



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**«ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ MACHINE LEARNING  
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΙΜΟ  
ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ»**

---

**ΤΖΑΝΑΚΟΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ**

A.M. 236225

***ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:***

Μπούρας Χρήστος, Καθηγητής

***ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:***

Βλάχος Κυριάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Γαροφαλάκης Ιωάννης, Καθηγητής

Μπούρας Χρήστος, Καθηγητής

**ΠΑΤΡΑ 2020**

© Copyright συγγραφέας Τζανάκος Δημοσθένης, 2020

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής αυτής εργασίας, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Μπούρα, καθηγητή του ΤΜΗΥΠ στο Πανεπιστήμιο Πατρών και Επιστημονικό Υπεύθυνο της Μονάδας 6 του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων (ΙΤΥΕ), για την δυνατότητα που μου έδωσε να αναλάβω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Οι υποδείξεις του και η συνεχής καθοδήγησή του ήταν πολύτιμα εφόδια για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Βασίλη Κόκκινο. Χωρίς την συνεχή παρουσία του, τη στήριξη του και τις χρήσιμες συμβουλές του, θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Θερμές ευχαριστίες ομοίως στην Χριστίνα Κουλούρη, της οποίας η βοήθεια και η στήριξη ήταν καθοριστική για το ξεκίνημα της παρούσας διπλωματικής. Παρείχε την ιδέα και τον τρόπο να ξεκινήσω την συγγραφή της εργασίας αυτής.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστώ στους «εκπαιδευτικούς» της ζωής μου, τους γονείς μου, Νίκο και Γιώτα, την αδερφή μου Σταυρούλα και τους φίλους μου, που όλα αυτά τα χρόνια, με τον δικό τους τρόπο, με βοήθησαν σε αυτήν την όμορφη προσπάθεια.

Πάτρα Μάρτιος 2020  
Τζανάκος Δημοσθένης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία MIMO (Multiple – Input Multiple – Output) έχει γίνει μια θεμελιώδης τεχνική στις τρέχουσες ασύρματες επικοινωνίες, τόσο στα κυψελωτά δίκτυα όσο και στα ασύρματα δίκτυα WiFi. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς αναμένεται να υποστηρίξουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων και πιο αξιόπιστες υπηρεσίες. Με την ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης (machine learning), οι επιδόσεις του MIMO βελτιστοποιούνται. Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι να μελετήσει τη βελτιωμένη απόδοση που μπορούν να προσφέρουν οι ισχυροί αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης στο πλαίσιο των δικτύων πέμπτης γενιάς, όσον αφορά την τεχνολογία MIMO και να προτείνει αλγόριθμο μηχανικής μάθησης για την αποκωδικοποίηση καναλιού σε MIMO περιβάλλοντα.

Στη διπλωματική μας λοιπόν θέτουμε ως στόχο την γεφύρωση του χάσματος μεταξύ του τομέα των κινητών επικοινωνιών και αυτού της Μηχανικής Μάθησης, εξετάζοντας συγκεκριμένους συνδυαστικούς κρίκους μεταξύ τους. Περιγράφουμε το μοντέλο συστήματος που θα χρησιμοποιήσουμε και τον μηχανισμό πάνω στον οποίο θα στηριχθούν τα πειράματά μας. Το σύνολο δεδομένων (dataset) που θα παράγουμε αποτελεί την έξοδο μιας κατάλληλης αναπαράστασης περιβάλλοντος MIMO, που βοηθά στον καθορισμό όλων των απαραίτητων παραμέτρων για τα πειράματά μας. Αναλύουμε τα αποτελέσματα του dataset και προτείνουμε την περαιτέρω χρήση του ως είσοδο στον αλγόριθμο μηχανικής μάθησης που επιλέξαμε, εξετάζοντας όλες τις πλευρές της τεχνικής αυτής.

# ABSTRACT

MIMO (Multiple – Input Multiple – Output) technology has become a fundamental technique in current wireless communications, both in cellular networks and WiFi networks. Fifth generation networks (5G) are expected to support extremely high data rates and more reliable services. By integrating machine learning, MIMO's performance is optimized. The purpose of our thesis is to study the enhanced performance of powerful MIMO algorithms on fifth generation networks in terms of MIMO technology and to study a machine learning technique for channel state prediction in a MIMO environment.

In our thesis we try to bridge the gap between mobile telecommunications and Machine learning, by examining a specific interconnection between the two areas. We describe our view of the problem, the system model that we will use and the mechanism behind our experiments. The Dataset that we will create is an output of a useful example of a MIMO environment representation, which helps setting all necessary parameters for our experiment. We explain the results presented in this Dataset and suggest its further use as an input to a Machine learning algorithm by examining this Machine learning technique from all sides.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	5
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	10
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	18
ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ – ΑΠΟ ΤΗΝ 1 <sup>Η</sup> ΣΤΗΝ 4 <sup>Η</sup> ΓΕΝΙΑ .....	18
2.1 Ιστορικά στοιχεία.....	18
2.2 Κυψελωτά δίκτυα.....	19
2.3 Εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....	20
2.4 Πρώτη γενιά κινητών δικτύων .....	21
2.5 Δεύτερη γενιά κινητών δικτύων.....	22
2.6 Ενδιάμεση γενιά 2.5G .....	24
2.7 Τρίτη γενιά κινητών δικτύων.....	26
2.8 Τέταρτη γενιά κινητών δικτύων .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	32
ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ 5 <sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ.....	32
3.1 Χρονοδιάγραμμα εξελίξεων .....	32
3.2 Οικοσύστημα του 5G .....	33
3.3 Χαρακτηριστικά του 5G .....	34

3.4	Δυνατότητες του 5G.....	36
3.5	Πλεονεκτήματα του 5G .....	38
3.6	Υπηρεσίες του 5G .....	39
3.7	Τρέχουσες εξελίξεις σε παγκόσμιο επίπεδο .....	40
3.8	Προκλήσεις του 5G .....	41
3.9	Οι κίνδυνοι της τεχνολογίας 5G .....	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> .....</b>		<b>43</b>
<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MIMO.....</b>		<b>43</b>
4.1	Βασικά χαρακτηριστικά της MIMO .....	43
4.2	Χαρακτηριστικά τεχνολογιών SISO, MISO και MIMO .....	44
4.2.1	Η περίπτωση Single Input Single Output (SISO).....	45
4.2.2	Η περίπτωση Multiple Input Single Output (MISO).....	45
4.2.3	Η περίπτωση Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	45
4.3	Μαζική MIMO τεχνολογία.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> .....</b>		<b>48</b>
<b>ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ .....</b>		<b>48</b>
5.1	Η έννοια της μάθησης .....	48
5.2	Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά μηχανικής μάθησης.....	48
5.3	Είδη μηχανικής μάθησης.....	50
5.3.1	Μηχανική Μάθηση με Επίβλεψη ή επιβλεπόμενη μάθηση .....	51
5.3.2	Μη Εποπτευόμενη ή μη επιτηρούμενη Μηχανική Μάθηση.....	52
5.3.3	Ημι – Εποπτευόμενη Μηχανική Μάθηση .....	52
5.3.4	Ενισχυμένη Μάθηση .....	52
5.4	Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης .....	53
5.5	Κατηγοριοποίηση .....	55
5.5.1	Ορισμός και αλγόριθμοι ταξινόμησης .....	56

5.5.2	Μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης.....	57
5.5.3	Δέντρα απόφασης .....	58
5.5.4	Νευρωνικά δίκτυα .....	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> .....</b>		<b>60</b>
<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....</b>		<b>60</b>
6.1	Εισαγωγικά στοιχεία εκτέλεσης σεναρίου.....	60
6.2	Διαδικασία παραγωγής Machine Learning dataset .....	61
6.3	Περιγραφή σεναρίου R ανίχνευσης ακτίνων .....	62
6.4	Παράμετροι S του dataset .....	65
6.5	Κώδικας παραγωγής του dataset.....	67
6.6	Πληροφορίες απόδοσης καναλιού .....	70
6.7	Συλλογή απαιτήσεων ταχύτητας .....	72
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> .....</b>		<b>74</b>
<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>		<b>74</b>
7.1	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας – 1 <sup>ο</sup> μέρος εξομοίωσης.....	74
7.2	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας – 2 <sup>ο</sup> μέρος εξομοίωσης.....	78
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> .....</b>		<b>86</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>		<b>86</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> .....</b>		<b>88</b>
<b>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....</b>		<b>88</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>90</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>		<b>95</b>
<b>ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΠΗΓΑΙΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....</b>		<b>95</b>





# ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Παράδειγμα κυψελωτού δικτύου ([54]).....	19
Εικόνα 2: Πλήθος συνδρομητών ανά τεχνολογία για τα έτη 2001 – 2013 ([13]) .....	20
Εικόνα 3: Πλήθος συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και ποσοστό ανά 100 κατοίκους για τα έτη 2001 – 2013 ([14]) .....	21
Εικόνα 4: Παρουσίαση των δικτυακών οντοτήτων του GSM ([55]) .....	24
Εικόνα 5: Βασικότερα πρότυπα κινητών δικτύων μέχρι την 3G γενιά ([19]).....	27
Εικόνα 6: Παρουσίαση τεχνολογιών SISO, SIMO, MISO, MIMO ([56]).....	44
Εικόνα 7: Είδη κερδών στις συστοιχίες πολλαπλών κεραιών: Κέρδη (α) Ποικιλομορφίας, (β) Διάταξης, (γ) Χωρικής πολυπλεξίας .....	46
Εικόνα 8: Μαζικό σύστημα MIMO.....	47
Εικόνα 9: Η διαδικασία παραγωγής του dataset.....	62
Εικόνα 10: 2D αναπαράσταση του σεναρίου του περιβάλλοντος ([38]).....	62
Εικόνα 11: 3D αναπαράσταση του περιβάλλοντος ([38]).....	63
Εικόνα 12: Το εποπτευόμενο μοντέλο εκμάθησης .....	70
Εικόνα 13: Δημιουργία του DeepMIMO_dataset .....	75
Εικόνα 14: Στιγμιότυπο με τα πρώτα 2 κελιά, 1 για κάθε σταθμό βάσης.....	76
Εικόνα 15: Στιγμιότυπο με τα 3801 κελιά, 1 για κάθε χρήστη.....	76
Εικόνα 16: Στιγμιότυπο με τα 2 κελιά πληροφορίας του 1 <sup>ου</sup> χρήστη.....	77
Εικόνα 17: Στιγμιότυπο με την τοποθεσία στους άξονες x – y – z.....	77
Εικόνα 18: 1 <sup>ο</sup> dataset. ....	78
Εικόνα 19: Στιγμιότυπο παραγωγής εισόδων και εξόδων.....	79
Εικόνα 20: Παραγόμενα αρχεία 2 <sup>ου</sup> μέρους εξομοίωσης.....	79
Εικόνα 21: Στιγμιότυπο με το παραγόμενο αρχείο DL_output.....	80
Εικόνα 22: Στιγμιότυπο με τα παραγόμενα αρχεία του machine learning βήματος.....	82

Εικόνα 23: Achievable rate του συστήματός μας, ανάλογα με τα δείγματα σε χιλιάδες ([40], [47]).....	83
Εικόνα 24: Πληρέστερη εξομοίωση που πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες, με 301 σειρές (54.481 χρήστες) και 4 σταθμούς βάσης, αποτελέσματα από τη δημοσίευση [41]. ([39][40][41][42][43]) .....	84

# AKΡΩΝΥΜΙΑ

**AMPS** Advanced Mobile Phone System

**ASN GW** Access Services Network GateWay

**CDMA** Code Division Multiple Access

**CDN** Content Distribution Network

**CSN** Connectivity Services Network

**DHCP** Dynamic Host Configuration Protocol

**EDGE** Enhanced Data Rates for Global Evolution

**EPC** Enhanced Packet Core

**FDMA** Frequency Division Multiple Access

**GSM** Global System for Mobile

**HSCSD** High-Speed Circuit-Switched Data

**IMT – A** International Mobile Telecommunications Advanced),

**KTF** Korean Telecom Freetel

**LTE** Long Term Evolution

**LDPC** Turbo Coding και Low-Density Parity Check

**MBWA** Mobile Broadband Wireless Access

**MIMO** Multiple Input Multiple Output

**NMT** (Nordic Mobile Telephone)

**NSP** Network Service Provider

**NTT** Nippon Telephone and Telegraph

**PCS** Personal Communication Services

**PDC** Personal Digital Cellular

**TAGS** Total Access Communication Systems (TACS

**TDMA** Time Division Multiple Access

**WCDMA** Wide Band Code Division Multiple Access

**WI-FI** Wireless Fidelity

**WPAN** Wireless Personal Area Networks

**5G** Πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας

**IoT** Internet of things

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών είναι ένας τομέας με πολύ γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης. Αδιαμφισβήτητα τα κινητά δίκτυα 5G αναμένεται να διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο κατά την τρέχουσα δεκαετία 2020 – 2030.

Το στοίχημα για το 5G είναι η εκμηδένιση των περισσότερων από τα προβλήματα των προηγούμενων τεχνολογιών και αφορά τρόπους μείωσης της κατανάλωσης ρεύματος, χρήση πολύ χαμηλού κόστους εξαρτημάτων χαμηλής ακρίβειας τα οποία να συνεργάζονται αποτελεσματικά και, γενικά, ανεύρεση νέων τρόπων ανάπτυξης, αφού οι επιπλέον υπηρεσίες που προσφέρουν οι κεραιές, δίνουν σημαντικές δυνατότητες και νέες ευκαιρίες.

Είδη προκλήσεων που καλούνται να αντιμετωπιστούν στα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα είναι η αξιόπιστη μετάδοση, το μειωμένο κόστος, η ασφάλεια, οι υπηρεσίες πολυεκπομπής, η υποστήριξη διαφορετικών συσκευών, πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών, η λειτουργία υπό υπερύψηλη πυκνότητα χρηστών, η δυνατότητα συνδεσιμότητας ετερογενών δικτύων, η υποστήριξη πολλαπλών μοντέλων κινητικότητας, κλπ.

Συνδυαζόμενη με την 5G τεχνολογία, μια πολλά υποσχόμενη τεχνική είναι η Μαζική MIMO τεχνολογία η οποία τα τελευταία χρόνια έχει κινήσει το παγκόσμιο ερευνητικό ενδιαφέρον, αφού προσδίδει νέες δυνατότητες για υψηλότερη απόδοση, αξιοπιστία σύνδεσης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και φασματική απόδοση. Στα μαζικά MIMO συστήματα εγκαθιδρύεται ένα πλήθος κεραιών στους σταθμούς βάσης που αποτελεί μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούν. Η λογική της επικοινωνίας του κάθε χρήστη με τον σταθμό βάσης μέσω εξοπλισμού απλής κεραιάς δίνει το πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μικρού κόστους του εξοπλισμού στους χρήστες.

Προκειμένου να αξιοποιήσουμε περαιτέρω τις δυνατότητες των συστημάτων MIMO με την 5G τεχνολογία, στοχεύουμε στον καθορισμό ενός συνόλου μεθόδων μέσω των οποίων είναι εφικτή η επινοήση κατάλληλων μοντέλων και αλγορίθμων, τέτοιων που είναι ικανοί να οδηγήσουν στην πρόβλεψη. Έτσι στρεφόμεστε στον τομέα της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning).

Ο τομέας αυτός αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της Τεχνητής Νοημοσύνης που ασχολείται με την ανάπτυξη αλγορίθμων μάθησης, δηλαδή αλγορίθμων που βελτιώνουν την επίδοση ενός συστήματος σε προβλήματα. Η βελτίωση με τον αλγόριθμο επέρχεται σταδιακά,

επειδή ο αλγόριθμος τις περισσότερες φορές είναι επαναληπτικός, δηλαδή εξετάζει τα παραδείγματα πολλές φορές σε «εποχές μάθησης».

Τα εργαλεία μηχανικής μάθησης έχουν πολλές και ενδιαφέρουσες εφαρμογές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και, ακόμα περισσότερο, στα συστήματα MIMO. Στόχος μας είναι μέσω των κατάλληλων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης να οργανώσουμε και να αυτοματοποιήσουμε άγνωστα μοντέλα που θα βοηθούν τα συστήματα MIMO να εξελίσσονται και να εισάγουν μεγαλύτερες ταχύτητες και δυνατότητες, κάτι που είναι και κύριος σκοπός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G.

Ο πιο εύκολος τρόπος μελέτης των δυνατοτήτων ενός συστήματος MIMO στο 5G είναι η δημιουργία ενός dataset που περιέχει κάθε φορά την πληροφορία που θέλουμε να δώσουμε ως είσοδο στην μηχανική μάθηση, έτσι ώστε να γίνουν οι αντίστοιχες προβλέψεις και να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος. Με την κατασκευή – δημιουργία αυτού του dataset, μπορούμε να έχουμε τις εισόδους και εξόδους πολλών machine learning εφαρμογών και παραδειγμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση μας δημιουργούμε ένα εικονικό σενάριο ενός πραγματικού περιβάλλοντος 5G δικτύου, όπου έχουμε κεραίες, χρήστες, κτίρια, δρόμους, κλπ. Αναπαράγουμε το σενάριο στην MATLAB και, δίνοντας όλες τις κατάλληλες παραμέτρους, καταλήγουμε στην εξαγωγή διάφορων αποτελεσμάτων και datasets.

Το dataset που μας ενδιαφέρει είναι αυτό που περιέχει πληροφορία throughput του καναλιού από τη μεριά του χρήστη (πόσα bps λαμβάνει ο χρήστης από την κεραία). Την πληροφορία αυτή χρησιμοποιούμε ως είσοδο στο εργαλείο μηχανικής μάθησης, όπου ορίζοντας τις κλάσεις, θα γίνεται πρόβλεψη της υπηρεσίας που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο για τον χρήστη στις αντίστοιχες συνθήκες. Οι κλάσεις μας είναι το minimum throughput για την πραγματοποίηση στο επίπεδο του χρήστη των υπηρεσιών: 1) μουσική, 2) βίντεο, 3) VoIP, 4) gaming.

Προκειμένου να αναπαρασταθεί ορθά ένα εικονικό δίκτυο 5G που χρησιμοποιεί την τεχνολογία MIMO, η πειραματική προσομοίωσή μας σε περιβάλλον MATLAB του επιλεγμένου μοντέλου συστήματος δικτύου θα πρέπει να διαθέτει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά. Αναγκαίο είναι, λοιπόν, να δώσουμε τις κατάλληλες παραμέτρους στο μοντέλο μας. Αυτό σημαίνει ότι θα συμπεριλάβουμε πολλαπλές κεραίες, ώστε να έχουμε το μέγιστο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Επιπλέον, υποθέτουμε ένα σενάριο εξομοίωσης δικτύου που να ικανοποιεί τις πραγματικές συνθήκες του επιθυμητού δικτύου. Μετά την εξομοίωση, θα παρουσιαστούν τα

αποτελέσματα σε μορφή πινάκων και άλλων παραμέτρων, όπως αποδόσεις δικτύου, ταχύτητες και ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.

Στη συνέχεια, ενσωματώνουμε το Machine Learning στο πείραμα. Ένας τρόπος να συμπεριλάβουμε την μηχανική μάθηση στην προσομοίωση, και άρα στο πείραμα, θα ήταν να εξειδικεύσουμε το είδος του αλγορίθμου με τρόπο ώστε να ορίζεται μόνος του ως αλγόριθμος μηχανικής μάθησης. Η ιδέα εδώ είναι να δημιουργήσουμε εποπτευόμενη μάθηση (Supervised learning).

Έτσι, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη χρήση του παραπάνω αλγορίθμου περιέχουν την είσοδο και δίνουν την επιθυμητή έξοδο του μοντέλου μας, όπως εμείς την έχουμε ζητήσει, χωρίς όμως να ξέρουμε τις τιμές της. Αυτή η επιλογή γίνεται επειδή αυτό που θέλουμε να μελετήσουμε είναι τα ίδια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και, άρα, δεν μπορούμε να τα ξέρουμε από πριν. Έτσι, λοιπόν, επιλέγουμε έναν αλγόριθμο εποπτευόμενης μάθησης και το πείραμά μας αποκτά και χαρακτηριστικά μηχανικής μάθησης.

Τελικά, η μηχανική μάθηση στο πείραμά μας θα συμπεριλαμβάνεται έμμεσα, μέσω των βημάτων της διαδικασίας που θα ακολουθήσουμε. Ο στόχος είναι να δημιουργήσουμε μια αλληλουχία βημάτων, την οποία θα ονομάσουμε μοντέλο μηχανικής μάθησης, και το οποίο ως μοντέλο θα μπορούσε εύκολα να δημιουργηθεί και να ακολουθηθεί από υπολογιστική συσκευή ή από σύνολο συσκευών που επικοινωνούν και ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους.

Η διπλωματική εργασία δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εκτενής ανασκόπηση των κινητών δικτύων επικοινωνιών από το 1G μέχρι και το 4G. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελωτών δικτύων και μια πληθώρα τεχνολογιών που αφορούσαν τις διάφορες γενιές κινητών επικοινωνιών μαζί με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Μέσα από τη συζήτηση αυτή γίνεται εφικτή η ανάγκη της μετάβασης προς την γενιά 4G που έχουμε σήμερα.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά, οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα της 5G τεχνολογίας. Επιπλέον, γίνεται εκτεταμένη συζήτηση πάνω στις υπηρεσίες που προσφέρει η 5G όπως και στις νέες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει και να λύσει.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνεται μια συνοπτική περιγραφή των MIMO συστημάτων. Δίνονται εν συντομία οι τεχνολογίες SISO, MISO και MIMO, ενώ δίνεται περισσότερη



έμφαση στα συστήματα MU – MIMO τα οποία προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία συνδέσμου, υψηλή απόδοση του ρυθμού μεταφοράς, καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και βελτιωμένη κάλυψη δικτύου.

- Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες της μηχανικής μάθησης. Παρουσιάζονται τα είδη της εποπτευόμενης, μη εποπτευόμενης και ενισχυμένης μάθησης και αναλύεται το επόμενο στάδιο μηχανικής μάθησης, η έννοια της ταξινόμησης.
- Στο Κεφάλαια 6 και 7 περιγράφουμε αναλυτικά ένα εικονικό σενάριο ενός πραγματικού περιβάλλοντος 5G δικτύου στην MATLAB και, δίνοντας όλες τις κατάλληλες παραμέτρους, καταλήγουμε στην εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων της εξομοίωσης στο περιβάλλον της MATLAB.
- Τέλος, στα Κεφάλαια 8 και 9 παραθέτουμε τα συμπεράσματά μας από την ανάλυση της πειραματικής εξομοίωσης και ιδέες για μελλοντική χρήση και επέκταση του μοντέλου μας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

## ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ – ΑΠΟ ΤΗΝ 1<sup>Η</sup> ΣΤΗΝ 4<sup>Η</sup> ΓΕΝΙΑ

### 2.1 Ιστορικά στοιχεία

Μπορούμε να πούμε ότι η ασύρματη μετάδοση χρονολογείται από τα αρχαία χρόνια, όπου ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε συστήματα που βασίζονταν στις αρχές της ασύρματης μετάδοσης (όπως οι αρχαίες φρυκτωρίες). Παρακολουθώντας, όμως, την ιστορική εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, διαπιστώνουμε ότι οι ασύρματες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν σχετικά τα τελευταία χρόνια και, μάλιστα, με πολύ γρήγορους ρυθμούς.

Πρώτη ασύρματη μετάδοση συνέβη το 1895 από τον Marconi. Άλλο σημαντικό γεγονός ήταν η ανακάλυψη του τηλεφώνου, το οποίο είχε τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας καθώς και του φωτόφωνου (photophone) από τους Bell και Tainter, το οποίο υπήρξε πρωτόπορα εφεύρεση για την εποχή του, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκε ευρέως. Και στην τηλεγραφία χρησιμοποιήθηκε η ασύρματη τεχνολογία, με κύριο μειονέκτημα την αδυναμία παραγωγής συνεχών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα να μεταδοθεί ήχος και εικόνα την ίδια στιγμή. Σήμερα χρησιμοποιείται μόνο από ραδιοερασιτέχνες.

Αρχές του 1920 αναπτύχθηκε η ραδιοφωνία (AM και FM μετά τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο) με μεγάλη απήχηση στον τομέα της ψυχαγωγίας. Ο πομπός και ο δέκτης είναι μια διαφορετική τεχνολογία από τις πρώτες μορφές ραδιοτηλεφωνίας. Αποτελεί από μόνη της μια ξεχωριστή ασύρματη επικοινωνία. Ο δέκτης κάνει επιλογή από το που θα πάρει πληροφορίες (ποιο σταθμό θα επιλέξει). Στο σύστημα αυτό στηρίζεται και η τηλεόραση, που αντικατέστησε το ραδιόφωνο ως καλύτερο μέσο μαζικής επικοινωνίας.

Στις επόμενες δεκαετίες άρχισε να αναπτύσσεται η ραδιοτηλεφωνία, στην οποία περιλαμβάνονται η μετάδοση γραπτών μηνυμάτων και η ασύρματη μετάδοση φωνής. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η κινητικότητα της ασύρματης συσκευής όπως, επίσης, και η εγκατάστασή της. Πολλές τεχνολογίες εντάσσονται στην κατηγορία αυτή, όπως τα κινητά τηλέφωνα (GSM), οι ασύρματοι πομποδέκτες (walkie – talkie) και τα CBs (ερασιτεχνικοί πομποδέκτες).

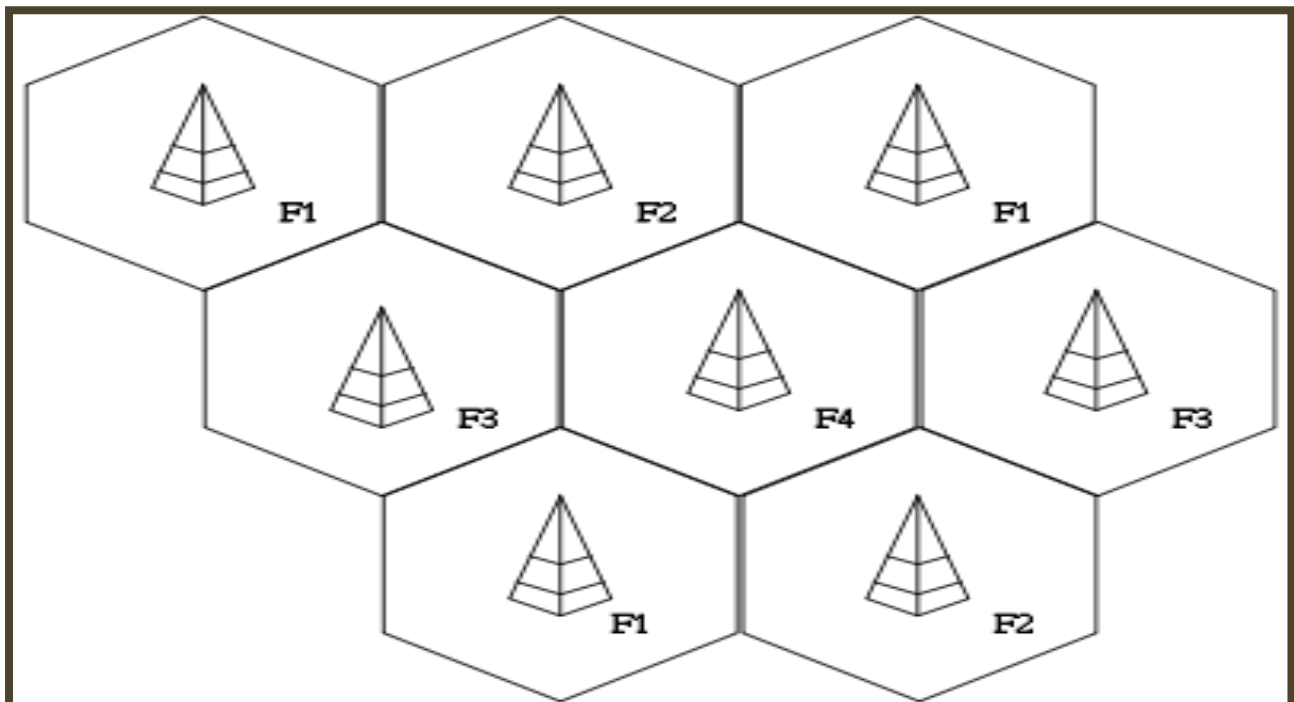
Επιπλέον, υπάρχουν τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ ηλεκτρονικών υπολογιστών και κινητών συσκευών. Μια πολύ διαδεδομένη ασύρματη δικτύωση μεταξύ υπολογιστών είναι το Wi – Fi (Wireless Fidelity), με την οποία ηλεκτρονικές συσκευές ανταλλάσσουν δεδομένα ή συνδέονται στο διαδίκτυο. Μια άλλη ευρέως γνωστή ασύρματη

τεχνολογία είναι το Bluetooth και η τεχνολογία Wireless Personal Area Networks (WPAN). Εμφανίζεται το 1988 μετά το Wi - Fi, με σκοπό τη διασύνδεση συσκευών μικρότερου μεγέθους και δυνατοτήτων. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται μια κάρτα δικτύωσης που να υποστηρίζει την συγκεκριμένη τεχνολογία.

## 2.2 Κυψελωτά δίκτυα

Η τεχνολογία των κυψελοειδών δικτύων προήλθε από τις απαιτήσεις της αγοράς κινητής τηλεφωνίας για ποιοτική επικοινωνία. Πρώτες προσπάθειες έγιναν το 1947 με την εμφάνιση και εξέλιξη της έννοιας της κυψέλης (cell) στα Bell Labs των ΗΠΑ. Κυρίαρχο ρόλο εδώ παίζει η έννοια της κυψέλης που δημιουργούν οι μέλισσες. Χωρίζεται σε τμήματα από μικρές ζώνες το καθένα, ώστε να υπάρχει και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των ίδιων συχνοτήτων.

Για την επικοινωνία οι χρήστες πληκτρολογούν τους αριθμούς των άλλων χρηστών. Από αυτούς τους αριθμούς, ο σταθμός βάσης του καλούντος ψάχνει και βρίσκει τον σταθμό βάσης του καλούμενου και εγκαθιδρύει τη σύνδεση μεταξύ των χρηστών. Ένα παράδειγμα κυψελωτού δικτύου με σταθμούς βάσης και κυψέλες φαίνεται στην Εικόνα 1.

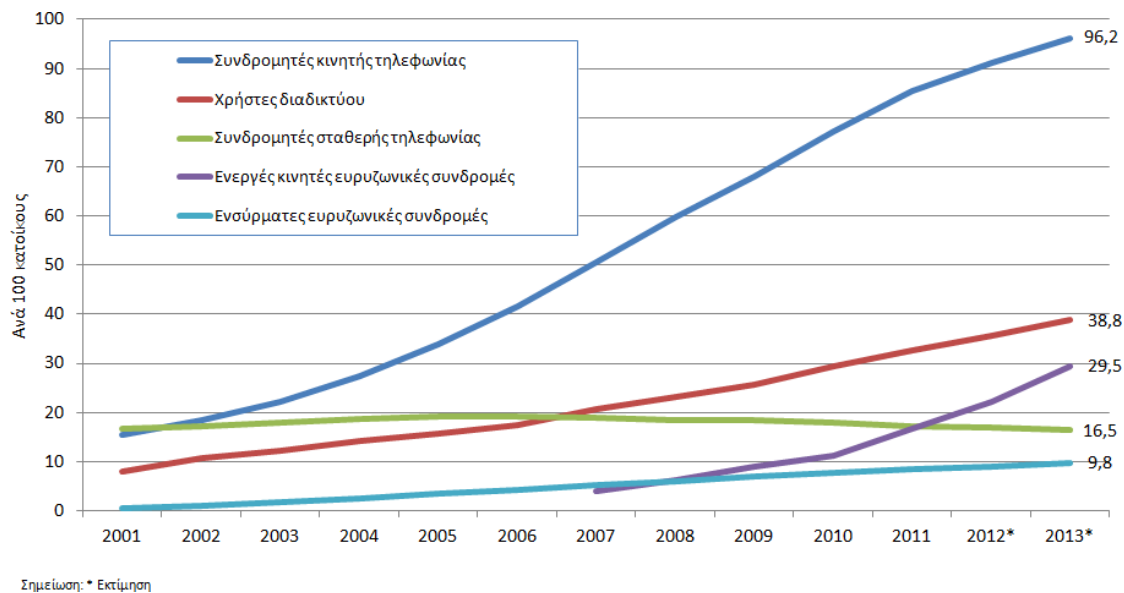


Εικόνα 1: Παράδειγμα κυψελωτού δικτύου ([54])

Το παραπάνω δίκτυο ονομάζεται «κυψελοειδές» ή «κυψελωτό» (cellular), αφού κάθε σταθμός βάσης συνδέεται με τους χρήστες που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση από τη βάση (κυψέλη), ενώ όλη η γεωγραφική περιοχή καλύπτεται με δημιουργία κυψελών τοποθετούμενων η μία δίπλα στην άλλη με μη επικαλυπτόμενο τρόπο. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του δικτύου αφού κάθε σταθμός βάσης λειτουργεί στη δική του ξεχωριστή συχνότητα. Έτσι το κινητό δίκτυο υποστηρίζει πιο εύκολα τις αυξημένες ανάγκες της επικοινωνίας μεταξύ των κινητών χρηστών του.

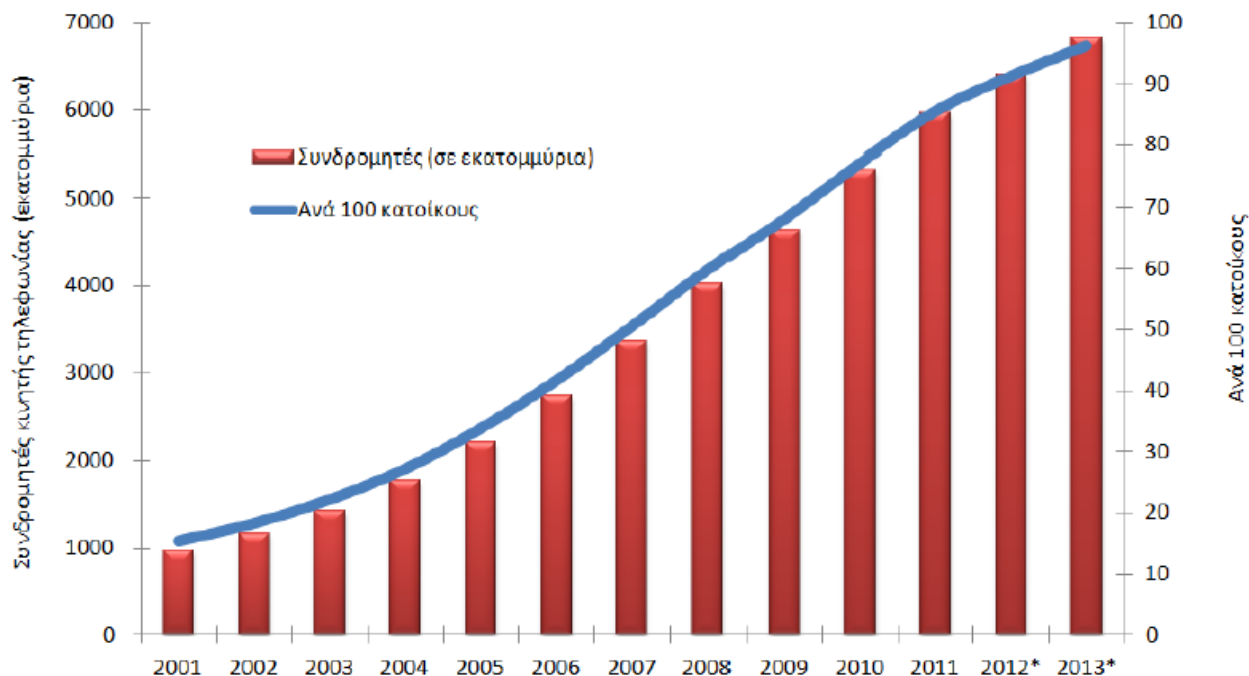
### 2.3 Εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Μετά την αλλαγή του 20<sup>ου</sup> αιώνα παρατηρήθηκε μετατόπιση από τη σταθερή στην κινητή τηλεφωνία. Σύμφωνα με στοιχεία του ΙΤU, το πλήθος συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας αποτελεί σταθερή εκτίμηση ότι είναι περίπου 6πλάσιο από το πλήθος των γραμμών σταθερής τηλεφωνίας [13], όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Πλήθος συνδρομητών ανά τεχνολογία για τα έτη 2001 – 2013 ([13])

Τα κυψελοειδή συστήματα συνδυάζουν την επικοινωνία με την κινητικότητα, προσδίδοντας έναν πραγματικά νέο επαναστατικό τρόπο επικοινωνίας. Σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα έχει επιτευχθεί μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα αυτό, τόσο από άποψη τεχνολογίας όσο και από άποψη συνδρομητών. Πρόκειται για την τεχνολογία που αύξησε ετησίως κατά 18% τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας, σε παγκόσμιο επίπεδο [14]. Κάτι τέτοιο φαίνεται και στην Εικόνα 3.



Σημείωση: \* Εκτίμηση

**Εικόνα 3: Πλήθος συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και ποσοστό ανά 100 κατοίκους για τα έτη 2001 – 2013 ([14])**

## 2.4 Πρώτη γενιά κινητών δικτύων

Η εποχή της κυψελωτής τηλεφωνίας, όπως την κατανοούμε σήμερα, ξεκίνησε με την παρουσίαση της πρώτης γενιάς των κυψελωτών συστημάτων (1G συστήματα) τα οποία χρησιμοποιούν αναλογική μετάδοση για υπηρεσίες ομιλίας. Έτσι, στη δεκαετία του 1980 ξεκινά δυναμικά η πρώτη γενιά (1G) των συστημάτων κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας.

Αρκετά πριν από τότε, υπήρχαν σε λειτουργία κάποια συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών, τα οποία είχαν απλά κάποιες ομοιότητες και χρήσεις με εκείνα της 1G, αλλά με σημαντικές διαφορές από αυτά της 1G. Η δομή του δικτύου τους όμως ήταν κυψελοειδής, ωστόσο υστερούσαν σε δυνατότητες. Ένα από τα σοβαρά μειονεκτήματά τους ήταν ότι αντιμετώπιζαν πρόβλημα όταν οι χρήστες ήταν κινούμενοι.

Η πρώτη γενιά, λοιπόν, χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής μετάδοσης για την κίνηση που αφορούσε αποκλειστικά μετάδοση φωνής. Τελικά δεν υπήρξε κάποιο πρότυπο που να επικράτησε. Τα NMT και TACS είχαν μία σχετική επιτυχία στις ευρωπαϊκές χώρες και το AMPS ήταν το πιο διαδεδομένο στις Η.Π.Α.

Σημαντική επιτυχία του 1G αποτέλεσε η εξασφάλιση της δυνατότητας συνέχισης της επικοινωνίας μιας κινητής μονάδας, ειδικά στην περίπτωση κινούμενων χρηστών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δυνατότητα εναλλαγής κυψελών (handover). Αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο λειτουργεί και η περιαγωγή κλήσεων (roaming).

Βασικά μειονεκτήματα του 1G ήταν:

- Τα συστήματα της πρώτης γενιάς κινητών δικτύων δεν ήταν σε θέση να προσφέρουν διαλειτουργικότητα μεταξύ των χωρών.
- Η χρήση κρυπτογράφησης δεν είναι δυνατή, καθώς τα αναλογικά σήματα δεν επιτρέπουν τη χρήση αποδοτικών σχημάτων κρυπτογράφησης.
- Η ποιότητα της κλήσης είναι υποδεέστερη σε σχέση με αυτή των ψηφιακών συστημάτων, καθώς η αναλογική κίνηση υποβαθμίζεται ευκολότερα από το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) και δεν επιτρέπει τη χρήση τεχνικών διόρθωσης λαθών.
- Προσφέρει χαμηλή φασματική απόδοση, καθώς κάθε φέρουσα αφιερώνεται σε έναν χρήστη ανεξάρτητα από το αν αυτός είναι ενεργός ή όχι.

Λόγω της άκρατης παγκοσμιοποίησης, ειδικά των εμπορικών συναλλαγών, αλλά και της σημαντικής αύξησης της κινητικότητας των ανθρώπων, όλα τα παραπάνω προβλήματα οδήγησαν αναπόφευκτα στα δίκτυα 2G. Βέβαια, παρόλο που σήμερα η εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες έχει εστιάσει στα κινητά δίκτυα ανώτερων γενεών, υπάρχουν πολλά δίκτυα 1G που εξακολουθούν να βρίσκονται σε λειτουργία. Προφανώς, στις χώρες προχωρημένης υποδομής στις τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα αυτά έχουν εγκαταλειφθεί αφού σπαταλούν πολύτιμο φάσμα συχνοτήτων το οποίο εκμεταλλεύονται τα σύγχρονα ψηφιακά κινητά δίκτυα επικοινωνιών πιο αποδοτικά [19].

## 2.5 Δεύτερη γενιά κινητών δικτύων

Τα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G), όπως αναφέραμε και παραπάνω, εμφανίστηκαν σχετικά γρήγορα και ήρθαν ως φυσική εξέλιξη των πρόσθετων αναγκών και μειονεκτημάτων που δημιούργησε η πρώτη γενιά. Εισήχθησαν στο τέλος της δεκαετίας του 1980 και, εκτός από την παραδοσιακή υπηρεσία ομιλίας, υποστηρίζουν και υπηρεσίες δεδομένων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.

Κύρια διαφοροποίησή τους με τα 1G είναι ο διαχωρισμός αναλογικού σε ψηφιακό, αφού τα 2G χρησιμοποιούν ψηφιακή μετάδοση της κίνησης. Ενώ τα 1G χρησιμοποιούν πολλαπλή

πρόσβαση στο πεδίο συχνότητας (Frequency Division Multiple Access – FDMA), τα 2G χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση στο πεδίο χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) ή χρήση διαφορετικού κώδικα ανά χρήστη (Code Division Multiple Access – CDMA).

Η ψηφιοποιημένη κίνηση παρουσιάζει πλεονεκτήματα, όπως:

- Παροχή ιδιωτικότητας και ασφάλειας λόγω της κρυπτογράφησης.
- Εφαρμογή κωδίκων ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών (error detection και error correction codes), που αυξάνουν την αξιοπιστία της μετάδοσης.
- Ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης στη λήψη σημάτων, με αποτέλεσμα την ανώτερη ποιότητα κλήσης.
- Αποδοτικότερη διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης μετάδοσης αφού τα ψηφιακά δεδομένα μπορούν να συμπιεστούν.
- Διαμοιρασμός των φερουσών συχνοτήτων σε πολλαπλούς χρήστες, είτε μέσω διαφορετικών χρονοσχημάτων (timeslots) είτε μέσω διαφορετικών κωδίκων ανά χρήστη.
- Χρήση ιεραρχικών δομών κυψελών (macrocells, microcells, picocells, femtocells).

Τέσσερα είναι τα κύρια πρότυπα για τα κινητά δίκτυα 2G: 1) Global System for Mobile (GSM) communications, 2) Digital AMPS (D – AMPS), 3) Code Division Multiple Access (CDMA) IS – 95, 4) Personal Digital Cellular (PDC). Το GSM απεδείχθη το πιο επιτυχημένο από τα τέσσερα, με αποτέλεσμα να υιοθετηθεί από την παγκόσμια αγορά.

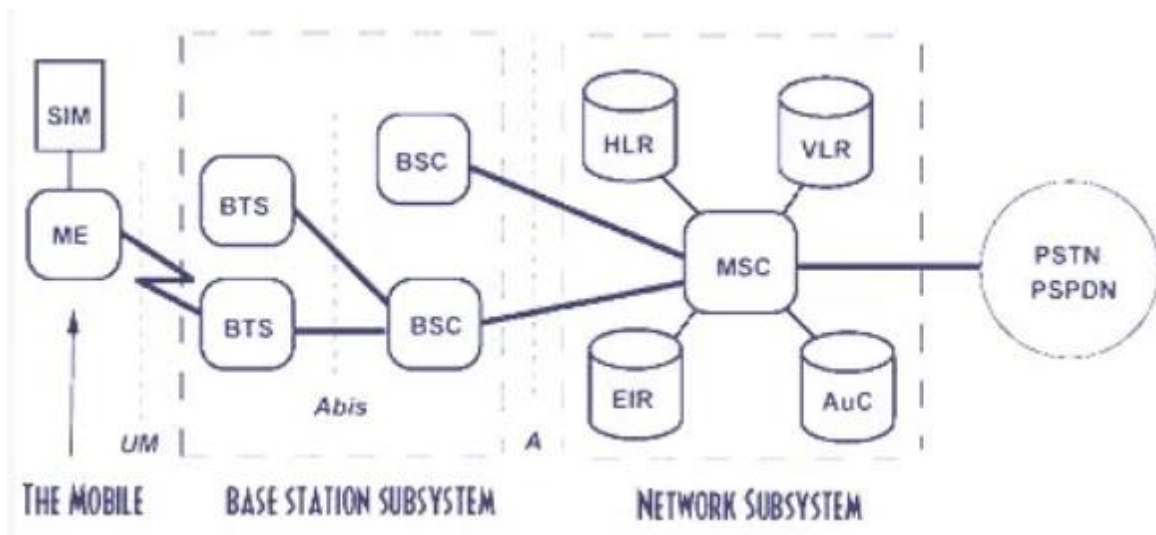
Κύρια χαρακτηριστικά του GSM είναι:

- Αναπτύχθηκε στην Ευρώπη στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [22] και εγκαθιδρύθηκε ως ενιαίο πρότυπο, επιτρέποντας την αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών εντός αυτής μέσω της διεθνούς περιαγωγής.
- Χρησιμοποιεί ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz και μετάδοση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDMA) ή πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (CDMA). Έτσι, υποστηρίζει μετάδοση προς πολλαπλούς χρήστες.
- Γρήγορα υιοθετήθηκε από μεγάλο πλήθος χωρών παγκοσμίως ενώ η διάδοσή του υστερεί στην αμερικανική ήπειρο. Ωστόσο η βορειοαμερικανική κοινότητα υιοθέτησε το



σύστημα Wideband CDMA (WCDMA), οπότε πολλές αμερικάνικες εταιρίες έχουν υιοθετήσει το σύστημα GSM / GPRS [20], [21].

- Συνολικά υπάρχουν 4 εκδόσεις του, ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, υπάρχουν αρκετά παράγωγά του που χρησιμοποιούν τις ζώνες των 1800 ή 1900 MHz.
- Η αρχιτεκτονική του αποτελείται από ένα σύνολο δικτυακών οντοτήτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Παρουσίαση των δικτυακών οντοτήτων του GSM ([55])

- Συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκε και το πρότυπο GSM – 400 για χρήση σε υψηλότερες συχνότητες. Αναπτύχθηκε από το ίδρυμα European Telecommunications Standards Institute (ETSI) και ήταν αρκετά αποδοτικό σε αραιοκατοικημένες και παράκτιες περιοχές. Ωστόσο σήμερα δεν χρησιμοποιείται πλέον [23].

## 2.6 Ενδιάμεση γενιά 2.5G

Ο όρος 2.5G υιοθετήθηκε σχετικά γρήγορα και αφορά ένα ευρύτερο σύνολο των αναβαθμίσεων που έγιναν πάνω στα κινητά δίκτυα 2G. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων 3G. Αν και η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των κινητών δικτύων 2G και των 2.5G είναι δυσδιάκριτη, οι τεχνολογίες High – Speed Circuit – Switched Data (HSCSD), General Packet Radio Services (GPRS) και Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE) θεωρούνται



τεχνολογίες 2.5G [24], [25]. Η μετάβαση στη γενιά 2.5G ξεκίνησε ουσιαστικά με την τεχνολογία General Packet Radio Service (GPRS).

Βασικό μειονέκτημα της HSCSD ήταν η χρήση μεταγωγής κυκλώματος που κατέληγε σε σπατάλη πόρων του δικτύου, αφού οι χρονοσχισμές δεσμεύονταν ακόμα και όταν η χωρητικότητά τους δεν χρησιμοποιούνταν. Έτσι, σημαντική εξέλιξη του GSM αποτέλεσε το GPRS [26], το οποίο βασίζεται στις αρχές του, με την κύρια διαφορά ότι το GSM είναι δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος (circuit – switched) ενώ το GPRS δίκτυο μεταγωγής πακέτου (packet – switched).

Κύρια χαρακτηριστικά του GPRS είναι:

- Χρησιμοποιεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτου.
- Επιτυγχάνει μικρότερο χρόνο εγκατάστασης ISP συνδέσεων.
- Χρέωση με βάση τον όγκο δεδομένων που αποστέλλονται και όχι με βάση το χρόνο σύνδεσης.
- Υποστήριξη ευέλικτων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων καθώς και συνεχής σύνδεση στο δίκτυο (πρακτικά ρυθμοί μέχρι και 115 Kbps ή και ακόμα μεγαλύτεροι).
- Βελτιστοποίηση της χρήσης των δικτυακών πόρων, αφού δεσμεύονται μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή / λήψη δεδομένων.
- Σε σχέση με το HSCSD, η κατασκευή του GPRS είναι περισσότερο δαπανηρή ενώ το HSCSD είναι πιο συνεπές σε real-time εφαρμογές.

Όμως, η τεχνολογία αυτή του GPRS μας δίνει περισσότερες δυνατότητες για την μεταφορά δεδομένων στα κινητά δίκτυα. Όσο λοιπόν συνεχίζεται αυτή η συνεχής μεταφορά δεδομένων στα κινητά δίκτυα, η τεχνολογία GPRS γίνεται αναγκαίο κομμάτι σε κάθε σύστημα κινητής τηλεφωνίας [27], [28].

Η ανάγκη αύξησης του ρυθμού μετάδοσης για την υποστήριξη εφαρμογών και υπηρεσιών φωνής και δεδομένων οδήγησε αναπόφευκτα σε πιο εξελιγμένες μεθόδους κωδικοποίησης μέσω του διαδικτύου. Οπότε οδηγηθήκαμε στην τεχνολογία EDGE.

Κύρια χαρακτηριστικά του EDGE είναι:

- Βασική ιδέα του ήταν η χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης Eight – Phase Shift Keying ( 8 – PSK) [29]

- Απαιτεί αναβάθμιση μόνο στο λογισμικό των σταθμών βάσης.
- Προσφέρει μέχρι και 3 φορές μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης από το GPRS (μέχρι 384 Kbps).
- Χρησιμοποιεί την ίδια δομή TDMA των πλαισίων καθώς και τα ίδια κανάλια και φορείς με αυτούς του GSM.
- Δίνει τη δυνατότητα χρήσης της τεχνικής διαμόρφωσης Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) που εμφανίζεται και στο βασικό μέρος του GSM.
- Εξελίσσεται συνεχώς και μπορεί να συνυπάρξει με την 3G τεχνολογία WCDMA, αυξάνοντας τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, της τάξης των 2 Mbps [15], [17].

## 2.7 Τρίτη γενιά κινητών δικτύων

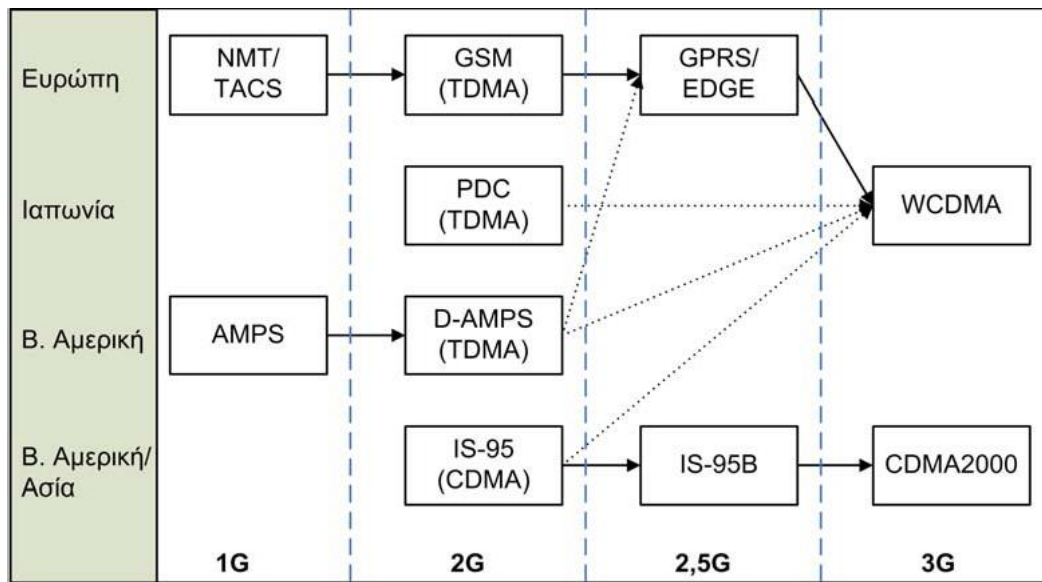
Αν και ήταν δυνατή η κίνηση υψηλού όγκου δεδομένων, βασικό μειονέκτημα του EDGE ήταν ότι η μετάδοση συνέχιζε να συμπεριφέρεται όπως στην μεταγωγή κυκλώματος, με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης. Επίσης, μέχρι περίπου το 1995 είχαν ήδη εγκαθιδρυθεί διαφορετικά πρότυπα σχετικά με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ανά την υφήλιο. Αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης ήταν η ανάγκη δημιουργίας νέων κινητών δικτύων που θα παρείχαν υπηρεσίες ανεξαρτήτως πλατφόρμας και των οποίων τα πρότυπα σχεδιασμού θα ήταν ίδια σε παγκόσμιο επίπεδο. Έτσι γεννήθηκε η ανάγκη για την 3G γενιά κινητών δικτύων [15].

Σε μια εποχή όπου ήταν αναπόφευκτη η ανάγκη για πολυμεσικές εφαρμογές και υπηρεσίες διαδικτύου [30], τέθηκε ως βασικός στόχος της ανάπτυξης των 3G η παροχή κινητών υπηρεσιών «οπουδήποτε» «οποτεδήποτε». Οι χρήστες μπορούν να μετακινούνται και να εξυπηρετούνται ακόμη και εκτός περιοχών κάλυψης 3G, όπου μπορεί να υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα, όπως οικιακά ασύρματα συστήματα, δορυφορικά δίκτυα και άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα.

Οπότε έτσι εξυπηρετείται και η ανάγκη για παγκόσμια κινητή πολυμεσική επικοινωνία σε αποδοτική βάση.

Η

Εικόνα 5 απεικονίζει τα πρότυπα για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα έως το 3G και πως αυτά εξελίχθηκαν [19].



Εικόνα 5: Βασικότερα πρότυπα κινητών δικτύων μέχρι την 3G γενιά ([19])

Τα επικρατέστερα συστήματα τρίτης γενιάς ήταν το UMTS στην Ευρώπη, το CDMA 2000 στις ΗΠΑ και το NTT Docomo στην Ιαπωνία [19]. Η ασύρματη διεπαφή του UMTS είναι το WCDMA, που τελικά επικράτησε και χρησιμοποιήθηκε τόσο στην Ιαπωνία όσο και στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ, οι οποίες μέχρι τότε είχαν μείνει πίσω στην εξέλιξη της τεχνολογίας των κινητών επικοινωνιών ευρείας χρήσης. Η αιτία της καθυστέρησης αυτής ήταν το κόστος προκειμένου να αποκτηθούν οι αναγκαίες άδειες φάσματος. Το WCDMA προσέφερε ταχύτητες μετάδοσης μέχρι και τα 2Mbps.

Παρόλες τις παραπάνω τεχνολογικές αναβαθμίσεις, η εγκαθίδρυση των 3G δικτύων καθυστέρησε σε πολλές χώρες εξαιτίας, κυρίως, του μεγάλου κόστους των αδειών φάσματος συχνοτήτων. Σε πληθώρα χωρών τα δίκτυα 3G δεν χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα συχνοτήτων με τα 2G, οπότε οι πάροχοι των δικτύων κινητής τηλεφωνίας υποχρεούνται να κατασκευάσουν εξ αρχής νέα δίκτυα και να αδειοδοτηθούν εκ νέου με νέες συχνοότητες.

Σημαντικότερες υπηρεσίες που παρέχονται από τα 3G δίκτυα είναι:

- Παροχή ρυθμών μετάδοσης τουλάχιστον 144 kbps (πλήρης κινητικότητα), 384 kbps (περιορισμένη κινητικότητα), 2 Mbps (χαμηλή κινητικότητα).
- Υποστήριξη συμμετρικής και ασύμμετρης κίνησης.

- Προηγμένες υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου και μεταγωγής κυκλώματος (IP κίνηση, αποδοτικές υπηρεσίες φωνής, ευρυζωνικές ασύρματες φωνητικές υπηρεσίες, βίντεο – κλήσεις, ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων).
- Ταυτόχρονη εκτέλεση αρκετών υπηρεσιών πάνω στην ίδια τερματική συσκευή.
- Μετάδοση δεδομένων μέσω τεχνολογίας HSPA, προσφέροντας ταχύτητες έως 14.4 Mbps (downlink) και 5.8 Mbps (uplink).
- Προς τα πίσω συμβατότητα και διαλειτουργικότητα.
- Δυνατότητα περιαγωγής.

## 2.8 Τέταρτη γενιά κινητών δικτύων

Σύμφωνα με το [33], βασικοί παράγοντες που οδήγησαν στην ανάπτυξη συστημάτων κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G) ήταν:

- Η αυξημένη ζήτηση για υπηρεσίες διαδικτύου.
- Η επέκταση των ασύρματων δικτύων διανομής καλωδιακής τηλεόρασης και πρόσβασης σε μεγάλο όγκο πληροφοριών.
- Η ζήτηση για υπηρεσίες τηλεειδοποίησης.
- Οι υπηρεσίες προσωπικών δεδομένων (PCS – Personal Communication Services).
- Οι εφαρμογές πολυμέσων, όπως η ασύρματη μετάδοση εικόνας.
- Η πραγματικού χρόνου προσβασιμότητα στο διαδίκτυο.

Γενικά, ο όρος 4G περιγράφει όχι απλώς ένα πρότυπο, αλλά ένα περιβάλλον στο οποίο τα δίκτυα παρέχουν επικοινωνία, χωρίς ασυνέχειες μεταξύ τους. Το περιβάλλον αυτών των προτύπων περιέχει και τις προδιαγραφές που πρέπει να χαρακτηρίζουν μια τεχνολογία για να θεωρηθεί αυτή ως 4G. Η κυρίαρχη ιδέα του οράματος της 4G τεχνολογίας αφορά την υλοποίηση ενός δικτύου μέσα σε άλλα δίκτυα, που περιλαμβάνει τη διασύνδεση τόσο των δικτύων όσο και των συσκευών.

Σύμφωνα με το [34]: «Τα ευρυζωνικά δίκτυα έχουν καταστεί ζωτικής σημασίας εθνικές υποδομές – όπως ακριβώς και τα δίκτυα μεταφοράς, ενέργειας και ύδρευσης – αλλά και με

επιπτώσεις που μπορεί να είναι ακόμα πιο ισχυρές και πέρα από κάθε φιλοδοξία. Αυτές οι βασικές βελτιώσεις στον τομέα των ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων μπορεί να οδηγήσουν σε κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, καθώς και στην επιτάχυνση της προόδου προς την επίτευξη των Αναπτυξιακών Στόχων του Ο.Η.Ε για τη Χιλιετία».

Στο [35] διαβάζουμε ότι τα συστήματα 4G αυξάνουν την ικανότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών ενσωματώνοντας όλες τις υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες (π.χ. τα GSM, GPRS, IMT – 2000, Wi – Fi, Bluetooth) σε μία «all- IP» πλατφόρμα. Σκοπός είναι οι χρήστες να έχουν την ελευθερία και την ευελιξία επιλογής οποιασδήποτε υπηρεσίας επιθυμούν με την κατάλληλα παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών και στην κατάλληλη τιμή, οποτεδήποτε και οπουδήποτε.

Η προτυποποίηση του 4G άρχισε με το Long Term Evolution (LTE), το οποίο είναι γνωστό με τον όρο 3,9G κυψελωτό σύστημα τηλεπικοινωνιών. Οι απαιτήσεις του LTE ξεκαθαρίστηκαν το 2006 και αφορούσαν την ασύρματη διεπαφή και την αρχιτεκτονική του δικτύου [36]. Μερικές από τις βασικές απαιτήσεις και χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί μια τεχνολογία ώστε να χαρακτηρίζεται 4G είναι:

- Χρήση τεχνικών μεταγωγής πακέτου μέσω χρήσης IP πρωτοκόλλων.
- Επίτευξη ρυθμών μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 100 Mbps (υψηλή κινητικότητα) και μέχρι και 1 Gbps (χαμηλή κινητικότητα).
- Μειωμένες καθυστερήσεις ως προς τους χρόνους εγκατάστασης συνδέσεων και την καθυστέρηση μετάδοσης.
- Επίτευξη αυξημένων ρυθμών μετάδοσης μέχρι και στα άκρα των κυψελών, με σκοπό να υπάρχει ομοιόμορφη παροχή υπηρεσιών στους χρήστες.
- Ευέλικτη διαχειριστικότητα του διαθέσιμου εύρους ζώνης τόσο στις νέες όσο και στις υπάρχουσες συχνότητες λειτουργίας.
- Δυναμική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, ώστε να υποστηρίζεται το μέγιστο δυνατό πλήθος χρηστών στο δίκτυο, χωρίς ύπαρξη απωλειών και, ταυτόχρονα, να εξασφαλίζεται η ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS).
- Απλοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου.
- Δυνατότητα κλιμάκωσης της χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

- Ελαχιστοποίηση κόστους / bit λόγω της βελτίωσης της φασματικής απόδοσης.
- Δυνατότητα αποδοτικού handover μεταξύ των διαφορετικών και ετερογενών δικτύων.
- Λογική κατανάλωση ενέργειας στις κινητές τερματικές συσκευές.
- Παροχή υπηρεσιών πολυμέσων νέας γενιάς, υψηλής ποιότητας, με την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.
- Υποστήριξη κινητικότητας έως 350 km/h.
- Προς τα πίσω συμβατότητα και διαλειτουργικότητα.

Δύο ανταγωνιστικά συστήματα πληρούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Το πρώτο είναι τα UMTS, HSPA και HSPA+ και το δεύτερο το WiMax. Κατά τη διάρκεια του 2010 ακόμη περισσότερα δίκτυα LTE είχαν αναπτυχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο, ως αποτέλεσμα της φυσικής εξέλιξης των διαφόρων συστημάτων 2G και 3G, συμπεριλαμβανομένων και του GSM στην οικογένεια του 3GPP και του CDMA 2000 στην οικογένεια 3GPP2.

Επιπλέον, το LTE επεκτάθηκε σε LTE Advanced, που αποτελεί καθαρά 4G τεχνολογία. Ως νέο πρότυπο κινητής επικοινωνίας βελτιώνει σημαντικά το LTE. Τυποποιήθηκε από το 3GPP τον Μάρτιο του 2011 ως 3GPP Release 10 [37]. Κύρια δυνατότητά του είναι η μεγαλύτερη αύξηση τη χωρητικότητας και της ταχύτητας του δικτύου, με χρήση νέων τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης και πολυπλεξίας.

Η δεύτερη τεχνολογία 4G είναι το WiMax που λειτουργεί παρόμοια με το WI – FI αλλά με ισχυρότερη δύναμη σήματος. Πιο συγκεκριμένα, το WI – FI φτάνει τα 100 μέτρα ενώ το WiMax φθάνει μέχρι και πάνω από τα 35 χιλιόμετρα. Ως εξέλιξη της οικογένειας πρωτοκόλλων IEEE 802.11, αρχικά σχεδιάστηκε για δίκτυα υπολογιστών και εφαρμόστηκε στην πορεία σε κινητά δίκτυα.

Το Mobile WiMax δίνει δυνατότητες ευρυζωνικής πρόσβασης σε κινητές συσκευές που βρίσκονται σε αποστάσεις μέχρι και 40 χιλιομέτρων. Χρησιμοποιεί μεταγωγή πακέτων και τα πρωτόκολλα IP, οπότε μπορεί να συνδέεται με όλα τα υπόλοιπα διαθέσιμα δίκτυα που βασίζονται στην μεταγωγή πακέτου (μια από τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί ως τεχνολογία 4G).

Βασικά χαρακτηριστικά του Mobile WiMax καθώς και της μετεξέλιξής του σε WiMax 2 είναι:

- Καλύτερη κάλυψη, με εξελιγμένες κεραιές συνδεδεμένες μεταξύ τους με πολλούς τρόπους.
- Εισαγωγή συστημάτων κεραιών MIMO.
- Καλύτερη διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους.
- Αυξημένη ασφάλεια χάρη σε νέους τρόπους κωδικοποίησης (Turbo Coding και LDPC).
- Βέλτιστη ποιότητα για τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου, δηλαδή η καλύτερη επιλογή για VoIP.
- Μετάδοση δεδομένων μέχρι και 110 Mbps (downlink) και 70 Mbps (uplink).
- Συμβατότητα με τις προηγούμενες εκδόσεις του (backward compatibility).



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ 5<sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ

### 3.1 Χρονοδιάγραμμα εξελίξεων

Όπως ήδη αναπτύξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών είναι ένας τομέας με γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης. Έτσι, σήμερα, βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο η ανάπτυξη, ο καθορισμός των αναγκών απόδοσης, οι προδιαγραφές των υπηρεσιών που θα προτείνουν και το είδος των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιούν τα νέα κυψελωτά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G).

Όπως συνέβη, λοιπόν, αρχικά και με τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς, ο όρος 5G χρησιμοποιείται προς το παρόν αρκετά γενικά, ώστε να περιγράψει μια σειρά από νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές που θα απαιτήσουν στα επόμενα χρόνια, σημαντικές μεταλλάξεις στις σημερινές υποδομές δικτύου, και οι οποίες θα οδηγήσουν αναπόφευκτα στη δημιουργία της νέας γενιάς.

Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός, λοιπόν, ότι τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών 5G είναι τα δίκτυα που αναμένεται να διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο κατά την τρέχουσα δεκαετία 2020 – 2030. Είναι νέας γενιάς και πολλά υποσχόμενα κινητά δίκτυα επικοινωνίας που έχουν ήδη σχολιαστεί σε πολλά διεθνή συνέδρια και επιστημονικά άρθρα, ενώ ήδη έχει ξεκινήσει από το 2009 προσπάθεια προτυποποίησής τους. Μια ομάδα εργασίας της ITU – R εργάζεται ήδη για την προτυποποίηση του φάσματος που απαιτείται και για τις νέες τεχνολογίες πάνω στις οποίες θα βασίζονται τα κινητά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Το 5G τοποθετούνταν στα θέματα συζήτησης περί κινητών δικτύων ακόμη και πριν εδραιωθεί το 4G στην Βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας. Πέρα από την ανάγκη ανάπτυξης νέων πρωτοπόρων τεχνολογιών, το 5G καλύπτει πολλά κομμάτια προηγούμενων γενεών που απαιτούν αλλαγή ή βελτίωση. Προτείνει, επίσης, νέες ταχύτητες και νέες δυνατότητες που θα δώσουν μεγάλο πλεονέκτημα στην γενιά αυτή, έναντι των προηγούμενων.

Η 5<sup>η</sup> γενιά ασυρμάτων δικτύων, όπως αναφέρει και ο Dr. Jakub Borkowski [4], αποδεικνύει ένα πρωτόγνωρο άλμα σε ταχύτητες ευρυζωνικού δικτύου, σε σύγκριση πάντα με τα προγενέστερα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Επισημαίνει δε ότι σε 5 χρόνια από τώρα, μέχρι δηλαδή το 2025, θα πρέπει όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες να έχουν εκτενή διαθέσιμη κάλυψη για το 5G.



Το καλώδιο δικτύου τείνει να θεωρηθεί και να αποτελέσει μέρος αναφοράς των ιστορικών τηλεπικοινωνιακών μουσείων. Αυτό διότι τα κινητά πλέον δεν είναι απλά ένα μέσο επικοινωνίας, αλλά έχουν και άλλες τεράστιες δυνατότητες, απειλώντας και τείνοντας να επικαλύψουν και εκείνες των περίφημων οπτικών ινών.

Σε χώρες με πλούσια ερευνητική δραστηριότητα, οι προσπάθειες για εφαρμογή των νέων τεχνολογιών πλησιάζουν όλο και περισσότερο στην πραγματοποίηση του 5G. Χώρες, δηλαδή, όπως οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία προοδεύουν σε αυτόν τον τομέα και έχουν συνεχώς θετικά αποτελέσματα στις έρευνες και τα πειράματά τους. Στην Ευρώπη γίνεται εξίσου μια προσπάθεια εισαγωγής των νέων τεχνολογιών στις κινητές τηλεπικοινωνίες.

Θεωρείται πως σημαντικές εφαρμογές τους θα πραγματοποιηθούν εντός του 2020, κάτι που σημαίνει πως μπορούμε και είμαστε σε θέση να αναφερόμαστε στη γενιά 5G το 2020, με πραγματικά δεδομένα και δυνατότητες υλοποίησης.

### **3.2 Οικοσύστημα του 5G**

Σε μια προσπάθεια περιγραφής του ως κάτι που θα μπορούν όλοι να κατανοήσουν, θα λέγαμε ότι το 5G είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον τεχνολογιών ή αλλιώς ένα οικοσύστημα τεχνολογιών, που συνδέει και συμπλέκει μεταξύ τους τις τεχνολογίες που εισάγει, με σκοπό να πετύχει τις μεγαλύτερες δυνατές ταχύτητες, με ελάχιστες καθυστερήσεις και μεγάλες αποδόσεις για πολλές και διαφορετικές χρήσεις.

Η επιλογή του όρου «οικοσύστημα» δεν είναι τυχαία. Πρόκειται για αναφορά σε συγκεκριμένες ενδείξεις, όπως η στήριξη της ευρυζωνικότητας με βάση τις ελάχιστες καθυστερήσεις και μεγάλες αποδόσεις για πολλές και διαφορετικές χρήσεις. Η έννοια του «οικοσυστήματος» καταφέρει να έρθει πολύ κοντά με την ιδέα του Internet Of Things (IoT), όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύστημα συνδεδεμένων μεταξύ τους συσκευών (υπολογιστών) που επικοινωνούν μεταξύ τους αυτόματα και ανταλλάσσουν δεδομένα δίχως την παρέμβαση του ανθρώπου.

Έτσι, λοιπόν, το 5G θα επιτρέπει την αδιάκοπη και μαζική επικοινωνία ανάμεσα στους υπολογιστές και άλλες «έξυπνες» συσκευές και, μάλιστα, με όλα τα οφέλη που αναφέραμε παραπάνω (μεγάλη απόδοση, μικρή κατανάλωση κ.λ.π.). Και όλα αυτά σε πραγματικό χρόνο, και για εφαρμογές όχι μόνο ψυχαγωγικού ή τηλεπικοινωνιακού χαρακτήρα, αλλά και για πιο σύνθετες δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος βιομηχανικών διαδικασιών, οι αισθητήρες αναγνώρισης κίνησης, οι πειραματικές ενέργειες βελτίωσης της καθημερινότητας, κλπ.

Όλα αυτά, λοιπόν, μπορούν αναμφίβολα να βελτιώσουν τις υπάρχουσες γενιές, με δεδομένο όμως πως οι τεχνολογίες που θα εισαχθούν θα είναι έτοιμες να δεχτούν συνδυασμούς τεχνικών και συγκεκριμένων αλγορίθμων που θα χρησιμοποιούνται για να ενσωματώνουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά στο 5G.

### 3.3 Χαρακτηριστικά του 5G

Το πιο βασικό χαρακτηριστικό του 5G παρέχεται μέσω της χρήσης των μαζικών συστημάτων MIMO τα οποία έγιναν γνωστά σαν συστήματα Very Large MIMO. Με τη χρήση περισσότερων κεραιών γίνεται δυνατή η αύξηση της απόδοσης της ενέργειας που εκπέμπεται. Πέρα όμως από αυτό, δίνεται και η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πιο φθηνά εξαρτήματα χαμηλής ισχύος ενώ, παράλληλα, μειώνεται το διάστημα εμβέλειας και γίνεται πιο απλός ο έλεγχος της πρόσβασης.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό που θα πρέπει να καλύπτεται από το 5G είναι η συνδεσιμότητα και, μάλιστα, με συνεχή και απρόσκοπτο τρόπο σε οποιαδήποτε συσκευή και εφαρμογή που είναι ικανή να υποστηρίξει τις νέες τεχνολογίες του 5G. Οι τεχνολογίες αυτές δεν θα λειτουργούν με έναν μοναδικό τρόπο σύνδεσης. Αντίθετα, πιθανώς να υποστηρίζουν πολλαπλές τεχνικές και τρόπους πρόσβασης, ανάλογα κάθε φορά με το ποιος χρησιμοποιεί την τεχνολογία και για ποιο λόγο. Μιλάμε, λοιπόν, για έναν πολύμορφο τρόπο χρήσης με ασύρματη σύνδεση ανάμεσα σε συσκευές που λειτουργούν σε διαφορετικούς κλάδους, όπως η ιατρική, η βιομηχανία, η ασφάλεια υπολογιστών αλλά και τα νοικοκυριά, τα αυτοκίνητα και τα σκάφη αναψυχής.

Οι μεγάλες ταχύτητες που θα παρέχονται από τα 5G δίκτυα, θα δίνουν τη δυνατότητα μέσω του ασύρματου παγκόσμιου ιστού (Wireless World Wide Web – WWW), να χρησιμοποιήσουμε τη δυναμική των πολυμέσων. Επιπλέον, τα νέα δυναμικά Adhoc Ασύρματα Δίκτυα (DAWN) θα παρέχουν νέες δυνατότητες συνεργασίας με τις έξυπνες κεραίες, με βάση τις αρχές της συνεργατικής ποικιλομορφίας και της ευέλικτης διαμόρφωσης. Όλα τα παραπάνω όμως, προϋποθέτουν πλήρη κατανόηση των δυνατοτήτων, όπως και των απαιτήσεων που θέτουν οι νέες τεχνολογίες που εισάγονται με το 5G.

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου σε συσκευές (περίπου χίλιες φορές μεγαλύτερη), την αύξηση της ταχύτητας (100Mbps – 1Gbps σε πόλεις), τη μείωση της καθυστέρησης, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και, τέλος, την αύξηση της ισχύος για αδύναμες (σε ενεργειακή απόδοση) συσκευές.

Με άλλα λόγια, μιλάμε για βασικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους της κινητής τηλεφωνίας που θα αλλάξουν δραστικά και θα φθάσουν σε άλλα επίπεδα από αυτά που

έχουμε συνηθίσει μέχρι σήμερα. Συγκεκριμένα, μέχρι και χίλιες φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα απ' ό,τι με τεχνολογίες του 2010, 10 φορές λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και ταυτόχρονα δεκάδες φορές μεγαλύτερος αριθμός συσκευών που μπορούν να είναι συνδεδεμένες στο ίδιο περιβάλλον.

Εν συνεχεία, όπως αναφέρουν πολυάριθμες έρευνες, θα πρέπει να υπάρχει και βελτίωση σε άλλα, πιο τεχνικά μέρη των τεχνολογιών αυτών της πέμπτης γενιάς, όπως για παράδειγμα ο χρόνος αντίδρασης στα δεδομένα (χρόνος που υπολογίζεται μικρότερος του 1ms) και αποδόσεις που θα αγγίζουν το 100%.

Το 5G καλείται να λύσει και το πρόβλημα που είχαν χρήστες, ιδιαίτερα σε δημόσιες θέσεις, με χρήση αρκετών σταθμών βάσης. Η νέα γενιά θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα υψηλής διαθεσιμότητας του ποσοστού δυαδικών αριθμών – ψηφίων σε σημαντικά πιο μεγάλο τμήμα των κυψελικών κυττάρων.

Σημαντική βελτίωση σε σχέση με την τεχνολογία 4G αφορά και στην τεχνολογία smart – radio. Θα δίνεται η δυνατότητα σε διαφορετικές ραδιοτεχνολογίες να χρησιμοποιούν και να διαμοιράζονται δίχως προβλήματα το φάσμα από την εύρεση αχρησιμοποίητου φάσματος και να προσαρμόζουν το σύστημα μετάδοσης. Κι αυτό σε αντίθεση με τον τρόπο που επιτυγχάνεται σήμερα, όπου διαφορετικές συσκευές μοιράζονται το φάσμα αλλά με σημαντικά προβλήματα.

Η νέα τεχνολογία, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις που περιγράφονται στα [5], [6], [7], [8]:

- Θα είναι περισσότερο φιλική στο περιβάλλον, αφού βασικός στόχος των σύγχρονων εταιρειών δημιουργίας κινητών συσκευών είναι να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, βασικός στόχος είναι και η επέκταση της ζωής της μπαταρίας των κινητών συσκευών.
- Θα δεσμεύει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, κάτι, που ακούγεται εξαιρετικά δύσκολο, αν σκεφτεί κανείς πώς είναι ακριβό να εξασφαλιστούν περισσότερες συχνοτικές ζώνες.
- Θα υποστηρίζει τη σύνδεση ολόένα και αυξανόμενου πλήθους συσκευών, αφού εκτός από τις κινητές συσκευές, τους κινητούς υπολογιστές, τα έξυπνα κινητά, τις ταμπλέτες κλπ, θα προστεθούν τα επόμενα χρόνια και άλλες έξυπνες συσκευές, όπως οικιακές συσκευές, αυτοκίνητα, κλπ. Μια τάση που επαυξάνεται με την διείσδυση του Internet of Things και την αλληλεπίδραση και επικοινωνία μεταξύ μηχανών (Machine – to – Machine).

- Θα πρέπει να έχει χαμηλότερο κόστος λόγω του σκεπτικισμού που υπάρχει σχετικά με τις νέες επενδύσεις στον τομέα αυτό. Ήδη οι εταιρείες κατασκευής τηλεφώνων δεν έχουν αποσβέσει τα χρήματά τους για την μελέτη των προηγούμενων γενιών κινητής επικοινωνίας και η 4G τεχνολογία δεν έχει αποδώσει οικονομικά τα μέγιστα.
- Θα πρέπει να αντικαταστήσει παλιότερες τεχνολογίες που συνυπάρχουν με παλαιότερες και ενδιάμεσες γενιές τεχνολογίας, όπως οι 2.5G, 2.75G, 3G, 4G κλπ.

Συνεπώς, ανακύπτει το ζήτημα του ποιες τεχνολογίες μπορούν να παρέχουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να επιφέρουν τις υψηλές απαιτήσεις της νέας γενιάς κινητής επικοινωνίας.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι τα Femtocells είναι ιδανικά να απαντήσουν σε πολλές από τις απαιτήσεις των 5G δικτύων. Με χρήση των Femtocells είναι δυνατό να συνδεθεί πλήθος συσκευών στο διαδίκτυο. Επίσης, είναι μία πράσινη τεχνολογία αφού καταναλώνει μικρό ποσοστό ενέργειας. Επιπλέον, κοστίζει λίγο και άρα είναι μία προσφιλή προσέγγιση για τους χρήστες, όπως αποδεικνύεται στα [9], [10], [11], [12].

Είναι φυσικό πως με τις τόσο επαναστατικές και πρωτοπόρες δυνατότητες που μας δίνει το 5G, η χρήση του κινητού θα ισοδυναμεί και δεν θα υπάρχει τίποτα να ζηλέψει από εκείνη του φορητού υπολογιστή. Θα είναι συγχρόνως φωτογραφική μηχανή, θα παίζει τα πιο σύγχρονα και βαριά παιχνίδια, θα διαθέτει τεράστιους χώρους για μουσική, βίντεο, θα είναι συσκευή εγγραφής και αναπαραγωγής. Επιπλέον, θα ενοποιηθούν οι περιοχές και θα πάψουν τα σύμβολα που αφορούν την περιαγωγή. Έτσι, αρχίζει η εποχή του παγκόσμιου κινητού τηλεφώνου, κάτι που μόνο στις ταινίες επιστημονικής φαντασίας βλέπαμε μέχρι σήμερα.

### 3.4 Δυνατότητες του 5G

Η εξέλιξη της τεχνολογίας μέσα στον χρόνο επιτυγχάνει ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση στις κινητές ευρυζωνικές επικοινωνίες. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς έχουν στόχο τη γρήγορη αποδοτική και οικονομική συνδεσιμότητα δεδομένων με το ελάχιστο δυνατό κόστος εγκατάστασης. Οι τεχνολογικές εξελίξεις θα υποστηρίξουν υψηλότερα ποσοστά και δεδομένα υπό την προϋπόθεση να ελαχιστοποιηθεί το κόστος ανά bit.

Σημαντική δυνατότητα των δικτύων πέμπτης γενιάς πρέπει να είναι η δυνατότητα ασύρματης πρόσβασης σε κάθε δίκτυο, όχι μόνο από τα παλιά όπως 2.5G, 3G, 4G, ή τα κινητά δίκτυα 5G, Wi – Fi, WPAN, αλλά και σε κάθε νέα τεχνολογία που θα εμφανίζεται. Αυτό θα επιτυγχάνεται από τον συνδυασμό νέων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων και της υπολογιστικής. Κι αυτό γιατί με την 5G τεχνολογία, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα να

υπάρχει συνεχής εναλλαγή, θα πρέπει να προσφέρεται η δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης μέσω πολλαπλών διαδρομών και με ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων. Κι όλα τα παραπάνω με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτές που έχουμε σήμερα.

Βέβαια, πρέπει να επισημάνουμε ότι η εξέλιξη των ραδιοσυχνοτήτων συνδέεται άρρηκτα με το φάσμα. Το διαθέσιμο φάσμα για κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις δύναται να αυξηθεί έως και σε δεκαπλάσια επίπεδα από τα σημερινά. Μέχρι το 2030 αναμένεται η ύπαρξη απαίτησης για 5000 φορές μεγαλύτερη ασύρματη κίνηση δεδομένων απ' ότι σήμερα [2]. Αν όμως το νέο φάσμα κατανέμεται σε κινητές ραδιοφωνικές εφαρμογές, θα απέχει πολύ από το επαρκές ώστε να μπορεί να καλύψει τις σημερινές απαιτήσεις.

Από την άλλη πλευρά, η αναδιανομή του εύρους ζώνης που πραγματοποιεί η τεχνολογία 5G, την καθιστά πολύ σημαντικό παράγοντα για τη βελτιστοποίηση των δικτύων. Είναι κατά κάποιο τρόπο έξυπνη τεχνολογία, εφόσον έχει τη δυνατότητα να αυτό-συγχρονίζεται στο δίκτυο που εισάγεται, χωρίς την ανάγκη χειρισμού από ειδικούς. Έτσι, δύναται να προσδίδει μεγαλύτερα ποσοστά ασφάλειας στο δίκτυο, εφόσον είναι δυνατό να υπάρχουν μία ή περισσότερες ομάδες χρηστών, που να είναι προεπιλεγμένα απαγορευμένες για το δίκτυο.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητο οι νέες κινητές τεχνολογίες να αυξήσουν τη φασματική τους απόδοση. Μετά από αυτό πρόκειται να αναπτυχθούν και νέες ετερογενείς αναπτύξεις δικτύου. Όπως αναφέρεται στο [3], ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί συνδυάζοντας την αξιοποίηση του φάσματος μεγαλύτερου από 6 GHz με την πυκνότερη διάταξη ετερογενών δικτύων. Ο συνδυασμός των δύο αυτών επιλογών αποτελεί και τον βασικό άξονα εξέλιξης προς το 5G.

Επιπλέον η φασματική αποτελεσματικότητα σε επίπεδο συστήματος, θα έχει τη δυνατότητα ενίσχυσης από έξυπνα σχέδια, τα οποία χρησιμοποιούν τεχνικές διαχείρισης διακυτταρικών παρεμβολών. Σήμερα η φασματική αποτελεσματικότητα είναι τυπικά μεταξύ 0,5 – 1,4 bps / Hz / cell, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του τερματισμού και του backhaul. Η φασματική απόδοση θα μπορούσε να φθάσει έως 5 – 10 bps / Hz / cell αν χρησιμοποιήσει προηγμένους δέκτες, κεραίες, πολυκυτταρική μετάδοση και συνεργασία.

Ένα επιπλέον ζητούμενο είναι η σημαντική αύξηση της φασματικής πυκνότητας των σταθμών βάσης. Μεγάλος αριθμός μικρών κυττάρων θα πρέπει να αναπτυχθεί, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση, τόσο στο σπίτι όσο και στην κάλυψη μικρών γραφείων. Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η βελτίωση της φασματικής απόδοσης, το πρόσθετο φάσμα και ο μεγάλος αριθμός μικρών σταθμών βάσης, μπορεί να παρέχει έως και 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ότι σήμερα.

Η αξιοποίηση του φάσματος, η πυκνότερη διάταξη των ετερογενών δικτύων, η αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης και η περαιτέρω επέκταση της φασματικής απόδοσης μπορούν να οδηγήσουν σε νέες δυνατότητες για το 5G, όπως:

- Ο συνδυασμός της αξιοπιστίας της επικοινωνίας μεταξύ μηχανών ή μηχανών και χρηστών, θα χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στην 4<sup>η</sup> βιομηχανική επανάσταση.
- Βιομηχανίες αυτοκινήτων, συνδυασμένες μεταφορές, οδηγοί – χρήστες των οδών, θα διαπιστώσουν σημαντική διαφορά στις παρεχόμενες υπηρεσίες.
- Ο χειρισμός από απόσταση μηχανημάτων είτε σε επικίνδυνες περιοχές είτε σε τομείς εξόρυξης ή κατασκευής θα δώσει νέες δυνατότητες.
- Στον τομέα της υγείας θα μιλάμε για επανάσταση, με τη δυνατότητα χειρουργικής επέμβασης από μακριά μέσω υπολογιστή ή και με τη χρήση έξυπνων φαρμάκων με ασύρματο τρόπο.
- Οι πόλεις, άρα και οι πολίτες, θα ωφεληθούν σημαντικά αφού μέσω των νέων έξυπνων εφαρμογών στην ενέργεια, στο περιβάλλον, στη διαχείριση των απορριμμάτων, στην καθημερινότητα γενικώς, η ποιότητα ζωής θα βελτιωθεί σημαντικά.
- Ο αντίκτυπος στην καθημερινότητα του πολίτη, στον τρόπο ζωής του, στη βιομηχανία, στις τεχνολογίες, θα αλλάξει. Τούτο γιατί σε αντίθεση με τις μέχρι τώρα τεχνολογίες οι οποίες επηρέαζαν κάθε φορά μια συγκεκριμένη ανάγκη και μια συγκεκριμένη επιχειρηματική δραστηριότητα, με την τεχνολογία 5G, η οποία θα υποστηρίζει συγχρόνως πολλαπλές υπηρεσίες, θα μιλάμε και για έναν νέο τρόπο ζωής.

### 3.5 Πλεονεκτήματα του 5G

Τα πλεονεκτήματα που θα επιφέρουν τα νέα δίκτυα 5G είναι πολυάριθμα και σημαντικά, καθώς θα αυξήσουν σημαντικά τις ταχύτητες, αλλά και την αξιοπιστία των συνδέσεων σε smartphones καθώς και σε άλλες συσκευές. Με βάση τα όσα δημοσιεύει το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ (WEF), το 5G αναμένεται να είναι 100 φορές ταχύτερο από το 4G, επιτρέποντας το streaming ταινιών υψηλής ανάλυσης σε μερικά δευτερόλεπτα.

Το 5G σχεδιάζεται για εξυπηρέτηση της διασύνδεσης δεκάδων δισεκατομμυρίων συσκευών μεταξύ τους και με το διαδίκτυο. Οπότε πρέπει να είναι ακραία γρήγορο, πολύ σταθερό και γενικότερα πολύπλευρο. Επιπλέον, θα αυξήσει τα ποσοστά δεδομένων πέραν του 1GB/sec και θα προσφέρει υψηλότερη ευρυζωνική πυκνότητα στους χρήστες. Θα παρέχει χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και χαμηλή κατανάλωση μπαταρίας, με αποτέλεσμα να αυξήσει



τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας έως και 10 χρόνια και να μειώσει τη χρήση ενέργειας δικτύου κατά 90%.

Η φασματική απόδοση θα αυξηθεί στο δίκτυο 5G, ώστε να προσφέρεται καλύτερη χρήση των smartphones, αυξάνοντας την ταχύτητά τους. Επίσης, θα εισάγει την εικονική πραγματικότητα στον τομέα των smartphones και, με τον τρόπο αυτό, θα ανοίξει μια νέα εποχή, αυτή των έξυπνων αυτοκινήτων και των έξυπνων κατοικιών.

Στον τομέα της υγείας, το 5G θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επαρκώς σε τομείς όπως η τηλεϊατρική, η εξέταση των ασθενών από απόσταση, η δυνατότητα γρήγορης ανάλυσης των ιατρικών δεδομένων, η δυνατότητα για ογκώδεις μεταφορές αρχείων. Τέλος, θα βοηθήσει στην εγκαθίδρυση ενός νέου αποκεντρωμένου μοντέλου της υγειονομικής περίθαλψης.

### **3.6 Υπηρεσίες του 5G**

Η χρήση των κινητών επικοινωνιών έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας με αποτέλεσμα οι χρήστες να γίνονται πιο απαιτητικοί, όσον αφορά τις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες και τις ταχύτητες που προσφέρονται για μεταφορά δεδομένων υψηλού όγκου, αλλά και κάλυψη σε ευρύτερο φάσμα του δικτύου. Επικουρικά σε αυτό έχει συμβάλει η εμφάνιση νέων και εξελιγμένων τεχνολογικά συσκευών, που στοχεύουν στη απόλυτη ψηφιοποίηση της πληροφορίας.

Οι υπηρεσίες που πρόκειται να παραχθούν από τη νέα τεχνολογική πραγματικότητα των 5G είναι:

- Οι μεγάλες ταχύτητες επιτυγχάνουν ελάχιστη καθυστέρηση της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου.
- Οι χρήστες που μπορούν να συνδεθούν σε ένα κινητό φτάνουν ακόμα και σε εκατομμύρια άτομα.
- Οι κύκλοι λειτουργίας ξεκινούν από ελάχιστα χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι και ολόκληρες ημέρες.
- Η σηματοδότηση των φορτίων μπορεί να κυμαίνεται στην κλίμακα από 1% μέχρι πλησίον του 100 %.

- Δίνεται η δυνατότητα απεριόριστης χωρητικότητας, μεταφοράς και διαχείρισης δεδομένων βίντεο σε πραγματικούς χρόνους. Παρέχεται ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service) σε ταχύτητες και πάνω από 1 Gbps.
- Η υπηρεσία cloud δίνεται και στα κινητά, με τα 10 Gbps ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων.
- Μηδενίζονται οι χρόνοι απόκρισης, αφού φθάνουν στο ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου.
- Ακόμα και μεταξύ κινούμενων οχημάτων η υποστήριξη πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο.
- Ακόμα και όταν διασυνδέονται διαφορετικές ασύρματες συσκευές ή πραγματοποιείται μεταγωγή, οι χρόνοι απόκρισης είναι μηδενικοί.
- Μεταφερόμαστε από τη δυνατότητα υποστήριξης περίπου 5 δισεκατομμυρίων χρηστών σε υποστήριξη πολλών δισεκατομμυρίων εφαρμογών και δισεκατομμυρίων μηχανών.
- Αντιμετωπίζονται τα προβλήματα – μειονεκτήματα των κινητών τηλεφώνων και έξυπνων συσκευών σχετικά με το ζήτημα της διάρκειας ζωής της μπαταρίας με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.
- Διαμορφώνεται το προφίλ της μελλοντικής – αυριανής έξυπνης πόλης.

### 3.7 Τρέχουσες εξελίξεις σε παγκόσμιο επίπεδο

Η πρώτη σημαντική εμπορική ανάπτυξη του 5G έγινε κατά τους χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες στην Νότια Κορέα. Ουσιαστικά οι χειμερινοί Ολυμπιακοί Αγώνες της Νότιας Κορέας αποτέλεσαν την πρώτη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη και σηματοδότησαν ένα σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G. Την ίδια χρονική περίοδο το 3GPP έχει πιθανότατα ολοκληρώσει της προδιαγραφές της αποκαλούμενης πρώιμης πτώσης του νέου ραδιοφώνου NR, αντικατοπτρίζοντας ένα υποσύνολο λειτουργιών 5G που είναι επαρκείς για τις πρώτες εμπορικές εφαρμογές του 5G, στη λεγόμενη μη αυτόνομη λειτουργία NSA. Η πλήρης ολοκλήρωση του 3GPP, που συχνά αναφέρεται ως 1<sup>η</sup> φάση του 5G, έγινε το δεύτερο εξάμηνο του 2018 και περιελάμβανε αυτόνομη λειτουργία.

Η Ελλάδα θα περιμένει την σχετική έκθεση της Κομισιόν, πριν πάρει τις αποφάσεις της για τα θέματα της τεχνολογίας στην ανάπτυξη των δικτύων 5G. Σύμφωνα με δηλώσεις του Υπουργού Ψηφιακής Διακυβέρνησης Κυριάκου Πιερρακάκη, το ζήτημα της κινητής τηλεφωνίας 5<sup>ης</sup> γενιάς δεν είναι αποκλειστικά τεχνολογικό θέμα, όπως συνέβαινε με τα



παλαιότερα δίκτυα – για παράδειγμα με την κινητή τηλεφωνία 4<sup>ης</sup> γενιάς που χρησιμοποιούμε σήμερα. «Είναι και ζήτημα εθνικής ασφάλειας και προστασίας των κρίσιμων υποδομών της χώρας».

Η Κομισιόν με τους πόρους που διαθέτει, «διατάχθηκε» από τα κράτη μέλη να βοηθήσει με τη δημιουργία μιας έκθεσης – ή μάλλον ενός πακέτου εργαλείων ανάλυσης για την κυβερνοασφάλεια, ειδικά για το 5G. Όσα περιέχονται στην έκθεση αυτή θα βοηθήσουν τα κράτη – μέλη να λάβουν αποφάσεις. Η έκθεση δεν είναι δεσμευτική, αλλά σε αντίθεση με τα περισσότερα κείμενα της Κομισιόν, αυτή είναι πολυαναμενόμενη από τις εθνικές κυβερνήσεις. Μια από αυτές είναι και η Ελληνική. Η Ελλάδα έχει δεσμευτεί ότι θα προχωρήσει σε διαγωνισμό για το φάσμα που θα χρησιμοποιήσουν τα δίκτυα 5G. Και είναι απαραίτητο να είναι γνωστοί οι όροι που θα βάλει το κράτος στην επιλογή εξοπλισμού.

### **3.8 Προκλήσεις του 5G**

Ο αριθμός των θεμελιώσεων από μια γενιά δικτύων στην επόμενη μεγαλώνει συνεχώς και, μάλιστα, κάθε γενιά δικτύων εισάγει νέες δυνατότητες και άρα προκλήσεις στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας και, γενικότερα, στον τομέα των δικτύων των υπολογιστών. Επειδή, υπάρχουν σημαντικές υποσχέσεις και προαπαιτούμενα από την 5G τεχνολογία, είναι σημαντικό να ξεπεραστούν σημαντικά προβλήματα που ανακύπτουν στα κινητά δίκτυα επικοινωνίας.

Το στοίχημα για το 5G είναι η εκμηδένιση των περισσότερων από τα προβλήματα των προηγούμενων τεχνολογιών, με την επιστήμη να αναζητά λύσεις για τα νέα προβλήματα που δημιουργούνται. Αυτό το στοίχημα αφορά τρόπους μείωσης της κατανάλωσης ρεύματος, η χρήση πολύ χαμηλού κόστους εξαρτημάτων χαμηλής ακρίβειας, τα οποία να συνεργάζονται αποτελεσματικά και, γενικά, η ανεύρεση νέων τρόπων ανάπτυξης, αφού οι επιπλέον υπηρεσίες που προσφέρουν οι κεραίες, δίνουν σημαντικές δυνατότητες και νέες ευκαιρίες.

Τα νέα τεχνολογικά ερωτήματα που ανακύπτουν είναι κρίσιμα και καθορίζουν τις προκλήσεις στο 5G. Θα γίνει πιο αποτελεσματική η υποστήριξη σημαντικά περισσότερων συσκευών μέσα από το Διαδίκτυο; Θα είναι δυνατή και πραγματοποιήσιμη η διαχείριση τόσο μεγάλου πλήθους εφαρμογών; Ο έλεγχος και η ασφάλεια της κυκλοφορίας θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των καθυστερήσεων, με την προϋπόθεση ότι τα νέα συστήματα και εφαρμογές θα είναι περισσότερο αξιόπιστα από τα προηγούμενα;

Είδη προκλήσεων που καλούνται να αντιμετωπιστούν στα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα είναι η αξιόπιστη μετάδοση, το μειωμένο κόστος, η ασφάλεια, οι υπηρεσίες πολυεκπομπής, η υποστήριξη διαφορετικών συσκευών, πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών, η λειτουργία

υπό υπερυψηλή πυκνότητα χρηστών, η δυνατότητα συνδεσιμότητας ετερογενών δικτύων, η υποστήριξη πολλαπλών μοντέλων κινητικότητας, κλπ.

### 3.9 Οι κίνδυνοι της τεχνολογίας 5G

Με το 5G θα βελτιωθεί κατά πολύ η καθημερινότητα του σύγχρονου ανθρώπου. Πέραν όμως των θετικών, το 5G θα έρθει αντιμέτωπο και με ορισμένους κινδύνους. Ένα σημείο σκέψης, για παράδειγμα, είναι το γεγονός ότι παρόλο που αλλάζουν και αναπτύσσονται συνεχώς τα δίκτυα και προστίθενται νέες κεραίες, δεν θα σταματήσουν οι εκπομπές των παλιών κεραιών. Οι χρήστες συνεχώς εξυπηρετούνται ενώ, ταυτοχρόνως, τα δίκτυα αλλάζουν και συμπληρώνουν το ένα το άλλο.

Δύο είναι τα κύρια στοιχεία του 5G που δημιουργούν προβληματισμούς στους επιστήμονες για τις επιπτώσεις του. Πρώτον, το μήκος κύματος εκπομπής, το οποίο για πρώτη φορά θα είναι στα επίπεδα των χιλιοστωμέτρων και δεύτερον η πυκνότητα των κεραιών οι οποίες και θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να καλύψουν αστικές περιοχές.

Εδώ απαιτούνται περισσότερες και πιο ενδελεχείς μελέτες καθώς και έρευνες πριν ξεκινήσει να εφαρμόζεται η τεχνολογία 5G σε αστικές περιοχές. Από την άλλη πλευρά, οι κατασκευαστές δε συμερίζονται αυτούς τους φόβους και αντιτάσσουν πως οι καθυστερήσεις στην ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας θα επιφέρουν καθυστέρηση στην οικονομική ανάπτυξη των κρατών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να δοθεί σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε όσα κράτη θα προχωρήσουν στην υλοποίηση της τεχνολογίας του 5G, κάτι που σε αυτή τη φάση έχει συμβεί σε μεγάλη έκταση μόνο με τη Νότια Κορέα.

Ολοκληρώνοντας αυτό το κεφάλαιο και με βάση την ιστορία σε παρεμφερή θέματα, μπορούμε να υποθέσουμε πως το πιθανότερο σενάριο είναι σε εύλογο χρόνο οι φωνές αντίδρασης και προβληματισμού να μετριαστούν μπροστά στα οφέλη των νέων τεχνολογιών που προσφέρει το 5G. Άλλωστε, όπως έχει δείξει και η ιστορία, οι εξελίξεις σε πειράματα στα οποία ο άνθρωπος είναι παράλληλα ο ερευνητής και το πειραματόζωο, ορίζονται κυρίαρχα από οικονομικούς παράγοντες που προκύπτουν από τους νόμους της προσφοράς και της ζήτησης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MIMO

### 4.1 Βασικά χαρακτηριστικά της MIMO

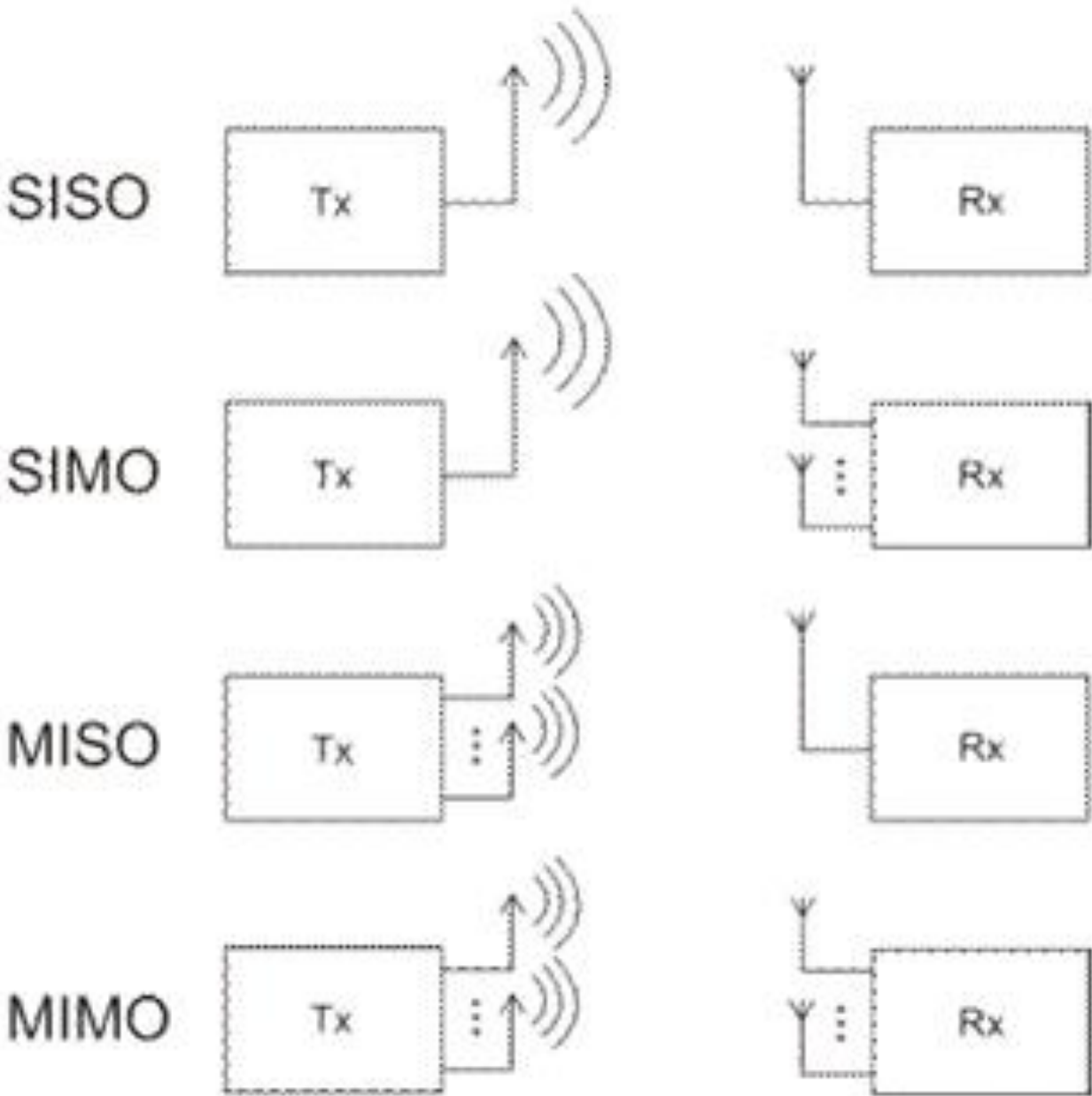
Ήδη στα προηγούμενα δύο κεφάλαια έχουμε αναφερθεί στην τεχνολογία συστημάτων κεραιών MIMO ( Multiple Input Multiple Output/πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου). Παρακάτω παρουσιάζουμε προδιαγραφές και βασικά χαρακτηριστικά της:

- Μέθοδος αύξησης της ικανότητας μιας ραδιοζεύξης, μέσω χρήσης συστοιχιών κεραιών εκπομπής και λήψης για αξιοποίηση πολλαπλών διαδρομών.
- Συνίσταται στην εγκαθίδρυση ενός πλήθους κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό – σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη – συσκευή του χρήστη που επιτρέπει την εκμετάλλευση του χωρικού πεδίου έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλότερες φασματικές αποδόσεις.
- Εκμεταλλεύεται την χωρική κωδικοποίηση των σημάτων ασύρματης μετάδοσης, με την οποία μπορούμε να μεγεθύνουμε το εύρος ζώνης (bandwidth) σε ένα κανάλι επικοινωνίας. Η ιδιαιτερότητα αυτή αυξάνει την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων από τον πομπό στον δέκτη και, μάλιστα, ανάλογα με τον αριθμό των συσκευών / κεραιών που χρησιμοποιούνται, αυξάνεται αντίστοιχα και η ταχύτητα.
- Συνδυάζεται με διάφορα ήδη υπάρχοντα πρότυπα, όπως, τα πρότυπα ασύρματων επικοινωνιών Wi – Fi, WiMax, LTE. Αναλόγως του προτύπου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστοιχιών των κεραιών διαφοροποιούνται έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η διάταξη του δικτύου, οι διαφορετικές καταστάσεις μετάδοσης των χρηστών, κλπ.
- Η εφαρμογή της οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα.
- Για επίτευξη όλο και υψηλότερης απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν συστήματα MIMO 2x2, 4x4 ή 8x8 [51] (δύο κεραιές στο σταθμό βάσης και δύο κεραιές στη συσκευή του χρήστη ή τέσσερις ή οκτώ αντίστοιχα), αφού η επιτεύξιμη φασματική απόδοση κλιμακώνεται γραμμικά με το πλήθος των κεραιών εκπομπής και λήψης. Με τον τρόπο αυτό εισάγονται τα συστήματα multi – user MIMO (MU – MIMO) [52].

- Αν συνδυαστεί με τις τεχνολογίες που προτείνουν τα δίκτυα 5G, τότε αναμφίβολα επιτυγχάνεται τεράστια αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων στα ήδη βέλτιστα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

#### 4.2 Χαρακτηριστικά τεχνολογιών SISO, MISO και MIMO

Στην παρακάτω Εικόνα 6 απεικονίζονται τα είδη τεχνολογιών SISO, MISO και MIMO:



Εικόνα 6: Παρουσίαση τεχνολογιών SISO, SIMO, MISO, MIMO ([56])

#### 4.2.1 Η περίπτωση Single Input Single Output (SISO)

Ο όρος SISO, όπως εφαρμόζεται στις ασύρματες τεχνολογίες, αναφέρεται στην τεχνολογία κεραιών που χρησιμοποιεί μία μόνο κεραία στον πομπό και μία στο δέκτη. Τα συστήματα SISO είναι η πιο απλή τεχνολογία κεραιών. Επειδή όμως οι μονές συχνότητες είναι ευάλωτες στα φαινόμενα space limit και frequency fading (εξασθένηση) τα συστήματα αυτά μερικές φορές αντιμετωπίζουν προβλήματα από φαινόμενα πολλαπλής διάδοσης του σήματος.

Στην περίπτωση του συστήματος SISO, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταδίδονται, διασκορπίζονται όταν αντιμετωπίζουν εμπόδια στην διαδρομή τους (όπως κτίρια, λόφους, κτλ). Στις περιπτώσεις αυτές, τα διασκορπισμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ακολουθούν πολλές διαφορετικές διαδρομές για να φτάσουν στον προορισμό τους. Το γεγονός αυτό όμως προκαλεί προβλήματα εξασθένησης. Σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών αυτό συνεπάγεται μείωση ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και αύξηση αριθμού σφαλμάτων.

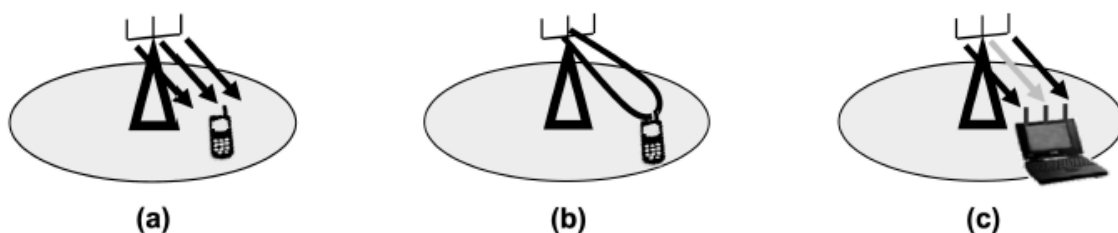
#### 4.2.2 Η περίπτωση Multiple Input Single Output (MISO)

Ο όρος MISO αναφέρεται στην τεχνολογία έξυπνων κεραιών που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στον πομπό και μια μόνο κεραία στον δέκτη, με στόχο να βελτιωθεί η ταχύτητα μετάδοσης και να μειωθούν τα προβλήματα που προκαλούνται από το φαινόμενο της πολυδιόδευσης του σήματος.

#### 4.2.3 Η περίπτωση Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Ο όρος MIMO είναι η ασύρματη τεχνολογία κεραιών που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στον πομπό και τον δέκτη και, σε γενικές γραμμές, μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση σε σχέση με τα απλά SISO συστήματα. Ένα παράδειγμα MIMO συστήματος φαίνεται στην **Error! Reference source not found..**

Η τεχνολογία MIMO εκμεταλλεύεται ουσιαστικά το φαινόμενο της πολυδιόδευσης (multipath), κατά το οποίο ένα σήμα από τον πομπό μέσω ανακλάσεων φτάνει σε πολλαπλά αντίγραφα στον δέκτη. Με τον τρόπο αυτό η ποιότητα του σήματος πέφτει και παρουσιάζονται απώλειες κατά την μετάδοση λόγω του φαινομένου της πολυδιόδευσης και των διαλείψεων. Η χρήση πολλαπλών κεραιών δίνει τη δυνατότητα συλλογής και οργάνωσης των επιμέρους σημάτων, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος. Η ποικιλία των χαρακτηριστικών των συστοιχιών κεραιών μπορούν να αξιοποιηθούν με τους παρακάτω 3 τρόπους, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Είδη κερδών στις συστοιχίες πολλαπλών κεραιών: Κέρδη (α) Ποικιλομορφίας, (β) Διάταξης, (γ) Χωρικής πολυπλεξίας

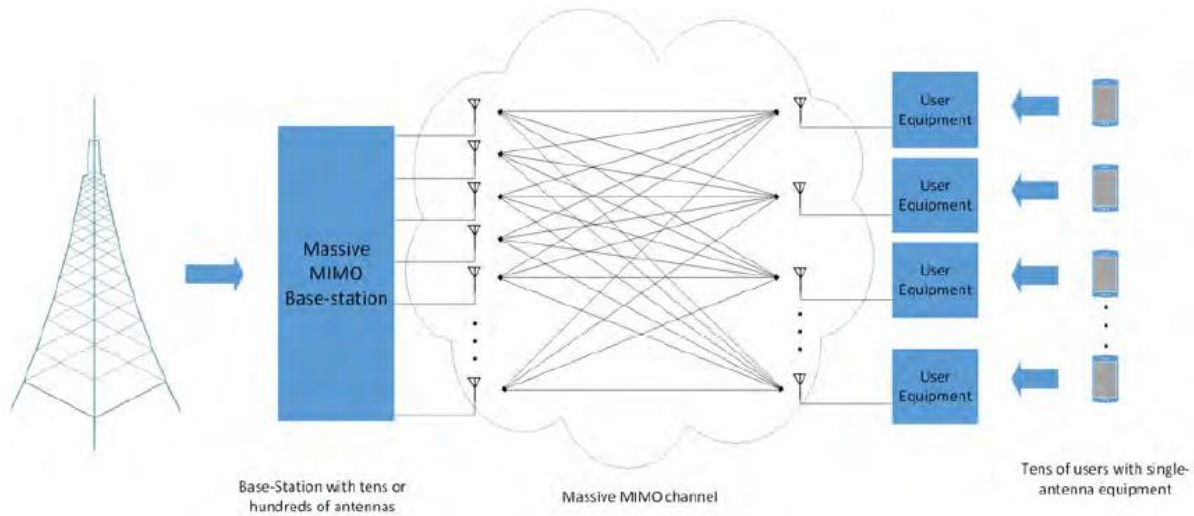
- **Κέρδος ποικιλομορφίας:** η χωρική ποικιλομορφία επιτυγχάνει βελτίωση της ανθεκτικότητας της μετάδοσης αφού μειώνει την εξασθένιση λόγω πολυδιάδευσης.
- **Κέρδος διάταξης:** υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών σε διαφορετικές κατευθύνσεις (multi – user MIMO) αφού μπορεί να γίνει προκωδικοποίηση και προγραμματισμένη κατευθυντική διάδοση.
- **Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας:** ο συνδυασμός των κεραιών που μπορεί να είναι διαθέσιμες επιτυγχάνει μετάδοση προς έναν χρήστη πολλαπλών ροών σήματος.

### 4.3 Μαζική MIMO τεχνολογία

Μια άλλη πολλά υποσχόμενη περίπτωση της MIMO είναι η Μαζική MIMO τεχνολογία (αλλιώς Large – Scale MIMO ή Large – Scale Antenna Systems), έτσι όπως περιγράφεται στο [52]. Έχει τα τελευταία χρόνια κινήσει το παγκόσμιο ερευνητικό ενδιαφέρον και αποτελεί μια από τις πιο ισχυρές υποψηφιότητες για υιοθέτηση από τα 5G δίκτυα, αφού θα δώσει δυνατότητα για υψηλότερη απόδοση, αξιοπιστία σύνδεσης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και φασματική απόδοση σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα MIMO μικρής κλίμακας [53].

Στα μαζικά MIMO συστήματα εγκαθιδρύεται ένα πλήθος κεραιών στους σταθμούς βάσης που αποτελεί μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούν. Στην Εικόνα 8 παρατηρούμε ένα σύστημα MU – MIMO όπου ο σταθμός βάσης είναι εφοδιασμένος με δεκάδες ή εκατοντάδες κεραιές και ο κάθε χρήστης, από τους δεκάδες που υπάρχουν, είναι εφοδιασμένος με εξοπλισμό απλής κεραιάς.





Εικόνα 8: Μαζικό σύστημα MIMO

Η λογική της επικοινωνίας του κάθε χρήστη με τον σταθμό βάσης μέσω εξοπλισμού απλής κεραίας δίνει το πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μικρού κόστους του εξοπλισμού στους χρήστες.

Τα MU – MIMO συστήματα βασίζονται στη χωρική πολυπλεξία που μπορεί να αποφέρει αυξημένη αποδοτικότητα, και πιο συγκεκριμένα:

- Υψηλή αξιοπιστία συνδέσμου, λόγω της καταπολέμησης του φαινομένου της εξασθένισης.
- Υψηλή απόδοση του ρυθμού μεταφοράς, αφού καθώς αυξάνεται το πλήθος κεραιών, δημιουργούνται όλο και περισσότερες ροές δεδομένων προς τους χρήστες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος.
- Μεγαλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αφού το κέρδος πολυπλεξίας αυξάνεται γραμμικά με το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών.
- Υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και βελτιωμένη κάλυψη δικτύου, αφού η ταυτόχρονη μετάδοση προς πολλαπλούς χρήστες μπορεί να πετύχει μείωση της αθροιστικής ισχύος μετάδοσης στον εξοπλισμό των χρηστών. Από την άλλη, οι σταθμοί βάσης μέσω της προκωδικοποίησης (beamforming) μπορούν να μεταδίδουν με συγκεντρωτικό τρόπο τα σήματα προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη ισχύς τόσο στους σταθμούς όσο και στους χρήστες να μειώνεται.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ

### 5.1 Η έννοια της μάθησης

Όταν αναφερόμαστε στη μάθηση του ανθρώπου, εννοούμε ένα γνωστικό σύστημα το οποίο γίνεται αντιληπτό στην καθημερινή ζωή και το οποίο συνδέεται κυρίως με δύο ιδιότητες: αφενός την ικανότητά του να αποκτά και να συσσωρεύει γνώση καθώς αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον και αφετέρου τη δυνατότητα που έχει να την βελτιώνει, επαναλαμβάνοντας τον τρόπο με τον οποίο εκτελεί κάθε μια του ενέργεια.

Η Μάθηση (Learning) θεωρείται ως μια από τις θεμελιώδεις ιδιότητες της νοήμονος συμπεριφοράς του ανθρώπου. Παρότι η επιστήμη της Γνωστικής Φιλοσοφίας έχει μελετήσει και ερευνήσει σε βάθος και για πολλά χρόνια την έννοια της μάθησης, δεν έχει ακόμα και σήμερα καταλήξει στην πλήρη κατανόησή της. Μπορούμε, λοιπόν, να ορίσουμε ως μάθηση μια διαδικασία η οποία βελτιώνει την επίδοση ενός συστήματος μέσα από μια συγκεκριμένη εργασία και ως αποτέλεσμα της παρατήρησης σημαντικού αριθμού παραδειγμάτων.

Για να υπάρξει μάθηση απαιτούνται τρία βασικά συστατικά :

- Ένα περιβάλλον το οποίο προσφέρει τα δεδομένα υπό μορφή παραδειγμάτων στο σύστημα.
- Ένα κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης του συστήματος
- Μια συγκεκριμένη εργασία την οποία το σύστημα καλείται να εκτελέσει

Ο άνθρωπος εφαρμόζει δια βίου διαδικασίες μάθησης εκούσια ή ακούσια. Η μάθηση στον άνθρωπο θεωρείται μέρος της νοημοσύνης του.

### 5.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά μηχανικής μάθησης

Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) αποτελεί τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης που ασχολείται με την ανάπτυξη αλγορίθμων μάθησης, δηλαδή αλγορίθμων που βελτιώνουν την επίδοση ενός συστήματος σε προβλήματα. Η βελτίωση με τον αλγόριθμο επέρχεται σταδιακά, επειδή ο αλγόριθμος τις περισσότερες φορές είναι επαναληπτικός, δηλαδή εξετάζει τα παραδείγματα πολλές φορές σε «εποχές μάθησης».



Γενικότερα μιλώντας, στόχος της μάθησης δεν είναι η συμβατική απομνημόνευση των δεδομένων που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός απλού πίνακα αποθήκευσης. Αντιθέτως, είναι η δυνατότητα παραγωγής σωστών εκτιμήσεων σχετικά με δεδομένα τα οποία αντιμετωπίζονται για πρώτη φορά από το σύστημα.

Η αξία της Μηχανικής Μάθησης βρίσκεται ακριβώς σε αυτή την ιδιότητα γιατί είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να προβλέψουμε, να εκτιμήσουμε τα άγνωστα μέχρι στιγμής δεδομένα, να μπορούμε να προβλέψουμε πόσο σημαντικά είναι, χωρίς να τα έχουμε ξαναδεί. Για να μπορέσει να εφαρμοσθεί η λογική αυτή είναι απαραίτητη η παρουσίαση παρόμοιων αντικειμένων ή δεδομένων, έτσι ώστε να αποκαλύπτεται η κρυμμένη σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

Εφαρμόζεται σε σειρά υπολογιστικών εργασιών όπου η σχεδίαση και ο προγραμματισμός των αλγορίθμων είναι ανέφικτος. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως τα φίλτρα spam, η οπτική αναγνώριση χαρακτήρων (OCR), οι μηχανές αναζήτησης και η υπολογιστική όραση.

Τελικά μπορούμε να πούμε ότι Μηχανική μάθηση είναι το σύνολο των μεθόδων μέσω των οποίων είναι εφικτή η επινόηση κατάλληλων μοντέλων και αλγορίθμων, τέτοιων που είναι ικανοί να οδηγήσουν στην πρόβλεψη.

Ουσιωδέστερη επιλογή ως προς το είδος της παρεχόμενης γνώσης είναι ο βαθμός ως προς τον οποίο αυτή προσφέρει είτε άμεση είτε έμμεση πληροφόρηση στο σύστημα μηχανικής μάθησης, όσον αφορά την υπό εκμάθηση έννοια. Βαρύνουσα σημασία στην ποιότητα ενός σώματος εκπαίδευσης αποτελεί η κατανομή των παραδειγμάτων, μέσω των οποίων θα αντληθεί γνώση από το σύστημα μηχανικής μάθησης.

Συνηθέστερη μορφή αναπαράστασης κάθε παραδείγματος (στιγμιότυπου) είναι η διανυσματική. Σε κάθε στιγμιότυπο (instance) περιλαμβάνεται ένα πλήθος από χαρακτηριστικά (attributes). Αυτά είναι μετρήσιμες ποσότητες που επιλέγονται κατάλληλα από τα δεδομένα εκπαίδευσης, ώστε το σύστημα μηχανικής μάθησης να μπορεί να εξάγει γνώση από τις τιμές τους.

Η επιλογή  $k$  χαρακτηριστικών μπορεί να απεικονιστεί γεωμετρικά στον  $k$  – διάστατο χώρο, που πλέον αποτελεί το χώρο των στιγμιότυπων, αντιστοιχίζοντας τα στιγμιότυπα σε διανύσματα  $k$  διαστάσεων. Θεωρώντας ως βάση το μοντέλο διανυσματικής αναπαράστασης, θέλουμε να βρούμε συνάρτηση  $f$ , η οποία να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά σε μια ιδανική συνάρτηση. Μέσω της ιδανικής συνάρτησης μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα, δηλαδή να προσεγγίσουμε τη συνάρτηση στόχο (target function)  $f$ .

Η ιδανική συνάρτηση και η συνάρτηση στόχος έχουν ως ελεύθερη μεταβλητή τυχαίο διάνυσμα  $x$ , πεδίο ορισμού τον χώρο στιγμιοτύπων και σύνολο τιμών που καθορίζεται από το είδος της εφαρμογής. Με την έννοια αυτή, το πρόβλημα της μηχανικής μάθησης και η επίλυσή του μετατρέπεται σε πρόβλημα προσέγγισης τιμών συνάρτησης (function approximation).

Βασική υπόθεση των περισσότερων αλγορίθμων Μηχανικής μάθησης είναι ότι πρέπει τα στιγμιότυπα που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση να είναι αντιπροσωπευτικά με τη γενική κατανομή των στιγμιοτύπων στον υπό μοντελοποίηση χώρο. Βεβαίως, ακόμη κι αν τα στιγμιότυπα εκπαίδευσης ακολουθήσουν κατανομές παρόμοιες με αυτές των μελλοντικών άγνωστων στιγμιοτύπων, η υπόθεση αυτή συχνά παραβιάζεται στην πράξη.

Από την άλλη, ακόμη και αν βρούμε το καταλληλότερο μοντέλο εκπαίδευσης το οποίο θα επαληθεύεται από όλα τα στιγμιότυπα εκπαίδευσης (συνεπές μοντέλο), αυτό δεν θα είναι απαραίτητως και η πιο επιτυχημένη επιλογή λύσης. Βασική αιτία αποτελεί το φαινόμενο των υπερβολικών ταιριασμάτων με τα δεδομένα εκπαίδευσης (overfitting). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως λόγω του μεγάλου αριθμού παραμέτρων του μοντέλου.

Επιπλέον, οι τυχαίες κανονικότητες που μπορεί να εμφανιστούν και οι οποίες ενδεχομένως οδηγούν σε λανθασμένες γενικεύσεις, είναι ένας παράγοντας που συντελεί στο overfitting. Είναι, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι, προσαρμοσμένες η καθεμία στον εκάστοτε αλγόριθμο για τη μετρίαση του φαινομένου αυτού.

### 5.3 Είδη μηχανικής μάθησης

Αναλόγως της φύσης των προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές μηχανικής μάθησης, όπως:

- Μάθηση με επίβλεψη (supervised learning) ή αλλιώς μάθηση με παραδείγματα (learning from examples),
- Μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) ή αλλιώς μάθηση από παρατήρηση (learning from observation).
- Ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning)

Τα παραπάνω είδη αναλύονται παρακάτω διεξοδικά.

### 5.3.1 Μηχανική Μάθηση με Επίβλεψη ή επιβλεπόμενη μάθηση

Στο είδος αυτό, το σύνολο δεδομένων είναι η συλλογή επισημασμένων παραδειγμάτων

$$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N.$$

Κάθε στοιχείο  $x_i$  μεταξύ των  $N$  ονομάζεται διάνυσμα χαρακτηριστικών. Ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών είναι ένα διάνυσμα στο οποίο κάθε διάσταση  $j = 1, \dots, D$  περιέχει μια τιμή που περιγράφει με κάποιο τρόπο το παράδειγμα.

Αυτή η τιμή ονομάζεται χαρακτηριστικό και δηλώνεται ως  $x(j)$ . Για παράδειγμα, αν το κάθε παράδειγμα  $x$  στη συλλογή μας αντιπροσωπεύει ένα άτομο, τότε το πρώτο χαρακτηριστικό,  $x(1)$ , θα μπορούσε να περιέχει το ύψος σε cm, το δεύτερο χαρακτηριστικό,  $x(2)$ , θα μπορούσε να περιέχει το βάρος σε kg, το  $x(3)$  περιέχει το φύλο και ούτω καθεξής.

Για όλα τα παραδείγματα στο σύνολο δεδομένων, το χαρακτηριστικό στη θέση  $j$  στο διάνυσμα χαρακτηριστικών πάντα περιέχει το ίδιο είδος πληροφορίας. Αυτό σημαίνει ότι αν  $x_i(2)$  περιέχει βάρος σε kg σε κάποιο παράδειγμα  $x_i$ , τότε το  $x_k(2)$  θα περιέχει επίσης το βάρος σε kg σε κάθε παράδειγμα  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, N$ .

Η ετικέτα  $y_i$  μπορεί να είναι είτε ένα στοιχείο που ανήκει σε ένα πεπερασμένο σύνολο κατηγοριών  $\{1, 2, \dots, C\}$ , ή ένας πραγματικός αριθμός ή μια πιο περίπλοκη δομή, όπως ένα διάνυσμα, ένας πίνακας, ένα δέντρο ή ένα γράφημα.

Εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, το  $y_i$  είναι είτε ένα πεπερασμένο σύνολο τάξεων είτε ένας πραγματικός αριθμός. Μια τάξη είναι η κατηγορία στην οποία ανήκει ένα παράδειγμα. Αν τα παραδείγματα είναι μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και το πρόβλημά μας είναι η ανίχνευση ανεπιθύμητων μηνυμάτων, τότε τίθενται δύο κατηγορίες  $\{\text{spam}, \text{not\_spam}\}$ .

Ο στόχος ενός αλγόριθμου εποπτευόμενης μάθησης είναι η χρήση του συνόλου δεδομένων (training set) για την παραγωγή ενός μοντέλου που παίρνει ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών  $x$  ως είσοδο και εξάγει πληροφορία που επιτρέπει την εξαγωγή μιας ετικέτας για αυτό το διάνυσμα χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, το μοντέλο που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων των ανθρώπων θα μπορούσε να λάβει ως είσοδο ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών που περιγράφει ένα άτομο και να εξάγει μια πιθανότητα το άτομο να έχει καρκίνο.

### 5.3.2 Μη Εποπτευόμενη ή μη επιτηρούμενη Μηχανική Μάθηση

Στην μη εποπτευόμενη μάθηση, το σύνολο δεδομένων είναι μια συλλογή μη χαρακτηρισμένων παραδειγμάτων

$$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N.$$

Και πάλι, το  $x$  είναι ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών και ο στόχος ενός αλγόριθμου μάθησης χωρίς επίβλεψη είναι να δημιουργήσει ένα μοντέλο που παίρνει ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών  $x$  ως είσοδο και είτε το μετατρέπει σε ένα άλλο διάνυσμα είτε ως τιμή που αξιοποιείται στην επίλυση ενός πρακτικού προβλήματος. Για παράδειγμα, κατά την ομαδοποίηση, το μοντέλο επιστρέφει την ταυτότητα της ομάδας για κάθε διάνυσμα χαρακτηριστικών στο σύνολο δεδομένων.

Στην μείωση των διαστάσεων, η έξοδος του μοντέλου είναι ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών που έχει λιγότερα χαρακτηριστικά από την είσοδο  $x$ , στην ανίχνευση των εξόδων (outlier detection) και η έξοδος είναι ένας πραγματικός αριθμός που υποδεικνύει πώς το  $x$  είναι διαφορετικό από ένα "τυπικό" παράδειγμα στο σύνολο δεδομένων.

### 5.3.3 Ημι – Εποπτευόμενη Μηχανική Μάθηση

Στην ημι – εποπτευόμενη μάθηση, το σύνολο δεδομένων περιέχει τόσο επισημασμένα όσο και μη επισημασμένα παραδείγματα. Συνήθως, η ποσότητα των μη επισημασμένων παραδειγμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από τον αριθμό των επισημασμένων παραδειγμάτων. Ο στόχος ενός ημι – εποπτευόμενου αλγόριθμου μάθησης είναι ο ίδιος με τον στόχο του αλγόριθμου εποπτευόμενης μάθησης. Η ελπίδα εδώ είναι ότι η χρήση πολλών μη επισημασμένων παραδειγμάτων μπορεί να βοηθήσει τον αλγόριθμο μάθησης να βρει ("παράγει" ή "υπολογίσει") ένα καλύτερο μοντέλο.

### 5.3.4 Ενισχυμένη Μάθηση

Το είδος αυτό αποτελεί υποπεδίο της Μηχανικής μάθησης όπου η μηχανή "ζει" σε ένα περιβάλλον και είναι ικανή να αντιληφθεί την κατάσταση αυτού του περιβάλλοντος ως ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών. Το μηχανήμα μπορεί να εκτελεί ενέργειες σε κάθε κατάσταση. Οι διαφορετικές ενέργειες φέρουν διαφορετικές ανταμοιβές και μπορούν, επίσης, να μετακινήσουν το μηχανήμα σε άλλη κατάσταση του περιβάλλοντος.

Ο στόχος ενός αλγόριθμου ενίσχυσης μάθησης είναι να μάθει μια πολιτική. Μια πολιτική είναι μια συνάρτηση  $f$  (παρόμοια με το μοντέλο στην εποπτευόμενη μάθηση) που παίρνει το διάνυσμα χαρακτηριστικών μιας κατάστασης ως είσοδο και εξάγει μια βέλτιστη

ενέργεια για να εκτελεστεί σε αυτή την κατάσταση. Η δράση είναι βέλτιστη εάν μεγιστοποιεί την αναμενόμενη μέση ανταμοιβή.

Η ενισχυμένη μάθηση επιλύει ένα συγκεκριμένο είδος προβλημάτων όπου η λήψη αποφάσεων είναι διαδοχική και ο στόχος είναι μακροπρόθεσμος, όπως το παιχνίδι, η ρομποτική, η διαχείριση των πόρων ή η εφοδιαστική.

#### **5.4 Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης**

Το πεδίο εφαρμογών της Μηχανικής Μάθησης είναι πραγματικά ευρύτατο. Αναφέρουμε ενδεικτικά τομείς όπως η Οικονομία, η Βιομηχανία, η Αεροπορία, το Διαδίκτυο και οι Τηλεπικοινωνίες καθώς και Εμπορικές, Οικιακές και Ιατρικές εφαρμογές.

Στην οικονομία ήταν ανέκαθεν γνωστή η ανάγκη και η σημασία της ικανότητας προβλέψεων. Συχνά χρησιμοποιούνται συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης και ειδικότερα Μηχανικής Μάθησης για την πρόβλεψη της κίνησης στην κεφαλαιαγορά για καλύτερες επενδύσεις σε μετοχές. Επίσης, υπάρχει η ανάγκη πρόβλεψης της αξίας υποτίμησης των προϊόντων ώστε να γίνεται μία ορθή εκτίμηση της κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων της εκάστοτε εταιρείας.

Ακόμη, είναι σημαντική η πρόβλεψη υποτίμησης επισφαλών απαιτήσεων πελατών ή, σε κάποιες περιπτώσεις, επισφαλών προμηθευτών, η πρόβλεψη καταστροφών και αλλαγής συναλλαγματικών διαφορών. Σημαντικές για μία εταιρεία είναι και οι προβλέψεις της αγοράς που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της καλύτερης πιθανής τιμής των προϊόντων και πιθανής αύξησης ή μείωσής της ή της πιθανότητας επιτυχίας ενός προϊόντος σε μία νέα αγορά.

Η Μηχανική Μάθηση δίνει, επίσης, τη δυνατότητα σε οικονομικούς οργανισμούς να ανιχνεύσουν αλλαγές στη μέχρι τότε συνηθισμένη οικονομική δραστηριότητα των πελατών τους και να ειδοποιηθούν για περαιτέρω έρευνες σε πιθανές προσπάθειες εξαπάτησης πελατών. Πληθώρα στατιστικών μεθόδων και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έχουν εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια στο πεδίο της οικονομίας στοχεύοντας στη δημιουργία προγνωστικών μοντέλων για την ανίχνευση της επιχειρηματικής αποτυχίας όπως είναι, για παράδειγμα, η Πολυμεταβλητή Ανάλυση διαφοροποίησης, η Λογαριθμική Ανάλυση και τα Νευρωνικά Δίκτυα.

Η Τεχνητή Νοημοσύνη δίνει επίσης τη δυνατότητα σε οικονομικούς οργανισμούς να ανιχνεύσουν αλλαγές στη μέχρι τότε συνηθισμένη οικονομική δραστηριότητα πελατών και να ειδοποιηθούν για περαιτέρω έρευνες σε πιθανές προσπάθειες εξαπάτησης πελατών.

Η βιομηχανία επωφελείται από την μηχανική μάθηση καθώς ρομπότ με μηχανική όραση και κατάλληλο σχεδιασμό ενεργειών μπορούν και αντικαθιστούν ανθρώπους σε επικίνδυνες ή επίπονες εργασίες. Αποδεικνύονται, ακόμα, πολύ αποτελεσματικά σε επαναλαμβανόμενες εργασίες στις οποίες οι άνθρωποι μπορεί να κάνουν λάθη λόγω στιγμιαίας μείωσης της προσοχής ή αποφεύγουν, καθώς η φύση των επαναλαμβανόμενων εξειδικευμένων εργασιών τους προσδίδει ένα αίσθημα κοινωνικής υποβάθμισης, πλήξης και μειωμένης συνεισφοράς

Τα Έμπειρα Συστήματα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των μονάδων παραγωγής και μέσω της αδιάλειπτης παρακολούθησης της μονάδας και της κατάλληλης επεξεργασίας των σημάτων εισόδου σε συνδυασμό με τη βάση γνώσεων, πραγματοποιούν ανίχνευση, διάγνωση και διόρθωση σφαλμάτων, καταγραφή συμβάντων και δράσεων, ειδοποίηση των χειριστών μέσω ευφώνων συναγερμών και προγραμματισμό αποθηκών, πόρων, τμημάτων και κύριου εξοπλισμού της παραγωγής.

Στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας η μηχανική μάθηση βοηθάει στην βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των μονάδων παραγωγής ενέργειας ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες των καταναλωτών χωρίς προβλήματα στο δίκτυο παροχής ενέργειας. Τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (E.M.S. – Energy Management Systems) πραγματοποιούν ένα ταίριασμα της παραγωγής με τη στιγμιαία ζήτηση φορτίου και προβλέπουν τα ημερήσια και εβδομαδιαία φορτία ζήτησης ώστε να αναπτύξουν μία στρατηγική ικανοποίησης αναγκών και ελαχιστοποίησης του κόστους.

Στον τομέα της αεροπορίας, χρησιμοποιούνται προσομοιωτές πτήσης για μάχη ή εκπαίδευση αναπληρωτών πιλότων που χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη για επεξεργασία των δεδομένων των πτήσεων. Στην περίπτωση εξομοίωσης μάχης μέσω εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης γίνεται έλεγχος και επιλογή της καλύτερης πιθανής στρατηγικής για επιτυχία μέσω έμπειρων συστημάτων. Προγράμματα μηχανικής μάθησης βοηθούν τους πιλότους κατά τη διάρκεια πτήσεων, προτείνοντας ελιγμούς. Ακόμα, υπάρχουν και τεχνητοί πιλότοι που οδηγούν τα αεροσκάφη κατά τη διάρκεια εξομοίωσης πτήσεων και βοηθούν πολύ σε περιπτώσεις που χρειάζεται η συλλογή δεδομένων πολλαπλών αεροσκαφών.

Μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται και στον τομέα ανάπτυξης λογισμικού αναγνώρισης ομιλίας (speech recognition software). Αντιστοίχως, σε προγράμματα φιλτραρίσματος ηλεκτρονικής αλληλογραφίας (e – mail) από ανεπιθύμητα μηνύματα, χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση στην αναγνώριση και ταξινόμηση τέτοιων μηνυμάτων (για παράδειγμα μέσω του τρόπου γραφής των εισερχόμενων μηνυμάτων, την συχνότητα εμφάνισης λέξεων – κλειδιών που υπάρχουν συνήθως σε ανεπιθύμητα μηνύματα, το όνομα του αποστολέα κ.λ.π.).



Κάποιοι ιστότοποι χρησιμοποιούν αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για να προτείνουν στο χρήστη ταινίες, σειρές, μουσική ή νέα που πιθανόν να είναι εντός των ενδιαφερόντων του χρήστη, βασισμένα σε προηγούμενες αξιολογήσεις του σε αντίστοιχα προϊόντα ή αξιολογήσεις χρηστών που εμφανίζουν ομοιότητες με τον εν λόγω χρήστη (ίδιο φύλο, καταγωγή, ενδιαφέροντα κλπ). Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται, επίσης, στις μηχανές αναζήτησης καθώς και στην παροχή στοχευμένων διαφημίσεων (targeted advertising) σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη.

Κάποιες από τις εμπορικές και οικιακές εφαρμογές της μηχανικής μάθησης αποτελούν η αυτόματη τηλεφωνική εξυπηρέτηση πελατών μέσω συστημάτων αναγνώρισης φωνής, η ανάπτυξη όλο και καλύτερων προσαρμοστικών διεπαφών ανθρώπου – μηχανής και διεπαφών που βοηθούν άτομα με ειδικές ανάγκες, όπως άτομα με μειωμένη όραση ή κινητικές δυσκολίες μέσω επεξεργασίας της φυσικής γλώσσας και αναγνώρισης φωνής, οπτικής αναγνώρισης χαρακτήρων, ανάγνωσης κειμένων και παραγωγής φυσικής γλώσσας.

Στον τομέα των παιχνιδιών υπάρχουν πολλές εφαρμογές μηχανικής μάθησης, όπως το πρώτο ευρείας κυκλοφορίας οικιακό ρομπότ, το Furby, και το πιο βελτιωμένο σκυλάκι AIBO της Sony με μεγάλη αυτονομία και χαρακτηριστικά νοημοσύνης, όπως δυνατότητες αναγνώρισης ομιλίας, έκφρασης συναισθημάτων με κινήσεις και ήχους και μετακίνησης σε διάφορες επιφάνειες.

Στην ιατρική υπάρχει πληθώρα εφαρμογών μηχανικής μάθησης, από συστήματα που ειδοποιούν τους ιατρούς στην περίπτωση που εμφανιστεί κάποια αλλαγή στην κατάσταση ενός ασθενούς έως συστήματα που αναλύουν μεγάλο όγκο δεδομένων και προτείνουν διασυνδέσεις μεταξύ περίπλοκων μοτίβων που προηγουμένως δεν θεωρούνταν ότι συσχετίζονται.

Μπορούμε να συνεχίσουμε την παραπάνω απαρίθμηση γεμίζοντας πολλές σελίδες ακόμα, συνειδητοποιώντας ξεκάθαρα ότι το machine learning βρίσκεται κυριολεκτικά παντού γύρω μας.

## **5.5 Κατηγοριοποίηση**

Επόμενο στάδιο από τη μηχανική μάθηση είναι η κατηγοριοποίηση ή αλλιώς ταξινόμηση (classification). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα στάδια που αφορούν την εκπαίδευση και την κατηγοριοποίηση δεδομένων.



### 5.5.1 Ορισμός και αλγόριθμοι ταξινόμησης

Η στατιστική ταξινόμηση είναι η διαδικασία στην οποία ανεξάρτητα αντικείμενα τοποθετούνται σε ομάδες βασισμένα σε ποσοτική πληροφορία ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών των αντικειμένων (τα οποία αναφέρονται και ως μεταβλητές, ιδιότητες κ.α.) και βασισμένα, επίσης, σε ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης αντικειμένων που έχουν ήδη χαρακτηριστεί ως προς το σε ποια ομάδα ανήκουν.

Δεδομένου του συνόλου δεδομένων, πρέπει να παραχθεί ένας ταξινομητής ο οποίος αντιστοιχίζει οποιοδήποτε αντικείμενο με την πραγματική του ετικέτα ταξινόμησης η οποία ορίζεται από μια άγνωστη αντιστοίχιση.

Η ταξινόμηση ανήκει στις λεγόμενες μεθόδους επιβλεπόμενης μάθησης. Δεδομένου ενός συνόλου παραδειγμάτων των οποίων γνωρίζουμε την ομάδα στην οποία ανήκουν, καλούμαστε να εκπαιδύσουμε το σύστημα ώστε να ταξινομεί άλλα άγνωστα δείγματα στις ομάδες που έχουμε. Τα παραδείγματα μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά στιγμιότυπα μιας έννοιας.

Για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του συστήματος συχνά κρατάμε ένα μέρος του training set το οποίο δεν συμμετέχει στη διαδικασία εκπαίδευσης και αφού ολοκληρωθεί η εκπαίδευση του συστήματος, εισάγουμε αυτό το set και αξιολογούμε τα αποτελέσματα (test set). Αυτό το κάνουμε γιατί είναι λογικό ένα σύστημα το οποίο έχει εκπαιδευτεί σε κάποια δεδομένα να έχει καλή απόδοση στην ταξινόμησή τους. Το θέμα από εκεί και πέρα είναι να μην έχει υπερεκπαιδευτεί στα συγκεκριμένα δεδομένα με αποτέλεσμα να μην έχει καλή απόδοση σε άλλα άγνωστα δεδομένα. Έτσι, κρατώντας ένα μέρος του training set έχουμε τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα της ταξινόμησης αφού ενώ στο σύστημα είναι άγνωστα σε εμάς όχι.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές ταξινόμησης οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στα δείγματα, όπως γραμμικοί ταξινομητές (linear classifiers), αισθητήρες (Perceptrons), μηχανές



διανυσμάτων υποστήριξης (support vector machines), δέντρα απόφασης (decision trees), Random forests, νευρωνικά δίκτυα (neural networks), bayesian networks, hidden markov models. Παρακάτω παρουσιάζουμε συνοπτικά μερικές σημαντικές από αυτές τις τεχνικές.

### 5.5.2 Μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης

Είναι μηχανές εκμάθησης που χρησιμοποιούνται στην αναγνώριση προτύπων, προερχόμενες από τη θεωρία στατιστικής εκμάθησης (statistical learning theory – SLT). Ο αλγόριθμος SVM δημιουργεί ένα ξεχωριστό υπερεπίπεδο στο πεδίο ορισμού. Λειτουργεί με τον παρακάτω τρόπο:

- Αντιστοιχεί το πεδίο ορισμού σε ένα πεδίο πολλών διαστάσεων μέσω μη γραμμικών αντιστοιχιών, οι οποίες επιλέγονται εκ των προτέρων (Kernel), και
- Δημιουργεί το υπερεπίπεδο σε αυτό το πεδίο πολλαπλών διαστάσεων.

Τα SVM αποτελούν μία μέθοδο ταξινόμησης που δέχεται ως είσοδο έναν πίνακα έκφρασης γονιδίων  $n \times m$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των δειγμάτων και  $m$  ο αριθμός των πειραμάτων που έχουμε πραγματοποιήσει. Στόχος των SVM είναι να διαχωριστούν τα δείγματα σε 2 κατηγορίες στον  $m$  – διάστατο χώρο που βρισκόμαστε, όπου η μία κατηγορία αντιπροσωπεύει τα μέλη μιας κλάσης (θετικά), και η άλλη τα μη μέλη, (αρνητικά).

Ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι συχνά δύσκολο να συμβεί στο  $m$  – διάστατο χώρο. Έτσι πρέπει να μεταφερθούμε σε έναν χώρο μεγαλύτερων διαστάσεων (feature space), ώστε να πετύχουμε το διαχωρισμό. Φυσικά με αυτό τον τρόπο μπορούμε να βρούμε πολλά υπερεπίπεδα τα οποία θα διαχωρίζουν τα δεδομένα μας. Με ποιο κριτήριο όμως επιλέγουμε το βέλτιστο υπερεπίπεδο;

Η μέθοδος SVM υποθέτει ότι τα πρότυπα είναι κατηγοριοποιημένα με ήδη γνωστή πληροφορία ταξινόμησης. Στη συνέχεια, μεταφέρονται τα πρότυπα από έναν χώρο χαμηλών διαστάσεων σε έναν χώρο μεγαλύτερης διάστασης όπου και αναζητούν ένα βέλτιστο υπερεπίπεδο διαχωρισμού. Αυτό το υπερεπίπεδο επιλέγεται έτσι ώστε να μεγιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των κοντινότερων προτύπων δυο διαφορετικών ομάδων.

Πολλές φορές, τα χαρακτηριστικά (features) ή οι μεταβλητές ενός συνόλου δεδομένων διακατέχονται από περίπλοκες μη – γραμμικές σχέσεις και ένας μη – γραμμικός μετασχηματισμός μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή ενός μη γραμμικά

διαχωρίσιμου χώρου καταστάσεων σε έναν πιο απλό γραμμικά διαχωρίσιμο χώρο χαρακτηριστικών υψηλών διαστάσεων (high dimensional feature space).

Ένας οποιοσδήποτε αλγόριθμος μπορεί να κάνει χρήση της συνάρτησης πυρήνα (γνωστής και ως kernel trick) αρκεί να μπορεί να εκφραστεί έτσι ώστε το κάθε διάνυσμα δεδομένων εισόδου (input data) να εμφανίζεται μόνο μέσα σε πράξεις εσωτερικού γινομένου (dot product). Η μη γραμμική εκδοχή του αλγορίθμου δημιουργείται μετά αντικαθιστώντας το εσωτερικό γινόμενο με τη συνάρτηση πυρήνα.

### 5.5.3 Δέντρα απόφασης

Αποτελούν μέθοδο κατηγοριοποίησης η οποία παράγει ένα δέντρο το οποίο ταξινομεί τα δεδομένα εισόδου σύμφωνα με την τάξη τους. Κάθε κλαδί του δέντρου αντιπροσωπεύει και μια απόφαση. Κάθε κόμβος του δέντρου σχετίζεται με κάποιο χαρακτηριστικό. Οι ακμές που ενώνουν τους κόμβους χαρακτηρίζονται από τις τιμές των χαρακτηριστικών και τα φύλλα – κόμβοι παρέχουν μια ταξινόμηση με αναφορά στα παραδείγματα με τα οποία τροφοδοτήθηκαν. Σε κάθε βήμα κατά τη διαδικασία δημιουργίας του δέντρου, επιλέγεται ένας κόμβος σύμφωνα με το στατιστικό μέτρο που ονομάζεται κέρδος πληροφορίας (Information gain), το οποίο μετρά το πόσο καλά ένας κόμβος (χαρακτηριστικό) διανέμει τις εισόδους σε σχέση με την κλάση τους.

### 5.5.4 Νευρωνικά δίκτυα

Είναι από τις δημοφιλέστερες και αποτελεσματικότερες τεχνικές κατηγοριοποίησης και μία από τις βασικότερες μεθόδους μηχανικής μάθησης. Η ιδέα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) έχει προέλθει από τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών νευρωνικών δικτύων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Από την στιγμή που διαπιστώθηκε ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος λειτουργεί εντελώς διαφορετικά από τον τρόπο που λειτουργούν οι Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές (Η/Υ) για να κάνουν υπολογισμούς, ξεκίνησε η προσπάθεια προσομοίωσης των μεθόδων μάθησης και λειτουργίας του από τους Η/Υ.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) ή απλά Νευρωνικά Δίκτυα (Ν.Δ.) αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου από μια μηχανή. Έχουν την ικανότητα να εκτελούν υπολογισμούς με μαζικό παράλληλο τρόπο. Η αρχιτεκτονική τους βασίζεται στην αρχιτεκτονική των Βιολογικών Νευρωνικών Δικτύων.

Τα ΤΝΔ είναι μια συλλογή από νευρώνες (Processing Units – PUs) που συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε PU έχει πολλές εισόδους αλλά μόνο μία έξοδο η οποία, με τη σειρά της, μπορεί να αποτελέσει είσοδο για άλλες PUs. Οι συνδέσεις μεταξύ των PUs διαφέρουν ως προς τη

σημαντικότητά τους, η οποία και προσδιορίζεται από το συντελεστή βάρους (σύναψη). Η επεξεργασία κάθε ΡU καθορίζεται από τη συνάρτηση μεταφοράς, η οποία καθορίζει την κάθε έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα ΤΝΔ πρέπει πρώτα να εκπαιδευτεί για να μάθει. Η μάθηση συνίσταται στον προσδιορισμό των κατάλληλων συντελεστών βάρους, ώστε το ΤΝΔ να εκτελεί τους επιθυμητούς υπολογισμούς, και πραγματοποιείται με τη βοήθεια αλγορίθμων που είναι γνωστοί ως κανόνες μάθησης ή αλγόριθμοι εκπαίδευσης. Ο ρόλος των συντελεστών βάρους μπορεί να ερμηνευτεί ως αποθήκευση γνώσης, η οποία παρέχεται μέσω παραδειγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο τα Ν.Δ. μαθαίνουν το περιβάλλον τους, δηλαδή το φυσικό μοντέλο που παρέχει τα δεδομένα.

Για την προσομοίωση των ανθρώπινων νευρωνικών δικτύων καταγράφονται αρχικά τα βασικά χαρακτηριστικά των νευρώνων και των διασυνδέσεών τους. Στη συνέχεια, προγραμματίζεται ο υπολογιστής για την προσομοίωση αυτών των χαρακτηριστικών. Παρ' όλα αυτά, επειδή η γνώση για τους νευρώνες είναι ελλιπής και οι υπολογιστικές δυνατότητες περιορισμένες, τα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί είναι αδρές απομιμήσεις των πραγματικών εγκεφαλικών νευρωνικών δικτύων.

Ένας νευρώνας είναι μια μονάδα επεξεργασίας πληροφοριών βασική για την λειτουργία του ΤΝΔ. Σε ένα μοντέλο νευρώνα μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρία βασικά στοιχεία:

- Ένα σύνολο από συνάψεις (διασυνδέσεις), η κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από κάποιο βάρος.
- Έναν αθροιστή που αθροίζει τα εισερχόμενα σήματα στον νευρώνα που έχουν πολλαπλασιαστεί με το βάρος της αντίστοιχης σύναψης από την οποία εισήλθαν.
- Μια συνάρτηση ενεργοποίησης για τον περιορισμό του μεγέθους της εξόδου ενός νευρώνα. Συνήθως το κανονικοποιημένο εύρος της εξόδου ενός νευρώνα είναι το κλειστό σύνολο  $[0,1]$  ή  $[-1,1]$ .

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 6.1 Εισαγωγικά στοιχεία εκτέλεσης σεναρίου

Τα εργαλεία μηχανικής μάθησης έχουν πολλές και ενδιαφέρουσες εφαρμογές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και, ακόμα περισσότερο, στα συστήματα MIMO. Η ικανότητα της μηχανικής μάθησης να οργανώνει και να αυτοματοποιεί άγνωστα μοντέλα, βοηθά τα συστήματα MIMO να εξελίσσονται και να εισάγουν μεγαλύτερες ταχύτητες και δυνατότητες, κάτι που είναι και κύριος σκοπός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G.

Ο πιο εύκολος τρόπος μελέτης των δυνατοτήτων ενός συστήματος MIMO στο 5G είναι η δημιουργία ενός dataset που περιέχει κάθε φορά την πληροφορία που θέλουμε να δώσουμε ως είσοδο στην μηχανική μάθηση για να γίνουν οι αντίστοιχες προβλέψεις και να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος. Με την κατασκευή – δημιουργία αυτού του dataset, μπορούμε να έχουμε τις εισόδους και εξόδους πολλών machine learning εφαρμογών και παραδειγμάτων.

Στην έρευνα mmWave και MU – MIMO, οι βασικές εργασίες επεξεργασίας σήματος, π.χ. precoding, εκτίμηση καναλιών, παρακολούθηση δέσμης και επιλογή χρηστών, εξελίσσονται γύρω από τα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών. Ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά, όπως η συσχέτιση μεταξύ καναλιών χρήστη σε διαφορετικές τοποθεσίες του περιβάλλοντος, εξαρτώνται κυρίως από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά και την γεωμετρία.

Μερικές machine learning εφαρμογές που περιστρέφονται γύρω από αυτή τη διαδικασία και ιδέα εξομοίωσης είναι οι εξής: η πρόβλεψη των σχημάτων δέσμης και των καναλιών με βάση την υπογραφή RF του χρήστη ή με βάση τη θέση του χρήστη και την πρόβλεψη του μελλοντικού μπλοκαρίσματος με βάση την ακολουθία των προηγούμενων επιλεγμένων δεσμών. Τα κανάλια που παράγονται χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις ανίχνευσης ακτινών συλλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά που βασίζονται στη γεωμετρία, όπως η συσχέτιση μεταξύ των καναλιών σε διαφορετικές θέσεις και η εξάρτηση από τα υλικά των διαφόρων στοιχείων του περιβάλλοντος.

Στην δικιά μας περίπτωση δημιουργούμε ένα εικονικό σενάριο ενός πραγματικού περιβάλλοντος 5G δικτύου, όπου έχουμε κεραίες, χρήστες, κτίρια, δρόμους, κλπ. Αναπαράγουμε το σενάριο στην MATLAB και, δίνοντας όλες τις κατάλληλες παραμέτρους, καταλήγουμε στην εξαγωγή διάφορων αποτελεσμάτων και datasets.

Το dataset που μας ενδιαφέρει είναι αυτό που περιέχει πληροφορία throughput του καναλιού από τη μεριά του χρήστη (πόσα bits per second λαμβάνει ο χρήστης από την κεραία). Την πληροφορία αυτή χρησιμοποιούμε ως είσοδο στο machine learning, όπου ορίζοντας τις κλάσεις, θα γίνεται πρόβλεψη της υπηρεσίας που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο για τον χρήστη στις αντίστοιχες συνθήκες. Οι κλάσεις μας είναι το minimum throughput για την πραγματοποίηση στο επίπεδο του χρήστη των υπηρεσιών: 1) μουσική, 2) βίντεο, 3) VoIP, 4) gaming.

## 6.2 Διαδικασία παραγωγής Machine Learning dataset

Παρακάτω παρουσιάζουμε το σύνολο δεδομένων των καναλιών του συστήματός μας, το οποίο είναι απόλυτα σχεδιασμένο για εφαρμογές Machine / deep learning σε mmWave και massive MIMO. Με το σύνολο δεδομένων αυτών των καναλιών, οι ερευνητές μπορούν εύκολα να κατασκευάσουν τις εισόδους και τις εξόδους πολλών εφαρμογών μηχανικής μάθησης.

Το dataset που δημιουργείται εξαρτάται, αρχικά, από ένα σενάριο R ανίχνευσης ακτινών και, στην συνέχεια, από τις παραμέτρους που δίνει ο ερευνητής σαν είσοδο. Οι παράμετροι αυτές είναι μεταβλητές και μπορούν να μεταβληθούν τηρουμένων των αναγκών του εκάστοτε πειράματος. Το γεγονός αυτό καθιστά το dataset παραμετροποιήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία παραγωγής του dataset έχει σχεδιαστεί για να παράγει dataset καναλιών βασισμένα σε σύνολα παραμέτρων που ρυθμίζονται από τον ερευνητή και καλύπτει την εφαρμογή machine learning που μας ενδιαφέρει.

Παράμετροι αποτελούν διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος και του καναλιού, όπως ο αριθμός των κεραιών, των OFDM subcarriers και των διαύλων καναλιού. Το σενάριο R ανίχνευσης ακτινών είναι, ουσιαστικά, μια έτοιμη εξομοίωση του συστήματος Remcom Wireless InSite [38]. Τα δεδομένα του εξομοιωτή αυτού χρησιμοποιούνται ευρέως από ερευνητές επειδή είναι ακριβή αποτελέσματα και δεδομένα πειραμάτων πάνω σε εικονικά περιβάλλοντα δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν επαληθευτεί από μετρήσεις καναλιών πραγματικού χρόνου.

Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, ως είσοδο το σενάριο R ανίχνευσης ακτινών και τις παραμέτρους του συστήματός μας, παράγονται μέσω κώδικα στη MATLAB, μετρήσεις του καναλιού και το dataset με την πληροφορία που μας ενδιαφέρει. Το dataset αυτό όπως επίσης και οι υπόλοιπες μετρήσεις που παράγονται μπορούν, όπως είπαμε, να χρησιμοποιηθούν σε Machine Learning εφαρμογές.

Στην Εικόνα 9 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής του dataset.

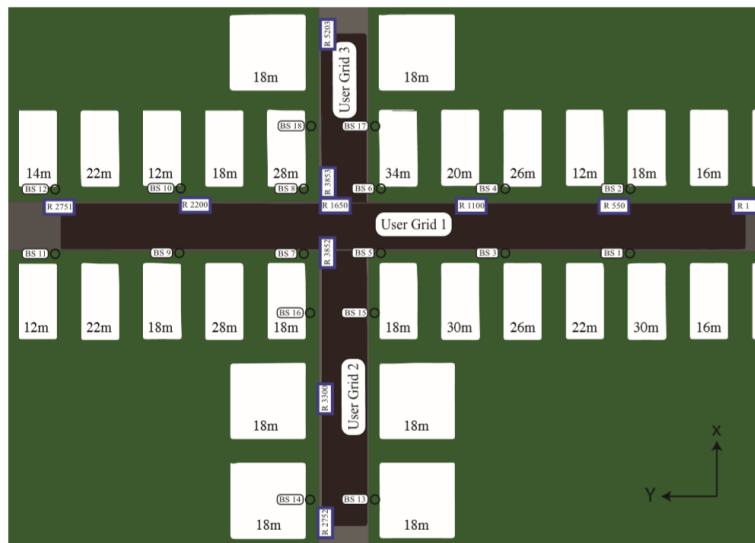


Εικόνα 9: Η διαδικασία παραγωγής του dataset.

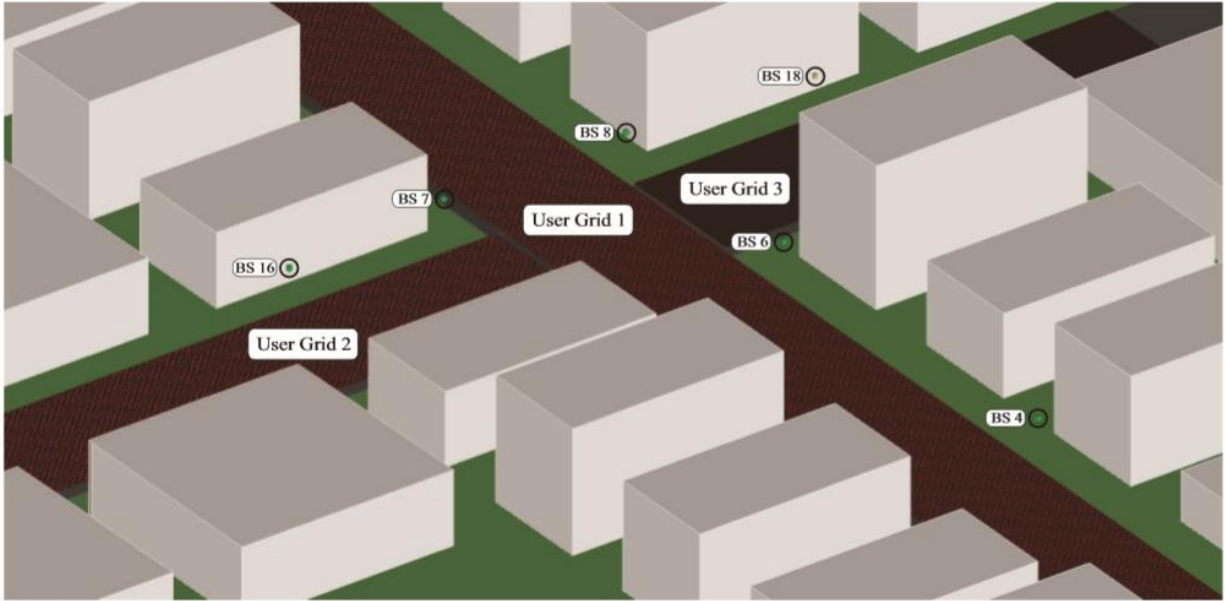
### 6.3 Περιγραφή σεναρίου R ανίχνευσης ακτίνων

Το έτοιμο σενάριο R που χρησιμοποιούμε αποτελείται από έναν αριθμό σταθμών βάσης (ή σημεία πρόσβασης) και από χρήστες γεωγραφικά τοποθετημένους σε ένα περιβάλλον με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Συνήθως, στο σενάριο ανίχνευσης ακτίνων, οι σταθμοί βάσης και οι κεραίες εκπέμπουν προς όλες τις κατευθύνσεις (omni ή quasi – omni antennas).

Στην Εικόνα 10 και Εικόνα 11 φαίνεται η 2D και 3D αναπαράσταση του σεναρίου περιβάλλοντος.



Εικόνα 10: 2D αναπαράσταση του σεναρίου του περιβάλλοντος ([38])



Εικόνα 11: 3D αναπαράσταση του περιβάλλοντος ([38])

Η προσομοίωση με το σενάριο ανίχνευσης ακτινών μας δίνει ως έξοδο, εκτός άλλων, και τις παραμέτρους του καναλιού (γωνίες άφιξης / αναχώρησης, κέρδη διαδρομής, κ.λπ.) για τα κανάλια μεταξύ κάθε πομπού και δέκτη. Σε περιπτώσεις έρευνας μεγάλης κλίμακας και για να έχουμε ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων, το σενάριο περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης και χρηστών [39], [40]. Το σενάριο αυτό είναι ένα σενάριο εξωτερικού περιβάλλοντος με ένα σταυροδρόμι, κτίρια και χρήστες.

Αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του σεναρίου, έτσι όπως αυτά απεικονίζονται στις παραπάνω εικόνες, έχουμε ένα εξωτερικό περιβάλλον με έναν κεντρικό δρόμο (ο κατακόρυφος στην Εικόνα 10) μήκους 600m και πλάτους 40m και με έναν κάθετο δρόμο μήκους 440m και πλάτους 40m.

Πιο αναλυτικά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά:

- **Σταθμοί βάσης (Base stations):** το σενάριο – περιβάλλον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, έχει 18 σταθμούς βάσης, BS1 – BS18, που βρίσκονται εναλλάξ και στις δύο πλευρές των δύο δρόμων. Ο κύριος δρόμος έχει 12 BS, 6 σε κάθε πλευρά. Η απόσταση μεταξύ BS1, BS3 και BS5 (ή αντίστοιχα BS2, BS4, BS6) είναι σταθερή και ίση με 100m (και παρόμοια για τα BS7, BS8, BS9 και BS8, BS10, BS12). Ο δεύτερος δρόμος έχει 6 BS. Η απόσταση μεταξύ BS13, BS 15 και BS17 (ή αντίστοιχα BS14, BS16 και BS18) είναι 150m. Το ύψος όλων των BS είναι 6m. Περαιτέρω, στην προσομοίωση, κάθε BS έχει μόνο ένα ημί – κυματικό δίπολο με τον άξονα της διπολικής κεραίας στην κατεύθυνση z.

- **Χρήστες (users):** λόγω πειραμάτων μεγαλύτερου σκέλους, το σενάριο είναι σχεδιασμένο να υποστηρίζει την ύπαρξη πολλών χρηστών στο ίδιο περιβάλλον (ακριβώς 1.184.923 χρήστες). Οι χρήστες βρίσκονται σε 3 ομοιόμορφες περιοχές  $x - y$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Η πρώτη περιοχή χρηστών βρίσκεται κατά μήκος του κεντρικού δρόμου, με μήκος 550m και πλάτος 35m. Ξεκινά από τη δεξιά πλευρά στην Εικόνα 10, 15 μέτρα μετά από το σημείο εκκίνησης του δρόμου και τελειώνει στα αριστερά, 35 μέτρα πριν το σημείο τερματισμού του δρόμου. Αυτή η πρώτη περιοχή έχει 2751 σειρές, R1 έως R2751, και κάθε σειρά έχει 181 χρήστες. Η απόσταση μεταξύ κάθε δύο γειτονικών χρηστών σε αυτή τη περιοχή είναι 20 cm. Η δεύτερη περιοχή είναι στη νότια πλευρά του δεύτερου δρόμου. Έχει 1101 σειρές, R2752 έως R3852, με 181 χρήστες σε κάθε σειρά. Όπως και στην πρώτη περιοχή, η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών χρηστών είναι 20 cm. Η τρίτη περιοχή βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του δεύτερου δρόμου. Έχει 1351 σειρές, από R3853 έως R5203, με 361 χρήστες σε κάθε σειρά. Εδώ, η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών χρηστών είναι 10 cm. Οι μικρές διαφορές ανάμεσα στις τρεις περιοχές επιτρέπουν ποικιλία στα πειράματα και στις δοκιμές διαφορετικών σεναρίων για τις προσομοιώσεις. Τέλος, όλοι οι χρήστες είναι εξοπλισμένοι με μία μονοπολική κεραία, με τον άξονα τους να ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση  $z$ .
- **Κτίρια:** οι δύο δρόμοι έχουν κτίρια και στις δύο πλευρές. Για απλότητα θεωρούμε το κτίριο στερεό και σε ορθογώνιο σχήμα. Κατά μήκος του κεντρικού δρόμου, όλα τα κτίρια έχουν βάσεις των ίδιων διαστάσεων, 30m × 60m. Στον δεύτερο δρόμο, τα κτίρια έχουν βάσεις 60m × 60m. Τα ύψη των κτιρίων είναι διαφορετικά και το ύψος κάθε κτιρίου δίνεται στην Εικόνα 10.
- **Υλικά:** στο σενάριο αυτό προσομοιώνεται μια διάταξη πολλαπλασιασμού σημάτων 60 GHz. Συνεπώς, το σενάριο αυτό υιοθετεί το υλικό ξηράς γης ITU 60 GHz για τους δύο δρόμους και το υλικό ITU γυψοσανίδας 60 GHz για τα κτίρια. Αυτά τα υλικά είναι διαθέσιμα στον προσομοιωτή Wireless InSite ray tracing [38].

Για κάθε ζεύγος πομπού – δέκτη, αυτή η προσομοίωση δίνει εκατοντάδες ακτίνες προς όλες τις κατευθύνσεις από τον πομπό και καταγράφει τα ισχυρότερα 25 μονοπάτια από εκείνα που έφτασαν στον δέκτη, όπου τα ισχυρότερα μονοπάτια είναι τα μονοπάτια με την υψηλότερη ισχύ λήψης. Επίσης, για κάθε ζεύγος σταθμού βάσης – χρήστη, ο συγκεκριμένος προσομοιωτής υπολογίζει τις παραμέτρους του καναλιού για κάθε κανάλι.

Ειδικότερα, για κάθε BS  $b$  και χρήστη  $u$  και για κάθε διαδρομή καναλιού, υπολογίζονται οι γωνίες αναχώρησης αζιμούθιου και ανύψωσης (AoDs) από τον σταθμό βάσης, η γωνία πρόσληψης αζιμούθιου και ανύψωσης (AoAs) στον χρήστη, η διαδρομή λήψης ισχύος, η φάση του μονοπατιού, η καθυστέρηση διάδοσης της διαδρομής. Εκτός από τις παραμέτρους



του καναλιού, υπολογίζεται η τοποθεσία  $x - y - z$  του χρήστη, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χαρακτηριστικό εισόδου για εφαρμογές Machine Learning.

#### 6.4 Παράμετροι S του dataset

Το γεγονός ότι μπορεί ο ίδιος ο ερευνητής να θέσει τις παραμέτρους του συστήματος, μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα σύνολο δεδομένων ανάλογα με την εφαρμογή ή το είδος του Machine Learning για το οποίο τα χρειαζόμαστε. Αυτό επιτυγχάνει δύο κύριους στόχους:

- (i) παρέχει στους ερευνητές πλήρη έλεγχο του συστήματος και της κεραίας και
- (ii) κάνει ευκολότερη την αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων και μετρήσεων, καθώς οι ερευνητές πρέπει απλώς να δηλώσουν τις παραμέτρους που έχουν ήδη ορίσει και να υιοθετήσουν ένα σενάριο ανίχνευσης ακτινών, "R", για να προσδιορίσουν πλήρως το παραγόμενο dataset.

Για να παράγουμε, λοιπόν, την πληροφορία που ζητάμε, δίνουμε στο σύστημα, μέσω του κώδικα παραγωγής του dataset, συγκεκριμένες τιμές στις παραμέτρους του κώδικα. Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής:

- **Ενεργοί BS (active\_BS στον κώδικα MATLAB):** καθορίζουμε τους σταθμούς βάσης που θέλουμε να ενεργοποιήσουμε στο σύστημά μας, δηλαδή τους σταθμούς με τους οποίους θα συνδέονται οι χρήστες. Ανάλογα με τους σταθμούς αυτούς, θα δημιουργούνται τα αντίστοιχα κανάλια μεταξύ χρήστη και κεραίων. Ενεργοποιώντας συγκεκριμένους σταθμούς, μειώνουμε αισθητά το μέγεθος της παραγόμενης πληροφορίας και εστιάζουμε όλη μας την προσοχή στο συγκεκριμένο υποσύνολο του σεναρίου και του συστήματος. Για παράδειγμα, το σενάριο "O1" εντοπισμού ακτινών περιλαμβάνει 18 BS. Αν η εφαρμογή μας απαιτεί μόνο τα κανάλια μεταξύ των BS 3, 4, 5, 6 και των χρηστών κινητής τηλεφωνίας, θέτουμε `active_BS = [3,4,5,6]`.
- **Ενεργοί χρήστες (active\_user\_first και active\_user\_last στον κώδικα MATLAB):** όπως και με τα BS, έχουμε τη δυνατότητα να ενεργοποιήσουμε μια συγκεκριμένη ομάδα χρηστών στον κώδικα παραγωγής του dataset. Αυτό γίνεται καθορίζοντας την πρώτη και την τελευταία σειρά της ομάδας χρηστών. Για παράδειγμα, για να ενεργοποιήσουμε τις ομάδες χρηστών από τη σειρά R1000 στη σειρά R1500 θέτουμε `active_user_first = 1000` και `active_user_last = 1500`.
- **Αριθμός κεραίων στα BS (num\_ant\_x, num\_ant\_y και num\_ant\_z στον κώδικα MATLAB):** παράμετροι που καθορίζουν τον αριθμό των κεραίων BS στους άξονες x, y και z, υποθέτοντας έναν ομοιόμορφο πίνακα και πάντα ως προς τους άξονες x, y, z στην

Εικόνα 10. Για παράδειγμα, το BS 3 στο σενάριο ανίχνευσης ακτινών. Αν αυτό το BS έχει μια ομοιόμορφη επίπεδη διάταξη  $16 \times 16$  (UPA) κατά μήκος του δρόμου, δηλαδή ένα UPA στο επίπεδο  $y - z$ , θέτουμε  $\text{num\_ant\_x} = 1$ ,  $\text{num\_ant\_y} = 16$  και  $\text{num\_ant\_z} = 16$ .

- **Απόσταση κεραίας (ant\_spacing στον κώδικα MATLAB):** παράμετρος που αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ των στοιχείων του array της κεραίας BS σε σχέση με το μήκος κύματος. Για απόσταση κεραίας μήκους κύματος, θέτουμε  $\text{ant\_spacing} = 0.5$ .
- **Εύρος ζώνης συστήματος (bandwidth στον κώδικα MATLAB):** είναι το εύρος ζώνης του συστήματος σε Hz. Για παράδειγμα, για εύρος ζώνης 500MHz, θέτουμε  $\text{bandwidth} = 0.5$ .
- **Παράμετροι OFDM (num\_OFDM, OFDM\_sampling\_factor και OFDM\_limit στον κώδικα MATLAB):** καθορίζουν τον αριθμό των OFDM subcarriers και ποιους subcarriers θα λάβουμε υπόψη για τον υπολογισμό των δεδομένων των καναλιών. Όπως και με τα BS, επιλέγοντας την ενεργοποίηση συγκεκριμένων subcarriers, μειώνουμε το μέγεθος του παραγόμενου συνόλου δεδομένων. Η παράμετρος OFDM\_sampling\_factor δίνει στον ερευνητή την επιλογή να εξετάζεται μόνο μια δειγματοληπτική έκδοση των OFDM subcarriers, ενώ η παράμετρος OFDM\_limit καθορίζει πόσους δειγματοληπτικούς subcarriers θέλουμε να εξετάσουμε. Για παράδειγμα, αν θέλουμε ένα σύστημα OFDM με 1024 subcarriers και θέλουμε να υπολογίσουμε τα κανάλια μόνο στους πρώτους 64 subcarriers, θέτουμε  $\text{num\_OFDM} = 1024$ ,  $\text{OFDM\_sampling\_factor} = 1$  και  $\text{OFDM\_limit} = 64$ . Για το ίδιο σύστημα OFDM, αν θέλουμε να υπολογίσουμε τα κανάλια μόνο στους πρώτους 64 δειγματοληπτικούς subcarriers με συντελεστή downsampling 4, δηλαδή στους subcarriers 1, 5, 9, ..., 256, τότε θέτουμε  $\text{num\_OFDM} = 1024$ ,  $\text{OFDM\_sampling\_factor} = 4$  και  $\text{OFDM\_limit} = 64$ .
- **Αριθμός μονοπατιών καναλιού (num\_paths στον κώδικα MATLAB):** όπως αναφέραμε παραπάνω, η προσομοίωση του σεναρίου ακτινών παράγει τα AoAs, AoDs κλπ., για έως 25 διαδρομές για το κανάλι μεταξύ κάθε BS και χρήστη. Αυτά τα μονοπάτια ταξινομούνται ανάλογα με την ισχύ που λαμβάνουν. Η πρώτη διαδρομή είναι αυτή με την υψηλότερη λαμβανόμενη ισχύ. Σε πολλές περιπτώσεις πειραμάτων, ίσως να μας ενδιαφέρει μόνο η ισχυρότερη διαδρομή ή τα πρώτα μονοπάτια. Όλα αυτά γίνονται μέσω της παραμέτρου num\_paths. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να εξετάσουμε μόνο τα ισχυρότερα 3 μονοπάτια, θέτουμε  $\text{num\_paths} = 3$ .

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται και στο MATLAB όλες οι παραπάνω περιγραφόμενες παράμετροι που μπορούν να αλλαχθούν, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος:

Dataset Parameters
• Ενεργοί σταθμοί βάσης (Active_BS)
• Ενεργοί χρήστες (active_user_first and active_user_last)
• Αριθμός κεραιών σταBS (num_ant_x, num_ant_y, and num_ant_z)
• Απόσταση κεραιάς (ant_spacing)
• Μήκος κύματος του συστήματος (bandwidth)
• Παράμετροι OFDM (num_OFDM, OFDM_sampling_factor, OFDM_limit)
• Αριθμός μονοπατιών καναλιού (num_paths)

## 6.5 Κώδικας παραγωγής του dataset

Ανάλογα με το σενάριο R ανίχνευσης ακτινών και τις παραμέτρους του συστήματος που θέτει ο ερευνητής, ο κώδικας παραγωγής του dataset δίνει ως έξοδο το αντίστοιχο dataset καθώς, επίσης, και σημαντικές μετρήσεις για τον πλήρη ορισμό των αποτελεσμάτων και των καναλιών. Εκτός, δηλαδή, από το dataset με την πληροφορία που ζητάμε, ο κώδικας παράγει και άλλα σημαντικά μητρώα, με πληροφορίες όπως τη μέγιστη ισχύ ακτίνας που επιτυγχάνει το κανάλι ανάμεσα στον χρήστη και στην κεραιά, την τοποθεσία του χρήστη στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , κλπ. Τέτοιες πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές machine learning εφαρμογές. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε δίνεται σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Δεδομένων των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της ακτινών της Remcom Wireless InSite [38], ο κώδικας παραγωγής του dataset κατασκευάζει σε αρχικό στάδιο τα κανάλια μεταξύ των ενεργοποιημένων BS και των χρηστών. Έχουμε, λοιπόν, τις παραμέτρους του dataset  $S$  που ορίζουν:

- (i) Έναν αριθμό BS κεραιών  $M = M_x M_y M_z$  (με  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  τον αριθμό των κεραιών BS στις  $x$ ,  $y$  και  $z$  κατευθύνσεις),
- (ii) Την απόσταση κεραιάς  $d$ ,
- (iii) Το εύρος ζώνης συστήματος  $B$ ,
- (iv) Ένα σύνολο OFDM subcarriers  $K$  για το οποίο πρέπει να υπολογιστούν τα κανάλια και
- (v) Έναν αριθμό μονοπατιών καναλιού  $L$ .

Στην συνέχεια, ο κώδικας παράγει το  $M \times 1$  διάνυσμα καναλιού,  $h_k^{b,u}$ , για κάθε ενεργό BS  $b$  και ενεργό χρήστη  $u$  και σε κάθε subcarrier  $k \in K$ . Το διάνυσμα  $h_k^{b,u}$  του καναλιού υπολογίζεται, μέσω του κώδικα, με τον τύπο:

$$h_k^{b,u} = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{\rho_l}{K}} e^{j\left(\theta_l^{b,u} + \frac{2\pi k}{K} \tau_l^{b,u} B\right)} a(\varphi_{az}^{b,u}, \varphi_{el}^{b,u}) \quad (1)$$

όπου  $a(\varphi_{az}^{b,u}, \varphi_{el}^{b,u})$  είναι το διάνυσμα – έξοδος των BS και ορίζεται από τον τύπο

$$a(\varphi_{az}^{b,u}, \varphi_{el}^{b,u}) = a_z(\varphi_{el}^{b,u}) \otimes a_y(\varphi_{az}^{b,u}, \varphi_{el}^{b,u}) \otimes a_x(\varphi_{az}^{b,u}, \varphi_{el}^{b,u}) \quad (2)$$

με  $a_x(\cdot), a_y(\cdot), a_z(\cdot)$  οι απαντήσεις των BS σε μορφή διανύσματος, στις κατευθύνσεις  $x, y, z$  αντίστοιχα.

Εκτός από το set των διανυσμάτων των OFDM subcarriers για κάθε ενεργό BS  $b$  και χρήστη  $u$ , ο κώδικας εξάγει επίσης την τοποθεσία ( $p^u = [p_x, p_y, p_z]$ ) του χρήστη στο χώρο  $xyz$ . Αυτές οι πληροφορίες τοποθεσίας είναι σημαντικές, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, ως χαρακτηριστικό εισόδου σε ορισμένες εφαρμογές Machine Learning.

Για κάθε ενεργό BS  $b$  και χρήστη  $u$  λοιπόν, το dataset που παράγεται αρχικά περιλαμβάνει

- (i) Το channel vector για το συγκεκριμένο σύνολο subcarriers  $K$ , αποθηκευμένο ως  $M \times |K|$  μητρώο, στο οποίο η στήλη  $k$  αντιπροσωπεύει το κανάλι στον  $k$  – οστό καθορισμένο subcarrier και
- (ii) Τη θέση χρήστη  $p^u$ .

Η πρόσβαση στα δεδομένα (κανάλια και τοποθεσία) κάθε ζεύγους σταθμού βάσης – χρήστη γίνεται ως εξής:

$$DeepMIMO\_dataset\{\bar{b}\}.user\{\bar{u}\}.channel \quad (3)$$

$$DeepMIMO\_dataset\{\bar{b}\}.user\{\bar{u}\}.loc \quad (4)$$

Το  $DeepMIMO\_dataset\{\bar{b}\}.user\{\bar{u}\}.channel$  παράγει το vector του καναλιού για το ζεύγος base – station  $b$  και user  $u$  [41]. Αν, δηλαδή, έχουμε  $k$  subcarriers, τότε το  $DeepMIMO\_dataset\{\bar{b}\}.user\{\bar{u}\}.channel$  θα είναι ένα μητρώο μεγέθους  $M \times k$ , όπου το  $M$  είναι ο αριθμός των κεραιών στο base – station και  $k$  το πλήθος των subcarriers.

Μετά την επεξεργασία αυτών των δεδομένων, όπως απαιτείται και από τη χρήση τους ανάλογα, συνεχίζουμε με την παραγωγή των σημάτων που λαμβάνονται. Με τη γνώση του διανύσματος καναλιού μεταξύ του BS και του χρήστη, πράγμα που είναι στην πραγματικότητα η πληροφορία κατάστασης καναλιού (Channel State Information) για αυτές τις δύο παραμέτρους, το σήμα που λαμβάνεται από το BS και, πιο συγκεκριμένα, από τον subcarrier  $K$  υπολογίζεται κατόπιν ως εξής [42]:

$$y_k = \sum_{n=1}^N h_{k,n}^T x_{k,n} + v_k \quad (5)$$

Με άλλα λόγια, πρόκειται για το σήμα λήψης του καναλιού, αν θεωρήσουμε την ισχύ μετάδοσης του σήματος ως  $x$  dBm. Αν για παράδειγμα, λαμβάνουμε το  $y=hx$ , και αν  $x = 30$  dBm, τότε το dataset που παράγουμε μας δίνει το  $y$  ως έξοδο (σήμα λήψης για το κανάλι).

Αν, επίσης, ο χρήστης είναι εκτός πεδίου από την κεραία που θέτουμε ενεργή ή αν είναι πίσω από κτίρια, τότε όλα τα διανύσματα μεταξύ αυτού του χρήστη και της ενεργής κεραίας είναι όλα 0. Άρα, λοιπόν, το dataset μας δίνει όλα τα πιθανά διανύσματα μεταξύ ενός χρήστη και της κεραίας.

Κύριος στόχος ενός τέτοιου απλοποιημένου μοντέλου συστήματος είναι να επισημάνει τα κύρια χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες ενός περιβάλλοντος MIMO με πολλαπλές κεραίες που εξυπηρετούν πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα και παρατηρώντας την αλληλεπίδρασή τους, υπολογίζοντας βασικές μεταβλητές που καθορίζουν συνολικά τα κανάλια.

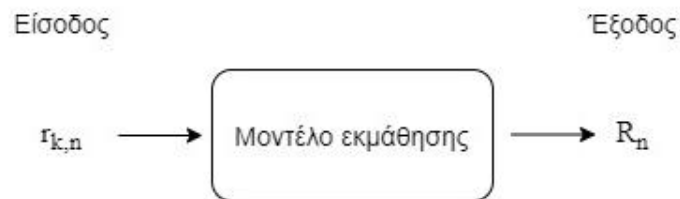
## 6.6 Πληροφορίες απόδοσης καναλιού

Στη συνέχεια, με βάση όλα τα δεδομένα που δίδονται στο σύστημα και αξιολογούνται από αυτό, το εργαλείο που χρησιμοποιούμε υπολογίζει τις πληροφορίες απόδοσης του καναλιού από την πλευρά του χρήστη. Πρώτον, χρησιμοποιούμε ένα εποπτευόμενο μοντέλο μάθησης που συνδέει τον αριθμό των OFDM subcarriers στα BS που επιλέξαμε να ενεργοποιήσουμε με το διάνυσμα σχηματισμού δέσμης που δημιουργήθηκε από το καθένα από αυτά.

Ο αλγόριθμος μάθησης σχηματισμού ακτινών υιοθετεί, λοιπόν, ένα εποπτευόμενο μοντέλο μάθησης για να χαρτογραφήσει όλα τα δεδομένα μεταξύ της OFDM ακολουθίας που ελήφθη σε έναν αριθμό BS και τον φορέα σχηματισμού δέσμης σε κάθε ένα από αυτά. Κάθε σημείο δεδομένων στο dataset που εκπαιδεύει αυτό το μοντέλο εκμάθησης αποτελείται από

- (i) Την είσοδο που είναι η OFDM ακολουθία σε 4 BS και
- (ii) Την έξοδο η οποία είναι το achievable rate των υποψηφίων διανυσμάτων διαμόρφωσης ακτίνας.

Στην Εικόνα 12 φαίνεται το εποπτευόμενο μοντέλο που μας δίνει το achievable rate του καναλιού από την ακολουθία  $r_{k,n}$ .



**Εικόνα 12: Το εποπτευόμενο μοντέλο εκμάθησης**

Δεδομένου του dataset, λοιπόν, μπορούμε να δημιουργήσουμε αυτές τις εισόδους και εξόδους για κάθε χρήστη  $u$  ως εξής. Για κάθε BS  $n$  (από τα ενεργά BS), και για κάθε subcarrier  $k$  (του εξεταζόμενου συνόλου subcarriers), έχουμε πρόσβαση στο διάνυσμα του καναλιού,  $h_k^{n,u}$ , από το dataset. Στη συνέχεια, λαμβάνουμε την είσοδο στο μοντέλο

εκμάθησης ως  $r_{k,n} = [h_k^{n,u}, 1]$ , δηλαδή το πρώτο στοιχείο του διανύσματος. Έπειτα, για κάθε BS  $n$  (των ενεργών BS), υπολογίζεται το achievable rate  $R_n$  όταν υιοθετείται το διάνυσμα σχηματισμού ακτινών  $f_p$  [43].

Με αυτόν τον αλγόριθμο σχηματοποίησης δέσμης, το εργαλείο καταφέρει να συλλέξει κάθε πληροφορία που είναι απαραίτητη για το κανάλι, ώστε να μπορέσουμε να συνεχίσουμε με τον υπολογισμό μιας πιο χρήσιμης παραγωγής για τα πειράματά μας. Αυτή η έξοδος είναι το rate του καναλιού για κάθε ζεύγος BS και χρήστη και αναφέρεται, επίσης, ως achievable rate του καναλιού. Το περιεχόμενό της μετρείται αρχικά σε bps / Hz και το υπολογίζουμε ως εξής: για κάθε BS  $n$  το achievable rate του καναλιού  $R_n^{(p)}$ , με ένα διάνυσμα σχηματισμού δέσμης  $f_p$ , δίνεται από τον τύπο:

$$R_n^{(p)} = \frac{1}{|K|} \sum_{k \in |K|} \log_2 \left( 1 + \text{SNR} |f_p^T h_k^{n,u}|^2 \right) \quad (6)$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το achievable rate του καναλιού (bps / Hz), το εργαλείο υπολογίζει με μια απλή διαδικασία το throughput του καναλιού [44], [45]. Αυτή η διαδικασία είναι ο αποκλεισμός του εύρους ζώνης από το dataset που έχουμε μέχρι εκείνο το σημείο.

Το dataset με το achievable rate του καναλιού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, περιέχει πληροφορίες με τη μορφή bps / Hz. Αυτό το περιεχόμενο δείχνει μια μάλλον διαφορετική πληροφορία από αυτό που θέλουμε, τη φασματική απόδοση (Spectral efficiency) του καναλιού. Η φασματική απόδοση συχνότερα εκφράζεται ως "bit ανά δευτερόλεπτο ανά hertz", ή bit / s / Hz. Μπορεί, επίσης, να οριστεί ως ο φασματικός ρυθμός δεδομένων (spectrum efficient) του καναλιού, διαιρεμένο με το εύρος ζώνης του καναλιού σε Hz:

$$\text{Spectral efficiency} = \text{channel data rate in bps} / \text{channel Bandwidth in Hz}$$

Στο παράδειγμά μας, το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 0,5 GHz και μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων 6 Mbps, για παράδειγμα. Στην περίπτωση αυτή, το αποδοτικό φάσμα του καναλιού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{Spectral efficiency} = 6 \times 10^6 / 2 \times 10^6 = 3 \text{ bits/second/Hz}$$

Αλλά η πληροφορία που χρειαζόμαστε για το Machine Learning κομμάτι στα πειράματά μας είναι σε bps. Επομένως, απλά εξαιρώντας το εύρος ζώνης από το achievable rate περιεχόμενο του dataset, λαμβάνουμε την πληροφορία που αναζητούμε.

Στη συνέχεια, με ένα νέο dataset που περιέχει το throughput του καναλιού για κάθε χρήστη, μπορούμε να αξιολογήσουμε την ποιότητα του καναλιού και να προτείνουμε διαφορετικές υπηρεσίες για αυτό. Οι προτεινόμενες υπηρεσίες βασίζονται σε γνωστά όρια διακίνησης που καθορίζονται σε όλο τον κόσμο και, φυσικά, εξαρτώνται από το ίδιο το κανάλι. Για να είμαστε ακριβέστεροι, αναζητούμε τιμές απόδοσης που χρησιμεύουν ως όρια για υπηρεσίες διαδικτύου (μουσική, βίντεο, παιχνίδια, κλήσεις).

## 6.7 Συλλογή απαιτήσεων ταχύτητας

Οι υπηρεσίες του διαδικτύου βασίζονται απόλυτα στην ταχύτητα του συστήματός μας. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα, τόσο περισσότερες υπηρεσίες μπορεί να υποστηρίξει το σύστημά μας. Οι υπηρεσίες διαδικτύου έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ταχύτητας σε bps. Έτσι, ανάλογα με την υπηρεσία που θέλουμε να υποστηρίξουμε στο σύστημά μας, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση που θέλουμε να απαιτούν οι χρήστες μας. Στη συνέχεια, η ερώτηση είναι απλή: πόση ταχύτητα / απόδοση χρειάζεται για μια συγκεκριμένη υπηρεσία.

Για τα πειράματά μας, θα συλλέξουμε τις απαιτήσεις ταχύτητας για 4 τύπους υπηρεσιών, όπως μουσική, βίντεο, παιχνίδια και κλήσεις. Κάθε μία από αυτές τις υπηρεσίες έχει διαφορετικές απαιτήσεις ταχύτητας και, φυσικά, κάποιος χρειάζεται περισσότερη ταχύτητα από την άλλη. Για παράδειγμα, μια απλή κλήση χρειάζεται λιγότερα bps από ένα τραγούδι, το οποίο χρειάζεται λιγότερα bps από ένα ολόκληρο βίντεο. Στη συνέχεια, φυσικά, το online gaming καταναλώνει περισσότερα bps από όλες τις άλλες τρεις υπηρεσίες.

Και πάλι, το ποσό των bps που κάθε υπηρεσία απαιτεί εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα είτε η ποιότητα της υπηρεσίας που ζητά ο χρήστης. Για παράδειγμα, ο χρήστης χρειάζεται περισσότερη παραγωγικότητα αν παρακολουθεί ταυτόχρονα περισσότερα από ένα βίντεο ή αν ακούει περισσότερα από ένα τραγούδια.

Για να καταστήσουμε τα πειράματά μας απλούστερα και ευκολότερα κατανοητά, θα λάβουμε απλώς υπόψη την ελάχιστη συνιστώμενη ταχύτητα για κάθε υπηρεσία, υποθέτοντας ότι οι χρήστες έχουν απλές ανάγκες και κάνουν ένα πράγμα τη φορά. Θα σκεφτούμε τις υπηρεσίες ως τη μια ανεξάρτητη από την άλλη.

Με όλα αυτά κατά νου, συλλέγουμε τη συνιστώμενη ταχύτητα για τις 4 υπηρεσίες μουσικής, βίντεο, τυχερών παιχνιδιών και κλήσεων όπως ακολουθήσαμε. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα προτεινόμενα όρια throughput για τις συγκεκριμένες υπηρεσίες internet:



<b>Service</b>	<b>Recommended Throughput in bps</b>
<b>Call (VoIP)</b>	100 kbps
<b>Music</b>	160 kbps
<b>Video</b>	500 kbps
<b>Gaming</b>	6000 kbps

Με βάση τα παραπάνω όρια throughput, θα δημιουργήσουμε το πρόβλημα ταξινόμησης στο Machine Learning κομμάτι της προσομοίωσής μας.

Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιήσουμε αυτά τα όρια ως ταξινόμηση για το dataset που λαμβάνουμε. Το ίδιο το σύνολο δεδομένων, όπως υπογραμμίσαμε προηγουμένως, περιέχει την πληροφορία throughput του καναλιού για κάθε χρήστη (γραμμές του μητρώου), σύμφωνα με το codebook που δημιουργήθηκε από τα BS (σειρές της μήτρας) [46]. Θεωρώντας ότι κάθε γραμμή του πίνακα είναι χρήστης και ότι οι στήλες είναι οι 9 ιδιότητες του χρήστη, οι οποίες είναι προκαθορισμένες από το codebook, κάνουμε υποθέσεις και προβλέπουμε την κατάσταση throughput κάθε χρήστη και την συνιστώμενη υπηρεσία για τον χρήστη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 7.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας – 1<sup>ο</sup> μέρος εξομοίωσης

Επιλέγουμε αρχικά το σενάριο ανίχνευσης ακτινών που μας ενδιαφέρει, από τα διαθέσιμα σενάρια που παρέχονται από την Remcom Wireless InSite [38]. Οπότε για την περίπτωση μας, επιλέγουμε ένα σενάριο ανίχνευσης ακτινών σε εξωτερικό περιβάλλον που εξομοιώνει ένα πραγματικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας. Το σενάριο αυτό είναι το “O1 ray tracing scenario” από τα διαθέσιμα στην λίστα των σεναρίων και απεικονίζεται στην Εικόνα 10, με το σταυροδρόμι, τα κτίρια και τους χρήστες κατά μήκος του δρόμου.

Το “O1 ray tracing scenario” περιέχει όλα τα κατάλληλα δεδομένα που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που μελετάμε, όπως αυτά περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, και σε μορφή εισόδου στον κώδικα της MATLAB (σταθμοί βάσης, χρήστες, κτίρια, υλικά).

Πιο συγκεκριμένα, κάθε σενάριο ανίχνευσης ακτινών περιέχει ένα αρχείο MATLAB (.mat) για τις θέσεις όλων των αντικειμένων στον χώρο, ένα αρχείο με τις παραμέτρους που δίνει ο ερευνητής και 18 διπλά αρχεία, δύο δηλαδή για κάθε σταθμό βάσης, όπου περιγράφονται τα κανάλια και τα χαρακτηριστικά των κεραιών σε κάθε σταθμό βάσης. Τα αρχεία αυτά είναι υποφάκελοι στον κώδικα της MATLAB ώστε να τα διαβάσει η εφαρμογή στην εκκίνηση των εξομοιώσεων.

Προετοιμάζουμε το περιβάλλον πάνω στο οποίο θα γίνουν οι εξομοιώσεις, δίνοντας στον κώδικα τις κατάλληλες παραμέτρους για τα πειράματα. Αναλόγως του πλήθους των δεδομένων εισόδου, τα δεδομένα στην έξοδο από την εκτέλεση του κώδικα μπορεί να απαιτούν μεγάλη υπολογιστική δύναμη. Στην περίπτωση μας, τα δεδομένα εισόδου προσαρμόζονται στις ανάγκες ενός προσωπικού υπολογιστή και, άρα, οι παράμετροι που δίνουμε έχουν μειωμένο αριθμό ενεργών σταθμών βάσης και μειωμένο αριθμό ενεργών χρηστών.

Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο των αναγκών του προσωπικού υπολογιστή, θέσαμε τις παρακάτω τιμές:

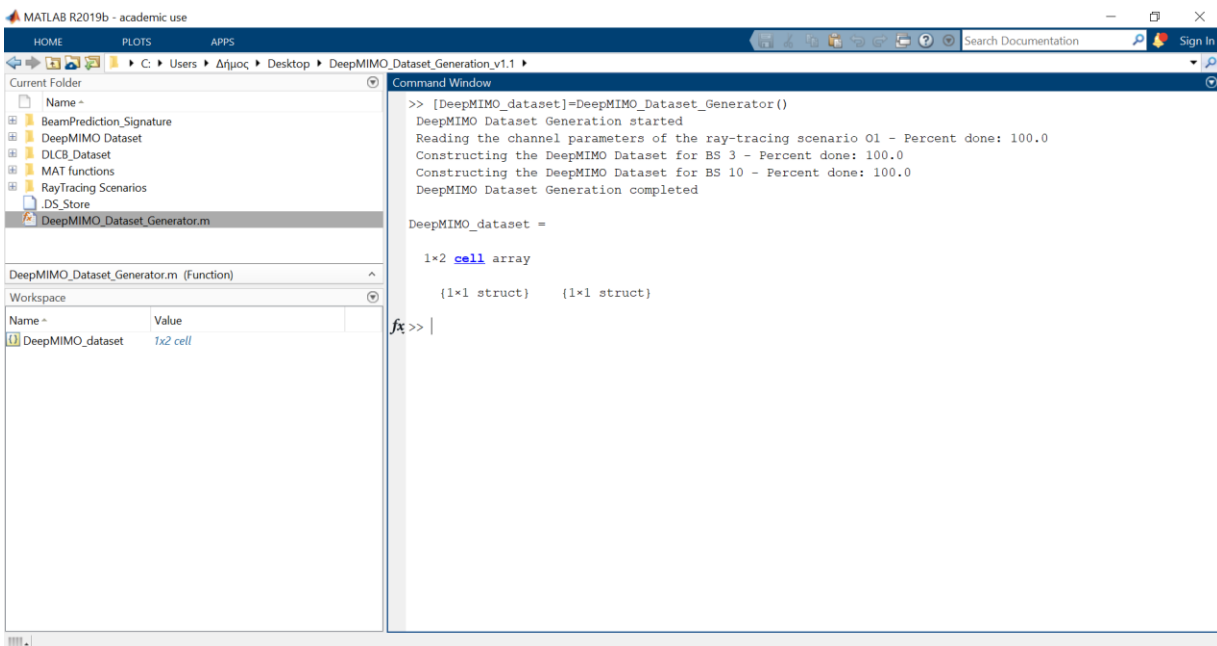
Dataset Parameters	Τιμές
active_BS	[3,10]

active_user_first and active_user_last	1600 and 1620
num_ant_x, num_ant_y, and num_ant_z	[1, 32, 8]
ant_spacing	0.5
bandwidth	0.5
num_OFDM, OFDM_sampling_factor, OFDM_limit	[1024, 1, 64]
num_paths	3

Δίνουμε τις παραπάνω τιμές στις αντίστοιχες παραμέτρους στο αρχείο κώδικα DeepMIMO\_Dataset\_Generation.m. Έπειτα, καλώντας την συνάρτηση

`[DeepMIMO_dataset]=DeepMIMO_Dataset_Generator()`

τρέχουμε την πρώτη σειρά πειραμάτων και παίρνουμε ως έξοδο το πρώτο αρχείο .mat σε μορφή μητρώου, το DeepMIMO\_dataset, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13:



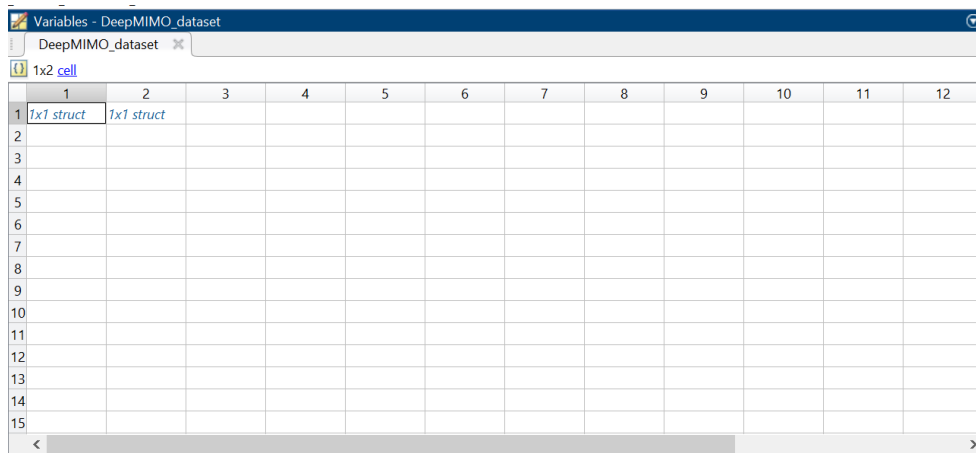
**Εικόνα 13: Δημιουργία του DeepMIMO\_dataset με το Channel State Information περιεχόμενο.**

Το παραπάνω dataset περιέχει στην πρώτη του μορφή δύο κελιά, ένα για κάθε σταθμό βάσης. Κάθε κελί για τον σταθμό βάσης περιέχει, με τη σειρά του, ένα κελί για κάθε χρήστη

και στην περίπτωση μας συνολικά 3801 κελιά (21 σειρές χρηστών, από 181 χρήστες η κάθε σειρά).

Στην συνέχεια, κάθε κελί για κάθε χρήστη περιέχει δυο κελιά, ένα για την τοποθεσία του χρήστη στους άξονες  $x - y - z$  και ένα για το CSI του συγκεκριμένου χρήστη σχετικά με το κανάλι από το οποίο εξυπηρετείται. Η τοποθεσία του χρήστη ως προς τους άξονες  $x - y - z$  δείχνει τη σχετική θέση του χρήστη στον χώρο. Όσον αφορά στο κελί με την πληροφορία CSI για κάθε χρήστη, παίρνουμε ένα μητρώο  $M \times K$ , όπου  $M$  ο αριθμός των κεραιών στον αντίστοιχο σταθμό βάσης και  $K$  ο αριθμός των OFDM subcarriers. Το μητρώο αυτό περιέχει διανύσματα σε μορφή μιγαδικών που είναι μια ένδειξη μέτρησης της σχέσης του χρήστη με την αντίστοιχη κεραιά και τον αντίστοιχο subcarrier.

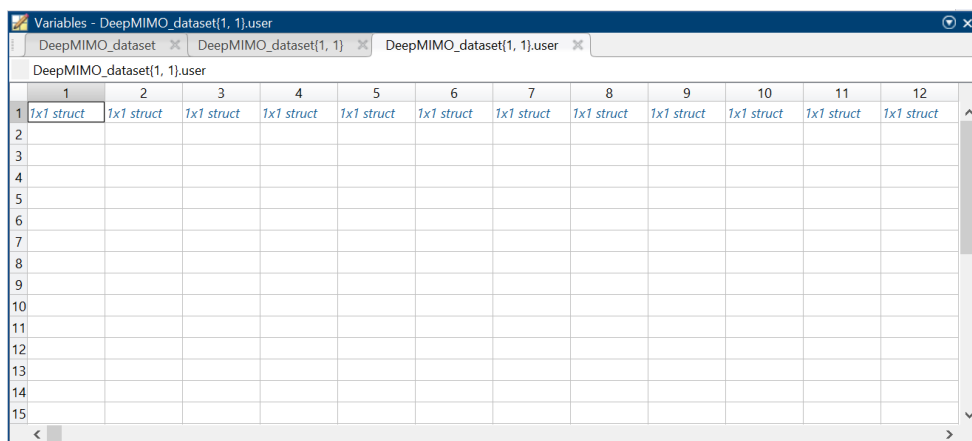
Παρακάτω δίνονται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα από τα βήματα της εξομοίωσης.



The screenshot shows a MATLAB Variables window titled 'Variables - DeepMIMO\_dataset'. The window displays a table with 12 columns and 15 rows. The first two columns are highlighted, and the first row contains the text '1x1 struct' in both columns. The rest of the table is empty.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1x1 struct	1x1 struct										
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

Εικόνα 14: Στιγμιότυπο με τα πρώτα 2 κελιά, 1 για κάθε σταθμό βάσης



The screenshot shows a MATLAB Variables window titled 'Variables - DeepMIMO\_dataset(1, 1).user'. The window displays a table with 12 columns and 15 rows. The first row contains the text '1x1 struct' in all 12 columns. The rest of the table is empty.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

Εικόνα 15: Στιγμιότυπο με τα 3801 κελιά, 1 για κάθε χρήστη

Field	Value
channel	256x64 comp...
loc	[242.4230,61...

Εικόνα 16: Στιγμιότυπο με τα 2 κελιά πληροφορίας του 1<sup>ου</sup> χρήστη, για τον 1<sup>ο</sup> σταθμό βάσης

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	242.4230	616.9710	2									
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

Εικόνα 17: Στιγμιότυπο με την τοποθεσία στους άξονες  $x - y - z$  του 1<sup>ου</sup> χρήστη, για τον 1<sup>ο</sup> σταθμό βάσης.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6.2735e-08 + 1.4310e-06i	2.2003e-07...	3.8762e-07...	5.3110e-07...	6.7486e-07...	8.2296e-07...	9.4146e-07...	1.0555e-06...	1.1689e-06...	1.2482e-06...	1.3197e-06...
2	-1.2422e-06 - 7.3493e-07i	-1.3154e-0...	-1.3852e-0...	-1.4185e-0...	-1.4409e-0...	-1.4580e-0...	-1.4375e-0...	-1.4062e-0...	-1.3697e-0...	-1.2966e-0...	-1.2147e-0...
3	1.3112e-06 - 6.4619e-07i	1.2301e-06...	1.1466e-06...	1.0294e-06...	9.0567e-07...	7.8330e-07...	6.3154e-07...	4.7866e-07...	3.3206e-07...	1.6158e-07...	-3.7797e-0...
4	-1.8075e-07 + 1.4702e-06i	-1.3859e-0...	1.4026e-07...	3.1220e-07...	4.7401e-07...	6.1726e-07...	7.7243e-07...	9.1129e-07...	1.0264e-06...	1.1483e-06...	1.2488e-06...
5	-1.1430e-06 - 9.6558e-07i	-1.2463e-0...	-1.3208e-0...	-1.3982e-0...	-1.4518e-0...	-1.4744e-0...	-1.4979e-0...	-1.4959e-0...	-1.4625e-0...	-1.4302e-0...	-1.3727e-0...
6	1.4408e-06 - 4.3801e-07i	1.3853e-06...	1.2990e-06...	1.2156e-06...	1.1106e-06...	9.7841e-07...	8.5319e-07...	7.1044e-07...	5.4588e-07...	3.9374e-07...	2.2943e-07...
7	-4.0757e-07 + 1.4584e-06i	-2.4356e-0...	-6.2902e-0...	-9.9448e-08...	2.6684e-07...	4.4414e-07...	5.9663e-07...	7.4828e-07...	9.0342e-07...	1.0278e-06...	1.1463e-06...
8	-1.0231e-06 - 1.1319e-06i	-1.1421e-0...	-1.2603e-0...	-1.3434e-0...	-1.4157e-0...	-1.4832e-0...	-1.5127e-0...	-1.5296e-0...	-1.5399e-0...	-1.5114e-0...	-1.4705e-0...
9	1.5173e-06 - 2.6280e-07i	1.4767e-06...	1.4309e-06...	1.3477e-06...	1.2533e-06...	1.1563e-06...	1.0252e-06...	8.8742e-07...	7.5128e-07...	5.8616e-07...	4.2025e-07...
10	-5.9663e-07 + 1.4320e-06i	-4.3004e-0...	-2.7160e-0...	-9.0459e-08...	8.6063e-08...	2.4820e-07...	4.2653e-07...	5.9328e-07...	7.3953e-07...	8.9582e-07...	1.0342e-06...
11	-8.8762e-07 - 1.2757e-06i	-1.0274e-0...	-1.1404e-0...	-1.2582e-0...	-1.3543e-0...	-1.4199e-0...	-1.4867e-0...	-1.5286e-0...	-1.5380e-0...	-1.5474e-0...	-1.5306e-0...
12	1.5459e-06 - 6.3447e-08i	1.5309e-06...	1.4828e-06...	1.4350e-06...	1.3635e-06...	1.2613e-06...	1.1625e-06...	1.0429e-06...	8.9705e-07...	7.5925e-07...	6.0552e-07...
13	-7.6627e-07 + 1.3302e-06i	-6.1416e-0...	-4.4050e-0...	-2.8051e-0...	-1.1161e-0...	7.2159e-08...	2.3566e-07...	4.0195e-07...	5.7630e-07...	7.2393e-07...	8.6858e-07...
14	-7.1216e-07 - 1.3475e-06i	-8.5614e-0...	-1.0031e-0...	-1.1183e-0...	-1.2245e-0...	-1.3289e-0...	-1.3972e-0...	-1.4536e-0...	-1.5050e-0...	-1.5181e-0...	-1.5181e-0...
15	1.5116e-06 + 1.1881e-07i	1.5122e-06...	1.5079e-06...	1.4655e-06...	1.4100e-06...	1.3505e-06...	1.2549e-06...	1.1494e-06...	1.0429e-06...	9.0416e-07...	7.6031e-07...

**Εικόνα 18: 1<sup>ο</sup> dataset.**  
**Στιγμιότυπο με το CSI του 1<sup>ου</sup> χρήστη, για τον 1<sup>ο</sup> σταθμό βάσης**

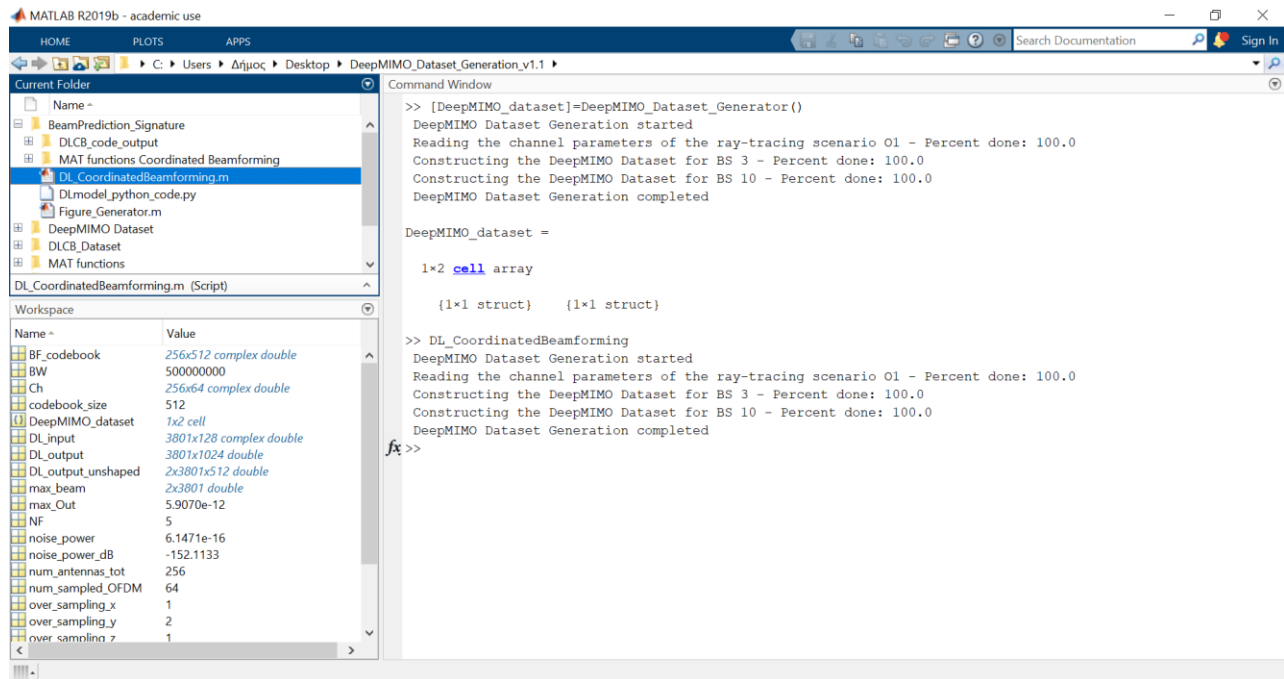
## 7.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας – 2<sup>ο</sup> μέρος εξομοίωσης

Στην συνέχεια, αφού έχουμε παράξει το dataset με το CSI περιεχόμενο για κάθε χρήστη σε κάθε σταθμό βάσης, το χρησιμοποιούμε ως είσοδο στο 2<sup>ο</sup> μέρος της εξομοίωσης, που είναι η χρήση Machine Learning τεχνικών για την παραγωγή του dataset με την πληροφορία throughput που θέλουμε για το τελικό μέρος των πειραμάτων.

Έτσι, τρέχουμε την συνάρτηση

DL\_CoordinatedBeamforming.m

για να παράγουμε αρχικά τις εισόδους του Machine Learning και μετά τις εξόδους του, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Στιγμιότυπο παραγωγής εισόδων και εξόδων του 2<sup>ου</sup> μέρους εξομοίωσης

Από αυτό το βήμα παράγονται όλα τα χρήσιμα αρχεία που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την περιγραφή του καναλιού και της σχέσης χρήστη – σταθμού βάσης. Τα αρχεία που παράγονται φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 20.

Workspace	
Name ^	Value
BF_codebook	256x512 complex double
BW	500000000
Ch	256x64 complex double
codebook_size	512
DeepMIMO_dataset	1x2 cell
DL_input	3801x128 complex double
DL_output	3801x1024 double
DL_output_unshaped	2x3801x512 double
max_beam	2x3801 double
max_Out	5.9070e-12
NF	5
noise_power	6.1471e-16
noise_power_dB	-152.1133
num_antennas_tot	256
num_sampled_OFDM	64
over_sampling_x	1
over_sampling_y	2
over_sampling_z	1
params	1x1 struct
Process_Gain	10
t	2
u	3801
val	1

Εικόνα 20: Παραγόμενα αρχεία 2<sup>ου</sup> μέρους εξομοίωσης

Εκτός από χρήσιμα, για την δική μας περίπτωση, αρχεία, όπως το codebook, με βάση το οποίο καθορίζεται η σειρά τοποθέτησης της πληροφορίας στο τελικό dataset για το throughput από την πλευρά του χρήστη, και το DL\_input, που είναι το επεξεργασμένο dataset με μιγαδική πληροφορία για το throughput, παράγονται και άλλα αρχεία με πληροφορία σχετική με τις ιδιότητες του καναλιού [47].

Τέτοιες ιδιότητες, για παράδειγμα, είναι η μέγιστη ισχύς ακτίνας [48], [49] για κάθε χρήστη, η ισχύς του θορύβου καναλιού και το gain της μέτρησης για την εξομοίωση. Το αρχείο, όμως, που μας ενδιαφέρει περισσότερο από όλα, είναι το DL\_output, που είναι και το τελικό dataset.

Το DL\_output περιέχει την πληροφορία spectral efficiency που έχουμε αναφέρει παραπάνω και, ουσιαστικά, είναι το dataset που χρησιμοποιούμε για να βρούμε το dataset με το throughput από την μεριά του χρήστη για το κανάλι. Έχει μέγεθος  $U \times C$ , όπου  $U$  το πλήθος χρηστών και  $C$  το πλήθος στηλών που δίνεται από το codebook (στην δικιά μας περίπτωση είναι  $3801 \times 1024$ ).

Στην συνέχεια, διαιρούμε με το μήκος κύματος του καναλιού για να παράγουμε ένα μητρώο ίδιου μεγέθους, αλλά με πληροφορία throughput (bps).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0.0043	0.0042	0.0040	0.0035	0.0026	0.0014	4.5777e-04	1.9141e-04	3.3864e-04	2.6502e-04	1.3117e-04	2.4093e-04	1
2	0.0036	0.0035	0.0034	0.0030	0.0022	0.0012	3.5572e-04	1.0132e-04	2.7955e-04	2.7882e-04	1.2975e-04	1.7568e-04	1
3	0.0032	0.0032	0.0031	0.0027	0.0020	0.0012	3.7907e-04	9.3598e-05	2.0057e-04	2.1394e-04	1.1633e-04	1.5377e-04	1
4	0.0028	0.0028	0.0026	0.0023	0.0017	9.3961e-04	3.1376e-04	1.3057e-04	2.2605e-04	1.8556e-04	9.6153e-05	1.6835e-04	1
5	0.0023	0.0023	0.0022	0.0019	0.0014	8.0822e-04	2.7928e-04	1.2708e-04	2.3954e-04	2.3354e-04	1.3683e-04	1.5482e-04	1
6	0.0019	0.0018	0.0018	0.0016	0.0012	7.6805e-04	3.3301e-04	1.3894e-04	1.5807e-04	1.6263e-04	1.4532e-04	1.8222e-04	1
7	0.0014	0.0014	0.0013	0.0012	8.9721e-04	5.5811e-04	2.8248e-04	1.9724e-04	2.5199e-04	2.5821e-04	2.2772e-04	2.5448e-04	2
8	0.0010	0.0010	9.7866e-04	8.9941e-04	7.5905e-04	5.7956e-04	4.2488e-04	3.6473e-04	3.8573e-04	3.9624e-04	3.8478e-04	3.4372e-04	2
9	8.6623e-04	8.5231e-04	8.5231e-04	8.4014e-04	8.0361e-04	7.2708e-04	5.6879e-04	4.4181e-04	4.7486e-04	6.4532e-04	7.0620e-04	6.1401e-04	5
10	0.0026	0.0026	0.0026	0.0024	0.0022	0.0020	0.0018	0.0018	0.0017	0.0014	0.0014	0.0015	
11	0.0117	0.0115	0.0109	0.0097	0.0075	0.0051	0.0033	0.0029	0.0031	0.0029	0.0027	0.0030	
12	0.0276	0.0272	0.0257	0.0222	0.0167	0.0100	0.0049	0.0038	0.0047	0.0044	0.0043	0.0051	
13	0.0150	0.0147	0.0138	0.0119	0.0089	0.0053	0.0027	0.0020	0.0025	0.0024	0.0020	0.0019	
14	0.0092	0.0091	0.0085	0.0073	0.0053	0.0029	0.0012	8.2210e-04	0.0011	9.6960e-04	8.1776e-04	9.6526e-04	8
15	0.0066	0.0065	0.0060	0.0051	0.0036	0.0019	6.9480e-04	4.7505e-04	6.3383e-04	5.0935e-04	5.3221e-04	6.6431e-04	4

Εικόνα 21: Στιγμιότυπο με το παραγόμενο αρχείο DL\_output

Παράλληλα με την παραγωγή του κατάλληλου μητρώου, ελέγχουμε και πόσο αποδοτικό είναι αυτό το κομμάτι της προσομοίωσης σε σχέση με την μέγιστη απόδοση που μπορεί να έχει ένα φυσικό σύστημα με κανονικές μετρήσεις.



Πιο συγκεκριμένα, εκτελείται ο κώδικας python (machine learning) για να χτιστεί, εκπαιδευτεί και δοκιμαστεί το μοντέλο μηχανικής μάθησης, με χρήση των εργαλείων Python 3.6, Keras, and Tensorflow [50]. Τότε το εργαλείο παράγει αρκετά ακόμα αρχεία μετρήσεων της ποιότητας των καναλιών και του συστήματός μας και, επίσης, ενός διαγράμματος της απόδοσής του.

Τα περισσότερα από αυτά τα αρχεία είναι προγενέστερα του DL\_output και είναι χρήσιμα για την παραγωγή της τελικής του μορφής. Δεν εμφανίζονται στο προηγούμενο βήμα γιατί δεν χρησιμοποιούνται περαιτέρω στην εφαρμογή μας.

```

MATLAB R2019b - academic use
HOME PLOTS APPS
C:\Users\Δήμος\Desktop\DeepMIMO_Dataset_Generation_v1.1
Current Folder Command Window

Workspace
Name Value
ach_rate_DL 1x15 double
ach_rate_opt 1x15 double
alpha 1.0472
BF_codebook 256x512 complex double
BW 500000000
Ch 256x64 complex double
channel 256x64 complex double
codebook_size 512
count 760
DeepMIMO_dataset 1x2 cell
distance_user 10
DL_input 3801x128 complex double
DL_output 3801x1024 double
DL_output_unshaped 2x3801x512 double
DL_size_array 1x15 double
DL_size_point 15
eff_channel_opt 2x64 complex double
eff_channel_pred 2x64 complex double
max_beam 2x3801 double
max_o 1
max_Out 5.9070e-12
max_p 0.5513
NF 5
noise_power 6.1471e-16
noise_power_dB -152.1133
num_antennas_tot 256
num_beams 512
num_DL_size_points 15
num_sampled_OFDM 64
opt_beam_idx 295

>> [DeepMIMO_dataset]=DeepMIMO_Dataset_Generator()
DeepMIMO Dataset Generation started
Reading the channel parameters of the ray-tracing scenario 01 - Percent done: 100.0
Constructing the DeepMIMO Dataset for BS 3 - Percent done: 100.0
Constructing the DeepMIMO Dataset for BS 10 - Percent done: 100.0
DeepMIMO Dataset Generation completed

DeepMIMO_dataset =

1x2 cell array

    {1x1 struct}    {1x1 struct}

>> DL_CoordinatedBeamforming
DeepMIMO Dataset Generation started
Reading the channel parameters of the ray-tracing scenario 01 - Percent done: 100.0
Constructing the DeepMIMO Dataset for BS 3 - Percent done: 100.0
Constructing the DeepMIMO Dataset for BS 10 - Percent done: 100.0
DeepMIMO Dataset Generation completed

>> Figure_Generator
DeepMIMO Dataset Generation started
Reading the channel parameters of the ray-tracing scenario 01 - Percent done: 100.0
Constructing the DeepMIMO Dataset for BS 3 - Percent done: 100.0
Constructing the DeepMIMO Dataset for BS 10 - Percent done: 100.0
DeepMIMO Dataset Generation completed

fx >>

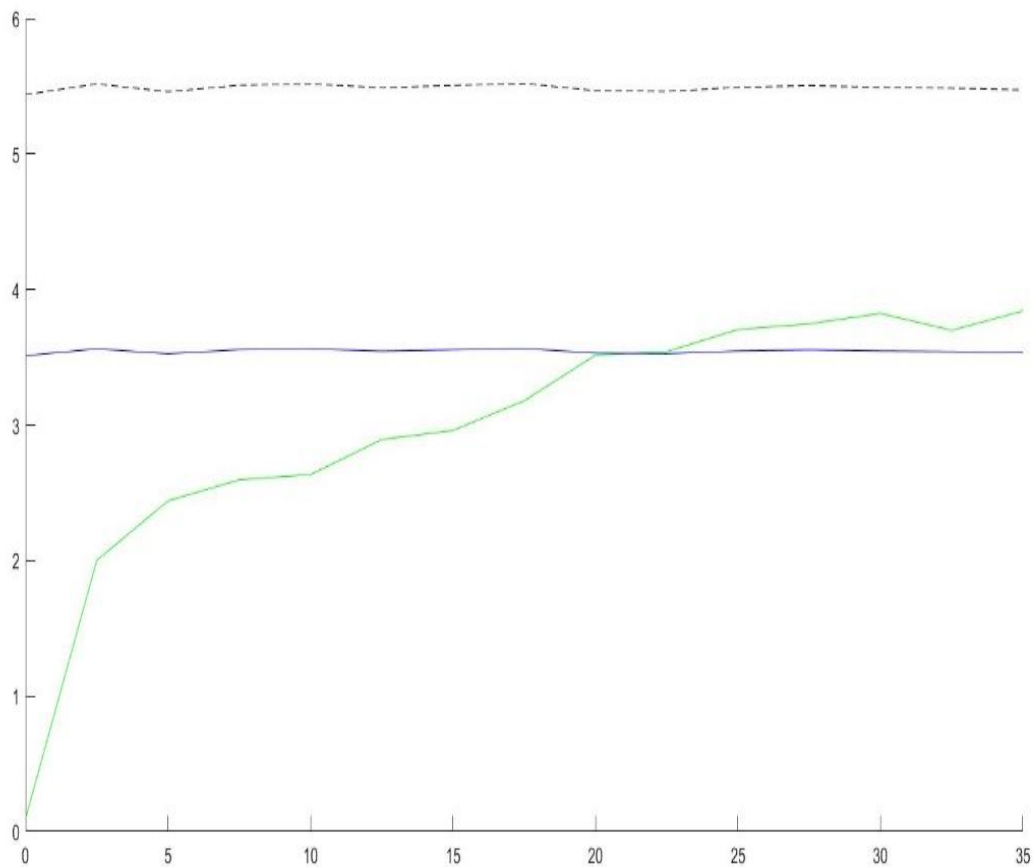
```

Workspace	
Name ^	Value
num_DL_size_points	15
num_sampled_OFDM	64
opt_beam_idx	295
over_sampling_x	1
over_sampling_y	2
over_sampling_z	1
overhead_DL	0.9993
overhead_opt	0.6458
params	<i>1x1 struct</i>
Pn	-117.0103
predicted_beam_idx	294
Process_Gain	10
saved_filename	'DLCB_code_output/DL_Result15'
SNR	5.0238e+11
t	2
Tc	0.0145
Tc_const	0.3212
theta_user	0.0556
Tt	1.0000e-05
TX	<i>15x2 cell</i>
TX1Opt_Beams	<i>760x512 double</i>
TX1Pred_Beams	<i>760x512 single</i>
TX2Opt_Beams	<i>760x512 double</i>
TX2Pred_Beams	<i>760x512 single</i>
u	3801
user_index	<i>1x760 int32</i>
user_indices	<i>15x760 int32</i>
v	22.2222
v_mph	50
val	1

Εικόνα 22: Στιγμιότυπο με τα παραγόμενα αρχεία του machine learning βήματος

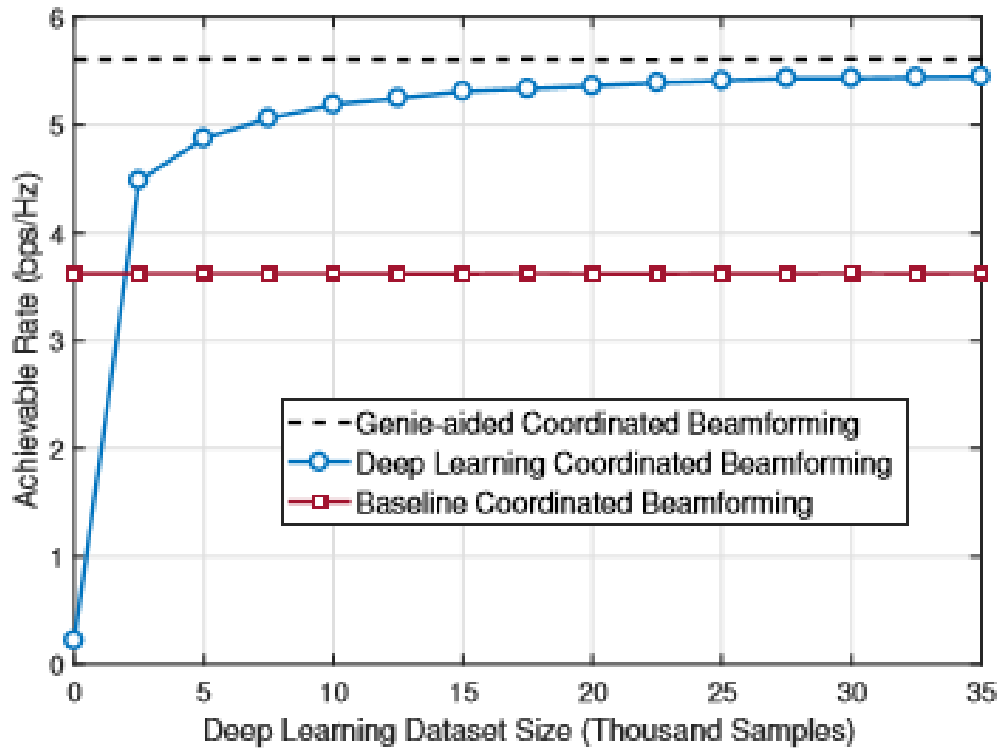
Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 23) παρουσιάζεται το achievable rate (άξονας x) της εξομοίωσής μας, σε σχέση με τα δείγματα που χρησιμοποιήσαμε για να το παράγουμε (άξονας y).

- **Με διακεκομμένη γραμμή:** το μέγιστο achievable rate του αντίστοιχου πραγματικού συστήματος με τις βέλτιστες μετρήσεις και παραμέτρους.
- **Με μωβ γραμμή:** το βέλτιστο achievable rate ιδανικά για ολόκληρο το πλήθος χρηστών στην κάθε χρονική στιγμή.
- **Με πράσινη γραμμή:** το achievable rate στην δική μας περίπτωση, με 21 σειρές χρηστών (3801 χρήστες) και δύο ενεργούς σταθμούς βάσης ([40], [47]).



**Εικόνα 23: Achievable rate του συστήματός μας, ανάλογα με τα δείγματα σε χιλιάδες ([40], [47])**

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε πως υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης των αποτελεσμάτων και της απόδοσης του συστήματός μας. Η χαμηλή αυτή απόδοση οφείλεται στο γεγονός ότι δεν συμπεριλάβαμε στα πειράματά μας μεγάλο αριθμό σταθμών βάσεων και κυρίως όχι μεγάλο αριθμό χρηστών. Αν αυξηθούν τα δείγματα, είναι φυσιολογικό επακόλουθο πως το σύστημα θα γίνει αυτόματα πιο αποδοτικό, καθώς εξορισμού έχει δημιουργηθεί για μεγάλο αριθμό χρηστών, σταθμών βάσης, κεραιών και subcarriers. Να επαναλάβουμε όμως πως στην περίπτωση αυτή απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη και φυσικά το σύστημα έχει μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα, κάτι που το καθιστά αυτόματα πιο ακριβό σε υλοποίηση. Για λόγους απλότητας πειραμάτων, λήφθηκαν υπόψιν 21 σειρές χρηστών (3.801 χρήστες) και δύο σταθμοί βάσης.



Εικόνα 24: Πληρέστερη εξομοίωση που πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες, με 301 σειρές (54.481 χρήστες) και 4 σταθμούς βάσης, αποτελέσματα από τη δημοσίευση [41]. ([39][40][41][42][43])

Το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανώς πληρέστερο, σε σχέση με το διάγραμμα των εξομοιώσεων της εργασίας αυτής. Για την παραγωγή του παραπάνω διαγράμματος, στο [41], χρησιμοποιήθηκαν 201 σειρές χρηστών (36.381 χρήστες), πολλές περισσότερες από ότι στην δική μας περίπτωση, και 4 σταθμοί βάσης. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση αυτής της περίπτωσης πειραμάτων πλησιάζει περισσότερο τη μέγιστη απόδοση ενός αντίστοιχου πραγματικού συστήματος με τις ίδιες συνθήκες. Η καμπύλη απόδοσης μεγαλώνει εκθετικά αμέσως μόλις αυξηθούν τα δείγματα των χρηστών και φτάνει σε μια βέλτιστη κατάσταση κοντά στη μέγιστη απόδοση με μερικές χιλιάδες δείγματα.

Τέλος, για την εφαρμογή machine learning που προτείνουμε, θα έχουμε:

- Λαμβάνουμε το DL\_output και αφαιρούμε το μήκος κύματος από το dataset, διαιρώντας κάθε κελί με το μήκος κύματος του συστήματος.

- Κάθε γραμμή του παραγόμενου dataset είναι ένας χρήστης (entity για το machine learning) από τους 3801 του συστήματός μας.
- Κάθε στήλη αποτελεί ιδιότητες (properties / attributes του χρήστη για το machine learning).
- Το τελευταίο βήμα επεξεργασίας του dataset είναι η προσθήκη, στην τελευταία στήλη του μητρώου, των κλάσεων που έχουμε δημιουργήσει με τις υπηρεσίες του διαδικτύου.
- Το τελικό dataset περιέχει το throughput του καναλιού από τη μεριά του χρήστη σε κάθε σταθμό βάσης και subcarrier των κεραίων του σταθμού βάσης και στην τελευταία στήλη το απαιτούμενο throughput για κάθε υπηρεσία που προτείνουμε, όπως φαίνεται και στις τιμές του παρακάτω πίνακα:

Service	Recommended Throughput in bps
Call(VoIP)	100 kbps
Music	160 kbps
Video	500 kbps
Gaming	6000 kbps

- Στην συνέχεια, αυτό το ολοκληρωμένο dataset δίνεται ως είσοδος στο machine learning. Αυτό στην συνέχεια, προβλέπει και προτείνει την κατάλληλη υπηρεσία για κάθε χρήστη από τις 4 που προτείνουμε, ανάλογα με το throughput που λαμβάνει ο χρήστης από το κανάλι.

Τέλος, λοιπόν, με την μέθοδο αυτή θα λαμβάνουμε μια ακριβή πρόβλεψη της προτεινόμενης υπηρεσίας διαδικτύου, από τη μεριά του χρήστη. Εμείς προτείνουμε τέσσερις υπηρεσίες, αλλά είναι κατανοητό πως μια μελλοντική υλοποίηση θα μπορούσε να περιλαμβάνει ευρύτερο εύρος throughput, οπότε και να προτείνει περισσότερες υπηρεσίες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάστηκε και αναπτύχθηκε μια μέθοδος δημιουργίας ενός συνόλου δεδομένων (dataset) για ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G. Το σύνολο δεδομένων αυτό έχει το χαρακτηριστικό ότι θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω σε Machine Learning τεχνικές, με σκοπό την αυτοματοποίηση και επιτάχυνση του δικτύου.

Βασική ιδέα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε είναι η εύρεση ενός δικτυακού μοντέλου που εξομοιώνει αληθινές συνθήκες κινητής τηλεφωνίας και που παράγει και μαθαίνει τα κατάλληλα δεδομένα εξόδου μεταξύ καναλιού και χρήστη. Αυτή η ιδέα περιστρέφεται κυρίως γύρω από το γεγονός ότι τα σήματα που μεταδίδονται και λαμβάνονται από τους σταθμούς βάσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την αλληλεπίδραση του χρήστη με τους σταθμούς βάσης όσο και από τον περιβάλλοντα χώρο.

Βασικοί άξονες της ιδέας της εξομοίωσής μας ήταν:

- Εξομοίωση πραγματικού χρόνου σε περιβάλλον MATLAB ενός δικτύου 5G που συμπεριλαμβάνει MIMO τεχνολογία.
- Εξαγωγή ενός MIMO dataset βασισμένο στις παραμέτρους που δίνουμε ως input στην παραπάνω εξομοίωση.
- Χρήση του παραπάνω MIMO dataset για την δημιουργία machine learning αλγορίθμου ο οποίος θα παράγει, μετά το πέρας εκτέλεσής του, την προσδοκώμενη έξοδο.

Με άλλα λόγια, αυτό που καταφέρνουμε με τα παραπάνω πειράματα είναι ουσιαστικά η δημιουργία, βήμα-βήμα, μιας διαδικασίας αναπαραγωγής ενός ψηφιακού περιβάλλοντος που αντικατοπτρίζει με ακριβή τρόπο ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς, με τη χρήση της τεχνολογίας MIMO. Με τη δημιουργία αυτού του περιβάλλοντος, είναι στην συνέχεια δυνατή η εξαγωγή σημαντικών αποτελεσμάτων, τα οποία ορίζουν το σύστημα μας και ταυτόχρονα ορίζονται από αυτό. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν διάφορες μορφές: είναι είτε χαρακτηριστικά του συστήματος είτε μετρήσεις αυτού. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι αποτελέσματα τα οποία μπορεί να αναπαράγει και να χρησιμοποιήσει ο ερευνητής κάθε φορά προς όφελος του και ανάλογα με την έρευνα και τον τομέα που τον ενδιαφέρει.

Στην παραπάνω εργασία, στόχος είναι η παραγωγή συγκεκριμένης πληροφορίας, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω σε έναν machine learning αλγόριθμο. Η επιθυμητή αυτή πληροφορία είναι γνωστή εξαρχής και ορίζεται ως το μέγεθος της πληροφορίας σε bits που καταφέρνει να μεταδοθεί από το κανάλι σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η πληροφορία αυτή είναι το throughput του καναλιού από τη μεριά του χρήστη, έπειτα από μετάδοση πληροφορίας από τις κεραιές που βρίσκονται σε ένα σταθμό βάσης.

Αφού παράγουμε το dataset με την επιθυμητή πληροφορία, το επόμενο βήμα θα ήταν να το μετατρέψουμε στη μορφή που πρέπει, ώστε να παίξει το ρόλο της εισόδου σε ένα αλγόριθμο machine learning. Στο dataset αυτό θα πρέπει να προσθέσουμε επιπλέον ως κλάσεις τις ιδιότητες που μας ενδιαφέρουν. Στην δική μας περίπτωση, ιδιότητες είναι το ελάχιστο throughput που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας στο διαδίκτυο, όπως η κλήση over IP ή η αναπαραγωγή ενός βίντεο στο youtube. Στην συνέχεια, ο machine learning αλγόριθμος θα παίρνει το dataset αυτό ως είσοδο και θα προβλέπει με ακρίβεια την υπηρεσία που μπορεί να υποστηρίξει ο χρήστης την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες.

Με την μέθοδο αυτή λοιπόν θα λαμβάνουμε μια ακριβή πρόβλεψη της προτεινόμενης υπηρεσίας διαδικτύου, από τη μεριά του χρήστη. Εμείς προτείνουμε τέσσερις υπηρεσίες, αλλά είναι κατανοητό πως μια μελλοντική υλοποίηση θα μπορούσε να περιλαμβάνει ευρύτερο εύρος throughput, οπότε και να προτείνει περισσότερες υπηρεσίες.

Η λύση που προτείνεται απαιτεί καλή γνώση των χαρακτηριστικών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας που μας ενδιαφέρει ενώ μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό περιβάλλον δικτύου, όπου υπάρχουν πολλές απώλειες και, ταυτόχρονα, διάφορες βελτιώσεις.

Με την εισαγωγή μεθόδων Machine Learning στο σύστημα, επιτυγχάνεται μια κατανοητή και βιώσιμη διαδικασία που επιλύει διάφορα προβλήματα στον τομέα αυτόν, όπως την εύρεση ορίων ταχύτητας για τις υπηρεσίες που παρέχει το διαδίκτυο. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το προτεινόμενο μοντέλο με τις κατάλληλες εισόδους παραμέτρων, προσαρμόζεται αποτελεσματικά στο περιβάλλον που αλλάζει συνεχώς μορφή, δίνοντας, ταυτόχρονα, ένα στιβαρό σύστημα κινητού δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>

## ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας ενθαρρύνουν διάφορες μελλοντικές έρευνες στον ίδιο τομέα, όπως για παράδειγμα η χρήση άλλων μορφών πληροφορίας για την πρόβλεψη της ποιότητας του δικτύου και η εξερεύνηση άλλων σεναρίων εξομοίωσης δικτύου σε περιβάλλοντα με πολλαπλούς χρήστες και πολλαπλές κεραιές.

Η πειραματική μας προσπάθεια μπορεί να επεκταθεί σε πληθώρα παραλλαγών του σεναρίου R που χρησιμοποιούμε. Αυτό μπορεί να αποτελείται από μεταβλητό και όχι σταθερό αριθμό σταθμών βάσης (ή σημείων πρόσβασης) και από χρήστες γεωγραφικά τοποθετημένους σε ένα περιβάλλον οι οποίοι να έχουν χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται με το χρόνο (π.χ. μεταβλητές παραμέτρους καναλιού, γωνίες άφιξης / αναχώρησης, κέρδη διαδρομής, ελάχιστο κατώφλι κατανάλωσης ισχύος των κεραιών τους, κλπ.). Επιπλέον, θα είχε ιδιαίτερη αξία να μελετήσουμε την έξοδο της πειραματικής μας διαδικασίας ανάλογα με τη μεταβολή σε πραγματικό χρόνο των χαρακτηριστικών του εξωτερικού περιβάλλοντος (δρόμοι και κτίρια).

Στη συνέχεια, μελλοντική επέκταση της εργασίας μας μπορεί να γίνει και στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο μάθησης. Στην περίπτωση μας ο αλγόριθμος μάθησης σχηματισμού ακτινών υιοθετεί ένα εποπτευόμενο μοντέλο μάθησης για να χαρτογραφήσει όλα τα δεδομένα μεταξύ της OFDM ακολουθίας που ελήφθη σε έναν αριθμό BS και τον φορέα σχηματισμού δέσμης σε κάθε ένα από αυτά. Θα μπορούσαμε, λοιπόν, να εισάγουμε έναν νέο τρόπο ορισμού του πειραματικού μας μοντέλου έτσι ώστε ο αλγόριθμος μάθησης να βασίζεται πάνω σε μεθόδους μη εποπτευόμενης, ημί – εποπτευόμενης ή ενισχυμένης μάθησης.

Προχωρώντας περισσότερο την παραπάνω λογική, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία του συστήματός μας, θα μπορούσαμε να κρατάμε ένα μέρος του dataset κρυφό ώστε να μην συμμετέχει στη διαδικασία εκπαίδευσης και αφού ολοκληρωθεί η εκπαίδευση του συστήματος, να εισάγουμε αυτό το κρυφό κομμάτι και να αξιολογούμε τα αποτελέσματα.

Αυτό είναι ύψιστης σημασίας να το κάνουμε γιατί είναι λογικό ένα σύστημα το οποίο έχει εκπαιδευτεί σε κάποια δεδομένα να έχει καλή απόδοση στην ταξινόμησή τους. Το θέμα από εκεί και πέρα είναι να μην έχει υπερεκπαιδευτεί στα συγκεκριμένα δεδομένα, με αποτέλεσμα να μην έχει καλή απόδοση σε άλλα άγνωστα δεδομένα. Έτσι, κρατώντας ένα μέρος του dataset έχουμε τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα της ταξινόμησης, αφού ενώ στο σύστημα είναι άγνωστα σε εμάς όχι.



Τέλος, ως μελλοντική επέκταση της εργασίας μας θα μπορούσε να γίνει πάνω στον τομέα της επιλογής της καταλληλότερης τεχνικής ταξινόμησης. Συγκεκριμένα, υπάρχουν πολλές τέτοιες τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν και να αξιολογηθούν βάσει της κάλυψης των πραγματικών αναγκών των χρηστών και των σταθμών βάσης. Παραδείγματα είναι οι γραμμικοί ταξινομητές (linear classifiers), οι αισθητήρες (Perceptrons), οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (support vector machines), τα δέντρα απόφασης (decision trees), τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks), τα δίκτυα Bayes, κλπ.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Hanzo, L.L., Akhtman, Y., Wang, L., & Jiang, M. (2010). *MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-68669-0
- [2]. IWPC. Evolutionary and disruptive visions towards ultra high capacity networks, 2014.
- [3]. R.C. Daniels, J.N. Murdock, T.S. Rappaport, and R.W. Heath. 60 ghz wireless: Up close and personal. *Microwave Magazine, IEEE*, 11(7):44{50, Dec 2010. ISSN 1527-3342. doi: 10.1109/MMM.2010.938581.
- [4]. Dr. Jakub Borkowski, Wireless Business Development Director for CEE & Nordic της Huawei (Συνέντευξη στο ΑΠΕ / ΜΠΕ 28 / 2 / 2019)
- [5]. EC H2020 5G Infrastructure PPP. Pre-structuring model: RTD & INNO strands. Technical report, 5th Generation Public-Private Partnership, 2014.
- [6]. Expert Working Group. Next generation of wireless networks. Technical report, NetWorld 2020 ETP, 2014.
- [7]. Expert Working Group. What is 5G (really) about? Technical report, NetWorld 2020 ETP, 2014.
- [8]. Ultra High Capacity Networks White Paper. Evolutionary & disruptive visions towards high capacity networks. Technical report, International Wireless Industry Consortium (IWPC), <http://www.iwpc.org/WhitePaper.aspx?WhitePaperID=17>, Apr. 2014.
- [9]. C. Bouras, V. Kokkinos, and A. Papazois. Financing and pricing small cells in next – generation mobile networks. In *Wired / Wireless Internet Communications, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [10]. K. Johansson and A. Furuskar. Cost efficient capacity expansion strategies using multi-access networks. In *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring*. 2005 IEEE 61st, volume 5, pages 2989–2993 Vol. 5, 2005.
- [11]. J. Markendahl and O. Mkitalo. A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks. In *Personal, Indoor and*

Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on, pages 145–150, 2010.

- [12]. N. Shetty, S. Parekh, and J. Walrand. Economics of femtocells. In IEEE Global Telecommunications Conference, 2009 (GLOBECOM '09), pages 1–6, Dec. 2009.
- [13]. International Telecommunication Union. (2012). Measuring the Information Society; The ICT Development Index. [Online] Available: [http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/mis2012/MIS2012\\_without\\_Annex\\_4.pdf](http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/mis2012/MIS2012_without_Annex_4.pdf)
- [14]. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%B5%CE%BB%CF%89%CF%84%CF%8C\\_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%B5%CE%BB%CF%89%CF%84%CF%8C_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF)
- [15]. Mishra., A. (2004). Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimization, 2G/2.5G/3G. Evolution of 4G. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-86267-4.
- [16]. 3gamericas. (2010). Transition to 4G: 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced. Rysavy Research / 3G Americas. [Online] Available: [http://www.3gamericas.org/documents/3G\\_Americas\\_RysavyResearch\\_HSPA-LTE\\_Advanced\\_FINAL.pdf](http://www.3gamericas.org/documents/3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_FINAL.pdf)
- [17]. Toh, C. (2002). Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [18]. Chen, Y. (2003). Soft Handover Issues in Radio Resource Management for 3G WCDMA Networks. Queen Mary, University of London. [Online] Available: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/bitstream/handle/123456789/3811/CHENSoftHandover2003.pdf?sequence=1>
- [19]. Holma, H., & Toskala, A. (2007). WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4th edition, John Wiley & Sons.
- [20]. Korhonen, J. (2003). Introduction to 3G Mobile Communications. 2nd edition, Artech House.
- [21]. Nilsson, M. (1999). Third Generation Radio Access Standards. Ericsson Review, No. 3.
- [22]. M. Rahnema. Overview of the gsm system and protocol architecture. Communications Magazine, IEEE, 31(4):92{100, April 1993. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/35.210402.

- [23]. Βαρβαρίγος, Ε., & Μπερμπερίδης, Κ. (2004). Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [24]. 3GPP TS 25.308. (2009). High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2. Version 9.0.0.
- [25]. 3GPP TS 25.423. (2009). UTRAN Iur interface Radio Network Subsystem Application Part (RNSAP) signalling. Version 8.5.0.
- [26]. S. Akesson. Gprs, general packet radio service. In Universal Personal Communications. 1995. Record., 1995 Fourth IEEE International Conference on, pages 640-643, Nov 1995. doi: 10.1109/ICUPC.1995.497087.
- [27]. Cai, J., & Goodman, D. (1997). General Packet Radio Service in GSM. IEEE Communications Magazine, pp. 122-131.
- [28]. Eylert, B. (2005). The Mobile Multimedia Business: Requirements and Solutions. John Wiley & Sons.
- [29]. Nokia Telecommunications, white paper. (1999). Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE). Available at: <http://www.nokia.com/>.
- [30]. Prodip Chaudhury, Werner Mohr, and Seizo Onoe. The 3gpp proposal for imt-2000. Communications Magazine, IEEE, 37(12):72{81, 1999.
- [31]. UMTS World. (2009). UMTS / 3G History and Future Milestones. [Online] Available: <http://www.umtsworld.com/umts/history.htm>
- [32]. Torbjorn Nilsson. Toward third-generation wireless communication. Ericsson Review, (2):68-77, 1998.
- [33]. Jalil, K., Latif, M., & Masrek, M. (2009). Looking Into The 4G Features. MASAUM Journal of Basic and Applied Sciences, 1(2), pp. 249-253.
- [34]. International Telecommunication Union. (2010). ITU Paves the Way for Next-Generation 4G Mobile Broadband Technologies. [Online] Available: [http://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2010/40.aspx](http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/40.aspx)

- [35]. Pereira, V., & Sousa, T. (2004). Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G. Department of Informatics Engineering of the University of Coimbra, Portugal.
- [36]. NGMN Alliance. Next generation mobile networks beyond hspa & evdo. White Paper, Dec, 5, 2006.
- [37]. Stefan Parkvall, Erik Dahlman, Anders Furuskär et al. Ericsson, Robert Syputa, Maravedis. Παγκόσμιο πρότυπο ITU για τις διεθνείς κινητές τηλεπικοινωνίες «IMT-Advanced» LTE Advanced - Εξέλιξη LTE προς IMT-Advanced . Συνέδριο τεχνολογίας οχημάτων, 2014. VTC 2014-Fall. IEEE 68η 21-24 Σεπτ. 2014 Σελίδα (εις): 1 - 5.
- [38]. Remcom, “Wireless insite,” <http://www.remcom.com/wireless-insite>.
- [39]. W. Khawaja, O. Ozdemir, Y. Yapici, I. Guvenc, M. Ezuma, and Y. Kakishimay, “Indoor coverage enhancement for mmwave systems with passive reflectors: Measurements and ray tracing simulations,” arXiv preprint arXiv:1808.06223, 2018.
- [40]. Q. Li, H. Shirani-Mehr, T. Balercia, A. Papathanassiou, G. Wu, S. Sun, M. K. Samimi, and T. S. Rappaport, “Validation of a geometry-based statistical mmwave channel model using ray-tracing simulation,” in 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2015, pp. 1–5.
- [41]. Ahmed Alkhateeb, “ DeepMIMO: A Generic Deep Learning Dataset for Millimeter Wave and Massive MIMO Applications”, Proc. of Information Theory and Applications Workshop (ITA), Feb., 2019
- [42]. C.-K. Wen, W.-T. Shih, and S. Jin, “Deep learning for massive mimocsi feedback,” IEEE Wireless Communications Letters, 2018.
- [43]. A. Alkhateeb, S. Alex, P. Varkey, Y. Li, Q. Qu, and D. Tujkovic, “Deep learning coordinated beamforming for highly-mobile millimeter wave systems,” IEEE Access, vol. 6, pp. 37328–37348, 2018.
- [44]. Sumitra N. Motade, Anju V. Kulkarni “ Channel Estimation and Data Detection Using Machine Learning for MIMO 5G Communication Systems in Fading Channel ”, Technologies 2018, 6, 72.

- [45]. R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, April 2016.
- [46]. J. Wang et al., "Beam codebook based beamforming protocol for multiGbps millimeter-wave WPAN systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 8, pp. 1390–1399, Oct. 2009.
- [47]. A. Alkhateeb, J. Mo, N. Gonzalez-Prelcic, and R. Heath, "MIMO precoding and combining solutions for millimeter-wave systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, pp. 122–131, Dec. 2014.
- [48]. Y. Wang, M. Narasimha, and R. W. Heath Jr, "Mmwave beam prediction with situational awareness: A machine learning approach," arXiv preprint arXiv:1805.08912, 2018.
- [49]. A. Klautau, P. Batista, N. G. Prelcic, Y. Wang, and R. W. Heath, "5G MIMO data for machine learning: Application to beam-selection using deep learning," in *Inf. Theory and Appl. Workshop (ITA)*, Feb 2018, pp. 1–6.
- [50]. M. Abadi et al., "Tensor Flow: A system for large-scale machine learning," in *Proc. OSDI*, 2016, pp. 265–283.
- [51]. Hanzo, L.L., Akhtman, Y., Wang, L., & Jiang, M. (2010). *MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-68669-0.
- [52]. T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, November 2010.
- [53]. F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large arrays," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan 2013.
- [54]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular\\_network#/media/File:Frequency\\_reuse.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network#/media/File:Frequency_reuse.svg)
- [55]. <https://blog.oureducation.in/network-switching-subsystem/#!prettyPhoto>
- [56]. <https://www.evercomtech.com/msg/msg8.html>

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΠΗΓΑΙΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- The DeepMIMO dataset is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.
- In order to use the DeepMIMO datasets/codes or any (modified) part of them, please cite
  - 1) The DeepMIMO paper: A. Alkhateeb,"DeepMIMO: A Generic Deep Learning Dataset for Millimeter Wave and Massive MIMO Applications," in Proc. of Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, CA, Feb. 2019.

```
@InProceedings{Alkhateeb2019,  
author = {Alkhateeb, A.},  
title = {{DeepMIMO}: A Generic Deep Learning Dataset for Millimeter Wave and Massive  
{MIMO} Applications},  
booktitle = {Proc. of Information Theory and Applications Workshop (ITA)},  
year = {2019},  
pages = {1-8},  
month = {Feb},  
Address = {San Diego, CA}, }
```

### **read\_raytracing.m**

```
% ----- DeepMIMO: A Generic Dataset for mmWave and massive MIMO -----%  
% Author: Ahmed Alkhateeb  
% Date: Sept. 5, 2018  
% Goal: Encouraging research on ML/DL for mmWave MIMO applications and  
% providing a benchmarking tool for the developed algorithms  
% ----- %  
function  
[channel_params]=read_raytracing(filename_DoD,filename_CIR,filename_Loc,num_paths,user_first,user_last)  
  
DoD_array=importdata(filename_DoD);  
CIR_array=importdata(filename_CIR);  
Loc_array=importdata(filename_Loc);  
  
total_num_users=DoD_array(1);  
pointer=0;  
  
DoD_array(1)=[];  
CIR_array(1)=[];
```

```

channel_params_all=struct('DoD_phi',[],'DoD_theta',[],'phase',[],'ToA',[],'power',[],'num_paths',[],'loc',[]);

for Receiver_Number=1:total_num_users
    max_paths=DoD_array(pointer+2);
    num_path_limited=min(num_paths,max_paths);
    if (max_paths>0)
        Relevant_data_length=max_paths*4;
        Relevant_limited_data_length=num_path_limited*4;

        Relevant_DoD_array=DoD_array(pointer+3:pointer+2+Relevant_data_length);
        Relevant_CIR_array=CIR_array(pointer+3:pointer+2+Relevant_data_length);

        channel_params_all(Receiver_Number).DoD_phi=Relevant_DoD_array(2:4:Relevant_limited_data_length);

        channel_params_all(Receiver_Number).DoD_theta=Relevant_DoD_array(3:4:Relevant_limited_data_length);
        channel_params_all(Receiver_Number).phase=Relevant_CIR_array(2:4:Relevant_limited_data_length);
        channel_params_all(Receiver_Number).ToA=Relevant_CIR_array(3:4:Relevant_limited_data_length);
        channel_params_all(Receiver_Number).power=1e-
3*(10.^(1*(30+Relevant_CIR_array(4:4:Relevant_limited_data_length))));
        channel_params_all(Receiver_Number).num_paths=num_path_limited;
        channel_params_all(Receiver_Number).loc=Loc_array(Receiver_Number,2:4);
    else
        channel_params_all(Receiver_Number).DoD_phi=[];
        channel_params_all(Receiver_Number).DoD_theta=[];
        channel_params_all(Receiver_Number).phase=[];
        channel_params_all(Receiver_Number).ToA=[];
        channel_params_all(Receiver_Number).power=[];
        channel_params_all(Receiver_Number).num_paths=0;
        channel_params_all(Receiver_Number).loc=Loc_array(Receiver_Number,2:4);
    end
    pointer=pointer+max_paths*4+2;
end

channel_params=channel_params_all(1,user_first:user_last);

end

```

### **construct\_DeepMIMO\_channel.m**

```

function [channel]=construct_DeepMIMO_channel(params,num_ant_x,num_ant_y,num_ant_z,BW,...

ofdm_num_subcarriers,output_subcarrier_downsampling_factor,output_subcarrier_limit,antenna_spacing_wavelength_ratio)

kd=2*pi*antenna_spacing_wavelength_ratio;
ang_conv=pi/180;
Ts=1/BW;

```



```

Mx_Ind=0:1:num_ant_x-1;
My_Ind=0:1:num_ant_y-1;
Mz_Ind=0:1:num_ant_z-1;
Mxx_Ind= repmat(Mx_Ind,1,num_ant_y*num_ant_z)';
Myy_Ind= repmat(reshape(repmat(My_Ind,num_ant_x,1),1,num_ant_x*num_ant_y),1,num_ant_z)';
Mzz_Ind= reshape(repmat(Mz_Ind,num_ant_x*num_ant_y,1),1,num_ant_x*num_ant_y*num_ant_z)';
M=num_ant_x*num_ant_y*num_ant_z;

k=0:output_subcarrier_downsampling_factor:output_subcarrier_limit-1;
num_sampled_subcarriers=length(k);
channel=zeros(M,num_sampled_subcarriers);

for l=1:1:params.num_paths
    gamma_x=1j*kd*sin(params.DoD_theta(l)*ang_conv)*cos(params.DoD_phi(l)*ang_conv);
    gamma_y=1j*kd*sin(params.DoD_theta(l)*ang_conv)*sin(params.DoD_phi(l)*ang_conv);
    gamma_z=1j*kd*cos(params.DoD_theta(l)*ang_conv);
    gamma_comb=Mxx_Ind*gamma_x+Myy_Ind*gamma_y + Mzz_Ind*gamma_z;
    array_response=exp(gamma_comb);
    delay_normalized=params.ToA(l)/Ts;

channel=channel+array_response*sqrt(params.power(l)/ofdm_num_subcarriers)*exp(1j*params.phase(l)*ang_conv)*exp(-1j*2*pi*(k/ofdm_num_subcarriers)*delay_normalized);
end

end

```

### DeepMIMO\_generator.m

```

function [DeepMIMO_dataset,params]=DeepMIMO_generator(params)

% ----- DeepMIMO Dataset Generation -----%
fprintf(' DeepMIMO Dataset Generation started \n')

% Read scenario parameters
file_scenario_params=strcat('./RayTracing Scenarios/',params.scenario,'/',params.scenario,'.params.mat');
load(file_scenario_params)

params.num_BS=num_BS;

num_rows=max(min(user_grids(:,2),params.active_user_last)-max(user_grids(:,1),params.active_user_first)+1,0);
params.num_user=sum(num_rows.*user_grids(:,3));           % total number of users

current_grid=min(find(max(params.active_user_first,user_grids(:,2))==user_grids(:,2)));
user_first=sum((max(min(params.active_user_first,user_grids(:,2))-user_grids(:,1)+1,0)).*user_grids(:,3))-user_grids(current_grid,3)+1;
user_last=user_first+params.num_user-1;

```

```

BW=params.bandwidth*1e9;                                % Bandwidth in Hz

% Reading ray tracing data
fprintf(' Reading the channel parameters of the ray-tracing scenario %s', params.scenario)
count_done=0;
reverseStr=0;
percentDone = 100 * count_done / length(params.active_BS);
msg = sprintf('- Percent done: %3.1f', percentDone); %Don't forget this semicolon
fprintf([reverseStr, msg]);
reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));

for t=1:1:params.num_BS
    if sum(t == params.active_BS) ==1
        filename_DoD=strcat('./RayTracing Scenarios/',params.scenario,'/',params.scenario,'.',int2str(t),'DoD.mat');
        filename_CIR=strcat('./RayTracing Scenarios/',params.scenario,'/',params.scenario,'.',int2str(t),'CIR.mat');
        filename_Loc=strcat('./RayTracing Scenarios/',params.scenario,'/',params.scenario,'.Loc.mat');

[TX{t}.channel_params]=read_raytracing(filename_DoD,filename_CIR,filename_Loc,params.num_paths,user_fi
rst,user_last);

        count_done=count_done+1;
        percentDone = 100 * count_done / length(params.active_BS);
        msg = sprintf('- Percent done: %3.1f', percentDone); %Don't forget this semicolon
        fprintf([reverseStr, msg]);
        reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
    end
end

% Constructing the channel matrices
TX_count=0;
for t=1:1:params.num_BS
    if sum(t == params.active_BS) ==1
        fprintf('\n Constructing the DeepMIMO Dataset for BS %d', t)
        reverseStr=0;
        percentDone = 0;
        msg = sprintf('- Percent done: %3.1f', percentDone); %Don't forget this semicolon
        fprintf([reverseStr, msg]);
        reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
        TX_count=TX_count+1;
        for user=1:1:params.num_user

[DeepMIMO_dataset{TX_count}.user{user}.channel]=construct_DeepMIMO_channel(TX{t}.channel_params(u
ser),params.num_ant_x,params.num_ant_y,params.num_ant_z, ...
        BW,params.num_OFDM,params.OFDM_sampling_factor,params.OFDM_limit,params.ant_spacing);
        DeepMIMO_dataset{TX_count}.user{user}.loc=TX{t}.channel_params(user).loc;

        percentDone = 100* round(user / params.num_user,2);
        msg = sprintf('- Percent done: %3.1f', round(percentDone,2)); %Don't forget this semicolon

```

```

        fprintf([reverseStr, msg]);
        reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
    end
end
end

if params.saveDataset==1
    sfile_DeepMIMO=strcat('./DeepMIMO Dataset/DeepMIMO_dataset.mat');
    save(sfile_DeepMIMO,'DeepMIMO_dataset','-v7.3');
end

fprintf('\n DeepMIMO Dataset Generation completed \n')

```

### **DeepMIMO\_Dataset\_Generator.m**

```
function [DeepMIMO_dataset,params]=DeepMIMO_Dataset_Generator()
```

```

% ----- Inputs to the DeepMIMO dataset generation code ----- %

%-----Ray-tracing scenario
params.scenario='O1';          % The adopted ray tracing scenarios [check the available scenarios at
www.aalkhateeb.net/DeepMIMO.html]

%-----DeepMIMO parameters set
%Active base stations
params.active_BS=[3,10];      % Includes the numbers of the active BSs (values from 1-18 for 'O1')

% Active users
params.active_user_first=1600; % The first row of the considered receivers section (check the scenario
description for the receiver row map)
params.active_user_last=1620; % The last row of the considered receivers section (check the scenario
description for the receiver row map)

% Number of BS Antenna
params.num_ant_x=1;           % Number of the UPA antenna array on the x-axis
params.num_ant_y=32;          % Number of the UPA antenna array on the y-axis
params.num_ant_z=8;           % Number of the UPA antenna array on the z-axis
                                % Note: The axes of the antennas match the axes of the ray-tracing scenario

% Antenna spacing
params.ant_spacing=.5;        % ratio of the wavelnegth; for half wavelength enter .5

% System bandwidth
params.bandwidth=0.5;         % The bandiwdth in GHz

% OFDM parameters

```

```

params.num_OFDM=1024;          % Number of OFDM subcarriers
params.OFDM_sampling_factor=1; % The constructed channels will be calculated only at the sampled
subcarriers (to reduce the size of the dataset)
params.OFDM_limit=64;         % Only the first params.OFDM_limit subcarriers will be considered when
constructing the channels

% Number of paths
params.num_paths=3;           % Maximum number of paths to be considered (a value between 1 and 25), e.g.,
choose 1 if you are only interested in the strongest path

params.saveDataset=0;

% ----- DeepMIMO Dataset Generation ----- %
[DeepMIMO_dataset,params]=DeepMIMO_generator(params);

End

```

### **DL\_CoordinatedBeamforming.m**

```

% ----- DeepMIMO Dataset Generation ----- %
[DeepMIMO_dataset,params]=DeepMIMO_Dataset_Generator();

%===== Coordinated Deep Learning code =====
% Beamforming codebook parameters
over_sampling_x=1;          % The beamsteering oversampling factor in the x direction
over_sampling_y=2;          % The beamsteering oversampling factor in the y direction
over_sampling_z=1;          % The beamsteering oversampling factor in the z direction

% Generating the beamforming codebook
[BF_codebook]=UPA_codebook_generator(params.num_ant_x,params.num_ant_y,params.num_ant_z,over_sam
pling_x,over_sampling_y,over_sampling_z,params.ant_spacing);
codebook_size=size(BF_codebook,2);

num_sampled_OFDM=size(DeepMIMO_dataset{1}.user{1}.channel,2); % Number of OFDM samples which
equals (from mmMIMO Dataset Generator) ofdm_num_subcarriers/output_subcarrier_downsampling_factor;

% Adding noise
NF=5;          % Noise figure at the base station
Process_Gain=10; % Channel estimation processing gain
BW=params.bandwidth*1e9; % System bandwidth in Hz
noise_power_dB=-204+10*log10(BW/params.num_OFDM)+NF-Process_Gain; % Noise power in dB
noise_power=10^(.1*(noise_power_dB)); % Noise power
num_antennas_tot=params.num_ant_x*params.num_ant_y*params.num_ant_z;

for u=1:1:params.num_user

```

```

for t=1:length(params.active_BS)

DeepMIMO_dataset{t}.user{u}.channel=DeepMIMO_dataset{t}.user{u}.channel+sqrt(noise_power)*(randn(num_antennas_tot,num_sampled_OFDM)+1j*randn(num_antennas_tot,num_sampled_OFDM));
end
end

% Generating the DL inputs (the omni-received sequences)
DL_input_unnorm=zeros(params.num_user, length(params.active_BS)*num_sampled_OFDM);

for u=1:1:params.num_user
for t=1:length(params.active_BS)
DL_input_unnorm(u,(t-1)*num_sampled_OFDM+1:t*num_sampled_OFDM)=DeepMIMO_dataset{t}.user{u}.channel(1,:);
end
end

% DL input normalization
DL_input=DL_input_unnorm/max(max(abs(DL_input_unnorm)));
clear DL_input_unnorm;

% Generating the DL outputs (achievable rates of candidate/codebook beamforming vectors)
DL_output_unshaped=zeros(length(params.active_BS), params.num_user, codebook_size);
for u=1:1:params.num_user
for t=1:length(params.active_BS)
Ch=DeepMIMO_dataset{t}.user{u}.channel;
DL_output_unshaped(t,u,:)=sum(log2(1+abs(Ch*BF_codebook).^2),1)/num_sampled_OFDM;
% DL output normalization
max_Out=max(DL_output_unshaped(t,u,:));
if max_Out ~= 0
DL_output_unshaped(t,u,:)=DL_output_unshaped(t,u,:)/max_Out;
end
[val, max_beam(t,u)]=max(DL_output_unshaped(t,u,:));
end
end

% Reshaping the output
DL_output=zeros(params.num_user, length(params.active_BS)*codebook_size);
for t=1:length(params.active_BS)
DL_output(:,(t-1)*codebook_size+1:t*codebook_size)=squeeze(DL_output_unshaped(t,:,:));
end

save DLCB_Dataset/DLCB_input DL_input
save DLCB_Dataset/DLCB_output DL_output

```

## UPA\_codebook\_generator.m

```

function
[F_CB,all_beams]=UPA_codebook_generator(Mx,My,Mz,over_sampling_x,over_sampling_y,over_sampling_z,ant_spacing)

kd=2*pi*ant_spacing;
antx_index=0:1:Mx-1;
anty_index=0:1:My-1;
antz_index=0:1:Mz-1;
M=Mx*My*Mz;

% Defining the RF beamforming codebook in the x-direction
codebook_size_x=over_sampling_x*Mx;
codebook_size_y=over_sampling_y*My;
codebook_size_z=over_sampling_z*Mz;

theta_qx=0:pi/codebook_size_x:pi-1e-6; % quantized beamsteering angles
F_CBx=zeros(Mx,codebook_size_x);
for i=1:1:length(theta_qx)
    F_CBx(:,i)=sqrt(1/Mx)*exp(-1j*kd*antx_index*cos(theta_qx(i)));
end

theta_qy=0:pi/codebook_size_y:pi-1e-6; % quantized beamsteering angles
F_CBy=zeros(My,codebook_size_y);
for i=1:1:length(theta_qy)
    F_CBy(:,i)=sqrt(1/My)*exp(-1j*kd*anty_index*cos(theta_qy(i)));
end

theta_qz=0:pi/codebook_size_z:pi-1e-6; % quantized beamsteering angles
F_CBz=zeros(Mz,codebook_size_z);
for i=1:1:length(theta_qz)
    F_CBz(:,i)=sqrt(1/Mz)*exp(-1j*kd*antz_index*cos(theta_qz(i)));
end

F_CBxy=kron(F_CBy,F_CBx);
F_CB=kron(F_CBz,F_CBxy);

beams_x=1:1:codebook_size_x;
beams_y=1:1:codebook_size_y;
beams_z=1:1:codebook_size_z;

Mxx_Ind=repmat(beams_x,1,codebook_size_y*codebook_size_z)';
Myy_Ind=repmat(reshape(repmat(beams_y,codebook_size_x,1),1,codebook_size_x*codebook_size_y),1,codebook_size_z)');
Mzz_Ind=reshape(repmat(beams_z,codebook_size_x*codebook_size_y,1),1,codebook_size_x*codebook_size_y*codebook_size_z)';

```

```

Tx=cat(3,Mxx_Ind',Myy_Ind',Mzz_Ind');
all_beams=reshape(Tx,[],3);
end

```

## Figure\_Generator.m

```

% ----- DeepMIMO Dataset Generation ----- %
[DeepMIMO_dataset,params]=DeepMIMO_Dataset_Generator();

%===== Coordinated Deep Learning code =====
% Initialization
% Beamforming codebook parameters
over_sampling_x=1;      % The beamsteering oversampling factor in the x direction
over_sampling_y=2;      % The beamsteering oversampling factor in the y direction
over_sampling_z=1;      % The beamsteering oversampling factor in the z direction

% Generating the beamforming codebook
[BF_codebook]=UPA_codebook_generator(params.num_ant_x,params.num_ant_y,params.num_ant_z,over_sam
pling_x,over_sampling_y,over_sampling_z,params.ant_spacing);
codebook_size=size(BF_codebook,2);

num_sampled_OFDM=size(DeepMIMO_dataset{1}.user{1}.channel,2); % Number of OFDM samples which
equals (from mmMIMO Dataset Generator) ofdm_num_subcarriers/output_subcarrier_downsampling_factor;
num_beams=params.num_ant_x*params.num_ant_y*params.num_ant_z*over_sampling_x*over_sampling_y*ov
er_sampling_z;

% ----- Plotting Deep Learning Outputs -----
num_DL_size_points=15;
BW=params.bandwidth*1e9;          % Bandwidth in Hz

% Reading the output of the DL code
for DL_size_point=1:1:num_DL_size_points
    saved_filename=strcat('DLCB_code_output/DL_Result',num2str(DL_size_point));
    load(saved_filename)

    for t=1:1:length(params.active_BS)
        TX{DL_size_point,t}.pred_beams=eval(matlab.lang.makeValidName(sprintf('TX%iPred_Beams',t)));
        TX{DL_size_point,t}.opt_beams=eval(matlab.lang.makeValidName(sprintf('TX%iOpt_Beams',t)));
    end

    user_indices(DL_size_point,:)=user_index+1;
end

% Calculating the achievable rates of coordinated beamforming using both the predicted and optimal beams

```

```

% Noise power and SNR
Pn=-204+10*log10(BW); % Noise power in dB
SNR=10^(.1*(0-Pn));
ach_rate_DL=zeros(1,num_DL_size_points);
ach_rate_opt=zeros(1,num_DL_size_points);

for DL_size_point=2:1:num_DL_size_points
    for count=1:1:length(user_indices(DL_size_point,:))
        for t=1:1:length(params.active_BS)
            channel=squeeze(DeepMIMO_dataset{t}.user{user_indices(DL_size_point,count)}.channel);
            % Effective channel with predicted beam
            [max_p,predicted_beam_idx]=max(TX{DL_size_point,t}.pred_beams(count,:));
            eff_channel_pred(t,:)=channel*BF_codebook(:,predicted_beam_idx);
            % Effective channel with optimal beam
            [max_o,opt_beam_idx]=max(TX{DL_size_point,t}.opt_beams(count,:));
            eff_channel_opt(t,:)=channel*BF_codebook(:,opt_beam_idx);
        end

        ach_rate_DL(DL_size_point)=ach_rate_DL(DL_size_point)+sum(log2(1+SNR*abs(diag(eff_channel_pred'*eff_
channel_pred))))/(size(user_indices,2)*num_sampled_OFDM);

        ach_rate_opt(DL_size_point)=ach_rate_opt(DL_size_point)+sum(log2(1+SNR*abs(diag(eff_channel_opt'*eff_ch
annel_opt))))/(size(user_indices,2)*num_sampled_OFDM);
    end
end

% Initial point
for count=1:1:length(user_indices(1,:))
    for t=1:1:length(params.active_BS)
        channel=squeeze(DeepMIMO_dataset{t}.user{user_indices(1,count)}.channel);
        % Effective channel with predicted beam
        eff_channel_pred(t,:)=channel*BF_codebook(:,randi(num_beams));
        % Effective channel with optimal beam
        [max_o,opt_beam_idx]=max(TX{1,t}.opt_beams(count,:));
        eff_channel_opt(t,:)=channel*BF_codebook(:,opt_beam_idx);
    end

    ach_rate_DL(1)=ach_rate_DL(1)+sum(log2(1+SNR*abs(diag(eff_channel_pred'*eff_channel_pred))))/(size(user
_indices,2)*num_sampled_OFDM);

    ach_rate_opt(1)=ach_rate_opt(1)+sum(log2(1+SNR*abs(diag(eff_channel_opt'*eff_channel_opt))))/(size(user_in
dices,2)*num_sampled_OFDM);
end

% Eff achievable rate calculations
theta_user=(102/params.num_ant_y)*pi/180;
alpha=60*pi/180;

```



```

distance_user=10;
Tc_const=(distance_user*theta_user)/(2*sin(alpha)); % ms
Tt=10*1e-6; % msec

v_mph=50;
v=v_mph*1000*1.6/3600; % m/s
Tc=Tc_const/v;

overhead_opt=1-(num_beams*Tt)/Tc; % overhead of beam training
overhead_DL=1-Tt/Tc; % overhead of proposed DL method

% Plotting the figure
DL_size_array=0:2.5:2.5*(num_DL_size_points-1);

figure (1)
hold on;
plot(DL_size_array,ach_rate_opt,'--k')
plot(DL_size_array,ach_rate_DL*overhead_DL,'g')
plot(DL_size_array,ach_rate_opt*overhead_opt,'b')

```

### **DLmodel\_python\_code.py**

```

from __future__ import division
import os, keras
os.environ["KERAS_BACKEND"] = "theano"
os.environ["THEANO_FLAGS"] = "device=gpu%d"%(1)
import numpy as np
import theano as th
import theano.tensor as T
from keras.utils import np_utils
import keras.models as models
from keras.layers.core import Reshape,Dense,Dropout,Activation
from keras.optimizers import adam
from scipy.io import loadmat, savemat
import os.path
from keras import backend as K

# Model training function
def train(In_train, Out_train, In_test, Out_test,
        nb_epoch, batch_size,dr,
        num_hidden_layers, nodes_per_layer,
        loss_fn,n_BS,n_beams):

    in_shp = list(In_train.shape[1:])

    AP_models = []

```

```

for idx in range(0, n_BS*n_beams-2, n_beams):
    idx_str = str(idx / n_beams + 1)

    model = models.Sequential()
    model.add(Dense(nodes_per_layer, activation='relu', init='he_normal',
                    name="dense" + idx_str + "1", input_shape=in_shp))
    model.add(Dropout(dr))
    for h in range(num_hidden_layers):
        model.add(Dense(nodes_per_layer, activation='relu',
                        init='he_normal', name="dense" + idx_str + "h" + str(h)))
        model.add(Dropout(dr))

    model.add(Dense(n_beams, activation='relu', init='he_normal',
                    name="dense" + idx_str + "o"))
    model.compile(loss=loss_fn, optimizer='adam')
    model.summary()
    # perform training ...
    earlyStoppingCallback = \
        keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='val_loss',
                                       patience=5,
                                       verbose=0,
                                       mode='auto')
    filepath = 'DLCB_code_output/Results_mmWave_ML'+str(idx)
    history = model.fit(In_train,
                        Out_train[:, idx:idx + n_beams],
                        batch_size=batch_size,
                        nb_epoch=nb_epoch,
                        verbose=2,
                        validation_data=(In_test, Out_test[:,idx:idx + n_beams]),
                        callbacks = [
                            keras.callbacks.ModelCheckpoint(filepath, monitor='val_loss', verbose=0,
save_best_only=True, mode='auto'),
                            keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=5, verbose=0, mode='auto')
                        ])

    # we re-load the best weights once training is finished
    model.load_weights(filepath)

    AP_models.append(model)

return AP_models

# Reading input and output sets generated from MATLAB
In_set_file=loadmat('DLCB_dataset/DLCB_input.mat')
Out_set_file=loadmat('DLCB_dataset/DLCB_output.mat')

In_set=In_set_file['DL_input']

```

```

Out_set=Out_set_file['DL_output']

# Parameter initialization
num_user_tot=In_set.shape[0]
n_DL_size=[.001,.05,.1,.15,.2,.25,.3,.35,.4,.45,.5,.55,.6,.65,.7,.75,.8]
count=0
num_tot_TX=4
num_beams=512

for DL_size_ratio in n_DL_size:

    print (DL_size_ratio)
    count=count+1
    DL_size=int(num_user_tot*DL_size_ratio)

    np.random.seed(2016)
    n_examples = DL_size
    num_train = int(DL_size * 0.8)
    num_test = int(num_user_tot*.2)

    train_index = np.random.choice(range(0,num_user_tot), size=num_train, replace=False)
    rem_index = set(range(0,num_user_tot))-set(train_index)
    test_index= list(set(np.random.choice(list(rem_index), size=num_test, replace=False)))

    In_train = In_set[train_index]
    In_test = In_set[test_index]

    Out_train = Out_set[train_index]
    Out_test = Out_set[test_index]

    # Learning model parameters
    nb_epoch = 10
    batch_size = 100
    dr = 0.05          # dropout rate
    num_hidden_layers=4
    nodes_per_layer=In_train.shape[1]
    loss_fn='mean_squared_error'

    # Model training
    AP_models = train(In_train, Out_train, In_test, Out_test,
                      nb_epoch, batch_size,dr,
                      num_hidden_layers, nodes_per_layer,
                      loss_fn,num_tot_TX,num_beams)

    # Model running/testing
    DL_Result={ }

```

```
for id in range(0,num_tot_TX,1):
    beams_predicted=AP_models[id].predict( In_test, batch_size=10, verbose=0)

    DL_Result['TX'+str(id+1)+'Pred_Beams']=beams_predicted
    DL_Result['TX'+str(id+1)+'Opt_Beams']=Out_test[:,id*num_beams:(id+1)*num_beams]

DL_Result['user_index']=test_index
savemat('DLCB_code_output/DL_Result'+str(count),DL_Result)
```

### **DL\_output\_multiplication.m**

```
A = [];
B = [];
DL_output = A[];
B[] = A[]*params.bandwidth
```