε δίκτυο 6ης γενιάς. [43]

Υπάρχει μια σταθερή αύξηση στις συσκευές IoT, οι οποίες περιλαμβάνουν διάφορους αισθητήρες για μέτρηση βάρους, θερμοκρασίας, και συγκεκριμένων στοιχείων του εδάφους στον τομέα της γεωργίας. Αυτές οι συσκευές μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Μέχρι το 2028, αναμένεται να φτάσουμε τα 34,7 δισεκατομμύρια συσκευές IoT, από 13,2 δισεκατομμύρια το 2022. Αυτή η ραγδαία αύξηση θα επιφέρει και μια τεράστια αύξηση στην κίνηση δεδομένων, κάτι που οι τρέχουσες τεχνολογίες δεν μπορούν να υποστηρίξουν, όπου το συννοθύλεμα έξυπνων συσκευών, πληροφορίας και ανθρώπων που δημιουργείται θα αποτελέσει το Internet of Everything (IoE) [44](1.13). Επιπλέον, θα μπορεί να καλύψει

χρήστες, που κινούνται με ταχύτητες έως και 1000 χλμ/ώρα, κάτι που θα ανοίξει νέους ορίζοντες για τις επικοινωνίες σε αυτόνομα οχήματα και άλλους τύπους μεταφοράς [45].

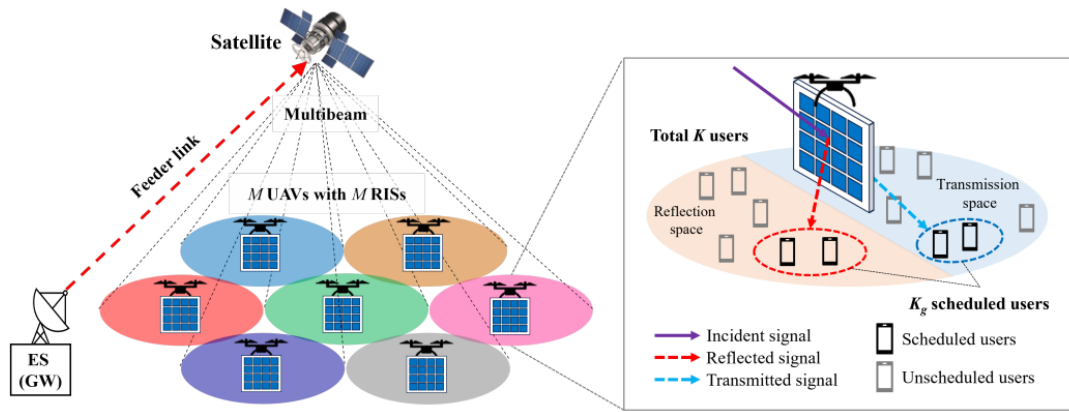


Σχήμα 1.13: Η επανάσταση του IoE που θα έρθει με το 6G. [47]

1.4.2 Τεχνολογίες 6ης Γενιάς

Μία σημαντική καινοτομία του 6G είναι η χρήση υπερυψηλών συχνοτήτων που φτάνουν μέχρι και τις ζώνες THz, επιτρέποντας την επίτευξη αυτών των υψηλών ταχυτήτων. Λόγω των μεγαλύτερων απωλειών στην ατμόσφαιρα σε αυτές τις συχνότητες, οι εφαρμογές θα υφίστανται κυρίως σε εναέριες και δορυφορικές επικοινωνίες, όπου η ατμόσφαιρα επηρεάζει ένα μικρό μέρος της διαδρομής. Επιπλέον, η τεχνολογία διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) σε συνδυασμό με την δημιουργία πολλαπλών δεσμών θα βοηθήσει να αντισταθμιστούν αυτές οι απώλειες σε σημαντικό βαθμό [46].

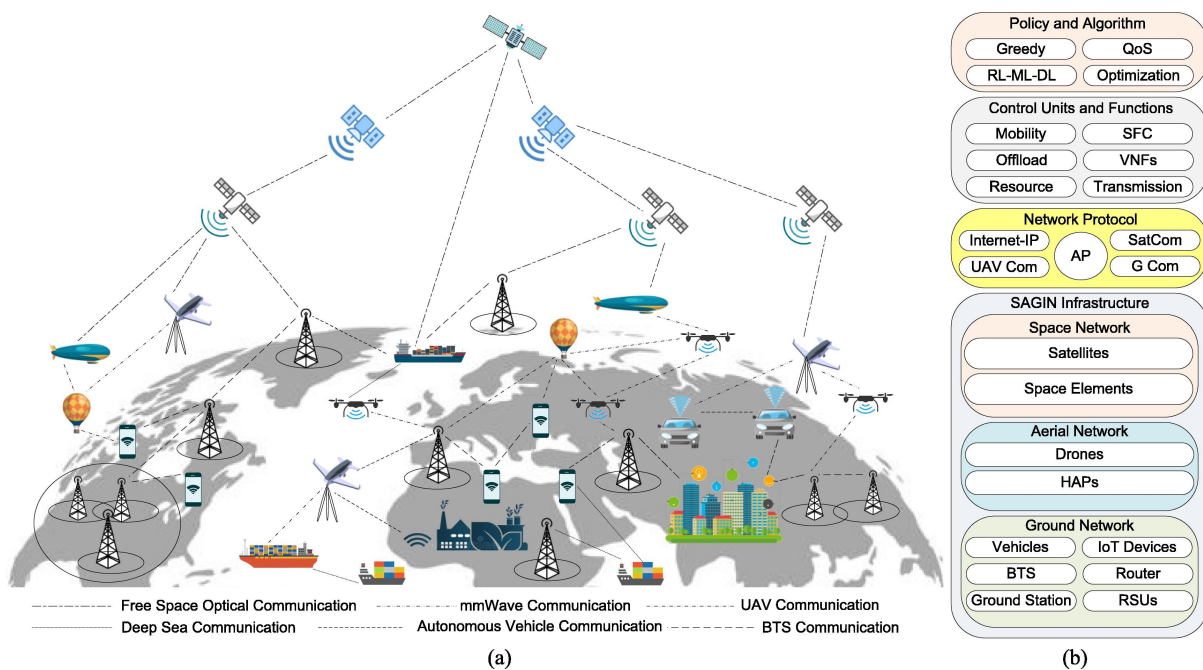
Σχετικά με το επίγειο και εναέριο κομμάτι, μία από τις τεχνολογίες-κλειδιά του 6G αναμένεται να είναι οι επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces-RIS) [48](1.14). Αυτού του είδους οι επιφάνειες θα έχουν εφαρμογή σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου συνήθως οι χρήστες περιβάλλονται από ψηλά κτήρια και ουρανοξύστες με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει σε αυτούς αποδυναμωμένο. Έτσι, θα τοποθετηθούν στις οροφές των ψηλών κτηρίων και στα πλαϊνά τους μέρη, άλλα και σε εναέρια μη-επανδρωμένα οχήματα (UAVs). Τα RIS είναι επιφάνειες, οι οποίες θα αποτελούνται από πολλούς μικρούς ανακλαστήρες, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να αλλάζουν την φάση τους και ως αποτέλεσμα να αντανακλούν το προσπίπτον σήμα προς την επιθυμητή κατεύθυνση, προσπερνώντας εμπόδια, μειώνοντας έτσι πιθανές απώλειες [49].



Σχήμα 1.14: Ο δορυφόρος εκπέμπει προς την RIS η οποία έχει τοποθετηθεί σε UAV. Στην προκειμένη περίπτωση το RIS έχει την δυνατότητα να ανακλάσει το προσπίπτον σήμα, αλλά και να το αναμεταδώσει. [50]

1.5 Θέμα και στόχοι παρούσας διπλωματικής εργασίας

Μία από τις σημαντικότερες διαφορές της 6ης γενιάς δικτύων από τις υπόλοιπες μέχρι τώρα γενιές είναι η εισαγωγή των εναέριων και δορυφορικών μέσων στις επίγειες επικοινωνίες και, κατά συνέπεια, η ενοποίησή τους με αυτές. Η παρούσα εργασία μελετάει την ενοποίηση των επίγειων, εναέριων και επίγειων επικοινωνιών (Satellite – Aerial – Terrestrial Integrated Networks) και το πως μπορεί να επιτευχθεί στο 6G, βλέποντας διάφορες τεχνικές σύνδεσης των σταθμών βάσης με τους χρήστες (User Association Algorithms) υπο το πρίσμα της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) του όλου συστήματος. Στόχος της εργασίας είναι να φτιαχτεί μια τεχνητή νοημοσύνη που θα πραγματοποιεί την παραπάνω διεργασία με επιτυχία και θα λειτουργεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ξεπερνώντας αντίστοιχους State-of-Art (SoA) αλγόριθμους από την βιβλιογραφία, εισάγοντας παράλληλα χαμηλή πολυπλοκότητα στο δίκτυο.



Σχήμα 1.15: Τα σενάρια χρήσης των δορυφορικών επικοινωνιών. [51]

1.6 Μεθοδολογία

Αρχικά, για την κατανόηση του θέματος, μελετήθηκαν όλες οι γενιές των κινητών δικτύων και τέλος η βασική εμβάθυνση έγινε στην 6η γενιά δικτύων, συναρτήσει των νέων τεχνολογιών και εξελίξεων που αναμένεται να φέρει. Στην επόμενη γενιά κινητών δικτύων προβλέπεται η ενοποίηση των επίγειων, εναέριων και δορυφορικών επικοινωνιών (SATIN)(1.15), με την βιβλιογραφία της παρούσας εργασίας να προτείνει μόνο μερικές λύσεις στο πρόβλημα. Η εισαγωγή των δορυφορικών, και κατ' επέκταση των εναέριων δικτύων, στην επόμενη γενιά επίγειων κινητών δικτύων είναι ένας από τους βασικούς κόμβους στην εξέλιξη των ασυρμάτων επικοινωνιών, και λόγω αυτού οι ερευνητές προτείνουν πολύπλευρες πιθανές λύσεις στο πρόβλημα εδώ και χρόνια. Στην παρούσα εργασία, έχει αναπτυχθεί τεχνική τεχνητής νοημοσύνης που προτείνει μία πιθανή λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, έγινε εκτενής ανάλυση και έρευνα στους παράγοντες που αποτελούν το πρόβλημα, όπως είναι το πως μπορεί να δομηθεί και να λειτουργήσει ένα τόσο μεγάλο και δυναμικό δίκτυο και πως μπορούν να ανατεθούν οι διαθέσιμοι επικοινωνιακοί και υπολογιστικοί πόροι σε αυτό, το οποίο είναι πλέον τρισδιάστατης μορφής, μιας και τώρα μιλάμε για τις οριζόντιες συνδέσεις μεταξύ των επίγειων και εναέριων σταθμών και μεταξύ των δορυφορικών σταθμών, μέσω των διαδορυφορικών συνδέσεων (Inter-Satellite Links), αλλά και μεταξύ εναέριων και δορυφορικών σταθμών.

Το τελικό σύστημα αποφασίστηκε να κατασκευαστεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης MATLAB, λόγω της διαθεσιμότητάς του ανοιχτά για το ακαδημαϊκό κοινό αλλά και για την πλούσια συλλογή του, τόσο σε toolbox που προσφέρει η ίδια η εταιρεία, όσο και σε αυτά που δημιουργούν οι χρήστες του και μοιράζονται με την υπόλοιπη κοινότητα. Ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία που υπήρχαν είναι το Reinforcement Learning Toolbox, το οποίο με την ευκολία του γραφικού του περιβάλλοντος ήταν το ιδανικό εναρκτήριο σημείο για την κατανόηση των τεχνικών που απαιτούνται για την δόμηση ενός νευρωνικού δικτύου. Έπειτα, επιλέχθηκε από την διαθέσιμη βιβλιογραφία μία διαφορετική εργασία που πραγματεύεται τα αντίστοιχα μέρη, η οποία υλοποιήθηκε και αυτή με παρόμοιες τεχνικές.

1.7 Επίλογος

Τελικώς, μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε τον ιδιάζουσα σημασίας ρόλο που παίζουν στην σημερινή κοινωνία και τον τρόπο που επικοινωνούμε τα κινητά δίκτυα και οι ασύρματες επικοινωνίες γενικώς. Οι όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις των ανθρώπων στην καθημερινότητα τους για την επικοινωνία τους, την εργασία τους και την ψυχαγωγία τους κινούν τους ερευνητές παγκοσμίως για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Η παρούσα εργασία είναι μία απόπειρα για την λύση ενός προβλήματος που με την επιτυχία του εκτέλεση θα προσφέρει μία τεχνητή νοημοσύνη ικανή να ανακατανέμει τον τηλεπικοινωνιακό φόρτο, ενεργειακώς αποδοτικά.

Κεφάλαιο 2ο: Σύγχρονη Βιβλιογραφική Έρευνα και Προσεγγίσεις

2.1 Εισαγωγή

Οι έρευνες των τελευταίων χρόνων, και ειδικότερα αυτές του 2024 έχουν αρχίσει να εστιάζουν στην ενοποίηση των δορυφορικών επικοινωνιών με τις επίγειες, άμεσα ή έμμεσα δια εναέριων αναμεταδοτών (UAV, αερόστατα, Zeppelin). Πιο συγκεκριμένα, οι έρευνες αυτές επικεντρώνονται περισσότερο στην διάδοση των σημάτων από δορυφόρο σε δορυφόρο (inter-satellite link), από δορυφόρο σε επίγειο σταθμό βάσης, από δορυφόρο σε εναέριους αναμεταδότες μέσω πολλαπλών διαμορφώσεων δέσμης (multibeam beamforming) και στην ανάθεση των πόρων (resource allocation). Οι έρευνες οι οποίες εστιάζουν στα SATIN και ταυτόχρονα λαμβάνουν υπόψιν δορυφόρους πολλαπλών τροχιών (LEO, MEO, GEO) είναι ελάχιστες. Περιορισμός ο οποίος είναι πολλές φορές απαραίτητος για την απλοποίηση ενός τόσο δυναμικού συστήματος, ώστε να μοντελοποιηθεί και να επιλυθεί.

2.2 Σχετικές Εργασίες και Έρευνες

| | Ενεργειακή Αποδοτικότητα (Energy Efficiency) | Σύνδεση χρηστών (User Association) | Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) | Επίγεια Δίκτυα (Terrestrial Networks) | Εναέρια Δίκτυα (HAPS) | Δορυφορικά Δίκτυα (Satellite Networks) |
|-----------------|----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| [52] | | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| [53] | | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| [54] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| [55] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| [56] | | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| [57] | | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| [58] | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| [59] | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| [60] | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| [61] | | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| [62] | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| [63] | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| [64] | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| [65] | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Proposed | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Πίνακας 2.1: Βιβλιογραφική Έρευνα.

Στον πίνακα 2.1 μπορούμε να δούμε κάποιες βιβλιογραφικές εργασίες σχετικές με την παρούσα εργασία. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται η αναφορά της κάθε βιβλιογραφικής σχετικής εργασίας, ενώ στις υπόλοιπες στήλες με ✓ σημειώνονται τα σημεία που έχει εμβαθύνει η καθεμία.

2.2.1 Σχετικές Εργασίες για τα Επίγεια Δίκτυα

Η μοναδική βιβλιογραφική αναφορά [52] που σχετίζεται αμιγώς με τα επίγεια δίκτυα αναφέρεται στα backhaul δίκτυα και την συνδεσιμότητα των κόμβων τους (Integrated Access Backhaul Nodes) με τους εξοπλισμούς χρηστών (UEs) και τους σταθμούς βάσης (gNBs). Συγκεκριμένα το [52] εστιάζει στην δρομολόγηση της κίνησης μέσω ενός backhaul δικτύου στις συχνότητες mmWave, το οποίο προϋποθέτει δημιουργία πολλαπλών δεσμών ανάμεσα στους IAB Nodes και στους gNBs, αλλά και ως προς τα UEs. Οι συγγραφείς προτείνουν έναν αλγόριθμο που παρέχει μία πολιτική (Policy) η οποία θα βλέπει τις ήδη υπάρχουσες συσχετίσεις μεταξύ IAB Nodes - gNBs - UEs και θα επιλέγει την αποδοτικότερη διαδρομή με γνώμονα το ποσοστό λήψης πακέτων. Η πολιτική αυτή είναι αποτέλεσμα ενός υβριδικού αλγορίθμου ο οποίος χρησιμοποιεί reinforcement learning πολλαπλών πρακτόρων (Multi - Agent Reinforcement Learning) και Advantage Actor Critic (A2C) τον οποίον τον ονομάζουν Relational Advantage Actor Critic (Relational A2C). Οι συγγραφείς τονίζουν την υψηλότερη αποδοτικότητα αυτού του αλγορίθμου σε σχέση με άλλες τεχνικές μηχανικής μάθησης.

2.2.2 Σχετικές Εργασίες για τα Εναέρια Δίκτυα

Η βιβλιογραφική εργασία [53] αναφέρεται αποκλειστικά στο κομμάτι των εναέριων δικτύων και συγκεκριμένα στην συσχέτιση εξοπλισμού χρήστη με UAV, τα οποία UAVs λειτουργούν ως Aerial Base Stations (ABSs). Οι συγγραφείς εστιάζουν στις ατελείς πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI), όπου συναρτήσει της κινητικότητας των ABSs αλλά και των UEs καταλήγει να υφίσταται κακή κάλυψη χρηστών. Για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται ένα νευρωνικό δίκτυο όπου ακόμα και στην περίπτωση ενός άκρως δυναμικού CSI θα προσφέρει ικανοποιητική κάλυψη. Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται με τεχνικές Deep Reinforcement Learning (RDRL), το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την κάλυψη της περιοχής. Επιπλέον η χρονική συσχέτιση καναλιών (temporal channel correlation) λαμβάνεται υπόψιν στον σχεδιασμό της συνάρτησης επιβράβευσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση του ποσοστού διαδοχικών χρονοθυρίδων, ως αποτέλεσμα οι χρήστες θα έχουν υψηλότερο ρυθμό σε αποστολή και λήψη πακέτων και γενικότερα σταθερότερη επικοινωνία.

2.2.3 Σχετικές Εργασίες για τα Ενοποιημένα Δίκτυα

Όλες οι εναπομείνουσες εργασίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις υποκατηγορίες, τα επίγεια - εναέρια δίκτυα, τα επίγεια - δορυφορικά δίκτυα και τα πλήρως ενοποιημένα δίκτυα. Σε κάθε κατηγορία ενοποιημένων δικτύων υπάρχει και ποσοστό ανάμιξης των τύπων δικτύων, παραδείγματος χάριν η [55] κάνει μεν λόγο για την συνύπαρξη του δορυφορικού δικτύου με το επίγειο, αλλά η ουσιαστική εμβάθυνση γίνεται για την εκφόρτωση των επίγειων δικτύων μέσω της χρήσης των δορυφορικών δικτύων. Άρα, στο μεγαλύτερο ποσοστό της η εργασία είναι δορυφορικών επικοινωνιών.

2.2.3.1 Σχετικές Εργασίες για τα Επίγεια - Εναέρια Δίκτυα

Στην εργασία [54] οι συγγραφείς ανέλαβαν να αυξήσουν την αποδοτικότητα του επίγειου κυψελωτού δικτύου στις εφαρμογές των οχημάτων συσχετίζοντας τα αυτόνομα οχήματα (Cellular Vehicle-to-Everything) με UAVs. Οι Xavier Fernando και Abhishek Gupta αρχικά κατασκευάζουν ένα μοντέλο Federate Reinforcement

Learning (FRL) το οποίο λειτουργεί εντός ενός οχήματος και υπολογίζει την πιθανότητα εκπομπής των εγγύτερων αυτόνομων οχημάτων. Την χρονική στιγμή που η πιθανότητα εκπομπής των πλησίον οχημάτων είναι χαμηλή θα παρθεί απόφαση για το αν γίνεται να εκπέμψει μια ενημέρωση ως προς το UAV. Γίνεται υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης που θα καταναλώσει το έκαστο UAV που εξυπηρετεί έναν όγκο οχημάτων σε C-V2X mode 4 και γίνεται υπολογισμός της καθυστέρησης πακέτων στο σενάριο FRL για τον όγκο των οχημάτων και το μέγεθος του δρόμου εντός του σεναρίου.

2.2.3.2 Σχετικές Εργασίες για τα Επίγεια - Δορυφορικά Δίκτυα

Το [55] εμβαθύνει στην επεξεργαστική ικανότητα των δορυφόρων τελευταίας γενιάς και τις δυνατότητες που προσφέρουν στην εκφόρτωση των επίγειων δικτύων μέσω της επεξεργαστικής ισχύς τους. Το θέμα που προσπαθούν να επιλύσουν οι συγγραφείς στο [55], πέρα από την εκφόρτωση του έργου που επιβαρύνει το επίγειο δίκτυο, είναι η συχέτιση των επίγειων χρηστών με τους δορυφόρους. Τα δύο αυτά προβλήματα επιλύονται με γνώμονα την επεξεργαστική ικανότητα του εκάστοτε δορυφόρου, την ενεργειακή κατανάλωση της εκπομπής των UEs και των δορυφόρων και των περαιτέρω προϋποθέσεων που υφίστανται για την δρομολόγηση των δεδομένων του χρήστη στον κατάλληλο δορυφόρο προς επεξεργασία. Οι συγγραφείς σχεδίασαν έναν εξελικτικό αλγόριθμο βασισμένο σε ένα deep Q-network (DQN) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την φόρτωση και εκφόρτωση των δορυφόρων επεξεργασίας κινητού δικτύου (Satellite Mobile Edge Computing) υπό το πρίσμα της ενεργειακής αποδοτικότητας και της ομοιόμορφης ανάθεσης πόρων. Παρατηρήθηκε ότι ο αλγόριθμος πράγματι μείωσε την ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με παρόμοιους αλγορίθμους.

Στο [56] οι συγγραφείς δεν αναφέρονται στην επεξεργασία δεδομένων σε ένα δορυφορικό δίκτυο όπως στο [55] αλλά στην πρόσβαση τους με βάση το είδος περιεχομένου. Χρησιμοποιώντας δορυφορικές κρυφές μνήμες (caches) σχεδιάζουν έναν αλγόριθμο όπου θα βελτιστοποιεί την μεταφορά του περιεχομένου ως προς τον τελικό χρήστη προβλέποντας το τι θα ζητήσει ο χρήστης (content-aware routing). Η δορυφορική cache, επίσης, θα ελέγχεται μέσω βοηθητικών δορυφόρων οι οποίοι θα έχουν έναν αλγόριθμο που θα προβλέπει το τι ζητάνε οι χρήστες που εξυπηρετεί τακτικά η υποβοηθούμενη cache με βάση δεδομένα ιστορικού. Ως αποτέλεσμα, οι δύο αυτοί αλγόριθμοι προσφέρουν υψηλότερη ταχύτητα παράδοσης και μειωμένη κατανάλωση κυκλοφορίας.

Η βιβλιογραφική εργασία [58] εμβαθύνει στην επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων για την δορυφορική κάλυψη επίγειων κυψελών. Οι συγγραφείς λαμβάνουν υπόψιν την κυκλοφοριακή ζήτηση (Traffic Demand) και την ενεργειακή αποδοτικότητα της κάθε δορυφορικής δέσμης που συνάπτεται με τους επίγειους σταθμούς βάσης ώστε να σχεδιάσουν έναν αλγόριθμο μηχανικής μάθησης ο οποίος θα αναθέτει το απαραίτητο εύρος συχνοτήτων σε πολλαπλές κυψέλες. Η επαναχρησιμοποίηση των ευρών συχνοτήτων δε θα γίνεται σε παραπλήσιες κυψέλες, αλλά θα ανατίθενται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα γίνεται ώστε να αποφευχθεί επικάλυψη συχνοτήτων από εγγύτερες δέσμες. Καταλήγουν στο γεγονός ότι έχουν έναν αποδοτικό αλγόριθμο χαμηλής πολυπλοκότητας.

Το [59] αναφέρεται στην ανάθεση πόρων και στον έλεγχο ισχύος σε LEO δορυφόρους οι οποίοι υποστηρίζουν τεχνικές rate - splitting multiple access (RSMA) για την εξυπηρέτηση πολλαπλών επίγειων σταθμών βάσης. Οι συγγραφείς σχεδιάζουν έναν αλγόριθμο Deep Reinforcement Learning (DRL) όπου

το πρόβλημα είναι μοντελοποιημένο ως πρόβλημα πολλαπλών πρακτόρων για υψηλότερη αποδοτικότητα στην λήψη αποφάσεων του κάθε πράκτορα. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος DRL κάνει συνδυαστική χρήση DQN αλγορίθμου για την διακριτή κατανομή των πόρων και proximal policy optimization (PPO) αλγορίθμου όπου θα ελέγχει την κατανάλωση ισχύος.

Η [57] είναι η πρώτη από τις λίγες βιβλιογραφικές εργασίες που βρέθηκαν να πραγματοποιούνται για την τοποθέτηση των VNF σε κάποιας μορφής ενοποιημένων δικτύων. Τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι συγγραφείς στην παρούσα βιβλιογραφική εργασία είναι η τοποθέτηση των χειριστών Software Defined Network (SDN) οι οποίοι θα επιτρέψουν την εύχρηστη, αλλά και ασφαλή μετάδοση δεδομένων σε LEO δορυφόρους, μετά κάνουν λόγο για το υψηλό κόστος και την λειψυδρία των πόρων σε ένα δορυφορικό δίκτυο στο οποίο παρουσιάζεται ανάγκη για αποδοτική ανάθεση πόρων σε πραγματικό χρόνο, και τέλος η ίδια η φύση των διαδορυφορικών συνδέσεων σε χαμηλή τροχιά εισάγει τεράστιου μεγέθους πολυπλοκότητα στο σύστημα το οποίο σημαίνει ότι τα VNFs πρέπει να τοποθετούνται με την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα και αποδοτικότητα ώστε να μην πληγεί η κινητικότητα του δικτύου χαμηλής τροχιάς. Η προτεινόμενη λύση είναι μια αρχιτεκτονική υπο την ονομασία Centralized and Distributed Software-Defined Satellite Terrestrial network (CDS DST), το οποίο όπως προδίδει και το όνομα συνδυάζει ένα κεντροποιημένο σύστημα με ένα αποκεντροποιημένο. Επιπλέον, επιλύουν το πρόβλημα της καθυστερημένης τοποθέτησης των VNF με το να γραμμικοποιήσουν το πρόβλημα και να το λύσουν με μέθοδο Mixed Integer Linear Programming (MILP) αντί να προσπαθήσουν να το επιλύσουν για Nonlinear Binary Programming (NLPB) στην περίπτωση σεναρίου μικρής κλίμακας. Στην περίπτωση σεναρίου μεγάλης κλίμακας προτείνουν έναν ευρετικό αλγόριθμο (heuristic algorithm) για την εύρεση λύσεων.

Η εργασία [60] καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του γνωστικού περιεχομένου που απαιτείται για την μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχοντας ως κομβικά σημεία την συσχέτιση των χρηστών σε πραγματικό χρόνο, την δρομολόγηση της κίνησης και την τοποθέτηση των διαφορετικών τύπων Network Function (xNF), τα οποία επιλύονται με γνώμονα την ενεργειακή αποδοτικότητα και το ποσοστό αποδοχής χρηστών. Το πρόβλημα αρχικά μοντελοποιείται ως ένα MILP το οποίο εμπεριέχει χαρακτηριστικά χωρητικότητας, ισχύος, και διάφορους περιορισμούς ροής του ενοποιημένου δικτύου όπου το καθιστούν αρκετά πολύπλοκο, ως αποτέλεσμα προτάθηκε και ένας ευρετικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας ονόματι Online Integrated Terrestrial and Satellite Energy-Efficient Resource Allocation Heuristic Algorithm (TERA). Ο αλγόριθμος πρώτα κάνει την απαραίτητη συσχέτιση του χρήστη και τη δρομολόγηση των δεδομένων του και μετά τοποθετεί τα απαραίτητα xNFs που απαιτούνται για την ικανοποίηση του χρήστη με βάση την σειρά που έχει υποδείξει το Service Function Chain (SFC). Αποδείχτηκε ότι έχει το 85% της επιτυχίας του αναλυτικού μοντέλου με 87% χαμηλότερη πολυπλοκότητα.

2.2.3.3 Σχετικές Εργασίες για τα Πλήρως Ενοποιημένα Δίκτυα

Στην βιβλιογραφική εργασία [61] γίνεται λόγος για την κάθετη μεταβίβαση (vertical handover) της κίνησης των δεδομένων με την υποβοήθηση UAVs. Δημιουργείται γράφος με βάση τον αλγόριθμο Dijkstra για την εύρεση των μικρότερων δυνατών αποστάσεων και οι αποφάσεις λαμβάνονται έχοντας υπόψιν την ισχύ λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength) και την σηματοθορυβική σχέση (Signal-to-Noise Ratio). Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι ο αλγόριθμός τους συνέφερε αξιόλογες βελτιώσεις στο RSS, στη σηματοθορυβική αποδοτικότητα, στη καθυστέρηση και τη μείωση των ping-pongs.

Στην εργασία [63] οι συγγραφείς προτείνουν την εισαγωγή UAVs ως αναμεταδότες σε ένα επίγειο-δορυφορικό δίκτυο για την βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων από και προς συσκευών Internet of Remote Things (IoRT). Εμβαθύνουν στην συσχέτιση του άκρως δυναμικού συστήματος που είναι ο στόλος των UAVs με τους επίγειους χρήστες IoRT, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο δυναμικής τοποθέτησης βασισμένο σε K-means (Dynamic Deployment based on K-means) ο οποίος διαλέγει τον απαραίτητο αριθμό των UAV και τα τοποθετεί στον χώρο με βάση τις ανάγκες του ενοποιημένου δικτύου. Επιπροσθέτως σχεδιάστηκε και ένας αλγόριθμος Coverage and Power Optimization (CPO) με τον οποίο αυξάνεται η ταχύτητα αποστολής δεδομένων. Παρατηρήθηκε ότι έναντι κλασσικών αλγορίθμων, στην προτεινόμενη προσέγγιση υφίσταται απολαβή έως και 240%.

Στο [64], όπως και στο [63] γίνεται χρήση εναέριων σταθμών βάσης στον ρόλο των αναμεταδοτών ανάμεσα στο επίγειο και δορυφορικό δίκτυο. Στην προκείμενη εργασία οι εναέριοι σταθμοί είναι αερόστατα διαφορετικών υψομέτρων και γωνιών, ταυτόχρονα η επικοινωνία μεταξύ των δορυφόρων γίνεται με οπτική ζεύξη. Οι συγγραφείς, αρχικά, προτείνουν έναν water-filling αλγόριθμο, ώστε να δοθεί προτεραιότητα στις ισχυρότερες ζεύξεις, βεβαιώνοντας ότι τα δεδομένα θα μεταφερθούν έγκαιρα. Προτάθηκε μια μέθοδος δημιουργίας πινάκων διαμόρφωσης για την αναμετάδοση της κίνησης δεδομένων σε πολλαπλά χρονοδιαγράμματα, όπου σε συνδυασμό με το σύνολο των ικανών οπτικών ζεύξεων μειώνεται η καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ των δορυφόρων. Τέλος, μεγιστοποιούν την ενεργειακή αποδοτικότητα με βάση της τρισδιάστατες τοποθεσίες των δορυφόρων, τα υψόμετρα των HAPS και τις γωνίες ανύψωσης των HAPS. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τους επαλήθευσαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος.

Το [65] αναφέρεται στην δυναμική φύση ενός ενοποιημένου δικτύου και οι συγγραφείς σχεδιάζουν μία τεχνητή νοημοσύνη η οποία βρίσκει την καλύτερη δυνατή διαδρομή με βάση κανόνες που επιλέχθηκαν από ένα μοντέλο. Με βάση την τοποθεσία των δορυφόρων, των HAPS, των επίγειων σταθμών και των link budget τους αυτό το μοντέλο υπολογίζει την ποιότητα των συνδέσεων. Γίνεται χρήση τεχνητής νοημοσύνης για την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής. Βάση προσομοιώσεων η προτεινόμενη μέθοδος διατηρεί τον ρυθμό παράδοσης πακέτων υψηλά σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους, ακόμη και κάτω από δυναμικές αλλαγές στην τοπολογία και τη διαθεσιμότητα των συνδέσεων λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών.

Η [62] αναφέρεται σε ένα ενοποιημένο επίγειο-εναέριο-δορυφορικό δίκτυο το οποίο μέσω μίας τεχνητής νοημοσύνης θα τοποθετεί VNFs στους απαραίτητους κόμβους με την υψηλότερη δυνατή ενεργειακή αποδοτικότητα. Συγκεκριμένα, το ενοποιημένο δίκτυο θα είναι τύπου Satellite-Aerial-Ground Integrated Network - Mobile Edge Computing (SAGIN-MEC) όπου θα κάνει την επεξεργασία των πόρων κινητών επικοινωνιών. Η τοποθέτηση των NFV επιτυγχάνεται με έναν υβριδικό αλγόριθμο DRL-G, ο οποίος αποτελείται από έναν αλγόριθμο deep reinforcement learning και έναν άπληστο αλγόριθμο, τους οποίους σχεδίασαν οι συγγραφείς. Ο αλγόριθμος πρώτα λαμβάνει την αίτηση από το SFC και μέσω του εκπαιδευμένου αλγορίθμου γίνεται μια πρόβλεψη από την οποία θα βρει την καλύτερη στρατηγική ο άπληστος αλγόριθμος. Στην περίπτωση που η λύση βρίσκεται εντός των περιορισμών θα γίνει η αποδοχή της ως λύση, αλλιώς θα απορριφθεί. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι υπάρχει μείωση του χρόνου καθυστέρησης των υπηρεσιών, με τον μειωμένο χρόνο να κυμαίνεται ανάμεσα στα 6-15 ms.

2.3 Επίλογος

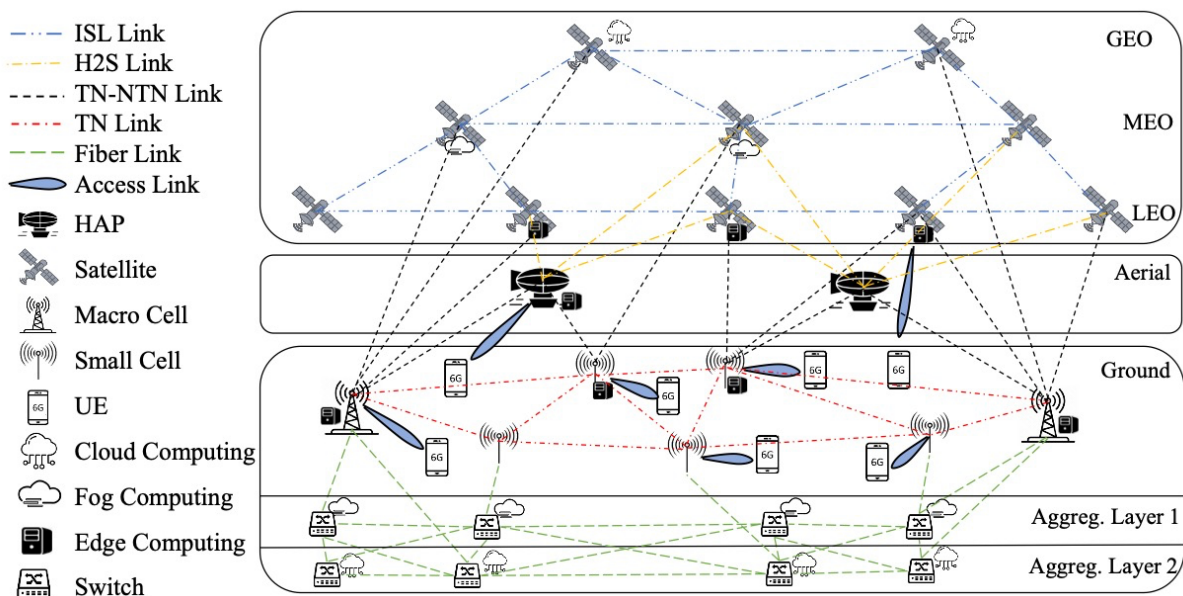
Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, η ερευνητική κοινότητα έχει δείξει τεράστιο ενδιαφέρον στην ενοποίηση των δορυφορικών δικτύων με τα εναέρια και τα επίγεια, και ακόμα περισσότερο για την αυτονομία τους. Αν και η βιβλιογραφία της παρούσας διπλωματικής είναι εκτενής, είναι προφανές ότι κανένα κομμάτι της δε θεωρείται πλήρες για να καλύψει το γνωστικό περιεχόμενο αυτής της εργασίας. Τα [52] έως [60] αναφέρονται στα δίκτυα μονού τύπου ή υβριδικά τα οποία δε περιέχουν όλες τις κατηγορίες, ενώ ακόμα και όταν αναλύεται ένα πλήρως ενοποιημένο δίκτυο ([61]- [65]) υπάρχουν τεράστιες ελλείψεις σε όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες. Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τον συνδυασμό των γνώσεων των παραπάνω εργασιών με στόχο την ανάπτυξη μιας πιο ολοκληρωμένης προσέγγισης.

Κεφάλαιο 3ο: Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση

3.1 Εισαγωγή

Για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου, διενεργήθηκε εκτενής ανάλυση του προβλήματος και ενδελεχής εξέταση των στοιχείων που διαμορφώνουν την αποδοτικότητά του. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται εκτενώς τα μοντέλα που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία αναφορικά με τις παραμέτρους που επιδρούν στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, τα μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης για επίγεια, εναέρια και δορυφορικά συστήματα, όπως επίσης και τα μοντέλα που αξιοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θέσης των δορυφόρων σύμφωνα με τις τροχιακές τους συντεταγμένες.

3.2 Μοντέλο Συστήματος (System Model)



Σχήμα 3.1: Αναλυτικό σχεδιάγραμμα του εννοιολογικού δορυφορικού, εναέριου και επίγειου δικτύου στην παρούσα εργασία.

3.2.1 Σηματοθορυβική Σχέση

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές προσδιορίζεται ανεξάρτητα για κάθε επίπεδο επικοινωνίας, συγκεκριμένα για τα δορυφορικά, εναέρια και επίγεια συστήματα. Στο δορυφορικό επίπεδο, ο προσδιορισμός αυτός είναι σχετικά απλούστερος, εφόσον οι παρεμβολές από γειτονικούς δορυφόρους θεωρούνται ασήμαντες, εξαιτίας των εκτεταμένων αποστάσεων και της εφαρμογής υψηλών συχνοτήτων που εξασθενούν ταχέως με την αύξηση της απόστασης. Σε αντιδιαστολή, στα επίγεια και εναέρια συστήματα, ο προσδιορισμός παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Οι εναέρια υποδομές εφαρμόζουν αποκλειστικά ασύρματες μεθόδους μετάδοσης, ενώ οι επίγειοι σταθμοί βάσης έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν τόσο ενσύρματες όσο και ασύρματες τεχνολογίες για το δίκτυο backhaul, με το δίκτυο πρόσβασης να στηρίζεται εξ ολοκλήρου σε ασύρματες τεχνολογίες.

3.2.1.1 Σηματοθορυβική Σχέση στο Δορυφορικό Μέρος

Για να βρούμε τη σηματοθορυβική σχέση στο δορυφορικό μέρος, σε dB, κάνουμε:

$$SINR = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N \cdot I} \right) \quad (3.1)$$

όπου S η μέση ισχύ του επιθυμητού σήματος, N η μέση ισχύς του θορύβου και I είναι η ολική παρεμβολή, η οποία στις δορυφορικές ζεύξεις θεωρείται αμελητέα.

3.2.1.2 Σηματοθορυβική Σχέση στο Επίγειο Μέρος

Το επίγειο τμήμα περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές μετρήσεις SINR: μία για το δίκτυο πρόσβασης (Access Network-AN) που αφορά τη σύνδεση μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης, και μία για το δίκτυο backhaul μέσω του οποίου διακινείται το σύνολο της πληροφορίας από τους σταθμούς βάσης.

Για να υπολογίσουμε το απαιτούμενο SINR στο δίκτυο πρόσβασης, σε dB, κάνουμε:

$$SINR_{ij} = SNR_{ij} - 10 \log_{10} \left(\frac{I}{N} + 1 \right) \quad (3.2)$$

όπου I αντιπροσωπεύει τη συνολική παρεμβολή, μετρούμενη σε Watts, που δέχεται ο χρήστης i από τους παρακείμενους σταθμούς βάσης j , ενώ N εκφράζει τη συνολική ισχύ θορύβου, επίσης σε Watts, που λαμβάνει ο χρήστης. Αναφορικά με το SNR_{ij} , το οποίο αποτελεί τον λόγο σήματος προς θόρυβο που λαμβάνει ο χρήστης μέσω του σταθμού βάσης και εκφράζεται σε dB, έχουμε:

$$SNR_{ij} = P_{jsub} + G_{T_x i} - L_{cbj} - L_{p_{i,j}} - L_{f_{i,j}} - N_{th} - NF \quad (3.3)$$

όπου $G_{T_x i}$ αναφέρεται στο κέρδος κεραίας μετρούμενο σε dBi, L_{cbj} αντιστοιχεί στις απώλειες καλωδίωσης μεταξύ του RF connector και της κεραίας εκφρασμένες σε dB, $L_{p_{i,j}}$ εκφράζει τις απώλειες μετάδοσης μεταξύ του χρήστη i και του σταθμού βάσης j σε dB, $L_{f_{i,j}}$ περιγράφει τις απώλειες λόγω φαινομένων slow-fading σε dB, N_{th} συμβολίζει τον θερμικό θόρυβο εκφρασμένο σε dBm, NF είναι ο συντελεστής θορύβου σε dB και P_{jsub} αποτελεί την κατανεμημένη ισχύ ανά subcarrier που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης j σε dBm, η οποία προσδιορίζεται ως ακολούθως:

$$P_{jsub} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{jmax}}{12N_j N_{PRB_{jmax}}} \right) \quad (3.4)$$

όπου P_{jmax} είναι μέγιστη δύναμη εκπομπής σε mW, N_j είναι ο αριθμός των κεραιών του σταθμού βάσης j και $N_{PRB_{jmax}}$ ο μέγιστος αριθμός των PRBs του σταθμού βάσης j .

Για να βρεθεί το απαιτούμενο SINR στο backhaul, σε dB, κάνουμε:

$$SINR_l^{trg} = 10 \log_{10} \left(2 \frac{\sum_{u \in U} r_u x_l^u}{BW_l} - 1 \right) \quad (3.5)$$

όπου BW_l είναι το εύρος ζώνης του backhaul link, r_u είναι ο απαιτούμενος ρυθμός των συσκευών χρήστη (UEs) και x_l^u είναι ο συνολικός αριθμός των backhaul links που μεταφέρουν πληροφορία.

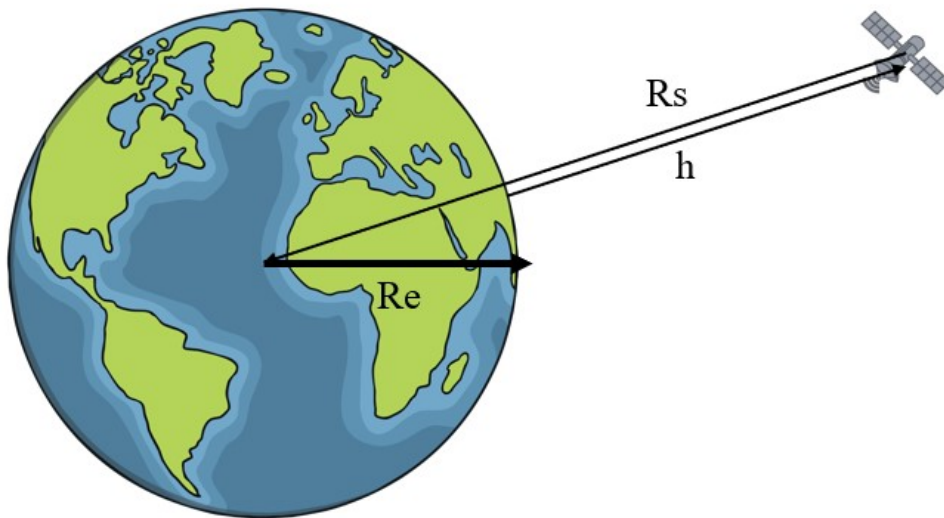
3.2.2 Δορυφορικό τμήμα

Για τον υπολογισμό της απόστασης του δορυφόρου από την Γη, R :

$$R = \sqrt{R_E^2 + R_S^2 - 2R_ER_S \cos(\gamma)} \quad (3.6)$$

όπου R_E είναι η ακτίνα της Γης με μήκος 6371 χλμ και R_S είναι η απόσταση του δορυφόρου από τον πυρήνα της Γης, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_S = h + R_E \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2: Αναλυτικό σχεδιάγραμμα υπολογισμού απόστασης ενός δορυφόρου από τη Γη.

Για τον υπολογισμό της γωνίας γ :

$$\cos(\gamma) = \cos(l_e)\cos(l_s)\cos(L) + \sin(l_e)\sin(l_s) \quad (3.8)$$

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos(\gamma)) \quad (3.9)$$

όπου l_e το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού, l_s το γεωγραφικό πλάτος του δορυφόρου και L η διαφορά ανάμεσα στο γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού με αυτό του δορυφόρου.

Για τον υπολογισμό της γωνίας ανύψωσης, El :

$$\cos(El) = \frac{R_S \sin(\gamma)}{R} \quad (3.10)$$

$$El = \cos^{-1}(\cos(El)) \quad (3.11)$$

Για την ενεργό ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ, EIRP, σε dBW, έχουμε:

$$EIRP = P_{T_x} + G_{T_x} - L_{T_x} \quad (3.12)$$

όπου P_{T_x} είναι η ισχύς του πομπού, G_{T_x} είναι το κέρδος της κεραίας του πομπού και L_{T_x} είναι οι απώλειες του πομπού.

Για τις απώλειες λόγω ασυμφωνίας των πολώσεων, L_{POL} , έχουμε:

$$L_{POL} = -20 \log_{10}(\cos(\phi)) \quad (3.13)$$

όπου ϕ είναι η γωνία μεταξύ της πόλωσης της κεραίας και αυτής του κύματος που λαμβάνεται.

Για τις απώλειες ελεύθερου χώρου, L_{FS} , έχουμε:

$$L_{FS} = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (3.14)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ραδιοκύματος. Εναλλακτικά για το λ ισχύει ότι:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.15)$$

οπότε με τον συνδυασμό των (3.14) και (3.15) προκύπτει:

$$L_{FS} = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi Rf}{c}\right) \quad (3.16)$$

Για να υπολογίσουμε τις συνολικές απώλειες μετάδοσης προσθέτουμε τις απώλειες ελευθέρου χώρου και τις συνολικές απώλειες από την ατμόσφαιρα, όπως υπολογίζονται στο (3.71):

$$L_{TOT} = L_{FS} + A_t \quad (3.17)$$

Για να βρούμε την τελική λαμβανόμενη ιστροπική ισχύ κάνουμε:

$$EIRP_R = EIRP - L_{POL} - L_{PROP} - L_T - L_I \quad (3.18)$$

όπου L_T είναι οι απώλειες σκόπευσης της κεραίας και L_I είναι οι απώλειες εξαιτίας της παρεμβολής.

Στην συνέχεια, για να βρεθεί ο λόγος της ισχύος του φέροντος, C , προς την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου, N_0 , σε dBHz:

$$\frac{C}{N_0} = EIRP - L_{PROP} - k + \frac{G}{T} \quad (3.19)$$

όπου k είναι η σταθερά Boltzmann και είναι ίση με $-228.6 \text{dBW} \cdot K_{-1} \cdot Hz^{-1}$.

Για τον υπολογισμό της σηματοθορυβικής σχέσης στις δορυφορικές ζεύξεις, σε dB, κάνουμε:

$$SNR = \frac{C}{N_0} - 10 \log_{10}(BW) \quad (3.20)$$

όπου $\frac{C}{N_0}$ είναι ο λόγος της ισχύος του φέροντος, C , προς την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου από το (3.19) και BW είναι το εύρος ζώνης του φέροντος σε Hz.

Για να υπολογίσουμε την λαμβανόμενη ενέργεια bit, E_b , σε συνάρτηση με την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου, N_0 , σε dB, κάνουμε:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0} \cdot \frac{1}{R_b} \quad (3.21)$$

όπου R_b είναι ο ρυθμός των bit.

3.2.2.1 Ατμοσφαιρικές απώλειες

Για τους παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες της ατμόσφαιρας έχουμε στο σύνολο 4 παράγοντες: α) απώλειες από την βροχή, β) απώλειες από τα σύννεφα και την ομίχλη, γ) απώλειες από τους υδρατμούς και τον αέρα και δ) απώλειες εξαιτίας των τροποσφαιρικών σπινθηρισμών ε) απώλειες στις συχνότητες μέχρι και 12 GHz λόγω ιονοσφαιρικών απωλειών.

- **Απώλειες βροχής**

Αρχικά για τον υπολογισμό των απωλειών από την βροχή έχουμε:

Βρίσκουμε το ύψος της βροχής. h_R ,

$$h_R = h_0 + 0.36 \quad (3.22)$$

όπου h_0 είναι το μέσο ισοθερμικό ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε το γεωμετρικό μήκος διαδρομής, L_S , σε km, για γωνία ανύψωσης $El \geq 5^\circ$, έχουμε:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin(El)} \quad (3.23)$$

όπου h_S είναι το ύψος του επίγειου σταθμού. Διαφορετικά για γωνία ανύψωσης $El < 5^\circ$, έχουμε:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{(\sin(El)^2 + \frac{2(h_R - h_S)}{R_E})^{1/2} + \sin(El)} \quad (3.24)$$

Μετάπειτα βρίσκουμε το γεωμετρικό μήκος, L_G , σε km:

$$L_G = L_S \cdot \cos(El) \quad (3.25)$$

Σειρά έχει να βρεθεί ο ρυθμός βροχόπτωσης, $R_{0,01}$, που υπολογίζεται μέσα από πίνακες σύμφωνα με το [66].

Έπειτα υπολογίζουμε την ειδική εξασθένηση, γ_R (dB/km):

$$\gamma_R = kR_{0,01}^a \quad (3.26)$$

Για τα k και a υπολογίζονται ως εξής:

$$k = \frac{1}{2}(k_H + k_\nu(k_H k_\nu)\cos(El)^2\cos(2\phi)) \quad (3.27)$$

$$a = \frac{1}{2}(k_H a_H + k_\nu a_\nu + (k_H a_H - \nu a_\nu) \cos(El)^2 \cos(2\phi)) \quad (3.28)$$

όπου k_H, k_ν, a_H, a_ν τα βρίσκουμε σε πίνακες στο [67] και είναι εξαρτώμενα από την συχνότητα.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του παράγοντα οριζόντιας εξασθένησης, $r_{0.01}$:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (3.29)$$

Στην συνέχεια, βρίσκουμε το ζ (degrees):

$$\zeta = \tan\left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}}\right)^{-1} \quad (3.30)$$

Ανάλογα με το αποτέλεσμα, αν $\zeta > El$ τότε:

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos(El)} \quad (3.31)$$

ενώ αν ισχύει $\zeta \leq El$ τότε:

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(El)} \quad (3.32)$$

όπου L_R σε km.

Έπειτα βρίσκουμε το x , σε μοίρες, για το οποίο ισχύει ότι αν το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού είναι $|\phi| < 36^\circ$ τότε:

$$x = 36 - |\phi| \quad (3.33)$$

ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση ισχύει $x = 0$.

Επόμενος υπολογισμός είναι του παράγοντα κατακόρυφης προσαρμογής, $v_{0.01}$:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin(El)}(31(1 - e^{-(El/(1+x))}) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45)} \quad (3.34)$$

Για το ενεργό μήκος διαδρομής, L_E (dB), ισχύει:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (3.35)$$

Τέλος, για τον τελικό υπολογισμό της ολικής εξασθένησης λόγω της βροχόπτωσης, A_r , σε dB κάνουμε:

$$A_r = \gamma_R L_E \quad (3.36)$$

• Απώλειες αερίων

Η ειδική εξασθένηση των αερίων (specific gaseous attenuation), σε dB/km, υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma = \gamma_O + \gamma_W = 0.1820f(N''_{Oxygen}(f) + N''_{WaterVapour}(f)) \quad (3.37)$$

όπου γ_O είναι η ειδική εξασθένηση λόγω του ξηρού αέρα, γ_W είναι η ειδική εξασθένηση λόγω των

υδρατμών και τα $N''_{Oxygen}(f)$ και $N''_{WaterVapour}(f)$ είναι τα φανταστικά μέρη, τα οποία εξαρτώνται από την συχνότητα (imaginary parts of the frequency dependent complex refractivities).

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τα φανταστικά μέρη με τους εξής τύπους:

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum i_{Oxygen} S_i F_i + N''_D(f) \quad (3.38)$$

$$N''_{WaterVapour} = \sum i_{WaterVapour} S_i F_i \quad (3.39)$$

όπου S_i είναι η φασματική δύναμη της γραμμής (the strength of the i th oxygen or water vapour line), F_i είναι η λειτουργία τοπικού εύρους ζώνης συχνότητας (the oxygen or water vapour line shape factor) και το $N''_D(f)$ είναι η σειρά ξηρότητας λόγω της απορρόφησης αζώτου που προκαλείται από την πίεση (the dry continuum due to pressure-induced nitrogen absorption and the Debye spectrum).

Για τον υπολογισμό του S_i για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, αντίστοιχα, έχουμε:

$$S_i = a_1 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot \theta^3 \exp(a_2(1 - \theta)) \quad (3.40)$$

$$S_i = b_1 \cdot 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3.5} \exp(b_2(1 - \theta)) \quad (3.41)$$

όπου p είναι η ατμοσφαιρική πίεση, e είναι η πίεση των υδρατμών και θ είναι η θερμοκρασία $\frac{300}{T}$, όπου T σε Κέλβιν, τα οποία όλα μπορούμε να τα βρούμε στο [68]. Για τα a_1, a_2, b_1, b_2 είναι σταθερές που τα παίρνουμε από πίνακες σύμφωνα με το [69].

Για τον υπολογισμό του F_i έχουμε:

$$F_i = \frac{f}{fi} \left(\frac{\Delta f - \delta(fi - f)}{(fi - f)^2 + (\Delta f)^2} + \frac{\Delta f - \delta(fi + f)}{(fi + f)^2 + (\Delta f)^2} \right) \quad (3.42)$$

όπου fi είναι η συχνότητα γραμμής του οξυγόνου ή των υδρατμών (the oxygen or water vapour line frequency) και Δf είναι το πλάτος της εκάστοτε γραμμής (the width of the line).

Για τον υπολογισμό του κάθε Δf για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, αντίστοιχα, έχουμε:

$$\Delta f = a_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{0.8-a_4} + 1.1 \cdot e \cdot \theta) \quad (3.43)$$

$$\Delta f = b_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{b_4} + b_5 \cdot e \cdot \theta^{b_6}) \quad (3.44)$$

όπου τα $a_3, a_4, b_3, b_4, b_5, b_6$ τα παίρνουμε πάλι από τους πίνακες στο [69].

Το τελικό Δf μετά τον διαχωρισμό Zeeman για το οξυγόνο και διεύρυνση Doppler για τους υδρατμούς ορίζονται (modified to account for Zeeman splitting of oxygen lines and Doppler broadening of water vapour lines), αντίστοιχα, ως εξής:

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f)^2 + 2.25 \cdot 10^{-6}} \quad (3.45)$$

$$\Delta f = 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 (\Delta f)^2 + \frac{2.1316 \cdot 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad (3.46)$$

Για τον συντελεστή διόρθωσης οξυγόνου (is a correction factor that arises due to interference

effects in oxygen lines), δ , ισχύει:

$$\delta = (a_5 + a_6 \cdot \theta) \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (3.47)$$

όπου a_5, a_6 τα παίρνουμε από τους ίδιους πίνακες. Αυτό ισχύει για το οξυγόνο αποκλειστικά, ενώ για τους υδρατμούς ισχύει $\delta = 0$.

Για την σειρά ξηρότητας λόγω της απορρόφησης αζώτου, N''_D ισχύει:

$$N''_D(f) = f \cdot p \cdot \theta^2 \left(\frac{6.14 \cdot 10^{-5}}{d(1 + (\frac{f}{d})^2)} + \frac{1.4 \cdot 10^{-12} \cdot p \cdot \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1.5}} \right) \quad (3.48)$$

όπου d είναι το μήκος στο φάσμα του Debye (the width parameter for the Debye spectrum) και είναι ίσο με $5.6 \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}$

Τέλος, για τις συνολικές απώλειες διαδρομής, A_g , σε dB έχουμε:

$$A_g = \gamma \cdot R = (\gamma_o + \gamma_w) R \quad (3.49)$$

όπου R είναι το μήκος της διαδρομής σε χιλιόμετρα.

• Απώλειες ομίχλης

Για να βρεθεί η ειδική εξασθένιση στα σύννεφα, γ_c , (dB/km), έχουμε:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T) \cdot M \quad (3.50)$$

όπου f η συχνότητα του συστήματος σε GHz, K_l ο συντελεστής απόσβεσης της υγρασίας σε (dB/km)/(g/m³), T η θερμοκρασία της υγρασίας σε Κέλβιν και M η πυκνότητα του υγρού. Η πυκνότητα συνήθως κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ 0.05 και 0.5 g/m³, με 0.05 να είναι μέτρια η ένταση της (ορατότητα στα 300 μέτρα), ενώ 0.5 να είναι πυκνή (ορατότητα στα 50 μέτρα).

Στην συνέχεια, για να βρεθεί η ειδική εξασθένιση της υγρασίας έχουμε:

$$K_l(f, T) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad (3.51)$$

το οποίο έχει μονάδα μέτρησης (dB/Km)/(g/m³).

Για να βρεθεί το η κάνουμε:

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (3.52)$$

Για τα ε' και ε'' (complex dielectric permittivity of water) έχουμε:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p(1 + (\frac{f}{f_p})^2)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s(1 + (\frac{f}{f_s})^2)} \quad (3.53)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (\frac{f}{f_p})^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (\frac{f}{f_s})^2} + \varepsilon_2 \quad (3.54)$$

όπου $\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1)^2$,

$\varepsilon_1 = 0.0671 \cdot \varepsilon_0$,

$$\varepsilon_2 = 3.52,$$

$$\theta = \frac{300}{T}$$

Για τα f_p, f_s (principal relaxation frequency)(secondary relaxation frequency) έχουμε:

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (3.55)$$

$$f_s = 39.8 \cdot f_p \quad (3.56)$$

τα οποία έχουν μονάδα μέτρησης τα GHz.

Τέλος, για να υπολογίσουμε τη ολική εξασθένηση εξαιτίας των σύννεφων και της ομίχλης, σε dB, έχουμε:

$$A_c = \gamma_c \cdot R \quad (3.57)$$

• Απώλειες σπινθηρισμών

Για τον υπολογισμό της απώλειας εξαιτίας των σπινθηρισμών αρχικά, βρίσκουμε μέσα από τους πίνακες του [70] το N_{wet} (median value of the wet term of the surface refractivity exceeded for the average year).

Έπειτα υπολογίζουμε το εύρος του σήματος αναφοράς (the standard deviation of the reference signal amplitude), σ_{ref} , σε dB:

$$\sigma_{ref} = 3.6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{wet} \quad (3.58)$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε το effective path length, L, (m):

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin(El)^2 + 2.35 \cdot 10^{-4} + \sin(El)}} \quad (3.59)$$

όπου h_L είναι το turbulent layer height και είναι ίσο με 1 χιλιόμετρο.

Σειρά έχει ο υπολογισμός του effective antenna diameter, D_{eff} , (m):

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} \cdot D \quad (3.60)$$

όπου η είναι η αποδοτικότητα της κεραίας (antenna efficiency) και D η γεωμετρική διάμετρος της (geometrical diameter).

Έπειτα, βρίσκουμε το antenna averaging factor, $g(x)$:

$$g(x) = \sqrt{3.86(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \tan^{-1}\left(\frac{1}{x}\right)\right) - 7.08x^{5/6}} \quad (3.61)$$

όπου $x = 1.22 \cdot D_{eff}^2 \cdot \frac{f}{L}$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε το standard deviation of the signal, σ :

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot f^{7/12} \cdot \frac{g(x)}{\sin(El)^{1.2}} \quad (3.62)$$

Μετάπειτα, υπολογίζουμε το time percentage factor, $a(p)$:

$$a(p) = -0.061(\log_{10}(p))^3 + 0.072(\log_{10}(p))^2 - 1.71 \log_{10}(p) + 3 \quad (3.63)$$

με το p να κυμαίνεται μεταξύ 0.01% μέχρι και 50%.

Τέλος υπολογίζουμε το fade depth, A_s , το οποίο μετριέται σε dB:

$$A_s = a(p) \cdot \sigma \quad (3.64)$$

• **Ιονοσφαιρικές απώλειες**

Στις συχνότητες μέχρι και τα 12 GHz οι ιονοσφαιρικές απώλειες λαμβάνονται υπόψιν. Βασιζόμενοι στο [71], αρχίζουμε με τον υπολογισμό του Total Electron Content (TEC):

$$N_T = \int_s n_e(s) ds \quad (3.65)$$

όπου s : διαδρομή διάδοσης (m) και n_e : συγκέντρωση ηλεκτρονίων (el/m^3).

Κατά τη διάδοση μέσω της ιονόσφαιρας, ένα γραμμικά πολωμένο κύμα θα υποστεί σταδιακή περιστροφή Faraday κατά του επιπέδου πόλωσης του λόγω της παρουσίας του γεωμαγνητικού πεδίου και της ανισοτροπίας του πλάσματος μέσου:

$$\theta = 2.36 \times 10^{-14} \frac{B_{\alpha\nu} N_T}{f^2} \quad (3.66)$$

όπου θ : γωνία περιστροφής (rad), $B_{\alpha\nu}$: μέσο μαγνητικό πεδίο Γης ($Wb \cdot m^{-2}$ or T), f : συχνότητα (GHz) και N_T : TEC ($el \cdot m^{-2}$).

Η διάκριση διασταυρούμενης πόλωσης για ευθυγραμμισμένες κεραιές, XPD (dB), σχετίζεται με τη γωνία περιστροφής Faraday, θ , ως εξής:

$$XPD = -20 \log(\tan \theta) \quad (3.67)$$

Η παρουσία φορτισμένων σωματιδίων στην ιονόσφαιρα επιβραδύνει τη διάδοση των ραδιοσημάτων κατά μήκος της διαδρομής. Η χρονική καθυστέρηση που υπερβαίνει το χρόνο διάδοσης στον ελεύθερο χώρο, η οποία συνήθως συμβολίζεται ως t , ονομάζεται καθυστέρηση ομάδας (Group Delay). Η ποσότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$t = 1.345 N_T / f^2 \times 10^{-7} \quad (3.68)$$

όπου t : χρόνος καθυστέρησης (s) σε σχέση με τη διάδοση στο κενό, f : συχνότητα μετάδοσης (Hz) και N_T : προσδιορίζεται κατά μήκος της κεκλιμένης διαδρομής διάδοσης ($el \cdot m^{-2}$).

Οι διασταυρούμενες και συμπολικές εξασθενήσεις, A_{xF} και A_{cF} , αντίστοιχα, λόγω της περιστροφής Faraday δίνονται ως εξής [72]:

$$A_{xF} = -20 \log[\cos(\theta)](dB) \quad (3.69)$$

$$A_{cF} = -20 \log[\sin(\theta)](dB) \quad (3.70)$$

όπου το $A_{xF} \rightarrow \infty$ με $\theta \rightarrow (2n+1)\pi/2$ για τιμές $n = 0, 1, 2, \dots$ και το $A_{cF} \rightarrow \infty$ με $\theta \rightarrow 2n\pi$ για τιμές $n = 0, 1, 2, \dots$.

- **Συνολικές απώλειες ατμόσφαιρας**

Για να υπολογίσουμε τις συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες κάνουμε:

$$A_t = A_g + \sqrt{(A_r + A_c)^2 + A_s^2} + A_{xF} + A_{cF} \quad (3.71)$$

3.2.3 Power Model Συστήματος

Σχετικά με τα μοντέλα ενέργειας, για τους επίγειους και τους δορυφορικούς σταθμούς βάσης έχουμε δύο κατηγορίες: α) αυτούς που συνδέονται ενσύρματα με το backhaul δίκτυο και ασύρματα με το δίκτυο πρόσβασης, οι οποίοι αφορούν αποκλειστικά επίγειους σταθμούς και β) αυτούς που συνδέονται ασύρματα, στο backhaul και στο δίκτυο πρόσβασης, στους οποίους συγκαταλέγονται και επίγειοι και δορυφορικοί σταθμοί.

3.2.3.1 Power Model για τους υπολογιστικούς κόμβους

Υπολογίζουμε την συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο σύνολο σε έναν υπολογιστικό κόμβο (physical machine), που πιθανόν να υπάρχει σε ένα σταθμό βάσης:

$$P_{pm} = p_{idle_{pm}} + (p_{max_{pm}} - p_{idle_{pm}})\theta_{pm}^{CPU} \quad (3.72)$$

όπου P_{pm} είναι η κατανάλωση του κόμβου, $p_{idle_{pm}}$ είναι η βασική κατανάλωση του σε αδράνεια, δηλαδή όταν το φόρτος εργασίας της CPU είναι στο 0%, ενώ το $p_{max_{pm}}$ είναι όταν ο φόρτος εργασίας είναι στο 100%. Το θ_{pm}^{CPU} είναι το ποσοστό του φόρτου εργασίας της CPU. Και πάλι εδώ ισχύει πως, σε περίπτωση που ο υπολογιστικός κόμβος είναι απενεργοποιημένος, ο παραπάνω τύπος μετατρέπεται σε:

$$P_{pm} = 0 \quad (3.73)$$

δηλαδή έχει μηδενική κατανάλωση ενέργειας.

3.2.3.2 Power Model για Ενσύρματο Backhaul Δίκτυο

Για την πρώτη κατηγορία ο υπολογισμός για την κατανάλωση ενέργειας στο backhaul δίκτυο, σε Watt, γίνεται ως εξής:

$$P_{switch} = p_{idle_{switch}} + \sum_{i \in ports} P_i \quad (3.74)$$

σε περίπτωση που ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται σε λειτουργία, ακόμα και σε αδράνεια, ή

$$P_{switch} = 0 \quad (3.75)$$

σε περίπτωση που είναι πλήρως απενεργοποιημένος. Το P_{switch} είναι η κατανάλωση ενέργειας στο switch του επίγειου σταθμού, $p_{idle_{switch}}$ είναι η βασική κατανάλωση ενέργειας στο switch όταν βρίσκεται σε αδράνεια και P_i είναι η κατανάλωση ενέργειας κάθε διασύνδεσης (port) που έχει το switch και βρίσκεται σε λειτουργία.

3.2.3.3 Power Model για Ασύρματο Backhaul και Access Δίκτυο

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης στο δίκτυο πρόσβασης, σε Watt, έχουμε:

$$P_{AN} = \sum_{i \in B} N_{TRX_i} (P_{0_i} + \Delta_{p_i} \cdot P_{out_i}) \quad (3.76)$$

όπου N_{TRX_i} είναι ο αριθμός των πομποδεκτών στον σταθμό βάσης i , το P_{0_i} είναι η στατική κατανάλωση ενέργειας όταν ο σταθμός βάσης i βρίσκεται σε αδράνεια, Δ_{p_i} είναι ο δείκτης της κλίσης της εκπομπόμενης ενέργειας του σταθμού βάσης για να ισοσταθμίσει την κίνηση των δεδομένων και P_{out_i} είναι η κατανάλωση ενέργειας που εξαρτάται από το φορτίο.

Αναλυτικά για το P_{out_i} έχουμε:

$$P_{out_i} = \sum_{u \in U} P_{i_{PRB}} \cdot c_{i,u} \cdot x_{i,u}^u \quad (3.77)$$

όπου $x_{i,u}^u$ είναι κάθε σύνδεσμος μεταξύ δύο κόμβων (nodes) που μεταφέρει πληροφορία, $c_{i,u}$ είναι ο αριθμός των συνολικών resource blocks που απαιτούνται για να γίνει η σύνδεση μεταξύ του χρήστη u και του σταθμού βάσης i , για το οποίο ισχύει:

$$c_{i,u} = \frac{r_u}{BW_{PRB} SE_{i,u}} \quad (3.78)$$

όπου r_u είναι ο απαιτούμενος ρυθμός των συσκευών των χρηστών, BW_{PRB} είναι το εύρος ζώνης ανά resource block και $SE_{i,u}$ είναι η μέγιστη αποδοτικότητα του φάσματος, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$SE_{i,u} = \min(N_{TX_i}, N_{RX_u}) \log_2 \left(1 + \frac{N_{RX_u} \cdot SINR_{i,u}}{\min(N_{TX_i}, N_{RX_u})} \right) \quad (3.79)$$

όπου N_{TX_i} , N_{RX_u} είναι οι κεραιές του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα, και $SINR_{i,u}$ είναι η αναλογία του σήματος προς τον θόρυβο και την παρεμβολή από τον σταθμό βάσης i προς τον δέκτη u . Στην προκειμένη περίπτωση, για το SINR ισχύει ο τύπος (3.2) όταν γίνεται λόγος για επίγειο σταθμό βάσης, ενώ για δορυφορικό σταθμό βάσης ισχύει ο τύπος (3.20).

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό της κατανάλωσης στο backhaul δίκτυο, σε Watt, έχουμε:

$$P_{BH} = \sum_{l \in L} N_{TRX_l} (P_{0_l} + \Delta_{p_l} P_{out_l}) \quad (3.80)$$

όπου N_{TRX_l} είναι ο αριθμός των πομποδεκτών στο backhaul link, P_{0_l} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για το backhaul link σε κατάσταση αδράνειας, Δ_{p_l} είναι ο δείκτης κλίσης του backhaul link για να ισοσταθμίσει την εκπεμπόμενη ενέργεια και P_{out_l} είναι η κατανάλωση εξαιτίας του φορτίου.

Για τον υπολογισμό του P_{out_l} , σε Watt, έχουμε:

$$P_{out_l} = SINR_l^{trg} + \beta_l \quad (3.81)$$

όπου $SINR_l^{trg}$ είναι το απαιτούμενο SINR για την πετυχημένη μεταφορά του φορτίου μέσω του backhaul link, το οποίο δίνεται από τον τύπο (3.5) για επίγειο σταθμό βάσης ή από τον τύπο (3.1) για δορυφορικό σταθμό βάσης χωρίς όμως να έχουμε παρεμβολές στο backhaul δίκτυο για το δορυφορικό μέρος, β_l είναι το σύνολο των απωλειών του συστήματος χωρίς τα κέρδη του, το οποίο υπολογίζεται, σε dBm, με τον εξής τρόπο:

$$\beta_l = L_{TX_l} + L_{RX_l} + PL_l + LM + N_{TH} + NF_{BH} - G_{TX_l} - G_{RX_l} \quad (3.82)$$

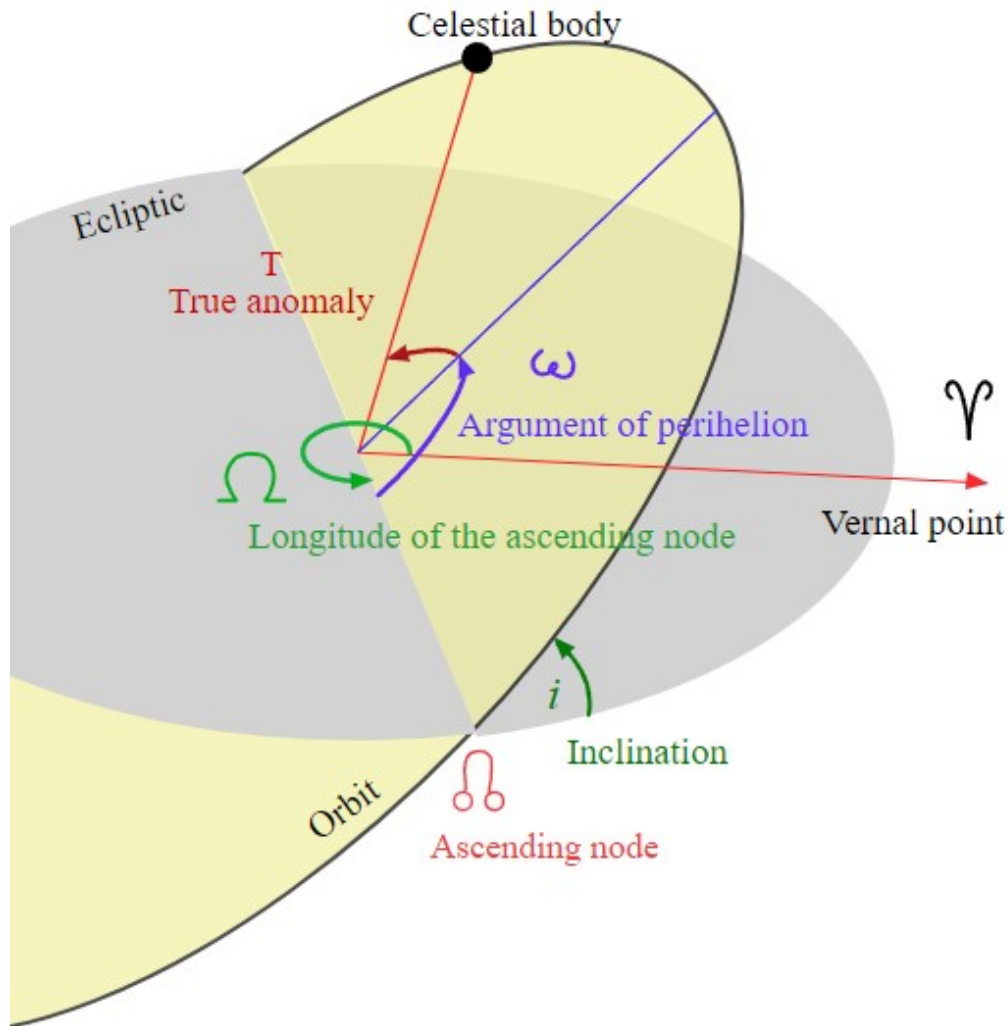
όπου L_{TX_l} και L_{RX_l} είναι οι απώλειες των κεραιών στον πομπό και τον δέκτη, αντίστοιχα, PL_l είναι οι απώλειες διάδοσης (συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες κενού χώρου και οι συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες, LM είναι το κενό ασφαλείας του backhaul link (link margin), N_{TH} είναι ο θερμικός θόρυβος του συστήματος, NF_{BH} είναι ο συντελεστής θορύβου (noise figure) του δέκτη. Ο ίδιος τύπος ισχύει για τα επίγεια και τα δορυφορικά συστήματα με τις αντίστοιχες τιμές να αλλάζουν από σύστημα σε σύστημα ανάλογα με τα δεδομένα.

3.2.4 Εύρεση Δορυφόρου στην Τροχιά

Ο προσδιορισμός της θέσης δορυφόρων στις τροχιές τους πραγματοποιείται με τη χρήση δύο εξειδικευμένων συστημάτων που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση δεδομένων της NORAD, τα οποία χρησιμοποιούνται και στο λογισμικό προσομοίωσης. Πρόκειται για τα μοντέλα SGP4 (Simplified General Perturbations-4) και SDP4 (Simplified Deep-Space Perturbations-4) [73]. Η βάση λειτουργίας αυτών των μοντέλων είναι τα τροχιακά χαρακτηριστικά, που αποκαλούνται επίσης κεπλέρια στοιχεία. Η θεωρητική τους προσέγγιση βασίζεται στη μέθοδο Two-Body-Keplerian, η οποία υπολογίζει τις θέσεις των ουράνιων σωμάτων χρησιμοποιώντας τους νόμους του Κέπλερ για την πλανητική κίνηση. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή δεν συνυπολογίζει τις βαρυτικές επιρροές από άλλα ουράνια σώματα εκτός της Γης, όπως οι πλανήτες, και αγνοεί τις ανωμαλίες του γήινου σχήματος. Τα δύο προαναφερόμενα μοντέλα αντιμετωπίζουν αυτούς τους περιορισμούς: το SGP4 συνυπολογίζει επιπλέον την ατμοσφαιρική αντίσταση και τη γεωμετρική ασυμμετρία του πλανήτη, εφαρμοζόμενο για δορυφόρους με περίοδο περιφοράς μικρότερη από 225 λεπτά. Από την άλλη πλευρά, το SDP4 περιλαμβάνει, εκτός από τα χαρακτηριστικά του SGP4, και τις βαρυτικές επιδράσεις του Ήλιου και της Σελήνης, χρησιμοποιούμενο για δορυφόρους με περίοδο περιφοράς 225 λεπτών και μεγαλύτερη. Τα κεπλέρια στοιχεία αποτελούνται από τις μεταβλητές που προσδιορίζουν μια τροχιά: α) τον μείζονα ημιάξονα, β) την εκκεντρότητα, γ) την τροχιακή κλίση, δ) το μήκος του ανιόντα κόμβου, ε) το όρισμα του περιγείου και στ) την αληθή ανωμαλία [74].

Ο μεγάλος ημιάξονας, που αναπαριστάται με το σύμβολο a , αντιστοιχεί στη μέτρηση που προσδιορίζει το εύρος μιας τροχιάς και ουσιαστικά εκφράζει τη διάσταση της κυκλικής πορείας μεταξύ των κεντρικών σημείων δύο σωμάτων. Η εκκεντρότητα, με σύμβολο e , προσδιορίζει το σχήμα της τροχιάς, καθορίζοντας πόσο ελλειπτική ή κυκλική είναι. Η τροχιακή κλίση, που συμβολίζεται ως i , περιγράφει τη γωνία μεταξύ του τροχιακού επιπέδου του σώματος και του ισημερινού επιπέδου αναφοράς. Η ορθή ανοδική αναφορά του αναβατικού κόμβου, που συμβολίζεται με Ω , αποτελεί τη γωνιακή μέτρηση που καθορίζει την περιστροφική θέση του σώματος στην τροχιά αναφορικά με το μεσημβρινό επίπεδο, λειτουργώντας

ως παράμετρος κάθετη στην κλίση. Η παράμετρος ή γωνιακή τιμή του περιγείου, που συμβολίζεται με ω , είναι η γωνία μεταξύ του σημείου περιγείου και του ανιόντα κόμβου. Η αληθής ανωμαλία, που παριστάνεται ως ϕ_0 , ορίζει τη γωνία μεταξύ της στιγμιαίας θέσης του σώματος στην τροχιά του και της διεύθυνσης του περιγείου, υποδεικνύοντας την ακριβή θέση του σώματος κατά μήκος της τροχιακής του διαδρομής.



Σχήμα 3.3: Τα στοιχεία που απαρτίζουν μία τροχιά και χρησιμοποιούνται για την εύρεση των δορυφόρων σε αυτήν. [74]

Για τους δορυφόρους που εφαρμόζονται στο σύστημα αυτής της μελέτης, η απόκτηση των προαναφερόμενων τροχιακών στοιχείων γίνεται μέσω αρχείων TLE (Two-Line Element). Τα δεδομένα κάθε δορυφόρου περιέχονται σε ένα τέτοιο αρχείο, το οποίο διατίθεται ελεύθερα στο κοινό μέσω διαδικτύου. Η τυποποίηση αυτών των αρχείων έχει γίνει από τη NASA (National Aeronautics and Space Administration) και τη NORAD (North American Aerospace Defense Command), με ένα τμήμα της τελευταίας να έχει την ευθύνη της επίβλεψης για τη διασφάλιση της ακρίβειας των πληροφοριών. Τα αρχεία TLE χρησιμοποιούνται από τα δύο μοντέλα που αναφέρθηκαν προηγουμένως για τον εντοπισμό της θέσης των δορυφόρων στις τροχιές τους, και για την παρούσα εργασία αντλήθηκαν από την πηγή [74].

```
HELLASSAT4
1 44034U 19007A 23098.55604815 .00000161 00000-0 00000-0 0 9996
2 44034 0.0666 125.2365 0003471 11.0030 299.4825 1.00271010 15668
```

Σχήμα 3.4: Τα στοιχεία του δορυφόρου HellasSat4 στην μορφή TLE.

3.3 Πρόβλημα προς Επίλυση και Αρχιτεκτονική Ακτορα/Κριτή

3.3.1 Ενισχυτική Μάθηση

Η ενισχυτική μάθηση αποτελεί μια θεμελιώδη προσέγγιση στην τεχνητή νοημοσύνη που μιμείται τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι και τα ζώα μαθαίνουν μέσω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον τους. Σε αντίθεση με την επιβλεπόμενη μάθηση, όπου το σύστημα εκπαιδεύεται με προκαθορισμένα παραδείγματα εισόδου-εξόδου, η ενισχυτική μάθηση βασίζεται στην εξερεύνηση και την ανακάλυψη βέλτιστων στρατηγικών μέσω δοκιμής και σφάλματος. Στον πυρήνα της ενισχυτικής μάθησης βρίσκεται η έννοια του πράκτορα που αλληλεπιδρά με ένα περιβάλλον. Ο πράκτορας παρατηρεί την τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος, λαμβάνει αποφάσεις για τις ενέργειες που θα εκτελέσει, και λαμβάνει ανταμοιβές ή ποινές ανάλογα με την ποιότητα των επιλογών του. Αυτή η κυκλική διαδικασία παρατήρησης-ενέργειας-ανταμοιβής συνεχίζεται μέχρι ο πράκτορας να μάθει μια βέλτιστη πολιτική που μεγιστοποιεί τη συνολική αναμενόμενη ανταμοιβή. Η μοντελοποίηση αυτής της διαδικασίας γίνεται μέσω της Μαρκοβιανής Διαδικασίας Απόφασης, η οποία παρέχει το μαθηματικό πλαίσιο για την τυποποίηση προβλημάτων ακολουθιακής λήψης αποφάσεων. Η ιδιότητα Markov υποδηλώνει ότι η μελλοντική εξέλιξη του συστήματος εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα κατάσταση και όχι από το ιστορικό των προηγούμενων καταστάσεων. Αυτή η απλοποίηση είναι κρίσιμη για την υπολογιστική αποδοτικότητα και την πρακτική εφαρμογή των αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης. Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης ανάθεσης πόρων σε δίκτυα 6ης γενιάς, η ενισχυτική μάθηση προσφέρει μια δυναμική και προσαρμοστική λύση. Το δίκτυο μοντελοποιείται ως ένα περιβάλλον όπου οι καταστάσεις αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα κατανομή πόρων, τη ζήτηση των χρηστών και την ενεργειακή κατανάλωση. Οι ενέργειες αντιστοιχούν στις αποφάσεις συσχέτισης χρηστών με σταθμούς βάσης, ενώ οι ανταμοιβές αντανακλούν την επίτευξη των στόχων ενεργειακής απόδοσης και ποιότητας υπηρεσίας.

3.3.2 Αλγόριθμος Proximal Policy Optimization (PPO)

Ο αλγόριθμος Proximal Policy Optimization αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα της ενισχυτικής μάθησης, συνδυάζοντας τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα με τρόπο που τον καθιστά ιδανικό για πολύπλοκα προβλήματα όπως η ανάθεση πόρων σε ετερογενή δίκτυα. Η θεμελιώδης καινοτομία του PPO έγκειται στον τρόπο που διαχειρίζεται το δίλημμα μεταξύ εξερεύνησης νέων στρατηγικών και εκμετάλλευσης της υπάρχουσας γνώσης. Σε αντίθεση με παλαιότερους αλγορίθμους που μπορεί να οδηγούσαν σε απότομες και ασταθείς αλλαγές στην πολιτική του πράκτορα, ο PPO εισάγει έναν μηχανισμό περιορισμού που διασφαλίζει ότι κάθε ενημέρωση της πολιτικής παραμένει εντός ενός "ασφαλούς" εύρους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής του clipping, όπου η αντικειμενική συνάρτηση τροποποιείται ώστε να αποτρέπει υπερβολικά μεγάλες αλλαγές στις πιθανότητες των ενεργειών. Η αρχιτεκτονική Actor-Critic που υιοθετεί ο PPO διαχωρίζει τη διαδικασία μάθησης σε δύο συμπληρωματικά τμήματα. Ο Actor είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων και την επιλογή ενεργειών βάσει της τρέ-

χουσας κατάστασης. Παράλληλα, ο Critic αξιολογεί την ποιότητα των καταστάσεων και των ενεργειών, παρέχοντας ανατροφοδότηση στον Actor για τη βελτίωση της πολιτικής του. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει πιο αποτελεσματική μάθηση, καθώς ο Critic μπορεί να εκτιμήσει τη μακροπρόθεσμη αξία των ενεργειών πέρα από τις άμεσες ανταμοιβές. Στο πλαίσιο των δικτύων 6ης γενιάς, ο PPO αποδεικνύεται ιδιαίτερα κατάλληλος λόγω της ικανότητάς του να χειρίζεται υψηλής διάστασης χώρους καταστάσεων και ενεργειών. Με 146 πιθανούς σταθμούς βάσης και πολλαπλούς χρήστες με διαφορετικές απαιτήσεις, ο χώρος αποφάσεων είναι τεράστιος. Ο PPO μπορεί να πλοηγηθεί αποτελεσματικά σε αυτόν τον χώρο, μαθαίνοντας πολιτικές που εξισορροπούν την ενεργειακή απόδοση με την ποιότητα υπηρεσίας.

3.3.3 Generalized Advantage Estimation (GAE)

Η μέθοδος Generalized Advantage Estimation αποτελεί έναν κρίσιμο μηχανισμό για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και σταθερότητας του αλγορίθμου PPO. Το κεντρικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει το GAE είναι η εκτίμηση του "πλεονεκτήματος" μιας ενέργειας σε σχέση με τη μέση απόδοση σε μια δεδομένη κατάσταση. Αυτή η εκτίμηση είναι θεμελιώδης για την καθοδήγηση του πράκτορα προς καλύτερες αποφάσεις. Η πρόκληση στην εκτίμηση του πλεονεκτήματος έγκειται στην εξισορρόπηση μεταξύ ακρίβειας και διακύμανσης. Μια απλή προσέγγιση θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε τις πραγματικές ανταμοιβές που λαμβάνονται από το περιβάλλον, αλλά αυτό οδηγεί σε υψηλή διακύμανση που μπορεί να αποσταθεροποιήσει τη μάθηση. Από την άλλη πλευρά, η χρήση μόνο των εκτιμήσεων του Critic μπορεί να εισάγει συστηματικά σφάλματα που περιορίζουν την απόδοση. Το GAE επιλύει αυτό το δίλημμα εισάγοντας έναν παράγοντα λ που ελέγχει τον συμβιβασμό μεταξύ διακύμανσης και μεροληψίας. Όταν ο παράγοντας λ είναι κοντά στο μηδέν, η εκτίμηση βασίζεται κυρίως στις προβλέψεις του Critic, οδηγώντας σε χαμηλή διακύμανση αλλά πιθανή μεροληψία. Όταν ο λ πλησιάζει τη μονάδα, η εκτίμηση ενσωματώνει περισσότερες πραγματικές ανταμοιβές, αυξάνοντας την ακρίβεια αλλά και τη διακύμανση. Στην εφαρμογή μας για τα δίκτυα 6ης γενιάς, το GAE παίζει κρίσιμο ρόλο στην αξιολόγηση των αποφάσεων συσχέτισης χρηστών. Για παράδειγμα, όταν ο πράκτορας αποφασίζει να συνδέσει έναν χρήστη με έναν δορυφορικό σταθμό αντί για έναν επίγειο, το GAE βοηθά στην εκτίμηση του μακροπρόθεσμου οφέλους αυτής της απόφασης, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την άμεση ενεργειακή κατανάλωση αλλά και τις μελλοντικές επιπτώσεις στη διαθεσιμότητα πόρων.

3.3.4 Forward και Backward Propagation με ADAM Optimizer

Η διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου που υλοποιεί τον Actor του PPO βασίζεται στην επαναληπτική εφαρμογή των τεχνικών forward και backward propagation. Κατά το forward propagation, τα δεδομένα εισόδου που περιγράφουν την κατάσταση του δικτύου διαδίδονται μέσω των επιπέδων του νευρωνικού δικτύου για να παράγουν την κατανομή πιθανότητας των πιθανών ενεργειών. Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου έχει σχεδιαστεί με τέσσερα κρυφά επίπεδα που σταδιακά μειώνονται σε μέγεθος από 600 σε 500, 400 και 300 νευρώνες. Αυτή η πυραμιδική δομή επιτρέπει στο δίκτυο να εξάγει προοδευτικά πιο αφηρημένες και συμπαγείς αναπαραστάσεις των δεδομένων εισόδου. Κάθε επίπεδο εφαρμόζει Layer Normalization πριν από τη συνάρτηση ενεργοποίησης ReLU, μια τεχνική που σταθεροποιεί την εκπαίδευση και επιταχύνει τη σύγκλιση. Το Layer Normalization παίζει κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση σταθερών στατιστικών χαρακτηριστικών κατά μήκος του δικτύου. Σε αντίθεση με το Batch Normalization που κανονικοποιεί κατά μήκος του batch, το Layer Normalization λειτουργεί σε

κάθε δείγμα ξεχωριστά, καθιστώντας το ιδανικό για την online φύση της ενισχυτικής μάθησης όπου τα δείγματα επεξεργάζονται σειριακά. Μετά το forward pass και τον υπολογισμό της απώλειας βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης του PPO, ξεκινά η διαδικασία backward propagation. Τα σφάλματα διαδίδονται αντίστροφα μέσω του δικτύου, υπολογίζοντας τις κλίσεις για κάθε παράμετρο. Αυτές οι κλίσεις δείχνουν την κατεύθυνση και το μέγεθος της αλλαγής που απαιτείται για τη μείωση της απώλειας. Ο ADAM optimizer αναλαμβάνει την ενημέρωση των παραμέτρων χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες κλίσεις. Η καινοτομία του ADAM έγκειται στη χρήση προσαρμοστικών ρυθμών μάθησης για κάθε παράμετρο και στην ενσωμάτωση momentum πρώτης και δεύτερης τάξης. Το momentum πρώτης τάξης βοηθά στην υπέρβαση τοπικών ελαχίστων και στην επιτάχυνση της σύγκλισης σε περιοχές με σταθερή κλίση. Το momentum δεύτερης τάξης προσαρμόζει το ρυθμό μάθησης ανάλογα με την ιστορική διακύμανση των κλίσεων, επιβραδύνοντας σε περιοχές με υψηλή καμπυλότητα και επιταχύνοντας σε επίπεδες περιοχές. Στην πράξη, ο ADAM έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικός για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων του PPO στο πρόβλημα ανάθεσης πόρων. Η ικανότητά του να χειρίζεται αραιές κλίσεις και να προσαρμόζεται σε διαφορετικές κλίμακες παραμέτρων τον καθιστά ιδανικό για τη μεγάλη διάσταση και ετερογένεια του προβλήματός μας.

3.3.5 Παρόν Νευρωνικό Δίκτυο

Ο πρωτεύον σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος των ενοποιημένων δικτύων και την αποδεκτικότητα των χρηστών (user association) από το δίκτυο πρόσβασης (access network) με την χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Για την επίτευξη αυτού, η AI εκπαιδεύεται σε σωρεία σεναρίων τα οποία παρέχουν την τοπολογία του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών βάσης - πρωτεύοντων και δευτερευόντων - όσο και των χρηστών που απαιτούνται να συνδεθούν. Αρχικά, η AI έχει ως είσοδο τις καταστάσεις του δικτύου που περιγράφουν ολικά τις ανάγκες του χρήστη και τους φυσικούς περιορισμούς του ίδιου του δικτύου. Τα χαρακτηριστικά κατάστασης (state features) που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος του δικτύου είναι συνολικά 4:

- Ενεργές κυψέλες.
- Απαιτούμενα ζεύγη φυσικών πόρων ανά χρήστη-κυψέλη.
- Οι εναπομείνοντες φυσικοί πόροι της κυψέλης μετά την συσχέτιση.
- Η καταναλισκόμενη ενέργεια των πόρων όλων των κυψελών επί την ενέργεια του κάθε είδους σταθμού βάσης επί τον αριθμό πομποδεκτών του κάθε είδους.
- Η πάγια καταναλισκόμενη ενέργεια του κάθε είδους σταθμού βάσης επί τον αριθμό πομποδεκτών του κάθε είδους.

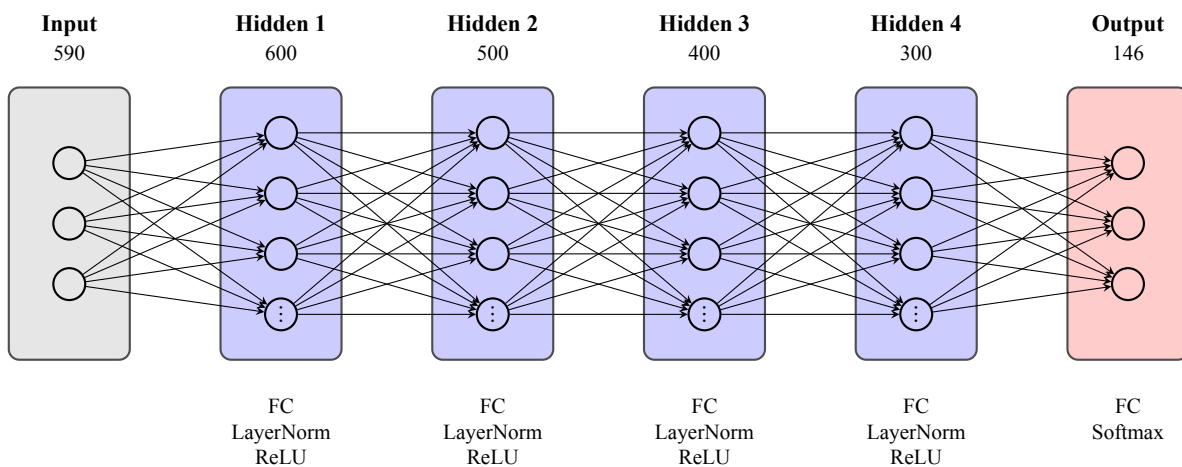
Τα εν λόγω χαρακτηριστικά επιλέχθηκαν λόγω της ικανότητας τους να περιγράψουν το ενοποιημένο δίκτυο επαρκώς, με την γνωστοποίηση των ενεργών κυψελών στον πράκτορα (agent) αναγνωρίζει ότι με την εκκίνηση ανενεργών κυψελών επιβαρύνει το ενοποιημένο δίκτυο, άρα θα προτιμάται η επιβάρυνση ήδη ενεργών κυψελών. Τα απαιτούμενα ζεύγη φυσικών πόρων ανά χρήστη-κυψέλη περιγράφουν την επιβάρυνση της κυψέλης για την ικανοποίηση της υπηρεσίας του χρήστη που θέλει ο άκτορας (actor)

να ικανοποιήσει για τον κάθε χρήστη που ζητείται να συσχετίσει, και σε συνδυασμό με την χρήση των εναπομενόντων πόρων στην συσχετιζόμενη κυψέλη του δικτύου πρόσβασης αναγνωρίζει τότε πάει να εξαντλήσει τους πόρους της. Τα δύο τελευταία χαρακτηριστικά εισάγονται στο νευρωνικό για την ακριβή ενημέρωση του ως προς το ποιο σταθμό είναι πιο ενεργειακά ωφέλιμο να επιλέξει. Η καταναλισκόμενη ενέργεια των πόρων της κάθε κυψέλης επιβλέπει το τι καταναλώνουν ενεργειακά οι πόροι της κάθε κυψέλης (κάθε μία από τις 146) σε συνδυασμό με το πόσους πομποδέκτες (chains) έχουν, ενώ το τελευταίο χαρακτηριστικό επιβλέπει την πάγια κατανάλωση όλων των ειδών σταθμών βάσης και όχι συγκεκριμένα για το καθένα. Το δίκτυο αποτελείται από 146 επίγειες, εναέριες και δορυφορικές κυψέλες, με μεγαλύτερο το δορυφορικό κομμάτι, άρα τα συνολικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται ως είσοδος είναι 590 (146 ενεργές κυψέλες, 146 ανάγκες εύρους ζώνης για το κάθε ζεύγος σταθμού βάσης - χρήστη, 146 διαθέσιμοι πόροι του κάθε σταθμού βάσης, 152 χαρακτηριστικά ενεργειακής κατανάλωσης), και ως έξοδο του νευρωνικού τους 146 σταθμούς βάσης προς επιλογή.

Η αρχική αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου ήταν τύπου Deep Q-Network (DQN). Ένα DQN χρησιμοποιεί Q values για την επιλογή αποφάσεων του, συγκεκριμένα:

$$Q(s, a) \quad (3.83)$$

όπου το s είναι η κατάσταση (state) του περιβάλλοντος και a η ενέργεια που θα πάρει σε αυτή την κατάσταση, με αποτέλεσμα μία ανταμοιβή. Όπως είναι προφανές, όσες περισσότερες καταστάσεις «δει» το νευρωνικό τόσο πιθανότερο να πάρει την σωστή απόφαση σε κάθε μία πιθανή κατάσταση. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση το νευρωνικό δεν έχει πρόσβαση σε όλη την κατάσταση του σεναρίου, αλλά μόνο σε ένα υποσύνολο του, το οποίο ονομάζεται παρατήρηση (observation), και ως ενέργεια έχουμε την συσχέτιση του χρήστη με έναν σταθμό βάσης. Αν και υπερβολικά ισχυρή η αρχιτεκτονική DQN είχε περιορισμούς σε σχέση με την τελική υλοποίηση. Λόγω της εξάρτησης της από τις τιμές παρατηρήσεων με ενεργειών κατάφερε να δημιουργήσει ένα πολυπληθές εύρος κυψελών που θα μπορούσε να συνδεθεί σε διάφορες καταστάσεις, αλλά εξαρτώνταν εξαιρετικά από την κάθε παρατήρηση, δυσκολευόμενο να συγκλείσει σε μια πιο γενικευμένη πολιτική.



Σχήμα 3.5: Αρχιτεκτονική άκτορα PPO με Layer Normalization και ReLU.

Σε αντίθεση η αρχιτεκτονική Proximal Policy Optimization (PPO) [75], ιδιαίτερα γνωστή για την χρήση

της στα Large Language Models (LLMs), αποδείχτηκε πολύ ικανότερη στο να καταλήξει σε μία πιο γενικευμένη πολιτική. Συγκεκριμένα:

$$\pi(s, a) \tag{3.84}$$

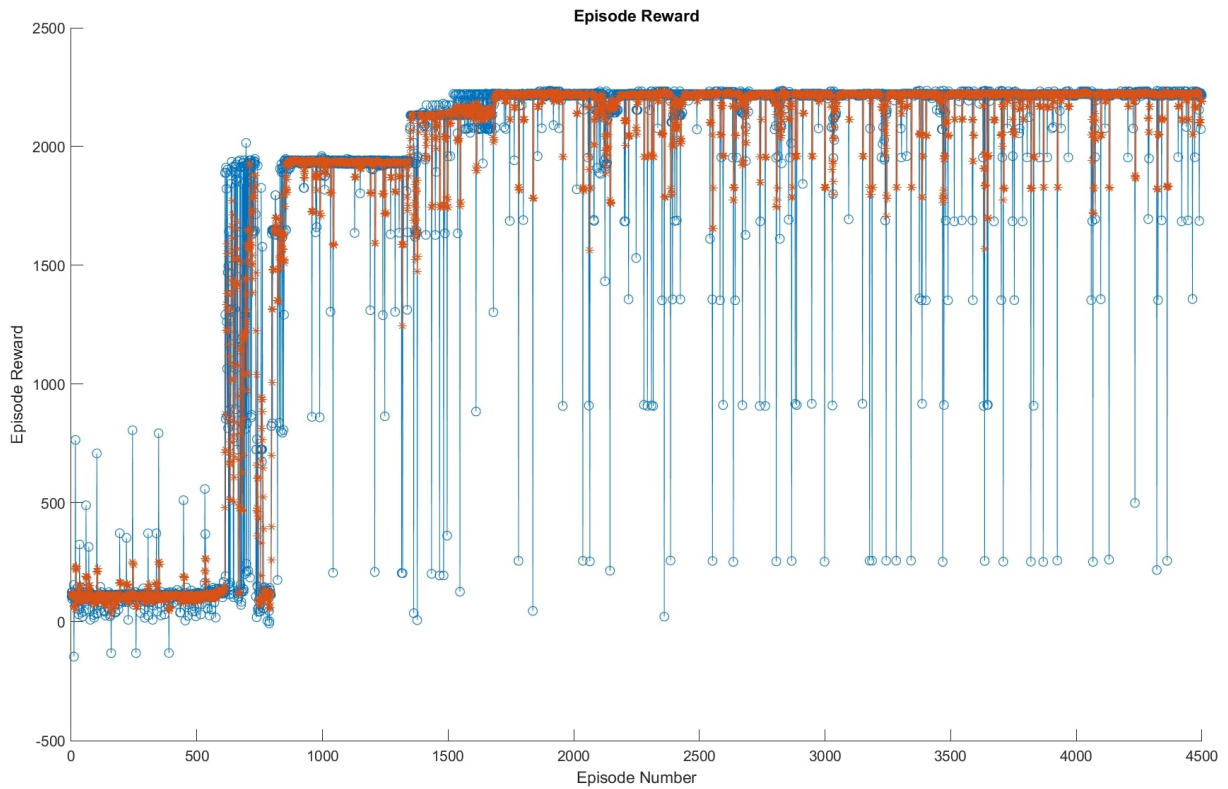
είναι η πιθανότητα για να επιλεγεί μια ενέργεια a σε μία κατάσταση s (σε αντίθεση με την προαναφερόμενη τακτική των Q-values που αναφέρονται σε σταθερή ανταμοιβή ανα κατάσταση/ενέργεια). Λόγω αυτής της κεντρικής διαφοράς ένας PPO αλγόριθμος είναι ικανότερος να δεχτεί ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος χαρακτηριστικών και εξόδων, σε ένα πολύ πιο δυναμικό περιβάλλον από έναν DQN. Επίσης μπορεί να αποφύγει τα φαινόμενα overfitting και underfitting λόγω των GAE (Generalized Advantage Estimation) και clipping μεθόδων, όπου αποτρέπουν τον άκτορα να κάνει υπερμεγέθεις αλλαγές σε κάθε βήμα. Η μέθοδος του "clipping" εφαρμόζεται στη συνάρτηση απώλειας του PPO και εξασφαλίζει ότι οι αλλαγές στην πολιτική παραμένουν εντός ενός λογικού ορίου. Αυτό προστατεύει από ακραίες ενημερώσεις που μπορούν να αποσταθεροποιήσουν τη μάθηση. Ταυτόχρονα το GAE υπολογίζει χονδρικά το πόσο καλή ήταν η επιλογή της ενέργειας σε συγκεκριμένη κατάσταση, σε σχέση με το τι περίμενε ο άκτορας, κάνοντας έτσι διορθώσεις στην πολιτική.

Η κατάληξη στην παρούσα υλοποίηση του νευρωνικού έγινε με πολλαπλούς πειραματισμούς στον σχεδιασμό του δικτύου, αλλά ως γενικό κανόνα πάντοτε έχουμε την μείωση των νευρώνων όσο βαθύτερα πηγαίνουμε στις λωρίδες (layers), ο λόγος μπορεί να οπτικοποιηθεί εύκολα με το παράδειγμα ενός συνελκτικού νευρωνικού δικτύου - οι αρχικοί νευρώνες διαλέγουν τα μικρότερα χαρακτηριστικά των εικόνων που εισάγονται στο δίκτυο και όσο μειώνεται το πλήθος των νευρώνων σε κάθε λωρίδα τα χαρακτηριστικά αυτά αρχίζουν να σχηματίζουν κομμάτια της αρχικής φωτογραφίας, μετά από την πράξη της συνέλιξης. Ο παρών αλγόριθμος λειτουργεί εννοιολογικά το ίδιο από αυτή την άποψη, κάθε βαθύτερη λωρίδα αναγκάζεται να κρατήσει "υψηλότερου επιπέδου" χαρακτηριστικά, αυξάνοντας την κατανόηση του δικτύου για το ποια πράξη πρέπει να ενεργήσει.

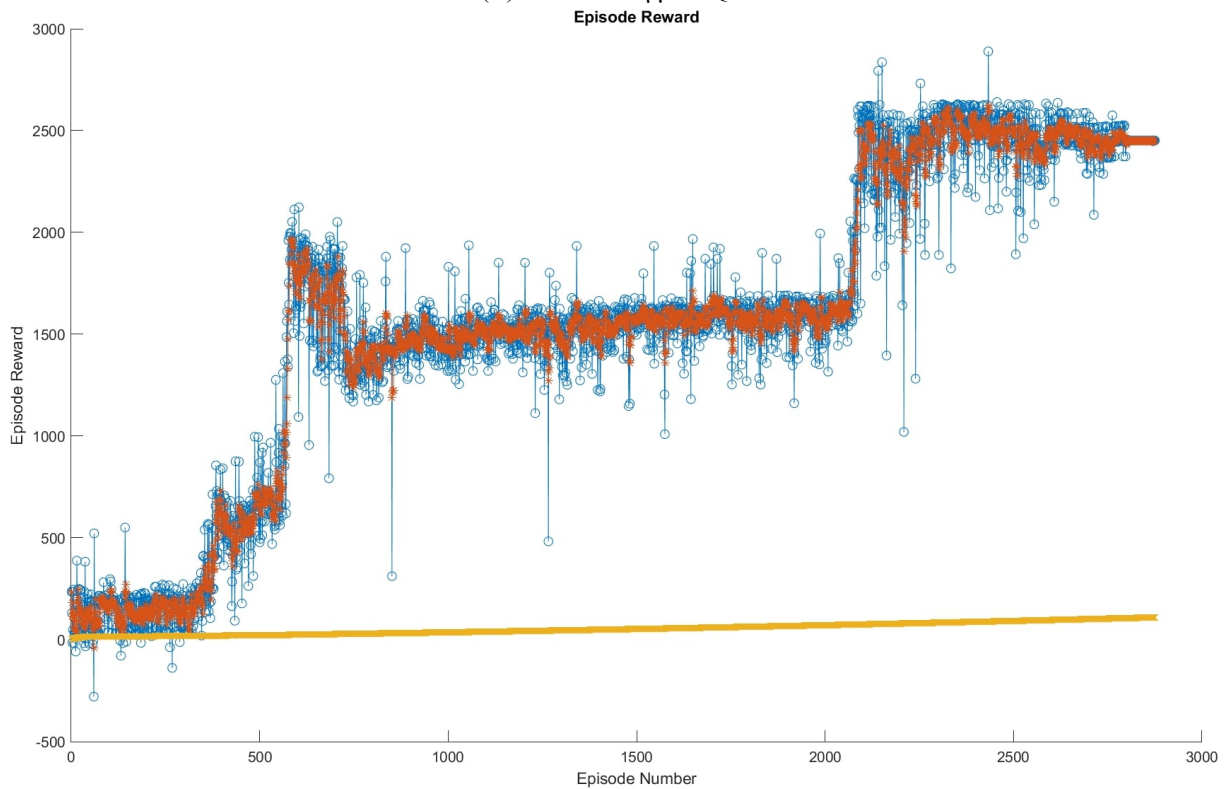
Επιπλέον, πέραν από τις πλήρως ενωμένες λωρίδες (fully connected layers) έχουμε και λωρίδες κανονικοποίησης (normalization layers) και την πράξη της συνάρτησης ReLU, η οποία εισάγει μη-γραμμικότητα στη σχέση εισόδου-εξόδου. Για την έξοδο του δικτύου χρησιμοποιείται η συνάρτηση softmax, η οποία μετατρέπει τις τιμές των νευρώνων σε πιθανότητες, κατηγοριοποιώντας τα αποτελέσματα. Ο κριτής έχει ως έξοδο έναν νευρώνα και χρησιμοποιείται για την αποφυγή biasing του άκτορα.

3.4 Συνάρτηση Ανταμοιβής

Μία από τις σημαντικότερες έννοιες της τεχνικής εκπαίδευσης Reinforcement Learning, είναι η συνάρτηση ανταμοιβής (reward function). Η συνάρτηση ανταμοιβής παρακινεί τον άκτορα για να κάνει τις σωστές κινήσεις από τις λάθος επιβραβεύοντας τον αναλόγως για την κάθε σωστή κίνηση που πράττει με βάση το πόσο σωστή την θεωρούμε. Μείζον θέματα είναι η μοντελοποίηση μίας συνάρτησης ανταμοιβής και η σωστή παραμετροποίηση της - διότι κάθε πρόβλημα απαιτεί διαφορετική προσέγγιση για το πως θα καθοδηγηθεί ο άκτορας. Η παρούσα συνάρτηση ανταμοιβής προήλθε από πειραματισμούς με την αποδοτικότητα της εκπαίδευσης και από το [?]. Ο παρών αλγόριθμος (1) προσπαθεί να ισορροπήσει ανάμεσα στην επιλογή ενεργειακά αποδοτικών επιλογών, όσο ταυτόχρονα προσπαθεί να παρακινήσει το



(α) Εκπαίδευση με DQN



(β) Εκπαίδευση με PPO

Σχήμα 3.6: Διαφορές στην εκπαίδευση DQN και PPO στο ίδιο σενάριο (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέσος όρος ανταμοιβών ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0). Παρατηρείται γρηγορότερη σύγκλιση του PPO, μέχρι και φαινόμενα overfit, σε λιγότερα επεισόδια.

νευρωνικό να μην υπερφορτώνει μόνο μία κυψέλη:

Algorithm 1 Αρχική Reward Function

```

1:  $baseReward = 1000/powerConsumption$ 
2: if  $cellResources < 1$  then
3:    $Reward = baseReward - \alpha$ , όπου  $\alpha$  μία σταθερά
4: else
5:    $Reward = baseReward$ 
6: end if

```

Αν και φαινομενικά ικανοποιητικός υπήρξαν προβλήματα κατά την εκπαίδευση. Το νευρωνικό έβρισκε τις αποδοτικότερες κυψέλες προς σύνδεση, άλλα τις υπερφόρτωνε κάθε φορά. Ο κύριος λόγος αυτής της αποτυχίας ήταν η αφαίρεση μίας αυθαίρετης σταθεράς η οποία αποτύγγανε να παρέχει όλη την "εικόνα" στο νευρωνικό σχετικά με το κατά πόσο παρέβη τον περιορισμό των φυσικών πόρων για να τιμωρηθεί αναλόγως. Επίσης προφανές είναι ότι τίποτα δεν περιόριζε το νευρωνικό από το να υπερφορτώσει την οποιαδήποτε κυψέλη και να πάει, λανθασμένα, σε αρνητικές τιμές η εναπομείνασα χωρητικότητα. Μέσω πειραματισμών η τελική μορφή είναι:

Algorithm 2 Hard Constraint

```

Hard Constraint standard penalty
2: Original action is not violated flag
   Calculate if potential resources of the selected cell will be depleted
4: if  $potentialResources < 0$  then
   Original action is violated flag
6: end if

```

Το συγκεκριμένο κομμάτι αποτρέπει το νευρωνικό να υπερφορτώσει κομμάτι του δικτύου αλλάζοντας την επιλογή της κυψέλης. Πέραν από τους σκληρούς περιορισμούς απαιτείται να εκπαιδευτεί το νευρωνικό με τρόπο που θα το αποτρέψει να χρησιμοποιηθούν κατά το ελάχιστο ή και καθόλου οι σκληροί περιορισμοί.

Algorithm 3 Reward Function

```

Find actual power increase by subtracting current power from last step's power
2: Minimum power set to 6
   Maximum power set to 300
4: if Action violates constraint then
    $Reward = -1$ ;
6: else
   Normalize the increase based on Min and Max provided
8:  $Reward = 1.0 - normalizedIncrease$ 
   Reward is bound between 0 and 1 for outliers (GEO may have over 2000W consumption)
10: end if

```

3.5 Περιβάλλον Εκπαίδευσης

Για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοιώσεων MATLAB και συγκεκριμένα η έκδοση R2021a με δικαιώματα ακαδημαϊκής χρήσης. Ο υπολογιστής στον οποίο έτρεξε η προσομοίωση, και η δημιουργία των σεναρίων για αυτήν αλλά και η ίδια η προσομοίωση, έχει έναν επεξεργαστή Ryzen 7 2700x, ο οποίος είναι τεχνολογίας 12 nm και έχει 8 πυρήνες με 16 λογικούς επεξεργαστές συνολικά με βασική συχνότητα πυρήνων τα 3.7 GHz και τρία επίπεδα μνήμης Cache. Σχετικά με την μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM), είναι μεγέθους 32 GB τύπου DDR4 και συχνότητας 2700 MHz.

Το περιβάλλον εκπαίδευσης των άκτορα/κριτή δημιουργήθηκε από τα templates του MATLAB για την δημιουργία περιβάλλοντων Reinforcement Learning. Ως περιβάλλον παραμετροποιήθηκαν τα σενάρια από τα οποία προήλθαν η τοπολογία του δικτύου αλλά και οι ίδιοι οι χρήστες.

3.6 Επίλογος

Στο τρέχον κεφάλαιο, έγινε μια λεπτομερής παρουσίαση του μοντέλου του συστήματος και της μεθοδολογίας για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης πόρων σε ενοποιημένα δίκτυα 6ης γενιάς. Η ανάλυση περιελάμβανε τόσο τις θεωρητικές αρχές, όσο και την πρακτική εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης.

Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο του συστήματος, το οποίο περιλάμβανε τον υπολογισμό των σημάτων θορύβου σε κάθε επίπεδο του ενοποιημένου δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των επίγειων, ασύρματων και δορυφορικών συνδέσεων. Θεωρήθηκε σημαντικό να δοθεί έμφαση στη μοντελοποίηση του δορυφορικού τμήματος και, συνεπώς, παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι υπολογισμοί των αποστάσεων, των γωνιών ανύψωσης και των ατμοσφαιρικών απωλειών. Η λεπτομερής ανάλυση των διαφόρων ειδών ατμοσφαιρικών απωλειών - βροχής, αέρα, ομίχλης, σπινθήρων και ιονοσφαιρικών επιδράσεων - εγγυάται την ακρίβεια και τη ρεαλιστικότητα του μοντέλου.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης για όλους τους τύπους των σταθμών βάσης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη στατική όσο και τη δυναμική κατανάλωση ενέργειας. Η διάκριση μεταξύ ενσύρματων και ασύρματων συνδέσεων backhaul, μαζί με τη λεπτομερή μοντελοποίηση της κατανάλωσης ανά πόρο, επέτρεψε τον ακριβή υπολογισμό της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του συστήματος.

Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένα εξίσου αναλυτικό μοντέλο του συστήματος και η μεθοδολογία για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης πόρων σε ενοποιημένα δίκτυα 6ης γενιάς. Επιπλέον, παρουσιάστηκε η πρακτική υλοποίηση της προτεινόμενης λύσης και αναλύθηκαν οι βασικοί της τομείς εφαρμογής.

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο συστήματος που περιλάμβανε τους υπολογισμούς της σηματοθορυβικής σχέσης για κάθε επίπεδο του ενοποιημένου δικτύου - επίγειο, αέριο και δορυφορικό. Επικεντρώθηκε ιδιαίτερα στη μοντελοποίηση του τμήματος με τους δορυφόρους, όπου εξετάστηκαν αναλυτικά οι υπολογισμοί αποστάσεων, γωνιών ανάκλασης και ατμοσφαιρικών απωλειών. Η λήψη υπόψη όλων των τύπων ατμοσφαιρικών απωλειών - από βροχή, αέρια, ομίχλη, σπινθηρισμό και

ιονοσφαιρικές επιδράσεις - εξασφάλιζε την ακρίβεια και ρεαλιστικότητα του μοντέλου. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν τα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας για όλους τους τύπους σταθμών βάσης, λαμβάνοντας υπόψη και τη στατική και τη δυναμική κατανάλωση ενέργειας.

Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της προτεινόμενης λύσης είναι η αξιοποίηση τεχνικών ενίσχυσης της μάθησης, και συγκεκριμένα του αλγορίθμου Proximal Policy Optimization (PPO). Η επιλογή του PPO έγινε με βάση τη δυνατότητά του να διαχειρίζεται πολύ-διάστατους χώρους καταστάσεων και να αναπτύσσει γενικευμένες πολιτικές, σε αντίθεση με άλλους αλγορίθμους, όπως το DQN. Το μοντέλο του νευρωνικού δικτύου, το οποίο αποτελείται από τέσσερα κρυφά επίπεδα και χρησιμοποιεί Layer Normalization, σχεδιάστηκε με προσοχή έτσι ώστε να έχει ισορροπημένη απόδοση υπολογιστικής ισχύος και μάθησης.

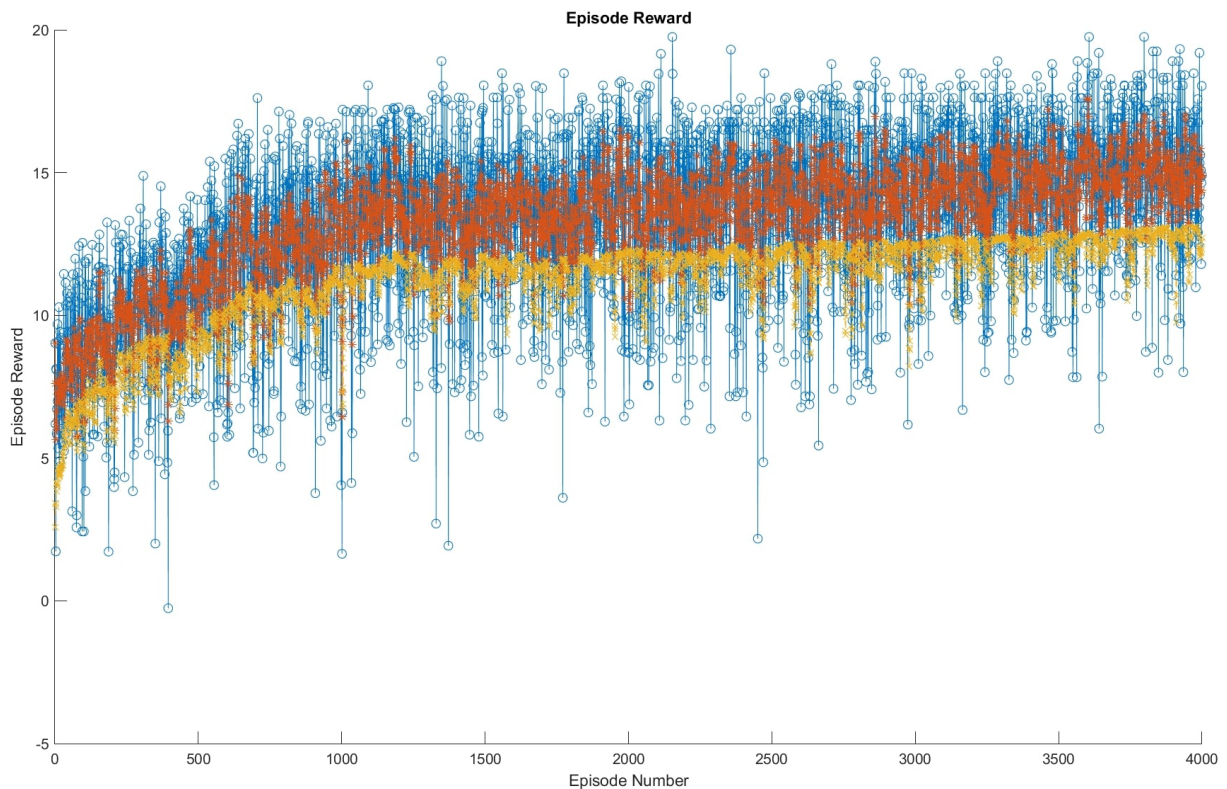
Αφιέρωθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη σχεδίαση της συνάρτησης ανταμοιβής, η οποία αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την επιτυχή εκπαίδευση του συστήματος. Μέσα από συνεχείς βελτιώσεις και πειραματισμούς, αναπτύχθηκε μια συνάρτηση που εξισορροπεί αποδοτικά την ενέργεια που καταναλώνει με την αποφυγή υπερβολικής φόρτωσης συγκεκριμένων κελιών, ενώ παράλληλα έχει ενσωματώσει σκληρούς περιορισμούς που διασφαλίζουν τη λύση του προβλήματος.

Η ολοκληρωμένη προσέγγιση που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο αποτελεί τη βάση για την πειραματική αξιολόγηση του συστήματος, η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Η συνδυαστική χρήση πολύπλοκων φυσικών μοντέλων με σύγχρονες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης αποτελεί ένα ισχυρό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας και τη δυνατότητά της να αντιμετωπίζει τις προκλήσεις των μελλοντικών δικτύων κινητών επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 4ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

4.1 Διαδικασία εκπαίδευσης

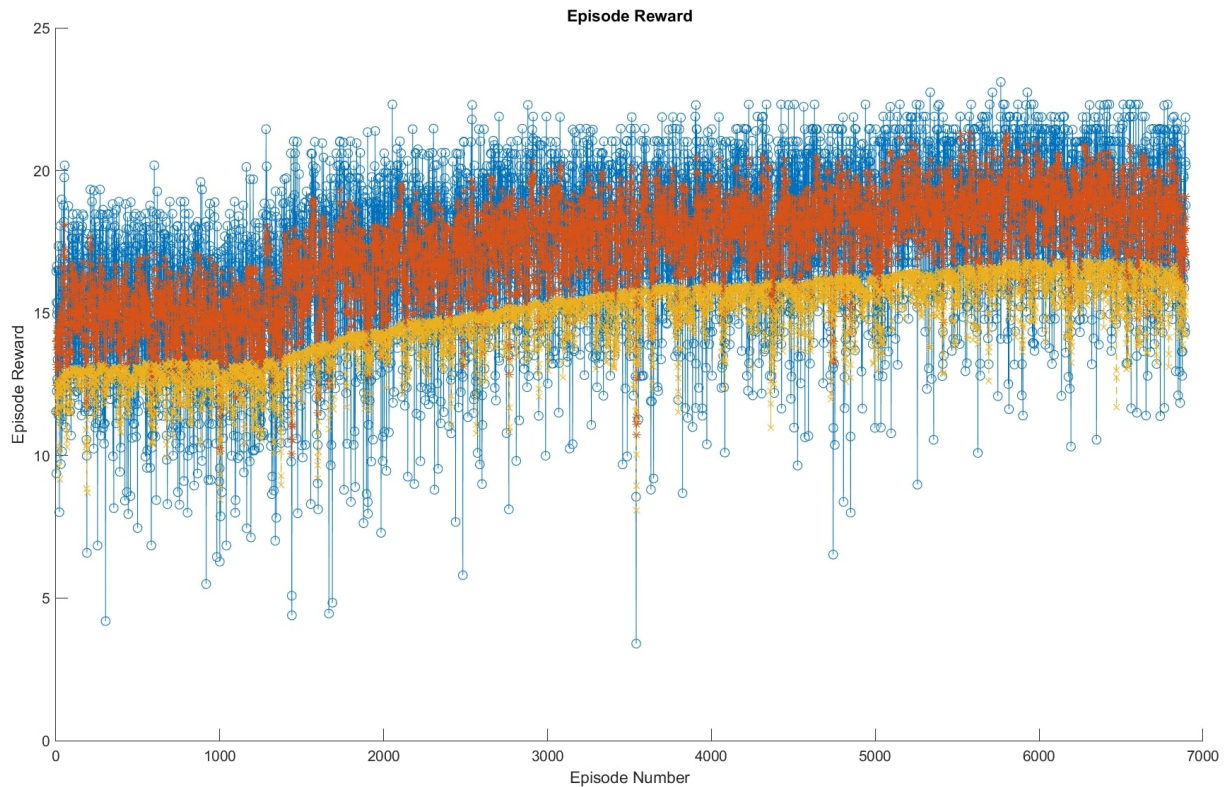
Η εκπαίδευση του νευρωνικού διεξήχθη σε τρεις διαφορετικές φάσεις, η πρώτη εκπαίδευση έχει ως σκοπό το νευρωνικό να αναγνωρίσει βασικά χαρακτηριστικά του σεναρίου, παρέχοντας το την βασική γνώση που χρειάζεται για να συνδέσει έναν χρήστη με το Access Network. Όλο το δίκτυο αποτελείται από 1 gNB, 8 Small Cells (SCs - 4 για κάθε cluster), 1 εναέρια πλατφόρμα (HAP), 134 δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO), κανέναν μεσαίας τροχιάς (MEO) και 2 γεωστατικούς (GEO). Το περιβάλλον εκπαίδευσης παραμένει ίδιο από άποψη τοπολογίας σταθμών βάσης και χρηστών:



Σχήμα 4.1: Πρώτη εκπαίδευση με 40 χρήστες συνολικά 4000 (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέση ανταμοιβή ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0).

Στην παρούσα εκπαίδευση (4.1) το νευρωνικό περνάει από το ίδιο ακριβώς σενάριο 4000 φορές έτσι ώστε να μπορέσει να διακρίνει τα βασικά χαρακτηριστικά που θα του δώσουν κάποιες αρχικές τιμές στους νευρώνες με τις οποίες θα γνωρίζει την "γενική κατεύθυνση" την οποία πρέπει να ακολουθήσει για να συνδέσει χρήστες χωρίς να εξαντλεί τους πόρους μόνο μερικών κυψελών. Προφανώς η εκπαίδευση σε ένα και μοναδικό σενάριο δεν καταρτίζει επαρκώς το νευρωνικό για να μπορεί να διαχειρίζεται πολλαπλά deployments χρηστών στο ίδιο δίκτυο, και για αυτόν τον λόγο εξήχθη ο εκπαιδευμένος πράκτορας στο ένα σενάριο και επανεκπαιδεύτηκε άλλες δύο φορές.

Η δεύτερη εκπαίδευση (4.2) του πράκτορα αποτελείται συνολικά από σχεδόν 7000 επεισόδια, τα οποία δημιουργήθηκαν από 10 διαφορετικά σενάρια (διαφορετική διάταξη και υπηρεσίες χρηστών - ίδια τοπολογία δικτύου), πολλαπλασιασμένα και τυχαίως τοποθετημένα. Στην παρούσα εκπαίδευση προσπαθεί το νευρωνικό να μάθει τις εξορισμού διαφορές του κάθε σεναρίου, ώστε να μπορεί μέσω των παρατη-

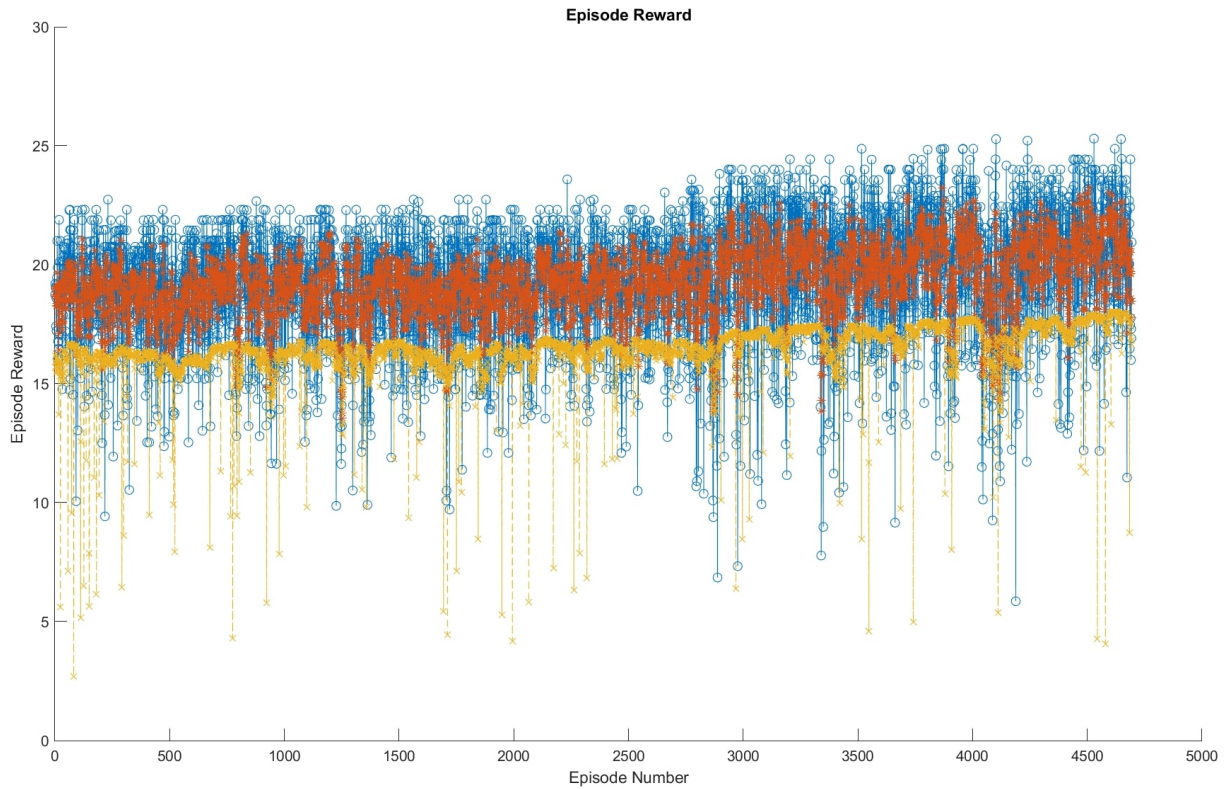


Σχήμα 4.2: Δεύτερη εκπαίδευση με 40 διαφορετικούς χρήστες τυχαία ανατεθειμένων επεισοδίων. Οι συνολικές διαφορετικές διατάξεις χρηστών είναι 10 και τα συνολικά επεισόδια είναι σχεδόν 7000 (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέση ανταμοιβή ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0).

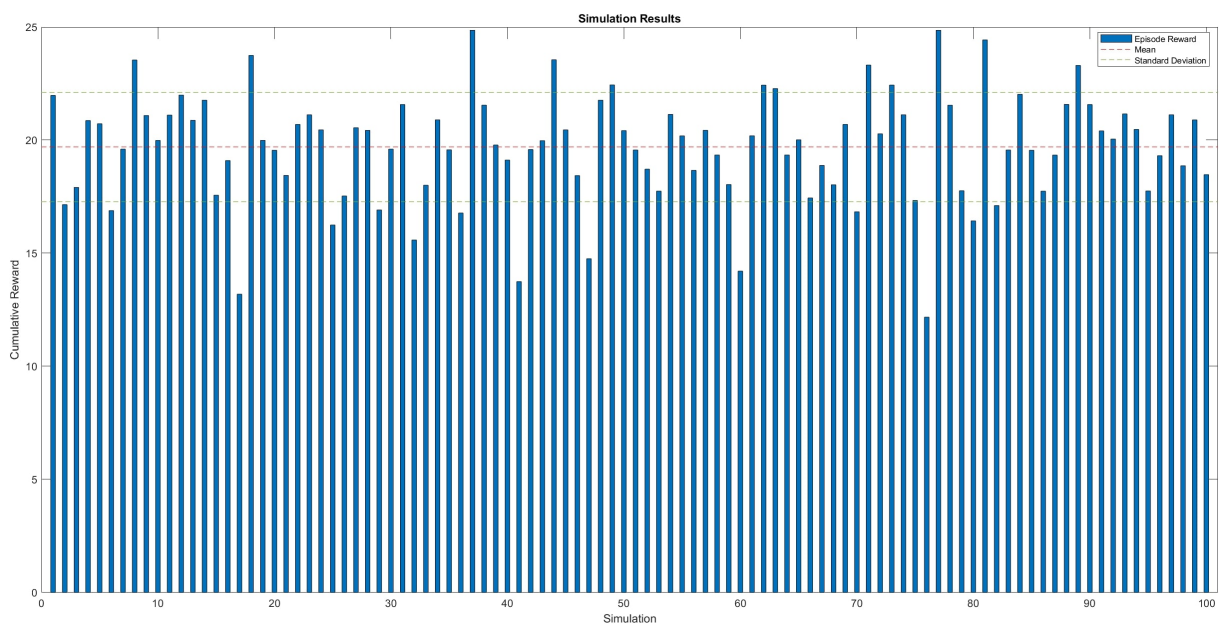
ρήσεων που του παρέχονται να διακρίνει τι πολιτική πρέπει να αλλάξει για την επίτευξη διαφορετικών σεναρίων. Συγκεκριμένα στο διάγραμμα παρατηρείται αυξητική πορεία των ανταμοιβών με υψηλές διαβαθμίσεις, η εν γένει αστάθεια του συστήματος προσδίδεται στο υπερβολικά δυναμικό περιβάλλον (40 χρήστες πρέπει να ανατεθούν σε 146 κυψέλες - και οι περισσότερες δορυφορικές), στην περίπτωση που θα είχαμε μικρότερη έξοδο θα ήταν σαφώς μία πιο σταθερή εκπαίδευση.

Η τρίτη και τελευταία εκπαίδευση (4.3) αποτελείται πάλι από 40 διαφορετικούς χρήστες στην ίδια τοπολογία του δικτύου με την διαφορά ότι κάθε επεισόδιο είναι και ένα διαφορετικό σενάριο. Παρατηρείται η αυξανόμενη ανταμοιβή που παρέχεται μετά από μερικά επεισόδια, με παρόμοιες διακυμάνσεις όπως στην δεύτερη εκπαίδευση. Τέλος, έγινε προσομοίωση του νευρωνικού σε 100 διαφορετικά επεισόδια με 40 διαφορετικούς χρήστες και ίδιας τοπολογίας. Ο πράκτορας δεν είχε εκπαιδευτεί με αυτά τα επεισόδια (4.4).

Στα ίδια σενάρια προσομοιώθηκαν και οι αλγόριθμοι BSCP και PHEUR [60] οι οποίοι είχαν μέση κατανάλωση $4.9184 \cdot 10^3 W$ και $3.7810 \cdot 10^3 W$ ο καθένας, ενώ ο παρών αλγόριθμος είχε κατανάλωση $3.6852 \cdot 10^3 W$.



Σχήμα 4.3: Τρίτη και τελευταία εκπαίδευση με 40 διαφορετικούς χρήστες τυχαία ανατεθειμένων επεισοδίων. Οι συνολικές διαφορετικές διατάξεις χρηστών είναι όσες και τα συνολικά επεισόδια - σχεδόν 4750 (μπλε: ανταμοιβή σε κάθε επεισόδιο, πορτοκαλί: μέση ανταμοιβή ανά 5 επεισόδια, κίτρινο: τιμές Q_0).



Σχήμα 4.4: Προσομοίωση 40 διαφορετικών χρηστών τυχαία ανατεθειμένων επεισοδίων. Οι συνολικές διαφορετικές διατάξεις χρηστών είναι όσες και τα συνολικά επεισόδια - 100. Η προσομοίωση έγινε σε σενάρια στα οποία ο πράκτορας δεν έχει εκπαιδευτεί προηγουμένως.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα ή/και Προτάσεις Βελτίωσης

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα κατέδειξε την αποτελεσματικότητα μιας τριφασικής προσέγγισης εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων για το πρόβλημα της συσχέτισης χρηστών σε ετερογενή δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, που βασίζεται στη σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητας των σεναρίων εκπαίδευσης, αποδείχθηκε ιδιαίτερα επιτυχημένη στην ανάπτυξη ενός ευφυούς πράκτορα ικανού να διαχειρίζεται αποδοτικά την κατανομή χρηστών σε ένα σύνθετο δικτυακό περιβάλλον που περιλαμβάνει επίγειους σταθμούς βάσης, εναέριες πλατφόρμες και δορυφορικές συνδέσεις.

Η πρώτη φάση εκπαίδευσης, με την επαναλαμβανόμενη έκθεση του νευρωνικού δικτύου σε ένα μοναδικό σενάριο για 4000 επεισόδια, έθεσε τις απαραίτητες βάσεις για την κατανόηση των θεμελιωδών χαρακτηριστικών του προβλήματος. Αυτή η αρχική φάση αποδείχθηκε κρίσιμη για την ανάπτυξη μιας βασικής "διαίσθησης" σχετικά με την αποφυγή της υπερφόρτωσης συγκεκριμένων κυψελών και την ισορροπημένη κατανομή των χρηστών στο δίκτυο.

Η δεύτερη φάση εκπαίδευσης εισήγαγε σημαντική ποικιλομορφία με τη χρήση 10 διαφορετικών σεναρίων σε περίπου 7000 επεισόδια, επιτρέποντας στο νευρωνικό δίκτυο να αναπτύξει την ικανότητα γενίκευσης και προσαρμογής σε διαφορετικές καταστάσεις. Παρά τις παρατηρούμενες διακυμάνσεις στις ανταμοιβές, που αποδίδονται στο εξαιρετικά δυναμικό περιβάλλον με 40 χρήστες και 146 διαθέσιμες κυψέλες, η συνολική τάση παρέμεινε ανοδική, υποδεικνύοντας συνεχή βελτίωση της απόδοσης του πράκτορα.

Η τρίτη και τελική φάση εκπαίδευσης, όπου κάθε επεισόδιο αντιπροσώπευε ένα μοναδικό σενάριο, ενίσχυσε περαιτέρω την ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίζει την πολυπλοκότητα και την ποικιλομορφία των πραγματικών δικτυακών συνθηκών. Η προσέγγιση αυτή κατέληξε σε έναν πράκτορα με εξαιρετική προσαρμοστικότητα και αποδοτικότητα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε 100 νέα, άγνωστα σενάρια επιβεβαίωσαν την υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης. Με μέση κατανάλωση ενέργειας $3.6852 \times 10^3 \text{W}$, ο αναπτυχθείς αλγόριθμος επέτυχε βελτίωση 25.1% σε σχέση με τον αλγόριθμο BSCP ($4.9184 \times 10^3 \text{W}$) και 2.5% σε σχέση με τον PHEUR ($3.7810 \times 10^3 \text{W}$). Αυτή η σημαντική μείωση στην ενεργειακή κατανάλωση υπογραμμίζει την πρακτική αξία της προσέγγισης, ιδιαίτερα σε μια εποχή όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα των δικτύων επικοινωνιών.

Η επιτυχία της τριφασικής εκπαίδευσης καταδεικνύει τη σημασία της σταδιακής και δομημένης προσέγγισης στην ανάπτυξη συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης για σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης δικτύων. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να αποτελέσει πρότυπο για μελλοντικές εφαρμογές σε παρόμοια προβλήματα, προσφέροντας έναν συστηματικό τρόπο ανάπτυξης ευφύων πρακτόρων που συνδυάζουν υψηλή απόδοση με ικανότητα γενίκευσης σε νέες καταστάσεις.

5.2 Κατευθύνσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε πλήρως στο κομμάτι της συσχέτισης των χρηστών, το οποίο αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την αποδοτική λειτουργία των σύγχρονων δικτύων κινητών επικοινωνιών. Η διαδικασία συσχέτισης χρηστών με τους κατάλληλους σταθμούς βάσης επηρεάζει άμεσα την ποιότητα υπηρεσίας, την κατανομή του φόρτου στο δίκτυο, και την συνολική απόδοση του συστήματος. Μέσα από την εκτενή ανάλυση και τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, διαφάνηκε ότι η προτεινόμενη προσέγγιση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους.

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει μία πιο ολιστική προσέγγιση στο πρόβλημα, σχεδιάζοντας και υλοποιώντας μία Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) που μπορεί ταυτόχρονα να διαχειρίζεται πολλαπλές πτυχές της βελτιστοποίησης δικτύου. Συγκεκριμένα, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να εκτελεί παράλληλα την τοποθέτηση xNF (Network Functions) στο δίκτυο, τη δρομολόγηση κυκλοφορίας (traffic routing) και τη συσχέτιση των χρηστών (user association). Αυτή η ενοποιημένη προσέγγιση θα επέτρεπε την εκμετάλλευση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ αυτών των τριών διαδικασιών, οδηγώντας σε πιο αποδοτικές λύσεις που λαμβάνουν υπόψη το συνολικό πλαίσιο λειτουργίας του δικτύου. Η συνδυασμένη βελτιστοποίηση θα μπορούσε να αποφύγει υποβέλτιστες λύσεις που προκύπτουν από την ανεξάρτητη επίλυση κάθε υποπροβλήματος.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι ένας μείζων περιορισμός των νευρωνικών δικτύων είναι ότι από μόνα τους είναι ανίκανα να τηρούν το 100% των φορών τους σκληρούς περιορισμούς που τους ανατίθενται στα προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτό οφείλεται στη στοχαστική φύση της εκπαίδευσης και στον τρόπο που τα νευρωνικά δίκτυα προσεγγίζουν τις λύσεις μέσω της ελαχιστοποίησης συναρτήσεων ανταμοιβών. Στην προκειμένη εφαρμογή, παρόλο που είναι σχετικά σπάνιο φαινόμενο, παρατηρήθηκαν περιπτώσεις όπου ο πράκτορας (agent) επιχειρεί να συνδεθεί σε σταθμούς βάσης με εξαντλημένους πόρους, παραβιάζοντας έτσι τους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας θα μπορούσαν να εξετάσουν υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των νευρωνικών δικτύων με ντετερμινιστικούς μηχανισμούς επιβολής περιορισμών. Επιπλέον, η ενσωμάτωση τεχνικών όπως η constraint-aware training ή η χρήση penalty functions που αυξάνονται δυναμικά κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ικανότητα του συστήματος να σέβεται τους απαράβατους περιορισμούς. Η ανάπτυξη τέτοιων μεθόδων αποτελεί ένα ενεργό πεδίο έρευνας στη βελτιστοποίηση με χρήση μηχανικής μάθησης και θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην πρακτική εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε πραγματικά δίκτυα επικοινωνιών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Dominguez, “Optical Telegraph (Semaphore System).” <https://kimon.hosting.nyu.edu/physical-electrical-digital/items/show/1353>.
- [2] Nobel Prize, “Guglielmo Marconi.” <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/facts/>.
- [3] Britannica, “Internet.” <https://www.britannica.com/technology/Internet>.
- [4] TeleGeography, “Submarine Cable Map.” <https://www.submarinecablemap.com/>.
- [5] Ebenezer Ackah Amuah, Mingxiao Wu, Xiaorong Zhu, “Cellular Network Fault Diagnosis Method Based on a Graph Convolutional Neural Network,” *MDPI Open Access Journals*, 2023.
- [6] Ericsson, “Global mobile network data traffic forecast.” <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast>.
- [7] Bayonne Police Department, “History of the Bayonne Police Department.” <https://www.bayonnepd.com/history.htm>.
- [8] Panasonic Mobile Communications Co., Ltd., “Panasonic Ships Over 100 million Units of Mobile Communication Terminals to Japanese Phone Carriers.” <https://news.panasonic.com/global/press/en080403-5>.
- [9] W.R.Young, “Advanced Mobile Phone Service: Introduction, Background, and Objectives,” *The Bell System Technical Journal*, 1979.
- [10] Rita Landström, “The world’s first GSM call.” <https://web.archive.org/web/20110706064231/http://www.yle.fi/elavaarkisto/?s=s&g=1&ag=86&t=586&a=5126>.
- [11] Adnan Ghayas, “Is General Packet Radio Service (GPRS) 2G, 3G or 4G?.” <https://commsbrief.com/is-general-packet-radio-service-gprs-in-gsm-2g-3g-or-4g/>.
- [12] Rysavy Research and 3G Americas, “EDGE, HSPA and LTE: The Mobile Broadband Advantage.” https://web.archive.org/web/20091007091901/http://developer.att.com/devcentral/tools_technologies/network/docs/DataCapabilities_GPRS_to_HSDPA.pdf.
- [13] CDMA Development Group, “CDMA2000 1X.” <https://web.archive.org/web/20100802011151/http://www.cdg.org/technology/cdma20001x.asp>.
- [14] Chiradeep BasuMallick, “Packet-Switched Network vs. Circuit-Switched Network: Understanding the 15 Key Differences.” <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/packet-switched-vs-circuit-switched-network/>.

- [15] Okan Özşahin, “Circuit Switching vs. Packet Switching.” <https://okanexe.medium.com/circuit-switching-vs-packet-switching-a28565ae02ae>.
- [16] Secretary, “Draft summary minutes, decisions and actions from 3GPP Organizational Partners Meeting6, Tokyo, 9 October 2001.” https://www.3gpp.org/ftp/op/OP_07/DOCS/pdf/OP6_13r1.pdf.
- [17] Telecom Knowledge Share, “WCDMA Introduction.” <https://telecom-knowledge.blogspot.com/2013/03/wcdma-introduction.html>.
- [18] GSMA, “HSPA.” <https://web.archive.org/web/20170709180358/https://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/hspa>.
- [19] Johan Bergman, Dirk Gerstenberger, Frederik Gunnarsson, Stefan Stroem, “Continued HSPA Evolution of mobile broadband,” *Ericsson Review* 1, 2009.
- [20] Cadence System Analysis, “Fundamentals of MIMO Communication in Wireless Systems.” <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/fundamentals-of-mimo-communication-inwireless-systems>.
- [21] 4g.co.uk, “How fast are 4G and 5G?.” <https://www.4g.co.uk/how-fast-is-4g/>.
- [22] NTT DoCoMo, “NTT DoCoMo Achieves World’s First 5Gbps Packet Transmission in 4G Field Experiment.” <https://web.archive.org/web/20080925084229/http://www.nttdocomo.com/pr/2007/001319.html>.
- [23] Sami Tabbane, “4G to 5G networks and standard releases: CoE Training on Traffic engineering and advanced wireless network planning.” https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-/3GPP_4G%20to%205G%20networks%20evolution%20and%20releases.pdf.
- [24] James Kurose, Keith Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach, 8th Edition*. Pearson, 2021.
- [25] ETSI, “Long Term Evolution (LTE).” <https://www.etsi.org/technologies/mobile/4G>.
- [26] Η Καθημερινή, “Τρίκαλα: Η πρώτη πόλη της Ελλάδας με τεχνολογία 5G.” <https://www.kathimerini.gr/life/technology/954024/trikala-i-proti-poli-tis-elladas-me-technologia-5g/>.
- [27] ITU-R M.2083-0, “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” tech. rep., ITU-R, 2015.
- [28] D. M. Abdullah and S. Y. Ameen, “ENHANCED MOBILE BROADBAND (EMBB): A REVIEW,” *Journal of Information Technology and Informatics (JITI)*, vol. 01, no. 01, pp. 13–19, 2021.
- [29] H. Ji, S. Park, J. Yeo, Y. Kim, J. Lee, and B. Shim, “Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in 5G Downlink: Physical Layer Aspects,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 124–130, 2018.

- [30] R. Kovalchukov, D. Moltchanov, J. Pirskanen, J. S ae, J. Numminen, Y. Koucheryavy, and M. Valkama, "DECT-2020 New Radio: The Next Step toward 5G Massive Machine-Type Communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 60, no. 6, pp. 58–64, 2022.
- [31] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, "A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges," *Wireless Netw* 21, vol. 21, no. 6, p. 2657–2676, 2015.
- [32] R. Chataut and R. Akl, "Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction," *Sensors*, vol. 20, no. 10, 2020.
- [33] S. Vahid, R. Tafazolli, and M. Filo, "Small Cells for 5G Mobile Networks," *Wiley Online Library*, 2015.
- [34] Scott Birch, "APAC mobile market to reach 2.1bn users by 2030, worth \$1tn." <https://mobile-magazine.com/technology-and-ai/apac-mobile-market-to-reach-2-1bn-users-by-2030-worth-1tn>.
- [35] 6G Flagship, "6G Flagship - Impact." <https://www.6gflagship.com/impact/>.
- [36] ETHER EU, "About ETHER." <https://www.ether-project.eu/about-ether/>.
- [37] S. Song, M. Choi, Y. Goh, J. Yun, W. Yoo, W. Yang, J. Jung, and J.-M. Chung, "Analysis of Wireless Backhaul Networks Based on Aerial Platform Technology for 6G Systems," *CMC*, vol. 62, no. 2, p. 473–494, 2020.
- [38] ITU-R M.2160-0, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," tech. rep., ITU-R, 2023.
- [39] H. Yu, T. Taleb, K. Samdanis, and J. Song, "Toward Supporting Holographic Services Over Deterministic 6G Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks," *IEEE Network*, vol. 38, no. 1, pp. 262–271, 2024.
- [40] S. Kharche and J. Kharche, "6G Intelligent Healthcare Framework: A Review on Role of Technologies, Challenges and Future Directions," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 19, no. 3, p. 603–644, 2024.
- [41] S. Kharche and J. Kharche, "Edge Intelligence for Autonomous Driving in 6G Wireless System: Design Challenges and Solutions," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 2, pp. 40–47, 2021.
- [42] S. Tripathi, N. V. Sabu, A. K. Gupta, and H. S. Dhillon, "Millimeter-Wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless," *6G Mobile Wireless Networks - Springer*, p. 83–121, 2021.
- [43] M. Mizmizi, M. Brambilla, D. Tagliaferri, C. Mazzucco, M. Debbah, T. Mach, R. Simeone, S. Mandelli, R. L. Valerio Frascolla, M. Magarini, M. Nicoli, and U. Spagnolini, "6G V2X Technologies and Orchestrated Sensing for Autonomous Driving," *VT Magazine*, 2021.
- [44] C. Ser odio, J. Cunha, G. Candela, S. Rodriguez, X. R. Sousa, and X. R. Sousa, "The 6G Ecosystem as Support for IoE and Private Networks: Vision, Requirements, and Challenges," *Future Internet*, vol. 15, no. 11, p. 348, 2023.

- [45] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [46] D. Peng, D. He, Y. Li, and Z. Wang, "Integrating Terrestrial and Satellite Multibeam Systems Toward 6G: Techniques and Challenges for Interference Mitigation," *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 1, pp. 24–31, 2022.
- [47] Emerline, "The Internet of Everything and the Internet of Things: What's What?." <https://emerline.com/blog/iot-vs-ioe>.
- [48] M. Jung and C. Kim, "Performance Analysis of RIS-Assisted Satellite-Aerial-Terrestrial Integrated Network," *2024 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, pp. 1–3, 2024.
- [49] C. Pan, H. Ren, K. Wang, J. F. Kolb, M. ElKashlan, M. Chen, M. D. Renzo, Y. Hao, J. Wang, A. L. Swindlehurst, X. You, and L. Hanzo, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, 2021.
- [50] T. Kim, M. Jung, and H. Son, "Joint User Scheduling and Phase Shift Optimization for STAR-RIS-Assisted Multicast Satellite Communications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024.
- [51] P. P. Ray, "A review on 6G for space-air-ground integrated network: Key enablers, open challenges, and future direction," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 9, pp. 6949–6976, 2022.
- [52] S. Yamin and H. H. Permuter, "Multi-agent reinforcement learning for network routing in integrated access backhaul networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 153, November 2023.
- [53] J. Li, C. Zhou, J. Liu, M. Sheng, N. Zhao, and Y. Su, "Reinforcement Learning-Based Resource Allocation for Coverage Continuity in High Dynamic UAV Communication Networks," *IEEE Transaction On Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 848–860, February 2024.
- [54] X. Fernando and A. Gupta, "Analysis of Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Cellular Vehicle-to-Everything Communication Using Markovian Game in a Federated Learning Environment," *Drones*, vol. 8, no. 6, pp. 238–268, June 2024.
- [55] H. Zhang, H. Zhao, R. Liu, X. Gao, and S. Xu, "Dynamic User Association and Computation Offloading in Satellite Edge Computing Networks via Deep Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, March 2024.
- [56] J. Tang, J. Li, L. Zhang, X. Chen, K. Xue, Q. Sun, and J. Lu, "Opportunistic Content-aware Routing in Satellite-Terrestrial Integrated Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, March 2024.
- [57] M. Xu, M. Jia, Q. Guo, and T. de Cola, "Delay-Sensitive and Resource-Efficient VNF Deployment in Satellite-Terrestrial Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, May 2024.

- [58] S. Chan, H. Lee, S. Kim, and D. Oh, “Intelligent Low Complexity Resource Allocation Method for Integrated Satellite-Terrestrial Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 1087–1091, May 2022.
- [59] J. Huang, Y. Yang, J. Lee, D. He, and Y. Li, “Deep Reinforcement Learning-Based Resource Allocation for RSMA in LEO Satellite-Terrestrial Networks,” *IEEE Transaction On Communications*, vol. 72, no. 3, pp. 1341–1354, March 2024.
- [60] A. Mesodiakaki, M. Gatzianas, C. Bratsoudis, G. Kalfas, C. Vagionas, R. Maximidis, A. Antonopoulos, N. Pleros, and A. Miliou, “Online Energy-efficient Resource Allocation in Integrated Terrestrial and Satellite 6G Networks,” *IEEE ICC 2024*, June 2024.
- [61] A. Warriar, L. Aljaburi, H. Whithworth, S. Al-Rubaye, and A. Tsourdos, “Future 6G Communications Powering Vertical Handover in Non-Terrestrial Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 33016–33034, February 2024.
- [62] X. Feng, M. He, L. Zhuang, Y. Song, and R. Peng, “Service Function Chain Deployment Algorithm Based on Deep Reinforcement Learning in Space–Air–Ground Integrated Network,” *Future Internet*, vol. 16, no. 1, January 2024.
- [63] Y. Yao, D. Dong, C. Cai, S. Huang, X. Yuan, and X. Gong, “Multi-UAV-assisted Internet of Remote Things communication within satellite–aerial–terrestrial integrated network,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 11, no. 10, pp. 1087–1091, January 2024.
- [64] S. Fu, J. Gao, and L. Zhao, “Collaborative Multi-Resource Allocation in Terrestrial-Satellite Network Towards 6G,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 11, pp. 7057–7071, November 2021.
- [65] T. Korikawa, C. Takasaki, K. Hattori, and H. Oowada, “A Routing Method with Link Information-based Rule Selection in Non-Terrestrial Networks,” *2024 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 850–855, 21 June 2024.
- [66] ITU-R P.837-7, “Characteristics of precipitation for propagation modelling,” tech. rep., ITU-R, 2017.
- [67] ITU-R P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” tech. rep., ITU-R, 2005.
- [68] ITU-R P.835-6, “Reference standard atmospheres,” tech. rep., ITU-R, 2017.
- [69] ITU-R P.676-13, “Attenuation by atmospheric gases and related effects,” tech. rep., ITU-R, 2022.
- [70] ITU-R P.453-14, “The radio refractive index: its formula and refractivity data,” tech. rep., ITU-R, 2019.
- [71] ITU-R P.531-15, “Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems,” tech. rep., ITU-R, 2023.
- [72] ITU-R P.619-5, “Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth,” tech. rep., ITU-R, 2021.

- [73] Felix R. Hoots and Ronald L. Roehrich, “SPACETRACK REPORT NO. 3,” tech. rep., December 1980.
- [74] Maral G. and Bousquet M., *ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ-ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ*, 5η Έκδοση. Τζιολα, 2014.
- [75] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, “Proximal Policy Optimization Algorithms,” *arXiv preprint*, 28 August 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α□: ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Κώδικας δυναμικής δημιουργίας περιβάλλοντος εκπαίδευσης άκτορα.

```
classdef LearningEnvironment < rl.env.MATLABEnvironment
    properties
        % Core scenario parameters
        N_step
        Users
        mean_arrival_rate
        mean_arrival_rate_points
        studied_points
        current_mmm = 1
        current_N_studied = 1
        current_scenario = 1
        current_snapshot = 1
        scenarios
        iteration
        N % Number of users currently being
            processed

        % Network configuration
        cells % Total number of cells
        cells_TN % Terrestrial network cells
        N_gNB % Number of gNBs
        N_HAPs % Number of HAPs
        N_LEOs % Number of LEO satellites
        N_MEOS % Number of MEO satellites
        N_GEOs % Number of GEO satellites

        % Network parameters
        id_gateway % Gateway node IDs
        id_cells % Cell IDs
        N_cells % Total number of cells
        cells_matrix % Cell configuration matrix
        GatewayNodes % Array storing gateway node indices

        % Computing node configuration
        N_first_layer_nodes % Number of first layer computing
            nodes
        N_second_layer_nodes % Number of second layer computing
            nodes
        N_total_c_nodes % Total number of computing nodes
    end
end
```



```

% Power calculation parameter
P_RB_pair          % Power per resource block pair
static_ON = 1      % Static power flag

% Access Network Delta Power Parameters
Delta_p_AN_gNB = 4.7 % Delta power for gNB access network
Delta_p_AN_SC = 4.0 % Delta power for small cell access
network
Delta_p_AN_HAP = 4.0 % Delta power for HAP access network
Delta_p_AN_LEO = 4.5 % Delta power for LEO access network
Delta_p_AN_MEO = 4.5 % Delta power for MEO access network
Delta_p_AN_GEO = 4.5 % Delta power for GEO access network

% Node Idle Power Parameters
P_idle_SC = 6.8 % Idle power small cell
P_idle_gNB = 130 % Idle power gNB
P_idle_HAP = 1.0 % Idle power HAP
P_idle_LEO = 3.9 % Idle power LEO
P_idle_MEO = 3.9 % Idle power MEO
P_idle_GEO = 3.9 % Idle power GEO

% Access Network TRX Parameters
N_TRX_AN_gNB = 8 % Number of TRX in gNB access network
N_TRX_AN_SC = 4 % Number of TRX in small cell access
network
N_TRX_AN_HAP = 8 % Number of TRX in HAP access network
N_TRX_AN_LEO = 32 % Number of TRX in LEO access network
N_TRX_AN_MEO = 32 % Number of TRX in MEO access network
N_TRX_AN_GEO = 32 % Number of TRX in GEO access network

% Loaded scenario data
BW_need % Bandwidth needs per user-cell pair
nodeDistance % Physical distances
batch_list_actual % List of user batches
data_rate_user_DL % User data rate requirements
active_cells % Currently active cells
AN_edge % Access Network edges
available_resources % Available resources per cell
BW_per_RB_pair % Bandwidth per resource block pair
time_exec_each_batch % Array storing execution time for each
batch

```

```

% State tracking
cell_power_history      % 146x1 vector tracking power
                        consumption per cell
user_association        % Simplified to track successful
                        connections only
previous_total_power    % Store previous total power for reward
                        calculation
power_scaling = 1      % Scaling factor for power-based
                        rewards
CurrentBatchIndex       % Current batch being processed
CurrentUserIndex        % Current user in batch being processed
CurrentBatch            % Current batch of users
State                   % Current environment state
action_mask
original_action_would_violate = false

% User tracking
CurrentUser              % Current user being processed
ProcessedUsers = []     % List of users already processed in
                        current batch
BatchTimeLeft           % Time remaining for current batch
                        processing

% Add initialization flag
is_initializing = true
initial_loads_count = 0
LogCounter = 0
step_count = 0
accumulated_reward = zeros(1, 40)
all_reward = 0

end

methods

function obj = LearningEnvironment(config)
    filename = sprintf('C:/Users/User/Documents/
        training_scenarios/scenarios_online_NTN_new/scen%02d/
        matfile_N=%02d_Arrival_rate_%.3f_Snap%02d.mat',...
        [01, config.min_users, config.mean_arrival_rate(1),
        01]);
    data = load(filename);

```

```

% Store dimensions in local variables (not object
  properties yet)
num_cells = data.cells;
total_features = 4*num_cells + 6;

action_array = [1:num_cells];

% Create observation and action specs using local
  variables
observationInfo = rlNumericSpec([total_features 1], ...
  'LowerLimit', -inf, ...
  'UpperLimit', inf);
actionInfo = rlFiniteSetSpec(action_array);

% Call superclass constructor with our specs
obj = obj@rl.env.MATLABEnvironment(observationInfo,
  actionInfo);

obj.N_step = config.N_step;
obj.Users = config.min_users:config.N_step:config.
  max_users;
obj.mean_arrival_rate = config.mean_arrival_rate;
obj.scenarios = config.scenarios;
obj.iteration = config.iteration;
obj.mean_arrival_rate_points = length(obj.
  mean_arrival_rate);
obj.studied_points = length(obj.Users);

obj.cells = num_cells;
obj.cells_TN = data.cells_TN;
obj.N_gNB = data.N_gNB;
obj.N_HAPs = data.N_HAPs;
obj.N_LEOs = data.N_LEOs;
obj.N_MEOs = data.N_MEOs;
obj.N_GEOs = data.N_GEOs;
obj.N_first_layer_nodes = data.N_first_layer_nodes;
obj.N_second_layer_nodes = data.N_second_layer_nodes;
obj.N_total_c_nodes = data.N_total_c_nodes;

obj.cell_power_history = zeros(obj.cells, 1);
obj.previous_total_power = 0;
obj.CurrentBatchIndex = 1;
obj.CurrentUserIndex = 1;

```

```

    obj.ProcessedUsers = [];
    obj.is_initializing = false;
end

function [Done, NextState] = advance_user(env)
    env.ProcessedUsers = [env.ProcessedUsers, env.CurrentUser
    ];

    if length(env.ProcessedUsers) == length(env.CurrentBatch)
        env.CurrentBatchIndex = env.CurrentBatchIndex + 1;

        if env.CurrentBatchIndex > length(env.
            batch_list_actual)
            Done = true;
            NextState = env.create_state();
            return;
        end

        env.CurrentBatch = env.batch_list_actual{env.
            CurrentBatchIndex};
        env.ProcessedUsers = [];
        env.CurrentUser = env.CurrentBatch(1);
        env.BatchTimeLeft = env.time_exec_each_batch(env.
            CurrentBatchIndex);
    else
        next_user_idx = length(env.ProcessedUsers) + 1;
        env.CurrentUser = env.CurrentBatch(next_user_idx);
    end

    Done = false;
    NextState = env.create_state();
end

function [InitialObservation, InitialState] = reset_function(
    env)
    env.LogCounter = env.LogCounter + 1;

    logsPath = 'C:\Users\User\Documents\training_logs';
    if ~exist(logsPath, 'dir')
        mkdir(logsPath);
    end

    timestamp = datestr(now, 'yyyy-mm-dd_HH-MM-SS');

```

```

logfile = fullfile(logsPath, sprintf('training_log_%03d_%s.txt', env.LogCounter, timestamp));

diary(logfile);
fprintf('Starting training session # %d: %s\n', env.LogCounter, timestamp);

fprintf('\n=== [Step %d] Starting Reset Function ===\n', env.LogCounter);

if env.is_initializing
    filename = sprintf('C:/Users/User/Documents/training_scenarios/scenarios_online_NTN_new/scen%02d/matfile_N=%02d_Arrival_rate_%.3f_Snap%02d.mat', ...
        env.Users(1), env.mean_arrival_rate(1));
    env.initial_loads_count = env.initial_loads_count + 1;
    fprintf('Initialization phase: Load count %d/3\n', env.initial_loads_count);

    if env.initial_loads_count >= 3
        env.is_initializing = false;
        env.current_scenario = 1;
        env.current_snapshot = 1;
        env.current_mmm = 1;
        env.current_N_studied = 1;
        fprintf('Initialization complete - Starting main execution\n');
    end
else
    fprintf('\nCurrent State:\n');
    fprintf('- Scenario: %d/%d\n', env.current_scenario, env.scenarios);
    fprintf('- Snapshot: %d/%d\n', env.current_snapshot, env.iteration);
    fprintf('- Mean Arrival Rate Point: %d/%d\n', env.current_mmm, env.mean_arrival_rate_points);
    fprintf('- Users Point: %d/%d\n', env.current_N_studied, length(env.Users));

    filename = sprintf('C:/Users/User/Documents/training_scenarios/scenarios_online_NTN_new/scen

```

```

%02d/matfile_N=%02d_Arrival_rate_%.3f_Snap%02d.
mat', ...
    env.current_scenario, env.Users(env.
        current_N_studied), ...
    env.mean_arrival_rate(env.current_mmm), env.
        current_snapshot);
end

if ~exist(filename, 'file')
    fprintf('\nERROR: Could not find file: %s\n',
        filename);
    InitialObservation = [];
    InitialState = [];
    return;
end

data = load(filename);

env.cells = data.cells;
env.cells_TN = data.cells_TN;
env.N = length(data.data_rate_user_DL);
env.BW_need = data.BW_need;
env.data_rate_user_DL = data.data_rate_user_DL;
env.P_RB_pair = data.P_RB_pair;
env.AN_edge = data.AN_edge;
env.available_resources = data.available_resources;
env.batch_list_actual = data.batch_list_actual;
env.time_exec_each_batch = data.time_exec_each_batch;

[initial_cell_power, ~, initial_total_power] =
    Joint_power_calc_v2(...
        env.BW_need, zeros(env.N, env.cells), env.cells_TN,
            env.N_gNB, ...
        env.N_HAPs, env.N_LEOs, env.N_MEOs, env.P_RB_pair,
            env.static_ON, ...
        env.Delta_p_AN_gNB, env.Delta_p_AN_SC, env.
            Delta_p_AN_HAP, ...
        env.Delta_p_AN_LEO, env.Delta_p_AN_MEO, env.
            Delta_p_AN_GEO, ...
        env.P_idle_gNB, env.P_idle_SC, env.P_idle_HAP, ...
        env.P_idle_LEO, env.P_idle_MEO, env.P_idle_GEO, ...
        env.N_TRX_AN_gNB, env.N_TRX_AN_SC, env.N_TRX_AN_HAP,
        ...

```

```

env.N_TRX_AN_LEO, env.N_TRX_AN_MEO, env.N_TRX_AN_GEO)
    ;

env.cell_power_history = initial_cell_power';
env.previous_total_power = initial_total_power;
env.active_cells = env.cell_power_history > 0;
env.user_association = zeros(env.N, env.cells);

if ~isempty(env.batch_list_actual) && iscell(env.
batch_list_actual)
    env.CurrentBatchIndex = 1;
    env.CurrentBatch = env.batch_list_actual{1};

    if isempty(env.CurrentBatch)
        error('First batch is empty');
    end

    env.CurrentUser = env.CurrentBatch(1);
    env.ProcessedUsers = [];
    env.BatchTimeLeft = env.time_exec_each_batch(1);
else
    error('batch_list_actual is empty or not a cell array
');
end

InitialState = env.create_state();
InitialObservation = env.create_observation(InitialState,
env.CurrentUser);

if ~env.is_initializing
    env.current_snapshot = env.current_snapshot + 1;
    env.step_count = 0;
    env.accumulated_reward = zeros(1, 40);
    env.all_reward = 0;

    if env.current_snapshot > env.iteration
        env.current_snapshot = 1;
        env.current_scenario = env.current_scenario + 1;

        if env.current_scenario > env.scenarios
            env.current_scenario = 1;
            env.current_mmm = env.current_mmm + 1;

```

```

if env.current_mmm > env.
    mean_arrival_rate_points
    env.current_mmm = 1;
    env.current_N_studied = env.
        current_N_studied + 1;

if env.current_N_studied > length(env.
    Users)
    fprintf('\n!!!_COMPLETED_ALL_
        USERS_-_SIMULATION_FINISHED_
        !!!\n');
    fprintf('Final_statistics:\n');
    fprintf('-_Total_scenarios_
        processed:_%d\n', env.
            scenarios);
    fprintf('-_Total_snapshots_per_
        scenario:_%d\n', env.iteration
            );
    fprintf('-_Total_arrival_rate_
        points:_%d\n', env.
            mean_arrival_rate_points);
    fprintf('-_Total_user_points:_%d\
        n', length(env.Users));
    diary off;
    InitialObservation = [];
    InitialState = [];

        end
    end
end
end
end
end

function [NextObservation, Reward, Done] = step_function(env,
    action)
    current_user = env.CurrentUser;
    previous_power = env.previous_total_power;
    hard_constraint_penalty = 1;
    env.original_action_would_violate = false;
    env.step_count = env.step_count + 1;

    % Check if chosen action would deplete resources

```



```

potentialResources = env.available_resources(action) -
    env.BW_need(current_user, action);

if potentialResources < 0

    env.original_action_would_violate = true; % Flag
        that the original action was unsafe

end

% Update environment resources after action
env.available_resources(action) = ...
    env.available_resources(action) - env.BW_need(
        current_user, action);
env.user_association(current_user, action) = 1;

% Calculate power impact
[~, P_BS_Watt, Total_power] = Joint_power_calc_v2(...
    env.BW_need, env.user_association, ...
    env.cells_TN, env.N_gNB, env.N_HAPs, env.N_LEOs, env.
        N_MEOs, ...
    env.P_RB_pair, 1, ...
    env.Delta_p_AN_gNB, env.Delta_p_AN_SC, env.
        Delta_p_AN_HAP, ...
    env.Delta_p_AN_LEO, env.Delta_p_AN_MEO, env.
        Delta_p_AN_GEO, ...
    env.P_idle_gNB, env.P_idle_SC, env.P_idle_HAP, ...
    env.P_idle_LEO, env.P_idle_MEO, env.P_idle_GEO, ...
    env.N_TRX_AN_gNB, env.N_TRX_AN_SC, env.N_TRX_AN_HAP,
        ...
    env.N_TRX_AN_LEO, env.N_TRX_AN_MEO, env.N_TRX_AN_GEO)
    ;

env.cell_power_history = P_BS_Watt';
env.active_cells = env.cell_power_history > 0;
current_total_power = sum(env.cell_power_history);

actual_power_increase = Total_power - previous_power; %
    from current_total_power

% Define expected power increase range based on your
    system

```

```

min_power_increase = 6.0;      % Smallest expected
    increase
max_power_increase = 300.0;    % Largest expected increase

% Calculate normalized reward
if env.original_action_would_violate
    Reward = -hard_constraint_penalty; % Keep penalty at
        -1
else
    % Normalize baseReward to [0, 1] range
    normalized_increase = (actual_power_increase -
        min_power_increase) / (max_power_increase -
        min_power_increase);
    Reward = 1.0 - normalized_increase; % small increase
        = high reward

    % Ensure reward stays in bounds
    Reward = max(0, min(1, Reward));
end

env.all_reward(env.step_count) = Reward; % Store reward
    at current step

% Check if this is the last step
if env.step_count == 40
    env.accumulated_reward = sum(env.all_reward);
end

%mu = 0.05;
%epsilon = 1e-6;

%resourceThreshold = 4;
%resourcePenalty = 0;

%if env.available_resources(action) < resourceThreshold
    %resourcePenalty = (1/mu) * log((resourceThreshold -
        env.available_resources(action)) + epsilon);
%end

%if env.original_action_would_violate
    %Reward = baseReward - resourcePenalty -
        hard_constraint_penalty;
%else

```

```

        %Reward = baseReward - resourcePenalty;
    %end

    % Parameters for log barrier functions
    % mu_power = 0.1;          % Barrier parameter for power

    % Safety margin for numerical stability
    % epsilon = 1e-6;

    % Power constraint log barrier (active when power exceeds
        threshold)
    % powerThreshold = 300;
    % powerBarrier = 0;
    % if actual_power_increase > powerThreshold
    %     powerBarrier = (1/mu_power) * log((
        actual_power_increase - powerThreshold) + epsilon);
    % end

    % Combined reward with barrier functions
    % if cellResources >= 0
    %     Reward = baseReward - powerBarrier;
    % Add penalty if hard constraint mechanism was triggered
    %     if env.original_action_would_violate
    %         Reward = Reward - hard_constraint_penalty;
    %     end
    % end

env.previous_total_power = Total_power;

fprintf('\nAction_Results:\n');
fprintf('Selected_Cell: %d\n', action);
fprintf('Previous_Power: %.2f_W\n', previous_power);
fprintf('New_Power: %.2f_W\n', current_total_power);
fprintf('Power_Increase: %.2f_W\n', actual_power_increase
);
fprintf('Available_Resources_of_current_cell: %.2f\n',
    env.available_resources(action));
fprintf('Reward: %.5f\n', Reward);
%if resourcePenalty ~= 0
    %fprintf('Resource Penalty: %.2f\n', resourcePenalty)
    ;
%end
% fprintf('Power Penalty: -%.2f\n', powerBarrier);

```

```

if env.original_action_would_violate
    fprintf('Hard_Constraint_Penalty_applied: %.1f\n',
        hard_constraint_penalty);
end
if env.step_count == 40
    fprintf('Accumulated_Reward: %.5f\n', env.
        accumulated_reward);
end

[Done, NextState] = env.advance_user();
if Done
    NextObservation = env.create_observation(NextState,
        current_user);
else
    NextObservation = env.create_observation(NextState,
        env.CurrentUser);
end
end

function observation = create_observation(env, State,
current_user)
num_cells = env.cells;
total_features = 4 * num_cells + 6;
features = zeros(total_features, 1);

% 1. Active cells status
features(1:num_cells) = env.active_cells;
% fprintf('Active Cells:\n');
% disp(features(1:num_cells)');

% 2. Bandwidth needs
features(num_cells+1:2*num_cells) = env.BW_need(
    current_user, :) / 13232; %/13232
% fprintf('Bandwidth Needs:\n');
% disp(features(num_cells+1:2*num_cells)');

% 3. Available resources (normalized)
features(2*num_cells+1:3*num_cells) = max(-1, (env.
    available_resources - env.BW_need(current_user, :))) / 5)
;
% fprintf('Available Resources:\n');
% disp(features(2*num_cells+1:end)');

```

```

max_P_RB = env.P_RB_pair(1) * env.Delta_p_AN_gNB * env.
    N_TRX_AN_gNB;

% 4. Power/Resource_Block * Delta_Power *
    Transceiver_Count
for i = 1:num_cells
    if i == 1 % gNB
        features(3*num_cells+i) = (env.P_RB_pair(i) * env
            .Delta_p_AN_gNB * env.N_TRX_AN_gNB) / max_P_RB
        ;
    elseif i <= env.cells_TN % Small cells
        features(3*num_cells+i) = (env.P_RB_pair(i) * env
            .Delta_p_AN_SC * env.N_TRX_AN_SC) / max_P_RB;
    elseif i <= env.cells_TN + env.N_HAPs % HAPs
        features(3*num_cells+i) = (env.P_RB_pair(i) * env
            .Delta_p_AN_HAP * env.N_TRX_AN_HAP) / max_P_RB
        ;
    elseif i <= env.cells_TN + env.N_HAPs + env.N_LEOs %
        LEOs
        features(3*num_cells+i) = (env.P_RB_pair(i) * env
            .Delta_p_AN_LEO * env.N_TRX_AN_LEO) / max_P_RB
        ;
    elseif i <= env.cells_TN + env.N_HAPs + env.N_LEOs +
        env.N_MEOs % MEOs
        features(3*num_cells+i) = (env.P_RB_pair(i) * env
            .Delta_p_AN_MEO * env.N_TRX_AN_MEO) / max_P_RB
        ;
    else % GEOs
        features(3*num_cells+i) = (env.P_RB_pair(i) * env
            .Delta_p_AN_GEO * env.N_TRX_AN_GEO) / max_P_RB
        ;
    end
end

max_P_idle = env.P_idle_gNB * env.N_TRX_AN_gNB;

% 5. Idle Power
features(4*num_cells+1) = (env.P_idle_gNB * env.
    N_TRX_AN_gNB) / max_P_idle;
features(4*num_cells+2) = (env.P_idle_SC * env.
    N_TRX_AN_SC) / max_P_idle;
features(4*num_cells+3) = (env.P_idle_HAP * env.
    N_TRX_AN_HAP) / max_P_idle;

```

```

features(4*num_cells+4) = (env.P_idle_LEO * env.
    N_TRX_AN_LEO)/ max_P_idle;
features(4*num_cells+5) = (env.P_idle_MEO * env.
    N_TRX_AN_MEO)/ max_P_idle;
features(4*num_cells+6) = (env.P_idle_GEO * env.
    N_TRX_AN_GEO)/ max_P_idle;

% Display Features
fprintf('\n=====Step%dFeatures=====\n', env
    .step_count);
fprintf('Neural_Network_Input:\n');
fprintf('Active:'); fprintf('%8d', features(1:num_cells)
    ); fprintf('\n');
fprintf('BW_Need:'); fprintf('%8.4f', features(num_cells
    +1:2*num_cells)); fprintf('\n');
fprintf('Avail-BW_need:'); fprintf('%8.4f', features(2*
    num_cells+1:3*num_cells)); fprintf('\n');
fprintf('Power/Res:'); fprintf('%8.4f', features(3*
    num_cells+1:4*num_cells)); fprintf('\n');
fprintf('Idle_Powers:gNB=%.4fSC=%.4fHAP=%.1fLEO=%.4f
    MEO=%.4fGEO=%.4f\n', ...
    features(4*num_cells+1:end));
fprintf('=====\n');

% Convert all features to double precision
observation = double(features);
end

function [nextObs, reward, done, info] = step(obj, action)
    fprintf('Stepcalledwithaction:%d\n', action);
    try
        [nextObs, reward, done] = obj.step_function(action);
    catch e
        fprintf('Errorinstep:%s\n', e.message);
        rethrow(e);
    end
    info = struct();
end

function initialObs = reset(obj)
    fprintf('Resetcalled\n');
    try
        [initialObs, ~] = obj.reset_function();
    end

```

```

        fprintf('Reset completed successfully\n');
    catch e
        fprintf('Error in reset: %s\n', e.message);
        rethrow(e);
    end
end

function state = create_state(env)
    state = struct(...
        'current_user', env.CurrentUser, ...           % Current
            user being processed
        'available_resources', env.available_resources, ... %
            Resources per cell
        'active_cells', env.active_cells, ...         % Which
            cells are active
        'power_history', env.cell_power_history, ... %
            Current power state
        'BW_need', env.BW_need);                       %
            Bandwidth requirements
    end

function [obsInfo, actInfo] = getSpecs(obj)
    obsInfo = obj.ObservationInfo;
    actInfo = obj.ActionInfo;
end

end

end
end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Κώδικας δυναμικής δημιουργίας άκτορα και κριτή.

```

% Start of training script
%clc;
%clear all;
%close all;

% Initialize environment configuration
envConfig = struct(...
    'N_step', 10, ...

```

```

    'min_users', 40, ...
    'max_users', 40, ...
    'mean_arrival_rate', [1], ...
    'scenarios', 1, ...
    'iteration', 101);

% Enable MATLAB's debug mode for errors
dbstop if error

% Create the environment first
fprintf('Creating learning environment...\n');
env = LearningEnvironment(envConfig);

% Create our custom PPO agent
fprintf('Building custom PPO agent with specified architecture...\n')
;
try
    % Get observation and action specs from environment using
    % getSpecs
    [obsInfo, actInfo] = env.getSpecs();

    % Create the deep neural networks for the PPO agent
    inputSize = obsInfo.Dimension(1);
    outputSize = numel(actInfo.Elements);

    fprintf('Creating networks with input size %d and output size %d\n'
        n', inputSize, outputSize);

    % Create actor network with your specified architecture plus
    % softmax output
    actorNetwork = [
        featureInputLayer(inputSize, "Name", "featureinput")
        fullyConnectedLayer(600, "Name", "fc_600")
        layerNormalizationLayer("Name", "norm1")
        reluLayer("Name", "relu_1")
        fullyConnectedLayer(500, "Name", "fc_500")
        layerNormalizationLayer("Name", "norm2")
        reluLayer("Name", "relu_2")
        fullyConnectedLayer(400, "Name", "fc_400")
        layerNormalizationLayer("Name", "norm3")
        reluLayer("Name", "relu_3")
        fullyConnectedLayer(300, "Name", "fc_300")
        layerNormalizationLayer("Name", "norm4")

```



```

    reluLayer("Name", "relu_4")
    fullyConnectedLayer(outputSize, "Name", "output")
    softmaxLayer("Name", "actor_softmax")
];

% Create critic network with the same architecture but single
output
criticNetwork = [
    featureInputLayer(inputSize, "Name", "featureinput")
    fullyConnectedLayer(600, "Name", "fc_600")
    layerNormalizationLayer("Name", "norm1")
    reluLayer("Name", "relu_1")
    fullyConnectedLayer(500, "Name", "fc_500")
    layerNormalizationLayer("Name", "norm2")
    reluLayer("Name", "relu_2")
    fullyConnectedLayer(400, "Name", "fc_400")
    layerNormalizationLayer("Name", "norm3")
    reluLayer("Name", "relu_3")
    fullyConnectedLayer(300, "Name", "fc_300")
    layerNormalizationLayer("Name", "norm4")
    reluLayer("Name", "relu_4")
    fullyConnectedLayer(1, "Name", "output")
];

% Create representation options
actorOptions = rlRepresentationOptions('LearnRate', 0.000001, '
    GradientThreshold', 1);
criticOptions = rlRepresentationOptions('LearnRate', 0.000002, '
    GradientThreshold', 1);

% Create actor and critic representations
actor = rlStochasticActorRepresentation(layerGraph(actorNetwork),
    obsInfo, actInfo, ...
    'Observation', {'featureinput'}, actorOptions);

critic = rlValueRepresentation(layerGraph(criticNetwork), obsInfo
    , ...
    'Observation', {'featureinput'}, criticOptions);

% Create PPO agent options
agentOptions = rlPPOAgentOptions(...
    'ExperienceHorizon', 500, ...
    'ClipFactor', 0.2, ...

```

```

        'EntropyLossWeight', 0.01, ...
        'MiniBatchSize', 65, ...
        'NumEpoch', 5);

    % Create the PPO agent
    agent = rlPPOAgent(actor, critic, agentOptions);

    fprintf('Custom PPO agent created successfully\n');

    % Try to start reinforcement learning designer with our custom
    % agent and environment
    fprintf('Launching Reinforcement Learning Designer...\n');
    reinforcementLearningDesigner(env, agent);
catch e
    fprintf('Error creating agent or launching RL Designer: %s\n', e.
        message);
    fprintf('Error trace:\n%s\n', getReport(e));
end

```