



**ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**Προσομοίωση Πρωτοκόλλου 5G Device to Device**  
Πτυχιακή εργασία

**Δημήτριος Γεωργιάδης**



Αθήνα, 11 Σεπτεμβρίου 2022



**ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

**Δημητρακόπουλος Γεώργιος (Επιβλέπων)**

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής,  
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

**Τσερπές Κωνσταντίνος**

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής,  
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

**Βαρλάμης Ηρακλής**

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής,  
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Αθήνα, 11 Σεπτεμβρίου 2022

Ο Δημήτριος Γεωργιάδης

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Δημητρακόπουλο για την καθοδήγηση που μου παρείχε στην διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους για την συνεχή κατανόηση, υποστήριξη και υπομονή που μου προσέφεραν.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη στα Ελληνικά.....σελ.	7
Περίληψη στα Αγγλικά.....σελ.	8
Κατάλογος Εικόνων.....σελ.	9
Κατάλογος Σχημάτων.....σελ.	10
Συντομογραφίες.....σελ.	11
Εισαγωγή	
1. 5G Cellular Network.....σελ.	15
Κεφ. 1: D2D Πρωτόκολλο Επικοινωνίας	
1.1. Ιστορική Αναδρομή.....σελ.	19
1.2. D2D Relay.....σελ.	20
1.3. D2D & Ad Hoc Networks.....σελ.	21
1.4. Applications & Use Cases of D2D.....σελ.	21
1.5. D2D Categories Based on Spectrum.....σελ.	24
1.6. D2D Challenges.....σελ.	25
1.6.1. D2D Mode Selection.....σελ.	26
1.6.2. D2D Procedures.....σελ.	27
1.6.3. Interference Management.....σελ.	28
1.6.4. D2D Resource Management.....σελ.	29
1.6.5. Network Densification.....σελ.	30
1.7. D2D & mmWave.....σελ.	30
1.7.1. Antenna Models.....σελ.	30
1.7.2. Indoor Locations & $\mu$ W band.....σελ.	31
1.7.3. Interference in mmW.....σελ.	32
1.7.4. D2D mmW Categories.....σελ.	33
1.7.5. 5G mmW Use Cases.....σελ.	33
Κεφ. 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο	
2.1. Σενάριο Προσομοίωσης.....σελ.	35
2.2. Signal to Interference plus Noise Ratio.....σελ.	36
2.3. Path Loss.....σελ.	39
2.3.1. Free Space Path Loss.....σελ.	39
2.3.2. Path Loss Exponent.....σελ.	40
2.3.3. Path Loss Calculation Models.....σελ.	41
2.4. SINR και Capacity.....σελ.	44
2.5. Licensed & Unlicensed Spectrum.....σελ.	45
2.6. Isotropic & Omnidirectional Antenna.....σελ.	46
2.7. Power Allocation Schemes.....σελ.	47
2.8. Power Allocation Schemes for Simulations.....σελ.	49
2.9. Channel Gain.....σελ.	51

2.10. Θόρυβος.....	σελ. 52
2.11. Παρεμβολές.....	σελ. 53
<b>Κεφ. 3: Μεθοδολογία Υλοποίησης</b>	
3.1. Περιβάλλον Υλοποίησης.....	σελ. 55
3.2. Βασικοί Κώδικες.....	σελ. 56
3.2.1 Resource Allocation using Matching Theory for Device-to-Device Underlay Communication.....	σελ. 56
3.2.2 Device-to-Device Communications in the Millimeter Wave Band: A Novel Distributed Mechanism.....	σελ. 58
3.3. Υλοποίηση του κώδικα προσομοίωσης.....	σελ. 59
3.3.1 Πρώτο Σενάριο Προσομοίωσης.....	σελ. 61
3.3.1.1. Ελάχιστη απόσταση μεταξύ των D2D συσκευών.....	σελ. 61
3.3.1.2. Αναζήτηση αποστάσεων.....	σελ. 63
3.3.1.3. Path Loss & Channel Gain.....	σελ. 63
3.3.1.4. Κατανομή Ενέργειας.....	σελ. 65
3.3.1.5. Υπολογισμός SINR και χωρητικότητας.....	σελ. 67
3.3.2. Δεύτερο Σενάριο Προσομοίωσης.....	σελ. 69
3.3.2.1. Υπολογισμός Αποστάσεων.....	σελ. 71
3.3.2.2. Path Loss & Channel Gain.....	σελ. 75
3.3.2.3. Antenna Gain.....	σελ. 76
3.3.2.4. Κατανομή Ενέργειας.....	σελ. 76
3.3.2.5. Υπολογισμός SINR και χωρητικότητας.....	σελ. 77
<b>Κεφ. 4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης</b>	
4.1 Χωρητικότητα των συστημάτων.....	σελ. 79
4.1.1 Χωρητικότητα Πρώτου Σεναρίου Προσομοίωσης.....	σελ. 79
4.1.1.1 Χωρίς τον αλγόριθμο Gale-Shapley.....	σελ. 79
4.1.1.2 Με τον αλγόριθμο Gale-Shapley.....	σελ. 84
4.1.2. Χωρητικότητα Δεύτερου Σεναρίου Προσομοίωσης.....	σελ. 88
4.2 Ενεργειακή Κατανομή.....	σελ. 91
4.2.1 Ενεργειακή Κατανομή Πρώτου Σεναρίου.....	σελ. 92
4.2.2 Ενεργειακή Κατανομή Δεύτερου Σεναρίου.....	σελ. 93
4.3 Path Loss.....	σελ. 94
4.3.1 Path Loss Πρώτου Σεναρίου.....	σελ. 94
4.3.2 Path Loss Δεύτερου Σεναρίου.....	σελ. 96
<b>Κεφ. 5: Συμπεράσματα</b> .....	σελ. 98
<b>Παράρτημα Α'</b> .....	σελ. 100
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	σελ. 110

## Περίληψη στα Ελληνικά

Οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, αξιοπιστία των διαύλων επικοινωνίας και λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση, ωθούν την επιστημονική κοινότητα να ανακαλύπτει νέες μεθόδους διαχείρισης των πόρων των σύγχρονων δικτύων, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα των επικοινωνιών. Τα σύγχρονα κυψελοειδή συστήματα πέμπτης γενιάς (5G) είναι διεθνώς αναγνωρισμένα για τις εξαιρετικές επιδόσεις τους και για τις καινοτόμες τεχνολογίες που εφαρμόζουν. Το Device to Device (D2D) πρωτόκολλο εδραιώθηκε μεταξύ των τεχνολογιών του 5G για τις γρήγορες και ασφαλείς απευθείας διασυνδέσεις μεταξύ δύο τερματικών, που προσφέρει. Το πρωτόκολλο συμβάλλει στην αποφόρτιση του δικτύου και στην αναδιοργάνωση των συνδέσεων ώστε να εξοικονομούνται οι πόροι του συστήματος, ενώ μπορεί να υποστηρίξει συνδέσεις αποκεντρωμένου χαρακτήρα. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανάδειξη των D2D επικοινωνιών σε 5G κυψελοειδή δίκτυα, σε συνδυασμό με μηχανισμούς κατανομής των ενεργειακών πόρων με στόχο την καλύτερη πραγματοποιήσιμη, συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Εξετάζονται οι D2D επικοινωνίες σε συνθήκες όπου το 5G σύστημα λειτουργεί κανονικά και σε συνθήκες, όπου οι υποδομές του δικτύου υπολειτουργούν. Το 5G δίκτυο αποτελείται από κεντρικό σταθμό βάσης, για τις επικοινωνίες των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και υποθάλλει τις D2D συνδέσεις. Στην περίπτωση που ο σταθμός βάσης αδυνατεί να εξυπηρετήσει τους χρήστες της κυνέλης εξαιτίας βλαβών, επιστρατεύονται οι D2D επικοινωνίες και συγκεκριμένα στην Millimeter Wave (mmW) μπάντα συχνοτήτων για να διατηρηθεί το μέγιστο δυνατό πλήθος των επικοινωνιών. Τα 5G συστήματα σε συνδυασμό με το mmW φάσμα συχνοτήτων παρέχουν ιδιαίτερα υψηλή χωρητικότητα και ακόμη χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο, όταν δεν παρουσιάζονται περιορισμοί στον τρόπο λειτουργίας τους. Για την διεκπεραίωση των υποθέσεων υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος προσομοίωσης, με την χρήση της MATLAB πλατφόρμας. Ο κώδικας κατασκευάζει τα διαφορετικά 5G συστήματα και μέσα από πειραματικές εκτελέσεις διαπιστώθηκε πως ακόμα και σε αντίξοες καταστάσεις, το δίκτυο με την χρήση των D2D επικοινωνιών παρέχει αξιόλογους ρυθμούς δεδομένων, ενώ ο αριθμός των επιτυχημένων επικοινωνιών είναι παρεμφερής με το πλήθος που εξυπηρετείται από το ίδιο σύστημα, στην συμβατική του λειτουργία.

**Λέξεις κλειδιά:** 5G, Device-to-Device (D2D), Millimeter wave (mmW), MATLAB.

## **Abstract ή Περίληψη στα Αγγλικά**

The ever-increasing demands for higher data transmission speeds, channel reliability and less energy consumption push the scientific community to discover new methods to manage the resources of modern networks, without degrading the quality of communications. Modern cellular systems of the fifth generation (5G) are internationally recognized for their excellent performance and for the innovative technologies that they apply. The Device-to-Device (D2D) protocol was established among the technologies of 5G, for the fast and secure direct connections between two terminals that it offers. The protocol is able to offload the network and reorganize connections in order to save system resources, while also supporting decentralized communications. The present work aims to highlight the importance of D2D communications in 5G cellular networks, in combination with energy resource allocation mechanisms to achieve the best feasible, total, system capacity. D2D communications are examined in conditions where the 5G system operates normally and in conditions where the network infrastructure is underperforming. The 5G network consists of a central base station for mobile user communications and it supports D2D connections. In the event that the base station is unable to serve all cellular users due to faults, D2D communications are employed, specifically in the Millimeter Wave (mmW) frequency band to maintain the maximum possible number of connections. 5G systems, when combined with the mmW frequency spectrum, provide particularly high capacity and even lower latency, in the case when there are no limitations in their mode of operation. To handle the cases, a simulation algorithm was implemented, using the MATLAB platform. The code constructs the different 5G systems and through experimental trials it was found that, even in adverse situations, the network utilizing D2D communications provides remarkable data rates, while the number of successful connections is similar to the number of communications served by the same system, in its conventional operation.

**Keywords:** 5G, Device-to-Device (D2D), Millimeter wave (mmW), MATLAB.



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Περιπτώσεις χρήσης του 5G πρωτοκόλλου [77].....σελ. 15	σελ. 15
Εικόνα 2. Τα τελευταία Releases του 3GPP οργανισμού [78].....σελ. 21	σελ. 21
Εικόνα 3. D2D σύστημα ανοδικής ζεύξης, D2D σύστημα καθοδικής ζεύξης [79].....σελ. 26	σελ. 26
Εικόνα 4. Path Loss Exponent values [57].....σελ. 41	σελ. 41
Εικόνα 5. Floating Intercept and slope values for LOS and NLOS [71].....σελ. 43	σελ. 43
Εικόνα 6. Isotropic vs Omnidirectional antenna patterns [80].....σελ. 46	σελ. 46
Εικόνα 7. Απλοποιημένο τομεακό μοντέλο [5].....σελ. 52	σελ. 52

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ.1: Το ολοκληρωμένο σχέδιο της κυψέλης του πρώτου σεναρίου χρήσης.....σελ.	62
Σχ.2: Το ολοκληρωμένο σχέδιο της κυψέλης μετά την εκτέλεση της dist συνάρτησης.....σελ.	64
Σχ.3: Πίνακας του Gale Shapley.....σελ.	69
Σχ.4: Ολοκληρωμένο αρχικό σχέδιο της κυψέλης δεύτερου σεναρίου.....σελ.	71
Σχ.5: Κυψέλη μετά την αντιστοίχιση των κοντινότερων D2D ζευγαριών με την συνάρτηση <i>dist</i> .....σελ.	72
Σχ.6: Τελική μορφή της κυψέλης δεύτερου σεναρίου.....σελ.	75
Σχ.7: Συνολική αποτύπωση των αποτελεσμάτων χωρητικότητας για το πρώτο σενάριο χωρίς της συμβολή του Gale-Shapley μηχανισμού.....σελ.	80
Σχ.8: Ομαδοποιημένη χωρητικότητα (δεύτερο διάγραμμα) στην ίδια εκτέλεση με το Σχήμα 7.....σελ.	81
Σχ.9: Συνολικά αποτελέσματα της πρώτης εκτέλεσης για $N_o = -144\text{ dBm}$ .....σελ.	82
Σχ.10: Συνολικά αποτελέσματα χωρητικότητας με αύξηση της απώλειας μονοπατιού για το πρώτο σενάριο χωρίς τον αλγόριθμο Gale-Shapley.....σελ.	82
Σχ.11: Δεύτερη εκτέλεση του πρώτου σεναρίου ακριβώς μετά την πρώτη χωρίς ταίριασμα.....σελ.	83
Σχ.12: Ολοκληρωμένη αποτύπωση των αποτελεσμάτων του πρώτου σεναρίου για την χωρητικότητα με την χρήση Gale-Shapley αλγορίθμου.....σελ.	84
Σχ.13: Ολοκληρωμένη δεύτερη αναπαράσταση της χωρητικότητας του συστήματος για το πρώτο σενάριο με χρήσης του αλγορίθμου ταιριάσματος.....σελ.	85
Σχ.14: Εκτέλεση του πρώτου σεναρίου με αλγόριθμο ταιριάσματος για $N_o = -144\text{ dBm}$ .....σελ.	86
Σχ.15: Αποτελέσματα της ολοκλήρωσης του πρώτου σεναρίου με την χρήση μηχανισμού ταιριάσματος, όταν $P_{tot} = 30\text{ dBm}$ .....σελ.	87
Σχ.16: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση του δεύτερου σεναρίου για την χωρητικότητα.....σελ.	88
Σχ.17: Δεύτερη διαδοχική εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου για χωρητικότητα.....σελ.	89
Σχ.18: Χωρητικότητα όταν οι ενέργειες των συσκευών που παρεμβάλλουν δίνεται αποκλειστικά από τον Equ PA για το δεύτερο σενάριο.....σελ.	90
Σχ.19: Δεύτερο σενάριο για χωρητικότητα όταν $PL \approx 250\text{ dB}$ .....σελ.	91
Σχ.20: Ενεργειακή κατανομή για το πρώτο σενάριο όταν $BW = 0.5\text{ GHz}$ .....σελ.	92
Σχ.21: Ενεργειακή κατανομή για το δεύτερο σενάριο όταν $BW = 0.8\text{ GHz}$ .....σελ.	94
Σχ.22: Απώλεια μονοπατιού για τον D2D δίαυλο και για την σύνδεση Tx - BS.....σελ.	95
Σχ.23: Απώλεια μονοπατιού για τους CUE - BS και CUE - Rx διαύλους, πρώτο σενάριο.....σελ.	95
Σχ.24: Απώλειες διαδρομής του δεύτερου σεναρίου.....σελ.	96

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

RAN	Radio Access Network
CN	Core Networks
BS	Base Station
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
mMTC	Massive Machine Type Communications
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
PHY	Physical Layer
BW	Bandwidth
mmW	Millimeter Wave band
M-MIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
MEC	Multi Edge Computing
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non-Line Of Sight
D2D	Device-to-Device
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
ISM	Industrial Scientific Medical band
GSM	Global System for Mobile Communication
FCC	Federal Communications Commission
3GPP	3rd Generation Partnership Project
PSN	Public Safety Network
ProSe	Proximity Service
V2X	Vehicle to Everything
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
NR	New Radio
AF	Amplify and Forward
DF	Decode and Forward
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
WANET	Wireless Ad-hoc Network
MANET	Mobile Ad-hoc Network
V2V	Vehicle to Vehicle
WSN	Wireless Sensor Network
WBAN	Wireless Body Area Network
QoS	Quality of Service
P2P	Peer to Peer
D2D Tx	D2D Transceiver
D2D Rx	D2D Receiver
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
CSI	Channel State Information

HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
UL	Uplink
DL	Downlink
CUE	Cellular User Equipment
DUE	D2D User Equipment
DOA	Direction Of Arrival
TOA	Time of Arrival
TDMA	Time Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
$\mu$ W	Microwave band
MUI	Multi User Interface
HPBW	Half Power Beamwidth
EWS	Early Warning System
PL	Path Loss
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
DD	Data Dissemination
AWGN	Additive White Gaussian Noise
FSPL	Free Space Path Loss
dBi	decibels over isotropic
PLE	Path Loss Exponent
Hz	Hertz
EE	Energy Efficiency
RS	Relay Selection
PA	Power Allocation
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System
PSO	Particle Swarm Optimization
RB	Resource Block
FDD	Frequency Division Duplex
MINLP	Mixed Integer Non-Linear Programming
DC	Difference of Convex
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
LWF-FTPA	Linear Water-Filling Fractional Power Allocation
IWF-FTPA	Iterative Water-Filling Fractional Power Allocation
SFR	Soft Frequency Reuse
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
OMA	Orthogonal Multiple Access
No	Noise
PPP	Poisson Point Process
AoA	Angle of Arrival
MC	Monte Carlo
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
Mbps	Megabits per seconds
dBm	decibel-milliwatts
Equ PA	Equal Power Allocation

Ran PA	Random Power Allocation
PL PA	Path Loss based Power Allocation
Thr PA	Throughput based Power Allocation
W	Watts

# Εισαγωγή

Ο χώρος των τηλεπικοινωνιών και δικτύων επεκτείνεται διηλεκώς. Οι ανάγκες για μεγαλύτερους όγκους πληροφορίας, γρηγορότερες ταχύτητες μεταφορών δεδομένων, με αξιοπιστία και ασφάλεια, προάγουν συνθήκες για τη δημιουργία νέων τεχνολογιών, πρωτοκόλλων, προτύπων και εφαρμογών. Το επίκεντρο της προσοχής του επιστημονικού κόσμου, προκειμένου να καλυφθούν οι αυξανόμενες απαιτήσεις, αποδόθηκε στις κινητές τηλεπικοινωνίες, με την αρχή ανάπτυξης τους να χρονολογείται στις αρχές του έτους 1980. Κάπως έτσι, τέθηκαν οι βάσεις για εφικτές επικοινωνίες μέσω φορητών συσκευών διαχωρίζοντας την εγκατάσταση κλήσεων από την υπάρχουσα και παρωχημένη σταθερή τοποθεσία [20].

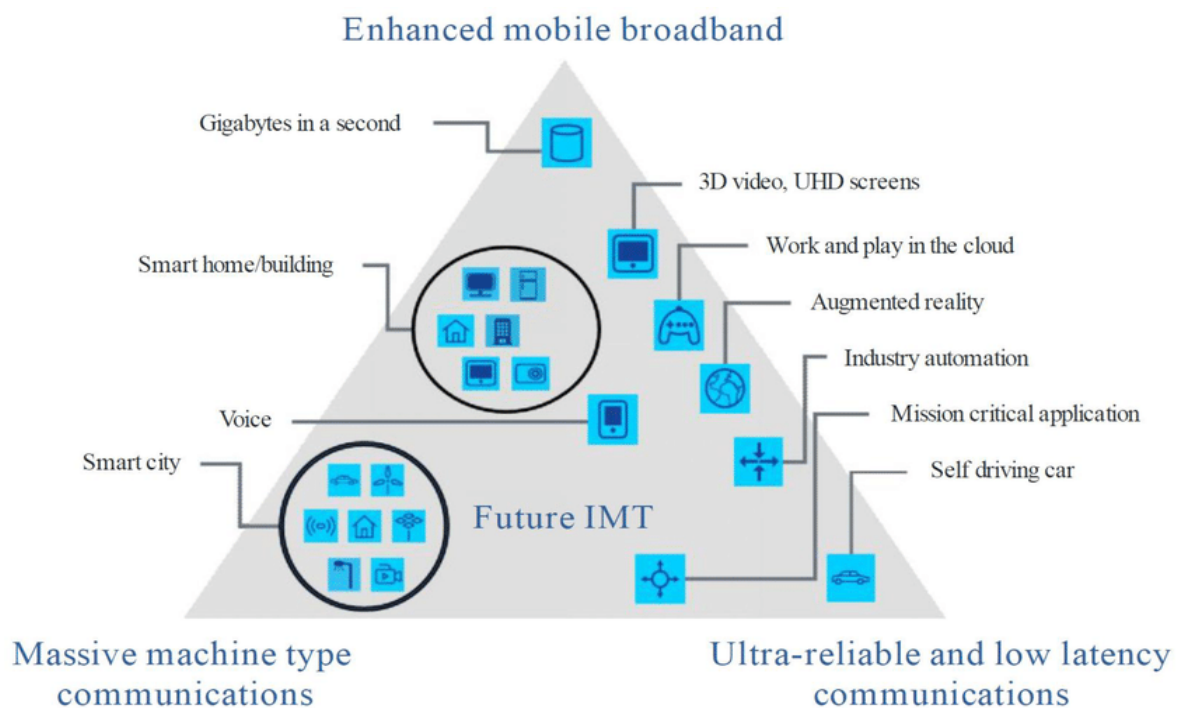
Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών επήλθαν πολυάριθμες επαναστατικές τεχνολογίες στα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών, με τη δημιουργία νέων γενεών των δικτύων να επέρχονται σχεδόν κάθε δεκαετία γεγονός που είναι κοινώς αποδεκτό. Ξεκινώντας από το 1981 με την εμφάνιση της πρώτης γενιάς δικτύου κινητών συσκευών, παρουσιάστηκε το πρώτο κινητό τηλέφωνο για ευρύ επικοινωνία. Η πρώτη γενιά, 1G, συνοδεύτηκε από το πρώτο κυψελοειδές δίκτυο. Η κινητή κυψελοειδής επικοινωνία έχει σχεδιαστεί ιστορικά βασισμένη στις κυψέλες που είναι οι κύριες μονάδες για το δίκτυο ραδιοπρόσβασης, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται η απαιτούμενη κάλυψη και η χωρητικότητα [10]. Σύμφωνα με το άρθρο [18] η υποδομή για αυτού του τύπου δίκτυο συγκροτείται από δύο στοιχεία, το Radio Access Network (RAN) και το Core Network (CN). Οι κινητές συσκευές διαθέτουν την ικανότητα να συνδεθούν στο CN για φωνητικές υπηρεσίες, για τη μεταφορά πακέτων πληροφορίας, ή και για τις δύο λειτουργικότητες ταυτοχρόνως. Επίσης, οι ράδιο-επικοινωνίες λαμβάνουν χώρα ανάμεσα σε κινητή συσκευή και στο σταθερό, σε προκαθορισμένη τοποθεσία, σταθμό βάσης (Base Station, BS), ο οποίος σταθμός εξυπηρετεί μία ή πολλαπλές ράδιο-κυψέλες. Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο οι κυψέλες είναι οι μικρότερες χωρικά οντότητες και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος και την εμβέλεια κάλυψής τους, ενώ διαθέτουν, όχι αποκλειστικά στο κέντρο τους, σταθμό βάσης.

Σταδιακά και με σταθερά βήματα προέκυψαν τα επόμενα ορόσημα δικτύων κινητών επικοινωνιών. Ο κανόνας της δεκαετίας φανερώνεται από την εξέλιξη των δικτύων, αφού η δεύτερη γενιά (2G) εμφανίστηκε το 1992, η τρίτη γενιά (3G) το 2001, η τέταρτη γενιά (4G) ή Long Term Evolution (LTE) χρονολογείται το 2011 και η τελευταία πλήρως λειτουργική πέμπτη γενιά 5G, τέθηκε σε εφαρμογή το 2020 [6]. Πιο συγκεκριμένα, με το 2G στάλθηκαν τα πρώτα μηνύματα κειμένου ανάμεσα σε κινητά τηλέφωνα. Στη συνέχεια το 3G πρωτόκολλο εγκατέστησε τα θεμέλια για πραγματική περιήγηση στο διαδίκτυο και το επαναστατικό στοιχείο που το χαρακτήριζε ήταν η δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο και η εύκολη ροή μουσικής σε κινητά τερματικά, με υψηλότερες ταχύτητες διάδοσης και καλύτερη φασματική απόδοση από την προκάτοχη γενιά. Στις αρχές του 2009 εισήχθη το πρωτόκολλο 4G, ικανό να υποστηρίξει εφαρμογές πραγματικού χρόνου για χρήστες κινητής τηλεφωνίας [3], υπηρεσία που μέχρι το 2011 ήταν πλήρως ανεπτυγμένη. Μέχρι σήμερα, το πρωτόκολλο έχει φτάσει στο μέγιστο των ικανοτήτων του με τις απαιτήσεις όμως συνεχώς να πληθαίνουν. Σύμφωνα με την δημοσίευση [6], η κίνηση των δεδομένων αυξανόμενη κάθε χρόνο, έφτασε τα 30.6 Exabytes μηνιαίως το 2020 και αναμένεται μετά το 2021 ο αριθμός των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο να έχει ξεπεράσει τα 28 δισεκατομμύρια. Το άρθρο [19] αναφέρει ότι μέχρι το 2023 το 66% του παγκόσμιου πληθυσμού θα διαθέτει διαδικτυακή πρόσβαση (από το 51% που καταγράφεται το 2018) και 29.3 δισεκατομμύρια συσκευές θα είναι συνδεδεμένες στο διεθνές δίκτυο, τριπλάσιος

αριθμός του πληθυσμού. Επιπροσθέτως, συζητά την αύξηση του αριθμού των συσκευών που θα χρησιμοποιούν Machine to Machine (M2M) επικοινωνία, από 33% του συνολικού πλήθους συσκευών το 2018, σε 50% μέχρι το 2023.

## 1. 5G Cellular Network

Αυτή η υπέρλογη αύξηση των χρηστών και όγκου δεδομένων που μεταφέρονται στα δίκτυα και η ανάγκη για ολοένα μεγαλύτερες ταχύτητες, έσπρωξαν την επιστημονική κοινότητα να ανακαλύψει νέες μεθόδους και τεχνολογίες για να ανταπεξέλθουν στις προκλήσεις. Η επιστημονική πλευρά στηριζόμενη στα εξελικτικά βήματα των προηγούμενων γενεών, ανταποκρίθηκε με τη δημιουργία του κυψελοειδούς δικτύου 5G. Το πρωτόκολλο 5G όμως δεν αποτελεί μια απλή τεχνολογική αναβάθμιση των τελευταίων γενεών.



Εικόνα 1: Περιπτώσεις χρήσης του 5G πρωτοκόλλου.

Σε αντιστοίχιση με την αμέσως προηγούμενη γενιά κινητών επικοινωνιών, το 5G είναι έως και 100 φορές γρηγορότερο με ταχύτητες που αγγίζουν τα 10 Gbps, με καθυστέρηση μετάδοσης (Latency) μικρότερη από 1 millisecond και έως και 100 περισσότερες υποστηριζόμενες συσκευές ανά κυνέλη [27]. Σύμφωνα με το άρθρο [4], ένα σύστημα 5G θα έχει βέλτιστο, ελάχιστο ρυθμό διακίνησης (minimum throughput σχεδόν 40 Mbps (Megabits per second), κυρίως για ανοδικές συζεύξεις), αυξημένη χωρητικότητα και ρυθμό δεδομένων (έως και τρεις φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με το 4G) και ύψιστη ενεργειακή απόδοση, με την κατανάλωση ενεργειακών πόρων να μειώνεται κατά το ήμισυ. Λόγω της δυνατότητας εικονοποίησης (Virtualization) του δικτύου, η εκτενής ποικιλία υπηρεσιών του πρωτοκόλλου θα παραδίδεται από το ίδιο δίκτυο. Οι κυρίαρχες οικογένειες των υπηρεσιών του 5G είναι [4] :

1. Enhanced Mobile BroadBand (eMBB): ορίζει ένα ελάχιστο επίπεδο ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων και δύναται να προσφέρει αυξημένο εύρος ζώνης με μειωμένο λανθάνοντα χρόνο.
2. Massive Machine Type Communications (mMTC): υποστήριξη εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας σύνδεσης δικτυακών συσκευών.
3. Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC): διασφαλίζει πιο αποτελεσματικό προγραμματισμό των μεταφορών δεδομένων, επιτυγχάνοντας μικρότερες μεταδόσεις εξαιτίας μεγαλύτερου υπομεταφορέα.

Στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer, PHY) οι κύριοι μοχλοί, ικανοί να ανταποκριθούν στους φιλόδοξους στόχους των 5G δικτύων, απαρτίζονται από ευρύτερο Bandwidth (BW) από 100 MHz έως 1 GHz, υψηλότερες συχνότητες μετάδοσης - Millimeter Wave Band (mmW) και μεγαλύτερο αριθμό κεραιών - Massive Multiple Input Multiple Output (M-MIMO) [4]. Οι παραπάνω έννοιες διερευνώνται στη συνέχεια της εργασίας.

Τα κυψελοειδή δίκτυα 5G στηρίζονται σε τρεις βασικές προϋποθέσεις: α) οι κεντρικοί χρήστες να παρέχονται με σύνδεση στις συσκευές τους, 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα, χωρίς διακοπές στις υπηρεσίες τους, β) ο κεντρικός πάροχος υπηρεσιών να δίνει πρόσβαση σε έξυπνα συστήματα μεταφορών και σε συνδέσεις αισθητήρων, γ) ο κεντρικός χειριστής του δικτύου να προσφέρει κλιμακούμενη ενεργειακή απόδοση και ασφαλείς υποδομές για επικοινωνία [3]. Τα δίκτυα αυτά διατήρησαν την αρχιτεκτονική των προκατόχων κυψελοειδών δικτύων και τη συνδύασαν με καινοτόμες τεχνολογίες για την ενίσχυση επιχειρησιακών δυνατοτήτων που διακατέχουν τα κυψελοειδή δίκτυα. Συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική του 5G αποτελείται από τα προαναφερθέντα RANs και CNs, με την προσθήκη του στοιχείου Multi Access Edge Computing (MEC). Το MEC στοιχείο μεταφέρει τις εφαρμογές από κεντρικούς σταθμούς παροχής, που περιέχουν τα δεδομένα (εντοπίζονται συνήθως στο μέσο του δικτύου), στις άκρες του δικτύου, πιο κοντά στους τελικούς χρήστες. Μερικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης, υψηλό BW και πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο σε RAN πληροφορίες (ειδοποιός διαφορά του 5G με τις προηγούμενες γενιές).

Είναι πολλές οι πτυχές που μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του 5G δικτύου. Σε αυτό το σημείο θα γίνει αναφορά στις τέσσερις βασικότερες:

- Massive Multiple Input Multiple Output (M-MIMO): Πολυάριθμες κεραιές κατανέμουν το σήμα και το διασπείρουν προς τον πομπό από διαφορετικές κατευθύνσεις για κάθε μία κεραία. Δηλαδή, κάθε κεραία δέχεται μία ελαφρώς διαφορετική εκδοχή του κύριου σήματος, εξαιτίας της διαφορετικής κατεύθυνσης, των εξασθενήσεων και της χρονικής καθυστέρησης, βελτιώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ποιότητα του σήματος, τη χωρητικότητα και το Throughput. Τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης, είναι απαραίτητο να διαθέτουν πολλαπλές κεραιές για την επικοινωνία. Η MIMO τεχνολογία καθιστά επίσης δυνατό τον χωρισμό φυσικού δικτύου σε πολλά εικονικά δίκτυα (Virtualization), με αποτέλεσμα οι διαχειριστές να μπορούν να διαθέσουν το κατάλληλο κομμάτι του δικτύου ανάλογα με την κίνηση εκείνη την χρονική στιγμή. Η MIMO αρχιτεκτονική αποτελεί συνδυασμό Device to Device (D2D) επικοινωνίας και Cloud Computing.
- Beamforming: Είναι τεχνική επεξεργασίας σήματος που επιτρέπει σε ένα σταθμό βάσης να μεταδίδει εστιασμένες δέσμες δεδομένων σε συγκεκριμένους χρήστες, μη εκπέμποντας προς όλες τις κατευθύνσεις. Η



μέθοδος αποτρέπει τις παρεμβολές και ενισχύει την απόδοση του συστήματος, διότι επιτρέπει πολλαπλές εισόδους και εξόδους από ροές δεδομένων την ίδια χρονική στιγμή [3]. Για την υλοποίηση της τεχνικής χρησιμοποιούνται μέθοδοι εκτίμησης Direction Of Arrival (DOA).

- Millimeter Wave (mmW): Αποτελεί μπάντα συχνοτήτων που καλύπτει το εύρος 3 GHz - 300 GHz [6], ωστόσο μέχρι τη στιγμή της συγγραφής της παρούσας πτυχιακής, οι περισσότερες εφαρμογές καλύπτονται από το εύρος 24-73 GHz [9]. Μία επικοινωνία mmW έχει την ικανότητα να προσφέρει εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, οι οποίοι οδηγούν σε σημαντική χωρητικότητα δικτύου, επειδή η επικοινωνία εκτελείται σε ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων [7]. Οι mmW επικοινωνίες εμφανίζονται, κατά κύριο λόγο, στις μικρότερες κυψέλες (Small cells) και θα είναι μια αξιόπιστη φασματική λύση για Pico & Femto κυψέλες. Αποσαφηνίζεται πως όσο τα ραδιοκύματα αποκτούν μεγαλύτερες συχνότητες, τόσο μειώνεται το μήκος τους, με αποτέλεσμα στην mmW μπάντα, το ανώτατο εύρος κάλυψης να πλησιάζει τα 200 μέτρα [2]. Παρότι η χρήση της μπάντας πρωτίστως για D2D επικοινωνία, είναι πιθανή λύση σε πληθώρα προκλήσεων, η λειτουργία της υποστηρίζεται μόνο σε απαιτητικές συνθήκες. Η έντονη ευαισθησία της μπάντας σε μπλοκαρίσματα (Blockage) του σήματος, η ανάγκη για κατευθυντικότητα (Directionality), η ανάγκη για ανίχνευση σύνδεσης μέσω οπτικής επαφής (Line of Sight, LOS) και η προσεκτική ευθυγράμμιση της δέσμης ανάμεσα στους D2D αναμεταδότες [5], είναι μερικές από τις συνθήκες που χρειάζεται να ικανοποιηθούν για την ομαλή λειτουργία της μπάντας.
- Device - to - Device (D2D): Μολονότι πρωτοεμφανίστηκε στην τέταρτη γενιά και συγκεκριμένα στην LTE-A (Long Term Evolution Advanced), λειτουργική ανταπόκριση βρήκε στην πέμπτη γενιά. Η D2D επικοινωνία ορίζεται ως η απευθείας τεχνολογία τερματικού, που σημαίνει ότι γειτονικά τερματικά (κοντινής εμβέλειας) μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες απευθείας χωρίς τη βοήθεια σταθμού βάσης [1]. Μία ακόμα πτυχή, πέρα από τον ορισμό της D2D επικοινωνίας, είναι πως μία συσκευή δρα ως αναμεταδότης που προωθεί την κίνηση από τις συσκευές στα άκρα της κυψέλης, προς τον σταθμό βάσης και το αντίστροφο, στην περίπτωση που οι συσκευές εντοπίζονται εκτός του εύρους της κυψέλης [10]. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται D2D Relay και αποτελεί κεντρικό κομμάτι ερευνών αναφορικά με τις D2D επικοινωνίες.

Οι παραπάνω τεχνολογίες είναι ένα δείγμα από τις καινοτομίες που συνόδεψαν το πρωτόκολλο. Ο σημαντικός αριθμός αυτών των νέων μεθόδων, που εισήχθη συγκριτικά με τις προηγούμενες γενιές, αποδεικνύει ότι η ακριβής αξιολόγηση της απόδοσης και ο σχεδιασμός των ραδιοδικτύων είναι ιδιαίτερα απαιτητικές διαδικασίες με σημαντικές υπολογιστικές προκλήσεις [20]. Τα σύγχρονα 5G συστήματα, συχνά, δεν μεταχειρίζονται αποτελεσματικά ασύρματους πόρους, για αυτό και είναι σημαντικό να υπολογίζεται η βέλτιστη θέση των κόμβων του δικτύου στο χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική φύση της κίνησης των δεδομένων με την πάροδο του χρόνου. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της D2D επικοινωνίας σε δίκτυα 5G παρέχει αποτελεσματική μεταφόρτωση του κυψελοειδούς συστήματος πρόσβασης, χωρίς επιπρόσθετα κόστη για ανάπτυξη της υποδομής από τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας [11]. Έχει βρεθεί πως οι D2D επικοινωνίες επιτρέπουν υψηλό ρυθμό δεδομένων, χρησιμοποιώντας το outband φάσμα (π.χ. την ελεύθερη ζώνη των 2.54 GHz - ευρέως γνωστή και ως Industrial Scientific & Medical (ISM) μπάντα συχνοτήτων [17]) και τις μη αδειοδοτημένες συχνότητες [3]. Οι ζώνες τις οποίες εκμεταλλεύονται οι

χρήστες κινητής τηλεφωνίας συμβάλλουν στην αύξηση της φασματικής και ενεργειακής απόδοσης εκμεταλλευόμενες την εγγύτητα, την επαναχρησιμοποίηση και τα κέρδη μεταβάσεων, όταν οι πόροι κατανέμονται κατάλληλα στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας και στους D2D χρήστες [8].

Η παρούσα πτυχιακή εστιάζει στις δυνατότητες της D2D επικοινωνίας, στον συνδυασμό της με τη mmW μπάντα συχνοτήτων και ως επέκταση με τη MIMO τεχνολογία. Ο σκοπός της εργασίας είναι να αναδείξει τη χρησιμότητα του D2D πρωτοκόλλου σε συστήματα 5G, μέσα από υλοποίηση του αντίστοιχου κώδικα και προσομοίωση σεναρίων χρήσης. Αναλυτικότερα, η εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο I θα γίνει μία πλήρης ανάλυση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας D2D, με ιστορικά στοιχεία, σενάρια χρήσης του, διαφορετικές του κατηγορίες (είδη επικοινωνίας, τρόποι λειτουργίας), παρούσες έρευνες και τέλος το συνδυασμό του με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, όπου και θα γίνει μια περιληπτική αναφορά κυρίως στην mmW μπάντα συχνοτήτων. Στο Κεφάλαιο II θα παρουσιαστεί το σενάριο της προσομοίωσης και το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η υλοποίηση της προσομοίωσης. Στο Κεφάλαιο III θα αναλυθεί η μεθοδολογία με στοιχεία από τον κώδικα υλοποίησης. Στο Κεφάλαιο IV θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μαζί με μερικά συμπεράσματα από την προσομοίωση, ενώ το Κεφάλαιο V θα είναι το τελικό συμπέρασμα της πτυχιακής συνδυαζόμενο με μερικές αναφορές για μελλοντικές έρευνες.

## Κεφ Ι : D2D Πρωτόκολλο Επικοινωνίας

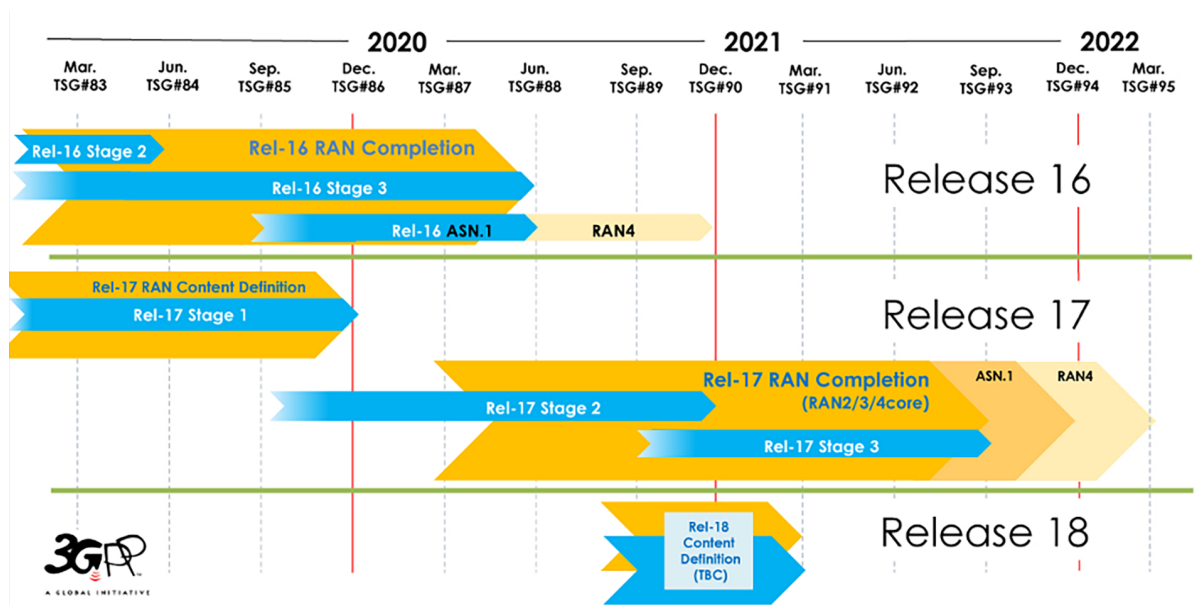
Ο ορισμός του πρωτοκόλλου υπαγορεύει πως οι επικοινωνίες D2D είναι η απευθείας σύνδεση μεταξύ κοντινών χρηστών που ανήκουν στο δίκτυο, χωρίς την ανάγκη διέλευσης μέσω του σταθμού βάσης [4].

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι προηγούμενες τεχνολογίες στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, όπως το Global System for Mobile Communications (GSM) , LTE, LTE-A, απαιτούσαν σταθερούς σταθμούς βάσης, διότι η μετάδοση όλων των φυσικών σημάτων από, είτε προς, τον εξοπλισμό του χρήστη, πρέπει να αναμεταδίδονται από τον σταθμό βάσης. Η μη ασταθής τοποθεσία του BS, διευκόλυνε τη δημιουργία και τη διάδοση των σημάτων. Ωστόσο, το έτος 2012 η ένωση Federal Communications Commission (FCC) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, υποστήριξε τη δημοσίευση Release 12, από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) φορέα, ως την επόμενη γενιά δικτύων δημόσιας ασφάλειας (Public Safety Networks, PSN), που θα μπορούσαν να παρέχουν υπηρεσίες φωνής και ομαδικής επικοινωνίας στην περίπτωση που ένας eNodeB, (σταθμός βάσης στο LTE δίκτυο, καθώς δεν υπήρχε η πέμπτη γενιά) υπολειτουργεί, λόγω φυσικής καταστροφής ή κακόβουλων επιθέσεων. Κατά συνέπεια, αυτή η απαίτηση οδήγησε τις κανονιστικές διεργασίες των 3GPP μεταδόσεων πλευρικής ζεύξης (Sidelink) στην έκδοση 12, να υποστηρίζουν απευθείας μεταδόσεις μεταξύ δύο συσκευών, χωρίς αναμετάδοση του σήματος από τον eNodeB κόμβο. Οι υπηρεσίες αυτές ονομάστηκαν Device to Device (D2D) Proximity Services (ProSe)[16].

Το άρθρο [4] αναφέρει ότι στις ProSe υπηρεσίες υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές λειτουργίας D2D επικοινωνιών, βασιζόμενες στον εντοπισμό θέσης, τόσο εμπορικές, όσο και κοινωνικές. Μεταξύ των περιπτώσεων χρήσης του πρωτοκόλλου που θα συζητηθούν περαιτέρω παρακάτω, το ενδιαφέρον κεντρίζουν οι υπηρεσίες εμπορικής εγγύτητας, οι επικοινωνίες Machine to Machine (M2M), η εξατομικευμένη διαφήμιση, η Vehicle to Everything (V2X) επικοινωνία και για τις κοινωνικές υπηρεσίες ξεχωρίζει το gaming, το social networking και το video distribution. Προκειμένου να υποστηριχθούν ορθώς οι κυριότερες υπηρεσίες, η έκδοση 12 εισήγαγε την ανακάλυψη συσκευών (Device Discovery), τη λειτουργία του συγχρονισμού (Synchronization) και συμπεριέλαβε τις συσκευές χρηστών που βρίσκονται εκτός της κάλυψης του BS, να ανταλλάσσουν απευθείας μηνύματα μεταξύ τους μέσω Sidelink μεταδόσεων. Το ζήτημα που είχε προκύψει, όμως, ήταν πως οι συσκευές αυτές χρειαζόντουσαν πρόσβαση στο δίκτυο από τον σταθμό βάσης. Η λύση ήρθε με την επόμενη έκδοση Release 13, που παρουσίασε τη μέθοδο D2D Relay. Η επόμενη έκδοση Release 14 επεδίωκε να επεκτείνει τις Sidelink μεταδόσεις από D2D ProSe σε V2X με ανταλλαγές μηνυμάτων ανάμεσα σε οχήματα, πεζούς και υποδομές. Με την έκδοση Release 15, ο οργανισμός 3GPP συνέχισε το εξελικτικό μονοπάτι της προηγούμενης έκδοσης, σχετικά με την πλευρική ζεύξη και παρέδωσε νέες λειτουργίες όπως ποικιλομορφία στη μετάδοση και διαμόρφωση πλάτους 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation), που υιοθετήθηκαν για την περαιτέρω ενίσχυση της απόδοσης και μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης [16].

Οι προαναφερθείσες εκδόσεις είχαν ως σημείο αναφοράς το LTE ή LTE-A σύστημα με προκαθορισμένες παραμέτρους σε κάθε δίκτυο. Προς το τέλος της έκδοσης 15 (2018) ο 3GPP οργανισμός στράφηκε στο νεοσύστατο δίκτυο πέμπτης γενιάς 5G. Για τη μετάβαση, ο οργανισμός κυκλοφόρησε την τυποποιημένη πρόοδο των μεταδόσεων πλευρικής ζεύξης NR (New Radio - 5G) στην έκδοση Release 16 τον Ιούνιο του 2018. Με αυτόν τον τρόπο, εκπληρώθηκαν οι απαιτήσεις για χαμηλές καθυστερήσεις, υψηλή αξιοπιστία, απόδοση και πυκνότητα του δικτύου [16]. Η έκδοση Release 16 παρουσίασε το ενδεχόμενο οι πλευρικές ζεύξεις να πραγματοποιούνται, όχι μόνο μέσω broadcast, αλλά και με unicast και groupcast υποστηρίζοντας αποδοτικά τοπικές υπηρεσίες δεδομένων [1]. Το άρθρο [28] δηλώνει ότι η έκδοση Release 16 ολοκληρώθηκε στο τέλος του 2019, έχοντας παρουσιάσει νέες λειτουργίες του CN, νέα πρωτόκολλα και καινοτομίες στο φυσικό επίπεδο, έτσι ώστε να υλοποιείται η πλευρική ζεύξη με τους διαφορετικούς τύπους διάδοσης στο NR. Η τελευταία λειτουργική έκδοση που έχει δημοσιεύσει ο 3GPP, είναι η έκδοση Release 17, που σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα του οργανισμού (μέχρι την ημερομηνία εισόδου σε αυτήν) θα ολοκληρωθεί προς το τέλος του καλοκαιριού του 2022. Η συγκεκριμένη έκδοση με βάση το [28] καθορίζει πως η αναμετάδοση που συζητείται στη τρέχουσα πλευρική σύνδεση NR Rel-17, θα προσφέρει ενίσχυση της αξιοπιστίας και κατάλληλη επιλογή και διαχείριση των πόρων ενέργειας, εξοικονομώντας, ως εκ τούτου, ενέργεια για πεζούς ή ευάλωτους χρήστες του δρόμου ή για εμπορικές συσκευές πλευρικής ζεύξης και για επέκταση του εύρους κάλυψης.



Εικόνα 2: Τα τελευταία Releases του 3GPP οργανισμού

## 1.2 D2D Relay

Οι αναμεταδότες ή ρελέ, όπως ονομάζονται, χρησιμοποιούνται για να επεκτείνουν την κάλυψη των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και για να επιτρέπουν την multi-hop επικοινωνία. Ένας άλλος τρόπος για την ενίσχυση της ισχύος του σήματος στο δέκτη, είναι η αναμετάδοση του σήματος μέσα από πολλαπλά μονοπάτια, με το καθένα να απαρτίζεται από συνεργατικές συσκευές. Οι τεχνικές αυτές αναφέρονται συχνά ως συνεργατικές τεχνικές

διαφορετικότητας (cooperative diversity techniques) [14]. Στις συνεργατικές επικοινωνίες, τα πρωτόκολλα αναμετάδοσης κατηγοριοποιούνται ως α) ενίσχυση και προώθηση (Amplify and Forward (AF)) ή ως β) αποκωδικοποίηση και προώθηση (Decode and Forward (DF)) ανάλογα με την τεχνική επεξεργασίας πληροφοριών στον D2D αναμεταδότη. Ως παράδειγμα διατίθεται το άρθρο [15], όπου στο μοντέλο συστήματος που υλοποιούν οι συγγραφείς, ο αναμεταδότης θα επηρεαστεί από τη μετάδοση του κυψελοειδούς χρήστη την χρονική στιγμή που ο ίδιος αναμεταδότης λαμβάνει την πληροφορία από την D2D πηγή. Η παρεμβολή σε συνδυασμό με τις πληροφορίες ενδυναμώνει στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το AF πρωτόκολλο στον αναμεταδότη. Κατά συνέπεια, ο D2D προορισμός θα έχει χαμηλή τιμή Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR) (μετρική για τον προσδιορισμό της ποιότητας του διαύλου) όταν ο αναμεταδότης προωθεί τις πληροφορίες.

### 1.3 D2D & Ad Hoc Networks

Ένα ασύρματο δίκτυο Ad Hoc (Wireless Ad Hoc Network, WANET) ή κινητό δίκτυο Ad Hoc (Mobile Ad Hoc Network, MANET) είναι ο αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου. Το σύστημα ονομάζεται Ad Hoc, καθώς δεν βασίζεται στην προ-υπάρχουσα υποδομή (router, access points κτλ). Αντιθέτως, κάθε κόμβος συμμετέχει στη διαδικασία δρομολόγησης, προωθώντας τα δεδομένα (πακέτα) σε άλλους κόμβους, ώστε ο προσδιορισμός των κόμβων που προωθούν την πληροφορία να γίνεται δυναμικά με κριτήριο τη συνδεσιμότητα του δικτύου και τον αλγόριθμο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται.

Συνήθως, το D2D πρωτόκολλο έρχεται σε σύγκριση ή λέγεται ότι βασίζεται σε MANET δίκτυα. Σύμφωνα με το άρθρο [4], το εν λόγω πρωτόκολλο, συνήθως διαθέτει τα χαρακτηριστικά δικτυακής υποδομής, όπως σταθμο βάσης, ο οποίος συμβάλλει στις διαφορετικές λειτουργίες ελέγχου των συνδέσεων. Οι ανάλογες διαδικασίες ελέγχου προκαλούν υψηλά κόστη στο αντίστοιχο MANET σύστημα. Η D2D επικοινωνία πραγματοποιείται σε τοπικό επίπεδο αποτελούμενη από ένα ή δύο άλματα (hops, με απλά λόγια, πόσες συσκευές χρησιμοποιούνται ως ρελέ για να φτάσει το τελικό σήμα από τον πομπό στο δέκτη) σε γενικό κανόνα, ενώ τα MANET απαιτούν δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων (multi-hop), με αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις να υποβαθμίζουν την απόδοση του δικτύου. Όσον αφορά τα σενάρια δημόσιας ασφάλειας, το πρωτόκολλο D2D χρησιμοποιείται για την παροχή στοιχειωδών υπηρεσιών και σε καταστάσεις με συσκευές εκτός κάλυψης, με τις συσκευές να συσπειρώνονται στο σημείο όπου η κεφαλή του συμπλέγματος δύναται να αντικαταστήσει προσωρινά τον σταθμό βάσης.

### 1.4 Applications & Use Cases of D2D

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.1 το πρωτόκολλο D2D λειτουργεί ως ProSe υπηρεσία και για αυτό βρίσκει έντονη εφαρμογή σε M2M επικοινωνίες, σε V2X και Vehicle to Vehicle (V2V), σε Video Streaming παροχές, σε Emergency Δίκτυα, πάντα με τη δυνατότητα μεταφοράς φωνής και δεδομένων. Το πρωτόκολλο επεκτείνει το πεδίο δράσης του, όταν συνδυάζεται με τα 5G συστήματα και με τις ξεχωριστές τεχνολογίες τους. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο εισήχθη στον τομέα της υγείας (Healthcare), με την πρόοδο των Wireless Body Area Networks (WBANs) και των γενικότερων Wireless Sensor Networks (WSN), στα οποία οι κόμβοι ανταλλάσσουν τις πληροφορίες τους (καθένα από αυτά λαμβάνει μετρήσεις για όργανα του ανθρώπινου σώματος) απευθείας μεταξύ τους χωρίς την υποβοήθηση ενός BS. Τέτοια συστήματα εξαρτώνται ολοκληρωτικά από το πρωτόκολλο, καθώς χρειάζονται τα παραγόμενα οφέλη του, ειδικά στη μείωση της χρησιμοποιούμενης

ενέργειας, αφού η ενέργεια σε παρόμοια συστήματα προέρχεται κατά κύριο λόγο από μπαταρίες μικρού μεγέθους ή από ενσωματωμένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες [6]. Στο γεγονός αυτό αξίζει να προστεθεί πως, όπως ένα WBAN σύστημα είναι μοναδικό και προσαρμόσιμο για τον κάθε ασθενή και άρα ημιμόνιμο, το ίδιο δύναται και για τις D2D επικοινωνίες. Συγκεκριμένα, για τη βέλτιστη λειτουργικότητά του, ένα D2D σύστημα έγκειται να αναδιοργανώνει δυναμικά την τοπολογία του [11], ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις τρέχουσες απαιτήσεις των εφαρμογών που εξυπηρετούνται από το σύστημα χωρίς να δημιουργούνται ενοχλήσεις στους χρήστες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές όπως αναφέρεται στο άρθρο [1]:

- A. Traffic Offloading: Οι συσκευές που εντοπίζονται εντός της κάλυψης από το σταθμό βάσης, δημιουργούν συνδέσεις χρησιμοποιώντας το αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων για D2D επικοινωνία. Οι επισυναπτόμενοι δίαυλοι αποφορτίζουν τον BS, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το σύστημα πρέπει να διαχειριστεί χρήστες εν κινήσει που αδυνατούν να διατηρήσουν τις προδιαγραφές, Quality of Service (QoS). Η D2D επιλογή σε συνδυασμό με υπηρεσίες ανοχής καθυστερήσεων, θα αποφορτώσουν το δίκτυο με την προϋπόθεση όμως, ότι όλοι οι χρήστες είναι σε κίνηση. Από τη στιγμή που ένας ή και οι δύο χρήστες παραμένουν στάσιμοι, τότε οι D2D δίαυλοι θα χρησιμοποιηθούν για να διευκολύνουν Peer to Peer (P2P) εφαρμογές όπως gaming, cooperative streaming, με εξαιρετικά αποτελέσματα.
- B. Disaster Management/Emergency Networks: Η D2D επικοινωνία πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει πρόσβαση στο δίκτυο, απουσία κυψελοειδών συνδέσεων, κατά τη διάρκεια απρόσμενων καταστροφών (συνηθέστερα φυσικά φαινόμενα όπως, τσουνάμι, έκρηξη ηφαιστειών, σεισμοί, πλημμύρες, τυφώνες) που βλάπτουν τα συστήματα επικοινωνίας. Βλάβες στην υποδομή του δικτύου, περιορισμός ενέργειας και ισχύος, έλλειψη διαθέσιμων πόρων και οι ελαττωμένες λειτουργικές υπηρεσίες είναι τα κύρια ζητήματα του σεναρίου. Η επισκευή και η οργάνωση του επηρεαζόμενου συστήματος διαρκούν περισσότερο από ότι σε καθημερινές συνθήκες και επομένως, η αποκατάσταση του δικτύου δεν μπορεί να συμβεί άμεσα. Ωστόσο, η παραγωγή ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο τερματικών με αυτόνομο τρόπο, με βάση το D2D πρωτόκολλο, είναι η απάντηση σε αυτήν την περίπτωση. Οι single και two-hop δυνατότητες του πρωτοκόλλου φέρνουν σε επαφή τους χρήστες της πληγείσας περιοχής με συσκευές στην περιοχή κάλυψης μέσω των ασύρματων δικτύων, διευκολύνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την επιχείρηση διάσωσης [25]. Να σημειωθεί πως οι D2D δίαυλοι υποστηρίζονται παρά την απουσία χειριστή δικτύου ή κεντρικής οντότητας (BS). Σύμφωνα με το άρθρο [30] η επικοινωνία έκτακτης ανάγκης διαχωρίζεται σε δύο τύπους:
  - Pre-Disaster Communication: Το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης είναι η πρώτη φάση σε ένα σύστημα αντιμετώπισης καταστροφών. Το σύστημα αποσκοπεί στο να προειδοποιήσει αποτελεσματικά και νωρίς με ισχυρή και γρήγορη μετάδοση τους ανθρώπους της επηρεαζόμενης περιοχής. Μολονότι το σύστημα εξαρτάται από τους τύπους και το μέγεθος της καταστροφής, εκμεταλλευόμενο αναδυόμενες τεχνολογίες, μπορεί να εξασφαλίσει την αξιόπιστη διάδοση του προειδοποιητικού μηνύματος σε πολλές ομάδες ανθρώπων [64]. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι, κατά τη διάρκεια του έκτακτου φαινομένου μεγάλης κλίμακος όπως τσουνάμι, δεν υπάρχει καμία διαβεβαίωση που να πιστώνει πως η προϋπάρχουσα υποδομή του δικτύου επιχειρήσεων θα είναι λειτουργική. Η πιθανότητα οι

υποδομές του δικτύου να έχουν υποστεί μερική ή καθολική ζημιά είναι εμφανώς ανεβασμένη.

- Post disaster Communication: Για τη διαχείριση καταστροφών μία λύση βασίζεται σε WSN και MANET δίκτυα. Το μεικτό αυτό σύστημα επικοινωνίας εφαρμόζεται στην πληγούσα περιοχή για σύνδεση των επηρεαζόμενων ανθρώπων και τις ομάδες διάσωσης. Η περιοχή που δεν έχει επλήγη από την καταστροφή, εκμεταλλεύεται την κυψελοειδή πύλη προς τη δορυφορική επικοινωνία. Αντίστοιχες λύσεις, σύμφωνα με το άρθρο [30], περιλαμβάνουν τον συνδυασμό Cognitive Radio (CR) με D2D επικοινωνίες σε ένα ενωμένο μοντέλο που θα παρέχουν άμεση ανταπόκριση [65], Big Data και IoT υπηρεσίες, οι οποίες έχουν προταθεί για τον εντοπισμό εγκλωβισμένων ανθρώπων και τέλος, συστήματα που χρησιμοποιούν Unmanned Aerial Vehicles (UAV) για επέκταση του σήματος και της διάρκειας της σύνδεσης κατά τη διάρκεια της καταστροφής.

- C. Extension of Cellular Coverage: Στα άκρα του δικτύου, είτε εκτός του εύρους κάλυψης, οι χρήστες αντιμετωπίζουν αυξημένα φαινόμενα εξασθένησης, έντονες παρεμβολές και λαμβάνουν χαμηλής ισχύος σήματα. Η ικανότητα αναμετάδοσης που διαθέτουν οι D2D συσκευές, βελτιώνει σημαντικά τη διεκπεραίωση του δικτύου, ωστόσο σε παρόμοια σενάρια κάνει την εμφάνισή του το ζήτημα επιλογής του τρόπου μετάδοσης (Mode Selection). Το πρόβλημα συνίσταται στην απόφαση, αν ο κόμβος του D2D πομπού (D2D Tx) θα πρέπει να επικοινωνεί απευθείας με το BS που εξυπηρετεί ή μέσω του κόμβου αναμετάδοσης D2D [8], με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και ελαττώματα που τους συνοδεύουν.
- D. Remote Health Monitoring: Αξιόπιστη επικοινωνία είναι το θεμελιώδες κριτήριο για μελλοντικές εφαρμογές παρακολούθησης υγείας σε πραγματικό χρόνο. Οι συσκευές αισθητήρων συνήθως τοποθετούνται πάνω σε ασθενείς (συχνά και μέσα στο σώμα τους) και προϋποθέτουν την ύπαρξη εξωτερικών κόμβων (σταθμό βάσης, διαδίκτυο). Στους εξωτερικούς κόμβους εξ ολοκλήρου πρόσβαση έχουν οι ιατροί ή εξειδικευμένο προσωπικό που έχει υπό την επίβλεψή του τον ασθενή. Οι μικρής εμβέλειας D2D συνδέσεις προσφέρουν ασφάλεια των δεδομένων, συνεχής υποστήριξη του ασθενούς και εξοικονόμηση ενέργειας, σημαντικότερη συμβολή καθώς οι συσκευές απορροφούν την ενέργεια χαμηλής χωρητικότητας μπαταριών, εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους. Συστήματα που υποστηρίζουν Remote Health Monitoring αποτελούν τα WBAN συστήματα.
- E. Mobile Tracking and Positioning: Ο ακριβής εντοπισμός της τοποθεσίας χρηστών μεταβάλλει αισθητά τον προσδιορισμό των επικοινωνιών του δικτύου και τους αλγόριθμους δρομολόγησης που το σύστημα αξιοποιεί. Συμβατικά, η τοποθεσία της συσκευής αποκαλύπτεται με τη βοήθεια δορυφορικών μέσων. Παρεπόμενο είναι η χρήση αυτών των υπηρεσιών να απαιτεί ανεβασμένες ποσότητες ενέργειας, ενώ το ίδιο το σήμα, όταν ο χρήστης βρίσκεται στο εσωτερικό κτηρίου, μεταβάλλεται από φαινόμενα εξασθένησης, παρεμβολές και πολλές φορές η συχνότητα του σήματος δεν δύναται να διαπεράσει τους υλικούς τοίχους της οικοδομής.
- F. Data Dissemination (DD): Είναι η κατανομή ή μετάδοση στατιστικών είτε διαφορετικού τύπου δεδομένων, προς τερματικά. Με την εκμετάλλευση του D2D πρωτοκόλλου βελτιώνεται η πιθανότητα λήψης δεδομένων και η DD υπηρεσία καταφέρνει να προάγει νέες πηγές εσόδων στους χειριστές και παρόχους του δικτύου ως εξής: Εμπορικά κέντρα μπορούν να προωθούν προσφορές και εκπτώσεις σε πελάτες που κυκλοφορούν μέσα στον χώρο τους. Την ίδια δυναμικότητα αποκτούν

θέατρα τα οποία διατίθενται να στείλουν ημερομηνίες κυκλοφορίας και ώρες προβολής στους πελάτες τους. Επομένως, εταιρείες με διαφημιστικούς σκοπούς είναι σε θέση να στοχεύσουν συγκεκριμένο δημογραφικό πελατών μέσα από D2D επικοινωνία με επίγνωση της κοινωνικής δικτύωσης, ώστε να προβάλλουν αποκλειστικά προϊόντα τους.

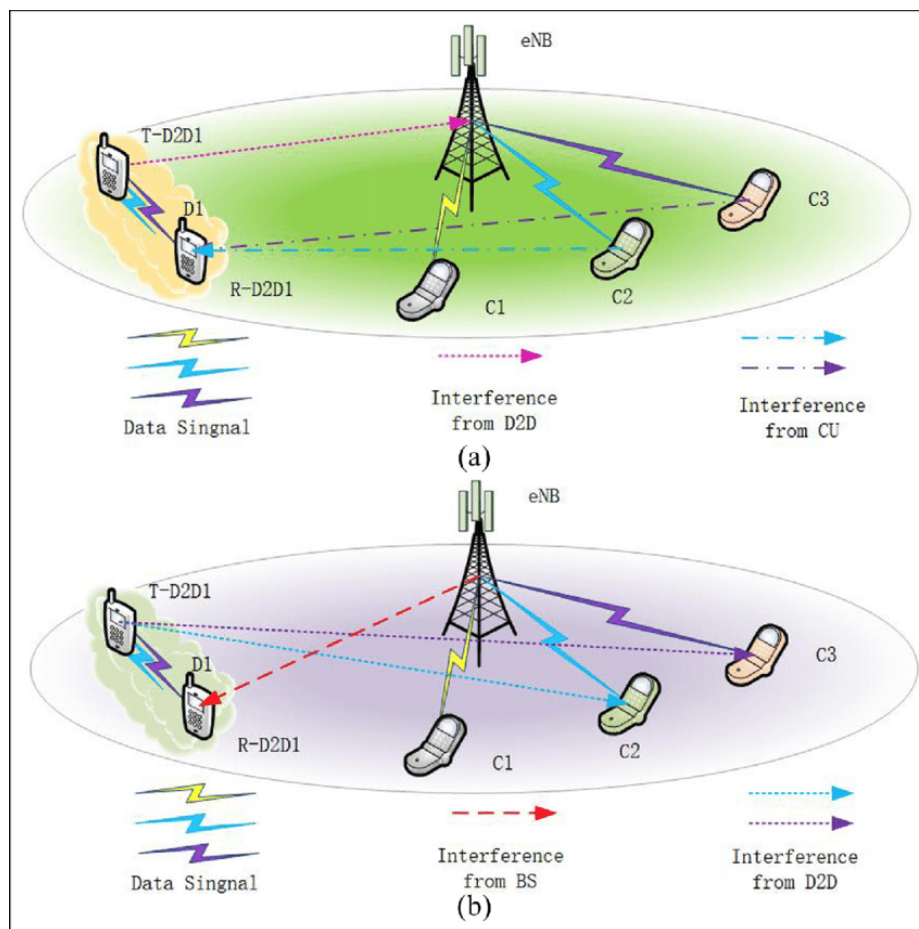
## 1.5 D2D Categories Based on Spectrum

Πρωταρχικός στόχος του πρωτοκόλλου είναι η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος που το υποσκελίζει με καλύτερη κατανομή των φασματικών πόρων. Άλλωστε το πρωτόκολλο είναι σε θέση να υποστηρίζει τόσο το αδειοδοτημένο όσο και το μη αδειοδοτημένο φάσμα και να τα χρησιμοποιεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Στο πλαίσιο της χρήσης και του διαμοιρασμού του φάσματος το D2D σύστημα κατηγοριοποιείται στις παρακάτω κλάσεις [31]:

- **Inband D2D Communication:** Σε αυτήν την περίπτωση το D2D σύστημα μεταχειρίζεται το φάσμα του κυψελοειδούς δικτύου, το οποίο μοιράζεται από κοινού και στις D2D συνδέσεις αλλά και στις παραδοσιακές επικοινωνίες. Το φάσμα αυτό είναι συνήθως το αδειοδοτημένο φάσμα (licensed spectrum). Η Inband D2D επικοινωνία ταξινομείται στην Underlay Inband D2D και στην Overlay Inband D2D. Για το πρώτο είδος, οι D2D δίαυλοι επαναχρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους με τις κυψελοειδείς συνδέσεις με αποτέλεσμα όμως να προκαλούνται παρεμβολές και να απαιτείται η εφαρμογή σχημάτων συντονισμού παρεμβολών, που βελτιώνουν τη συνολική απόδοση. Στην overlay Inband D2D, οι D2D δίαυλοι απασχολούν δεσμευμένους πόρους του κυψελοειδούς φάσματος. Το κύριο προτέρημα της Inband επικοινωνίας στοχεύει στην αποτελεσματικότερη χρήση του κυψελοειδούς φάσματος, είτε με την επαναχρησιμοποίηση κοινών πόρων, είτε με την κατανομή δεσμευμένων πόρων σε D2D χρήστες. Το άρθρο [10] αναφέρει ότι, με τις Inband συνδέσεις, η φασματική απόδοση αυξάνεται, ιδίως στις underlay επικοινωνίες. Η απόσταση μετάδοσης μπορεί να αγγίζει τις άκρες του πεδίου κάλυψης του σταθμού βάσης, ενώ η διαχείριση των QoS είναι απλούστερη, καθώς ο BS ελέγχει την κατανομή του φάσματος, χαρίζοντας ταυτόχρονα και υψηλότερες ροές δεδομένων. Όμως, οι Inband επικοινωνίες αντιμετωπίζουν σημαντικές παρεμβολές από τον D2D χρήστη, προς τον χρήστη κινητής τηλεφωνίας και αντιστρόφως. Επιπροσθέτως, ορισμένα εύρη ζώνης του κυψελοειδούς φάσματος παραμένουν σε αδράνεια και δεν χρησιμοποιούνται ιδίως στα overlay συστήματα, εφόσον δεν πραγματοποιείται D2D σύνδεση. Ένας χρήστης δεν δύναται να έχει μεταδόσεις D2D και κινητής τηλεφωνίας ταυτόχρονα και ακόμα, η διαχείριση της κινητικότητας είναι κρίσιμης σημασίας και οι χειριστές του συστήματος είναι πιθανό να μην διαθέτουν αποθέματα φάσματος, γεγονός που θα επηρεάσει κεφαλαιουχικές δαπάνες.
- **Outband D2D Communication:** Οι D2D σύνδεσμοι υποστηρίζονται από το μη αδειοδοτημένο φάσμα και καταργούνται οι παρεμβολές ανάμεσα στον D2D χρήστη με τον χρήστη κινητής τηλεφωνίας. Η Outband επικοινωνία ταξινομείται αντίστοιχα σε Controlled και Autonomous. Όταν οι συνδέσεις εγκαθιδρύονται αυτόνομα από τις D2D συσκευές και ανεξάρτητα από τον χειριστή ή το ίδιο το δίκτυο, τότε η επικοινωνία είναι autonomous Outband. Στην περίπτωση που ο συντονισμός προκύπτει από το δίκτυο και οι δίαυλοι επικοινωνίας είναι ελεγχόμενοι, τότε η επικοινωνία αντιστοιχεί στην controlled Outband. Το κύριο πλεονέκτημα της Outband μεθόδου είναι πως, οι χρήστες μπορούν να έχουν ταυτόχρονα μεταδόσεις D2D και



κινητής τηλεφωνίας, χωρίς να αναφουούν ζητήματα παρεμβολών ανάμεσά τους, με εύκολο σχεδιασμό και ευελιξία στην ανάπτυξή των συνδέσεων. Από την άλλη πλευρά, η ανεξέλεγκτη φύση του φάσματος έχει ως επακόλουθο τόσο την παραγωγή εξασθένισης των D2D διαύλων, όσο και την αμφίβολη τήρηση των QoS παραμέτρων. Η απόσταση μετάδοσης είναι χαμηλή, ο χειριστής του δικτύου δεν έχει ολοκληρωτικό έλεγχο των συνδέσεων, άρα η κατανομή των πόρων περιπλέκει και η αντιμετώπιση σφαλμάτων δυσκολεύει. Ολοκληρώνοντας τις αδυναμίες της Outband επικοινωνίας αξίζει να σημειωθεί πως ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στους D2D διαύλους δεν μπορεί να ξεπεράσει τους ρυθμούς του WiFi πρωτοκόλλου [10].



Εικόνα 3: D2D σύστημα ανοδικής ζεύξης (α) και D2D σύστημα καθοδικής ζεύξης (β).

## 1.6 D2D Challenges

Η πρόσβαση στο φάσμα Inband ή Outband αποτελεί μία από τις κρίσιμες προκλήσεις που το D2D καλείται να ρυθμίσει. Σε αυτές τις τεχνικές προκλήσεις συμπεριλαμβάνονται η κατανομή ενεργειακών πόρων και κατ' επέκταση η ενεργειακή κατανάλωση, η διαχείριση παρεμβολών, η μέθοδος διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί στο σήμα (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA είτε Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA), μετρήσεις της ποιότητας των καναλιών

(Channel State Information, CSI), η απευθείας ή μη, λειτουργία HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), η ασφάλεια και η αυθεντικοποίηση των πληροφοριών και τέλος ο τρόπος επιλογής μετάδοσης και αρχιτεκτονικές διαδικασίες [4].

### 1.6.1 D2D Mode Selection

Ο τρόπος επιλογής μετάδοσης εξαρτάται άμεσα από το σενάριο χρήσης των D2D εφαρμογών. Για παράδειγμα, στο σενάριο C) Extension of Cellular Coverage που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη υπό ενότητα, το πρόβλημα συγκροτείται αποφασίζοντας εάν ο κόμβος D2D Tx είναι βέλτιστο να συνδέεται απευθείας με τον BS που εξυπηρετεί την συσκευή ή να συνδέεται μέσω του D2D Relay κόμβου, ώστε να καταφέρει να επικοινωνήσει με τον D2D πομπό (D2D Rx). Ο πομπός αδυνατεί να αντιστοιχίζεται σε πολλαπλούς δέκτες και ο D2D αναμεταδότης δεν θα λαμβάνει και θα εκπέμπει το σήμα κατά τη διάρκεια του ίδιου πόρου [8].

Στο άρθρο [22] συζητείται πως μέχρι τώρα υπάρχουν τρεις παραδοσιακοί τρόποι επιλογής μετάδοσης. A) Cellular, B) Dedicated, C) Non-orthogonal Sharing. Η λειτουργία κινητής τηλεφωνίας A) ορίζει πως, οι συσκευές συνομιλούν μεταξύ τους μέσα από τον σταθμό βάσης. Ο BS δρα ως αναμεταδότης ανάμεσα στις συσκευές, ενώ το σύνολο των πόρων, χρησιμεύει μόνο σε συσκευές που πραγματοποιούν συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας και άρα δεν άγεται η απευθείας σύνδεση τερματικών [25]. Η αποκλειστική λειτουργία B) συσχετίζεται με την Overlay D2D επικοινωνία, όμως η λειτουργία αυτή είναι εύκολο να καταχράται πόρους. Η τελευταία επιλογή αναφέρεται στην επαναχρησιμοποίηση, δηλαδή οι D2D χρήστες να εκμεταλλεύονται τους ίδιους πόρους με τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας (Underlay D2D mode). Απόρροια αυτού είναι να σχηματίζονται παρεμβολές μεταξύ των δύο, αλλά η κατανομή και διαχείριση των πόρων να είναι σημαντικά αποτελεσματικότερες.

Το άρθρο [1] παρουσιάζει παρόμοια, αλλά ελαφρώς διαφορετική, κατανομή των τρόπων μετάδοσης και αναφέρει ότι δύο επικοινωνούσες συσκευές δύναται να λειτουργούν με τον ίδιο, διαφορετικό ή υβριδικό τρόπο μετάδοσης, γεγονός που μετατρέπει την διαχείριση του δικτύου σε ακόμα πολυπλοκότερη διαδικασία. Αναλυτικότερα οι τέσσερις τρόποι που αναπτύσσονται είναι:

- Pure Cellular Mode: Όταν η διαθεσιμότητα των πόρων είναι χαμηλή και ταυτόχρονα, οι παρεμβολές έντονες αποτρέποντας την δημιουργία D2D συνδέσεων, επιστρατεύεται η παραδοσιακή κινητή τηλεφωνία. Σε αυτήν την περίπτωση οι D2D χρήστες δεν μπορούν να μεταδώσουν τα δεδομένα τους.
- Partial Cellular Mode: Δύο συσκευές χρηστών είναι σε θέση να επικοινωνήσουν διαπερνώντας τον BS χωρίς ομοδιαυλική χρήση φάσματος.
- Dedicated Mode: Οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους αξιοποιώντας δεσμευμένους φασματικούς πόρους.
- Underlay Mode: Με αυτόν τον τρόπο οι D2D και οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας μοιράζονται από κοινού τους πόρους για απερχόμενη (Uplink, UL) και κατερχόμενη ζεύξη (Downlink, DL).

## 1.6.2 D2D Procedures

Στις αρχιτεκτονικές διαδικασίες αναφέρονται ο συγχρονισμός (Synchronization), ο αρχικός εντοπισμός του σήματος, η ανακάλυψη συσκευής ανάμεσα σε πολλαπλές κυψέλες, η ανίχνευση της συχνότητας του μηνύματος, η πύκνωση και εκφόρτωση των κυψελών και η D2D επικοινωνία στην millimeter Wave μπάντα συχνοτήτων. Αντλώντας πληροφορίες από τα άρθρα [7,10] πως οι κυριότερες λειτουργικότητες για το πρωτόκολλο είναι ο συγχρονισμός, η εύρεση συσκευής (Device Discovery), η πύκνωση και εκφόρτωση κυψελών (Cell Densification and Offloading), η διαχείριση των παρεμβολών, των πόρων και της ενέργειας και η επιλογή μετάδοσης. Παρακάτω αντικατοπτρίζεται η σειρά των διαδικασιών για την θεμιτή D2D σύνδεση:

1. *Device Discovery* ή *Initial Device Discovery* είναι το πρώτο βήμα για την εγκαθίδρυση της επικοινωνίας, πάντα στο εύρος κάλυψης της συσκευής. Μία συσκευή είναι απαραίτητο να καταφέρνει να εντοπίσει την παρουσία των υπόλοιπων συσκευών. Γενικά, η διαδικασία εντοπισμού λαμβάνει χώρα τη στιγμή που οι συσκευές εκπέμπουν το σήμα εντοπισμού δια μέσω του σταθμού βάσης για να ανακαλύψουν γειτονικές συσκευές. Η εύρεση συσκευής χωρίζεται σε συγκεντρωτική (Centralized) και κατανεμημένη (Distributed). Όταν το σύστημα επικεντρώνεται στην centralized ανακάλυψη συσκευών τότε, μια κεντρική οντότητα θα συμβάλει στην εύρεση κυρίως σε ένα σημείο πρόσβασης ή στον σταθμό βάσης της κυψέλης. Η προβλεπόμενη συσκευή ενημερώνει τον BS για τον σκοπό της σύνδεσης με τις παρακείμενες κοντινές συσκευές. Ο σταθμός βάσης χρειάζεται να αποκτήσει πληθώρα πληροφοριών, όπως συνθήκες καναλιού, ισχύς σήματος και παράλληλα θα πρέπει να γνωρίζει την πολιτική ελέγχου συγκριτικά με τις παρεμβολές. Η συμμετοχή του BS εξαρτάται από προκαθορισμένα πρωτόκολλα που θα ακολουθηθούν. Στις περιστάσεις που θα επιλεγεί η distributed ανακάλυψη συσκευών, οι συσκευές έχουν την άδεια να ανακαλύπτουν άλλες συσκευές χωρίς να περιλαμβάνουν τον σταθμό βάσης. Η συσκευή θα επικοινωνεί με τα σήματα ελέγχου σε ακανόνιστα διαστήματα ωστόσο εμφανίζονται ζητήματα συγχρονισμού και έλλειψης ισχύος [7,10].
2. *Device Association* που αναφέρει ότι όταν η συσκευή εντοπιστεί, το επόμενο βήμα είναι ενσωματωθεί στο δίκτυο, είτε με relay mode είτε με τη βοήθεια του δικτύου, ανάλογα με τις συνθήκες [10].
3. *Synchronization*, λαμβάνει χώρα αμέσως μετά το βήμα 2. Ο συγχρονισμός γίνεται αποκλειστικά μεταξύ των συσκευών του συστήματος και του σταθμού βάσης. Το χρονικό πλαίσιο και ο προγραμματισμός καθορίζεται από τη κεντρική μονάδα. Λόγω της εξάρτησης αυτής από τον BS, η εύρεση συσκευών δυσκολεύει όταν οι συσχετιζόμενες γειτονικές συσκευές είναι εκτός του εύρους κάλυψης του BS. Οι συσκευές στην κατάσταση ασύγχρονης ανακάλυψης συνεχώς αναζητούν χρήστες σε κοντινή απόσταση [7,10].
4. *Mode Selection*. Εξαιρετικά κρίσιμο κομμάτι για την επισύναψη της σύνδεσης, με τους διαφορετικούς τρόπους να έχουν δηλωθεί στην προηγούμενη υποενότητα.
5. *Power Control*. Επισημαίνεται ως η διαδικασία προσαρμογής των επιπέδων ενέργειας του BS στις DL μεταδόσεις και κατά αντιστοιχία της συσκευής του χρήστη κατά τη διάρκεια UL μεταδόσεων. Η ανάγκη για αύξηση της ενεργειακής ισχύος μετάδοσης συγχέεται με την αύξηση της χωρητικότητας της ζεύξης. Ο έλεγχος ισχύος έχει την ευθύνη να συνθέτει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης D2D με τον CUE (Cellular User

Equipment). Ο εύλογος έλεγχος ρυθμίζει τις παρεμβολές, αφού ο D2D επαναχρησιμοποιεί τους πόρους του κυψελοειδούς δικτύου. Ο αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος θα είναι, όπως και η εύρεση συσκευών, είτε Centralized είτε Distributed. Για τους centralized αλγορίθμους ο σταθμός βάσης είναι ο επιβλέπων της διαδικασίας και υπεύθυνος για την λήψη αποφάσεων, ενώ αντίθετα για τους distributed, ο εξοπλισμός του χρήστη είναι υπεύθυνος [7,10,22].

6. *Interference and Beamforming*. Ο συντονισμός παρεμβολών για την D2D επικοινωνία είναι στενά συνδεδεμένος με τον έλεγχο ισχύος στις συσκευές και στους σταθμούς βάσης. Είναι απαραίτητη η ανάλυση των παρεμβολών και η κατάσταση του συνδέσμου προκειμένου να κατανεμηθεί κατάλληλα η ισχύς. Η Beamforming τεχνική χρησιμεύει για τον ακριβή εντοπισμό των D2D χρηστών χρησιμοποιώντας τεχνικές εκτίμησης DOA (Direction Of Arrival), όπως έχει δηλωθεί. Η εκτίμηση αναφέρεται στη διαδικασία ανάκτησης πληροφοριών κατεύθυνσης από πολλές ηλεκτρομαγνητικές πηγές ή κύματα, από τις εξόδους ενός αριθμού κεραιών λήψης που σχηματίζουν μια συστοιχία αισθητήρων. Μια ακριβής τεχνική συγχρονισμού μπορεί να ελαττώσει σημαντικά τις παρεμβολές, καθώς οι χρήστες θα μεταδίδουν μέσα από μία ιδιαίτερα κατευθυντική δέσμη μεταξύ τους ή ο σταθμός βάσης θα στέλνει μονάχα προς την κατεύθυνση των D2D χρηστών [7,10].
7. *Resource Management*. Η βασική πρόκληση της D2D επικοινωνίας είναι η κατανομή των πόρων με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη ταχύτητα με ελάχιστη παρεμβολή [10].

### 1.6.3 Interference Management

Η συνύπαρξη των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και των D2D ζευγαριών, τα οποία αξιοποιούν τους ίδιους κυψελοειδείς πόρους, οδηγεί σε ζητήματα παρεμβολών. Η επιλογή του τρόπου λειτουργίας του δικτύου είναι και πηγή διαφορετικού τύπου παρεμβολών [7]. Η επιτυχής μετάδοση δύναται να καταστραφεί από τις παρεμβολές που διακυβεύουν το λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR). Η μετρική SINR μετράει την ποιότητα του σήματος: την ισχύ του θεμιτού σήματος σε σύγκριση με μη θεμιτές παρεμβολές και τον θόρυβο.

Η διαχείριση των παρεμβολών με επίγνωση των διαθέσιμων πόρων, είναι ένα ανεπτυγμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Συχνά, παρουσιάζεται ως πρόβλημα μεγιστοποίησης ρυθμού με συντελεστές προτεραιότητας, που υπόκεινται σε περιορισμούς μέγιστης ισχύος μετάδοσης και ελάχιστων QoS. Ειδάλλως, μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης ισχύος μετάδοσης υπό ελάχιστους QoS περιορισμούς. Ο προσεκτικός προγραμματισμός των μεταδόσεων ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές, ενώ τα κατάλληλα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και η μέθοδος HARQ αυξάνουν την ευρωστία του σήματος απέναντι στο θόρυβο [14].

Οι παρεμβολές ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: παρεμβολές συνεπιπέδων (Co-tier Interference) και στις διασταυρούμενες παρεμβολές (Cross-tier Interference) [25]. Co-tier παρεμβολές συμπίπτουν σε δύο συσκευές που λειτουργούν στην ίδια βαθμίδα. Πιο συγκεκριμένα, η παρεμβολή προκύπτει ανάμεσα στην D2D συσκευή που εκπέμπει και στην D2D συσκευή που λαμβάνει το σήμα, οι οποίες μοιράζονται από κοινού φασματικούς πόρους και βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη. Cross-tier παρεμβολές συμβαίνουν μεταξύ συσκευών που ανήκουν σε δύο διαφορετικές βαθμίδες. Ένα κυψελοειδές δίκτυο δύο επιπέδων συγκροτείται από μία βαθμίδα κυψελών μακροεντολής (το λεγόμενο macro-tier) και το

επίπεδο των συσκευών (το ονομαζόμενο device-tier) [1]. Με άλλα λόγια, οι συσκευές κυψελοειδούς επικοινωνίας και οι D2D συσκευές προκαλούν παρεμβολές ανάμεσά τους, εφόσον η D2D επικοινωνία ενσωματώνεται στο δίκτυο. Η πηγή και ο προορισμός των παρεμβολών επηρεάζεται από τον τύπο ζεύξης (είτε UL, είτε DL). Στο σενάριο ανερχόμενης ζεύξης, η κυψελοειδής συσκευή μεταδίδει τα δεδομένα της προς τον σταθμό βάσης, στο macro-tier, την ώρα που η D2D συσκευή εκπέμπει την πληροφορία της στον δέκτη στο device-tier. Το φάσμα εν τοιαύτοι περιπτώσει διαμοιράζεται στα D2D ζευγάρια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται παρεμβολές στα ζευγάρια: χρήστης παραδοσιακών επικοινωνιών και D2D δέκτη (D2D Rx) , D2D Tx και σταθμός βάσης. Η παρεμβολή στον σταθμό βάσης είναι αμελητέα, αφού η ισχύς του είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ισχύ του σήματος παρεμβολής. Στο σενάριο κατερχόμενης ζεύξης υπάρχει η συνθήκη, ο σταθμός βάσης να εκπέμπει δεδομένα σε χρήστη του δικτύου. Το κατερχόμενο διαθέσιμο φάσμα χρησιμοποιείται κοινώς από όλους τους χρήστες του συστήματος, για τις συνδέσεις τους. Η παρεμβολή αναπαράγεται ανάμεσα στον εκπέμποντα σταθμό βάσης και στον D2D δέκτη και παράλληλα μεταξύ του D2D πομπού και τον κυψελοειδή δέκτη.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παρεμβολές, εκτός από τη διαχείριση των ενεργειακών πόρων στο άρθρο [7] προτείνονται τρεις γενικές προσεγγίσεις που θα βοηθήσουν στην καταπολέμηση τους: a) *Interference Avoidance* με τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να αποφύγουν τη δημιουργία παρεμβολών μεταξύ των D2D και των κυψελοειδών διαύλων, b) *Interference Cancellation* με τεχνικές που αξιοποιούν προηγμένα σχήματα κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης για την ακύρωση σημάτων παρεμβολής στους DUE (D2D User Equipment) και CUE (Cellular User Equipment), c) *Interference coordination* με σχήματα που βρίσκουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην Inband επικοινωνία.

#### 1.6.4 D2D Resource Management

Η διαχείριση των πόρων τυπικά λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την επιλογή τρόπου μετάδοσης. Η αποδοτική διαχείριση περιορίζει αξιοσημείωτα τις παρεμβολές και παράλληλα εξοικονομεί ενέργεια και μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα της σύνδεσης. Η κατανομή των πόρων θεωρείται το κύριο μέλημα στην D2D επικοινωνία, λόγω των κρίσιμων συνεπειών της στην αποτελεσματικότητα του συστήματος. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, στις D2D επικοινωνίες, για τις κατανομές των πόρων, κατάλληλα μπλοκ πόρων διαμοιράζονται στους D2D χρήστες τα οποία επιδρούν στις ομοδιαυλικές παρεμβολές και καθυστερήσεις, προκαλούμενες από τους CUE [31]. Μια τεχνική διαχείρισης πόρων και συγκεκριμένα ενεργειακών, συζητείται στο άρθρο [όποιος αριθμός θα έχει περισσέψει], στο οποίο ο σταθμός βάσης επιτρέπει και ελέγχει καθολικά τη χρήση των πόρων τόσο από D2D χρήστες, όσο και από κυψελοειδείς χρήστες, με τους συγγραφείς να προτείνουν έναν επαναληπτικό συνδυαστικό αλγόριθμο δημοπρασιών όπου οι D2D χρήστες διεκδικούν την πρόσβαση στο κανάλι που το εκμεταλλεύεται CUE χρήστης. Ωστόσο, η μεθοδολογία κεντρικής (centralized) κατανομής χάνει την αξιοπιστία της καθ' όσο μεγαλώνει ο αριθμός των χρηστών που ανήκουν στο σύστημα. Με απλά λόγια, η διαχείριση των συσκευών από έναν χειριστή δυσχαιρένει, με την αύξηση του συνολικού αριθμού χρηστών. Υπάρχουν όμως, μεθοδολογίες κατανομημένης (distributed) κοινής χρήσης που βασίζονται για παράδειγμα στα θεωρητικά μοντέλα παιχνιδιών (Game Theory) που είναι ικανά να προσφέρουν μια αποτελεσματική ανάλυση για τα μειονεκτήματα που απορρέουν από τη λανθασμένη κατανομή των πόρων στην D2D επικοινωνία. Οι distributed τρόποι κατανομής, παρόλα αυτά, πιθανώς να απαρτίζονται από πολύπλοκες και κοστοβόρες διαδικασίες.

Όταν στη διάρκεια της εργασίας άγεται η αναφορά στους πόρους του συστήματος, οι πόροι συνήθως αναλογούν σε χρονοθυρίδες στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης του χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) ή σε μπάντες συχνοτήτων στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA). Προφανώς, συμπεριλαμβάνονται και οι ενεργειακοί πόροι, δηλαδή το διαθέσιμο ποσό ισχύος που μία συσκευή είναι σε θέση να αξιοποιήσει για τις επικοινωνίες της.

### 1.6.5 Network Densification

Η πύκνωση του δικτύου αποτελεί ένα από τα επιφανή χαρακτηριστικά των κυψελοειδών γενεών. Το ετερογενές δίκτυο ήταν μία σημαντική τροποποίηση στα 4G δίκτυα, το 5G όμως επικεντρώθηκε στις συσκευές που το απαρτίζουν και άλλαξε την προκαθορισμένη αρχιτεκτονική σε device-centric. Η κατανομή φάσματος με υψηλότερες συχνότητες ή χρήση cognitive radios, απαίτησε ολική μεταρρύθμιση της αρχιτεκτονικής του δικτύου, προκειμένου οι άνω και κάτω συζεύξεις να ρέουν δια μέσω διαφορετικών συνόλων κόμβων [10]. Η πύκνωση του δικτύου αποσκοπεί στην αύξηση της χωρητικότητας του, με τη βασική ιδέα να προτείνει την ανάπτυξη μικρών κυψελών κάλυψης, όπως οι Pico και οι Femto κυψέλες, που θα εγκαθίστανται σε κοντινή απόσταση από τις συσκευές που θα καλούνται να εξυπηρετήσουν, με αποτέλεσμα να προάγονται ευνοϊκές συνθήκες διαύλων μεταξύ πομπού και δέκτη [7]. Είναι ωφέλιμο να σημειωθεί, πως αξιοποιώντας τις mmW συσκευές που είναι ικανές για κατευθυντικές συνδέσεις μεταξύ τους και σε κοντινή απόσταση, επιτυγχάνεται η εκφόρτωση κυκλοφορίας από επικαλυπτόμενα στρώματα. Το χαρακτηριστικό της κατευθυντικής μετάδοσης και λήψης κυμάτων της σχετικής μπάντας συχνοτήτων θα παρασκήσει τις D2D επικοινωνίες με αποτελεσματικότερη ασφάλεια, καθώς και αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των πόρων του επικαλυπτόμενου δικτύου [23].

### 1.7 D2D & mmWave

Η διαθεσιμότητα ευρείας ζώνης φάσματος και συγκεκριμένα η mmW μπάντα, είναι μια ελκυστική παροχή συχνοτήτων, για τα κυψελοειδή δίκτυα επόμενης γενιάς. Σε αντίθεση με την κοινή τοπολογία και αντίληψη, οι πολλαπλών τύπων εξασθενήσεις, είτε λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης, βροχής, ομίχλης είτε συνθηκών χιονιού, θεωρούνται αμελητέες στην περίπτωση των ζωνών συχνοτήτων και των αποστάσεων μετάδοσης που απασχολεί τον χρήστη. Φυσικά, στην μπάντα συχνοτήτων mmW υπάρχει επιπρόσθετη απώλεια μονοπατιού (Path Loss), σε συνάρτηση με τις συμβατικές ζώνες συχνοτήτων. Όμως, συχνά με την εκμετάλλευση της διαταξης των κεραιών, που σε ένα σύγχρονο σύστημα ταυτίζονται με τις MIMO συστοιχίες, αντισταθμίζονται οι απώλειες της διαδρομής στον πομπό ή στον δέκτη [23]. Το άρθρο [24] υποστηρίζει πως η απώλεια μετάδοσης στις mmW συχνότητες, είναι συγκριτικά υψηλότερη από την αντίστοιχη απώλεια στην Microwave band (μW, που είναι η άμεσα συγκρίσιμη μπάντα), εφόσον η απώλεια διάδοσης ελεύθερης διαδρομής (free space) είναι ανάλογη του τετραγώνου της φέρουσας συχνότητας. Η εφαρμογή κατευθυντικής κεραίας υψηλής απολαβής προτιμάται για να ισοσκελίσει την επίπονη απώλεια διάδοσης και εν τέλει να ελαχιστοποιήσει φαινόμενα σκίασης και εξασθενήσεων.

#### 1.7.1 Antenna Models

Επιπλέον, τα mmW συστήματα βασίζονται σε εξαιρετικά κατευθυντικές μεταδόσεις με σκοπό να ξεπεράσουν την ιστροπική απώλεια διαδρομής. Η κατευθυντική μετάδοση τείνει

να απομονώνει τους χρήστες, μειώνοντας συνολικά την ένταση των παρεμβολών. Ο βαθμός απομόνωσης συνδέεται άμεσα με το μέγεθος των κεραιών, τον σχεδιασμό των κεραιών, καθώς και με το επίπεδο τοπικής διασποράς και χωρικού πολλαπλού μονοπατιού [33]. Το κέρδος των κατευθυντικών κεραιών, συνδυαζόμενο με την αυξημένη απώλεια διάδοσης που διακατέχεται από τις mmW επικοινωνίες, προβάλλεται με τη μορφή σχετικά χαμηλών παρεμβολών πολυάριθμων χρηστών (Multi User Interference, MUI), που μπορούν να στηρίξουν ταυτόχρονες συνδέσεις. Η δυνατότητα να επιτρέπεται η δημιουργία πολλαπλών διαδοχικών D2D συνδέσεων, βελτιώνει περαιτέρω τη χωρητικότητα συνολικά, του δικτύου [24].

Προκειμένου να επιτευχθεί η κατευθυντικότητα των κεραιών, παρατάσσονται τα παρακάτω μοντέλα κεραιών [9]:

- **Sectored Antenna Model:** Το μοντέλο τομεακής κεραίας υποθέτει ανεβασμένη σταθερά κέρδους (Gain), στο εύρος Half Power Beamwidth (HPBW) και χαμηλή σταθερά κέρδους στις λοιπές κατευθύνσεις. Συνηθέστερα χρησιμοποιείται σε μελέτες που εστιάζουν στη στοχαστική γεωμετρία.
- **Cosine Antenna Pattern:** Είναι μοντέλο που περιγράφει ρεαλιστικά τον κύριο λοβό (main lobe) μέσω μιας συνημιτονικής συνάρτησης. Όμως παραμελεί τους πλευρικούς λοβούς (side lobes) για αυτό και η χρήση του μοντέλου είναι περιορισμένη.
- **Gaussian Directional Model:** Παρόμοιο μοντέλο με την πρώτη κατηγορία, με τη διαφορά ότι συνυπολογίζει μικρό-διαταραχές και εσφαλμένες ευθυγραμμίσεις μεταξύ πομπού και δέκτη. Συνδέεται στενά με εφαρμογές και αλγορίθμους βελτιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας.

Φυσικά, τα μοντέλα συστοιχιών και λειτουργιών αναφορικά με τις κεραίες είναι πολυπληθή, ωστόσο οι κυριότερες κλάσεις είναι οι προαναφερθείσες. Επομένως, ευδιάκριτο είναι το γεγονός, πως η κατευθυντικότητα καθορίζει την έκβαση των mmW επικοινωνιών. Όμως, η συγκεκριμένη μάλιστα συχνότητα με τις υψηλές απώλειες μετάδοσης, αντιμετωπίζει έντονες δυσκολίες και στην περίθλαση γύρω από εμπόδια, όπως κτήρια, λόφοι κτλ. [10]. Παράλληλα, οι συνδέσεις μεταξύ πομπού και δέκτη που δεν έχουν καθαρή χωρίς τροχοπέδη, οπτική επαφή, (Non Line of Sight, NLOS), δεν είναι εφικτές στο πλήθος των περιπτώσεων [9]. Διότι, τα mmW σήματα αδυνατούν να διεισδύσουν μέσα από στερεά υλικά και η περιορισμένη, αυτή, ικανότητα, φράζει τα υπαίθρια σήματα της μάντας, σε δρόμους και εξωτερικές κατασκευές, μολονότι η ισχύς σήματος πιθανώς να φτάσει στο εσωτερικό των κτηρίων μέσω γυάλινων και ξύλινων αντικειμένων.

### 1.7.2 Indoor Locations & μW band

Σε αυτό το σημείο, έχει σημασία να αναφερθεί, πως για τις περιπτώσεις που ο πομπός βρίσκεται εντός κτηρίου, υπάρχουν τρόποι εντοπισμού της τοποθεσίας ακόμα και χωρίς την υποβοήθεια των υποδομών του δικτύου. Η λειτουργικότητα είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε περιπτώσεις εκτάκτων περιστατικών που η υποδομή του δικτύου υπολειτουργεί. Ενδεικτικά, το άρθρο [34] προτείνει μια καινοτόμα μέθοδο χρόνου αφίξεων (Time of Arrival, TOA), η οποία στηρίζεται στην παροχή τοποθεσίας σε εσωτερικούς χώρους εκμεταλλευόμενη την LTE ProSe D2D λειτουργία και δεν προαπαιτεί δομικά στοιχεία όπως WiFi ή Beacon. Ακόμα, για να παρέχεται η τοποθεσία, αυτή τη φορά με βάση τη ραδιοσυχνότητα, χρησιμοποιείται ο χρόνος άφιξης μετ' επιστροφής (round-trip) ή η διαφορά χρόνου άφιξης. Αλλά, καμία από τις παραπάνω μεθόδους δεν επιφέρει πραγματικά θεμιτά αποτελέσματα,

καθώς όλες απαιτούν αξιοσημείωτους πόρους εύρους ζώνης και συγχρονισμένες συσκευές σε ένα αυστηρό πλαίσιο. Στη συζήτηση έρχεται να συνεισφέρει το 5G πρωτόκολλο με τη mmWave μπάντα συχνοτήτων, η οποία διαθέτει υψηλό εύρος ζώνης και οι βλέψεις του δικτύου, είναι να μπορεί να επιτύχει ακρίβεια τοποθέτησης ενός μέτρου ή λιγότερο. Με τις προϋποθέσεις ωστόσο που ακολουθούν την μπάντα, το επιθυμητό αποτέλεσμα δεν είναι για την ώρα πραγματοποιήσιμο, ενώ η ιδέα που έχει προς το παρόν επικρατήσει είναι κάθε κτήριο να έχει το αποκλειστικό του 5G δίκτυο και να επενδύσει σε εφαρμογές εντοπισμού τοποθεσίας με ακριβό 5G εξοπλισμό. Με την μπάντα να μην διαπερνάει υλικούς τοίχους, ο εξοπλισμός θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθε δωμάτιο [66].

Εξερευνώντας τις υψηλότερες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων για D2D επικοινωνίες, η mmW ζώνη, αντιμετωπίζεται ως μία ελκυστική λύση για τις προκλήσεις που διακατέχουν την υλοποίηση D2D σε μεγάλη κλίμακα. Οι συνδέσεις, σε αυτό το προκαθορισμένο περιβάλλον, προσέφεραν νέες δυνατότητες στον προγραμματισμό δικτύων. Για παράδειγμα, καθώς το φάσμα χωρίς άδεια είναι άφθονο στη ζώνη mmW, η σπανιότητα του δεν αποτελεί σοβαρό ζήτημα. Επιπροσθέτως, με την κατευθυντικότητα, όπως αναφέρθηκε, μειώνεται το πρόβλημα της παρεμβολής πολλαπλών χρηστών (MUI). Κατά αντιστοιχία, προκειμένου να αποφευχθεί το υψηλό MUI στη μW ζώνη, οι D2D χρήστες μεταχειρίζονται την mmW μπάντα, φυσικά, μονάχα στις περιπτώσεις που εμφανίζονται διαθέσιμες LOS συνδέσεις. Ειδάλλως, εξακολουθούν να χρησιμοποιούν την μW ζώνη συχνοτήτων.

### 1.7.3 Interference in mmW

Σε κυψελοειδές 5G δίκτυο που υποβάλλεται στην mmW μπάντα ραδιοσυχνοτήτων, οι D2D επικοινωνίες, καλούνται να ξεπεράσουν δύο τύπους παρεμβολών, στο εσωτερικό της ίδιας κυψέλης: α) παρεμβολές που προκαλούνται ανάμεσα στις τοπικές D2D συνδέσεις, στην περίπτωση που είναι πολλαπλές και μεταξύ διαφορετικών συσκευών και β) παρεμβολές μεταξύ των τοπικών διαύλων D2D και των σημάτων είτε από D2D συσκευή προς τον σταθμό βάσης, είτε από τον σταθμό βάσης προς τον σταθμό βάσης, που εντοπίζεται σε διαφορετική κυψέλη [24]. Το πρόσχημα αυτό, έχει ωθήσει πολυάριθμες έρευνες και μελέτες στην προσπάθεια δημιουργίας αλγορίθμων που αποσκοπούν στην καλύτερη κατανομή φασματικών/χρονικών πόρων και στη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας του δικτύου ώστε να μειωθεί στο έπακρο η παρουσία των παρεμβολών.

Η βιβλιογραφία διερευνά εκτενώς το κομμάτι των παρεμβολών στην συγκεκριμένη μπάντα συχνοτήτων: το άρθρο [33], για τη μετρική του συστήματος που ονομάζεται INR (Interference-to-Noise-Ratio) παρουσιάζει ένα λεπτομερώς διαμορφωμένο μοτίβο κεραίας για να αιχμαλωτίζει τα κέρδη από τη beamforming τεχνική και ένα ανανεωμένο μοντέλο καναλιού στις 28 GHz και 73 GHz συχνότητες, το οποίο σε συνδυασμό με ρεαλιστικές beamforming τεχνικές προσφέρει ακριβή διαχωρισμό των χρήσιμων και μη κερδοφόρων σημάτων παρεμβολής. Το άρθρο [37] φανερώνει έναν σχεδιασμό Ad hoc mmW δικτύου στη συχνότητα των 60 GHz, με καθεστώς περιορισμένου θορύβου και παρεμβολών, τα οποία λειτουργούν σύμφωνα με το ALOHA πρωτόκολλο και τα Time Division Multiple Access (TDMA). Για την αξιολόγηση του μοντέλου, οι συγγραφείς του άρθρου διερευνούν την χρήση υβριδικού Medium Access Control (MAC) πρωτοκόλλου δύο φάσεων: πρώτα την κατανομή πόρων με βάση την αντιπαράθεση, ακολουθούμενη από μία συγκεντρωτική χωρίς αντιπαράθεσης κατανομή πόρων



### 1.7.4 D2D mmW Categories

Ανάλογα με τις περιρέουσες συνθήκες γύρω από την mmW ζώνη, το άρθρο [9] συζητά την κατηγοριοποίηση των D2D επικοινωνιών στην mmWave ζώνη συχνοτήτων σε δύο τύπους και ονομάζει τις γενικές συνδέσεις ως mmD2D. Η κλάση D-mmD2D συγχέεται με τη χρήση mmD2D για τον καθορισμό συνόδων άμεσης σύνδεσης μεταξύ των χρηστών. Τα κύρια σενάρια χρήσης συμπεριλαμβάνουν μη προσχεδιασμένες mmD2D (Unplanned mmD2D), εφαρμογές ελεγχόμενης λογικής και εφαρμογές ελεγχόμενης υποδομής. Η δεύτερη κλάση, λεγόμενη R-mmD2D εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο η mmD2D σύνδεση επεκτείνει την πρόσβαση του δικτύου και επομένως και την απόδοση του συστήματος με την αξιοποίηση των αναμεταδοτών. Γνωρίζοντας πως, οι mmD2D δίαυλοι είναι μη ανθεκτικοί στο μπλοκάρισμα και στις πολλαπλές παρεμβολές, ενώ υπολειτουργούν σε ζεύξεις μακρινής εμβέλειας, τα πολλαπλά μονοπάτια, που παράγονται με τη χρήση αναμεταδοτών, παρέχουν εναλλακτικές διαδρομές στον χρήστη, προκειμένου να αποφευχθεί η αντιξοότητα των συνθηκών, που διέπουν την μπάντα συχνοτήτων. Οι παραπάνω τρόποι για mmD2D συνδέσεις, ταυτίζονται φυσικά, με την κατηγοριοποίηση τρόπων μετάδοσης για απλού τύπου D2D μεταδόσεις.

### 1.7.5 5G mmW Use Cases

Η ανάμειξη της mmW μπάντας συχνοτήτων με τις κατευθυντικές MIMO κεραίες και την προοπτική της πυκνωσης του δικτύου, υπηρετεί τον ρόλο συστημάτων πρόσβασης και backhaul με εξαιρετικά ανεβασμένες ταχύτητες. Νέες δυνατότητες θα εφορμήσουν όταν ενεργοποιηθούν οι mmW φασματικές επιλογές στο Mobile Edge Computing (MEC), το οποίο αναμένεται να ελαττώσει την απόσταση του τελικού χρήστη και της πληροφορίας και υπολογιστικής λειτουργικότητας. Η υποστήριξη, όμως κινητών λειτουργιών παρουσιάζεται ως μια ιδιαιτέρως σημαντική πρόκληση στην χρήση της μπάντας. Σε σημαντικά αυξημένες συχνότητες, οι μικρές αποκλίσεις και μεταβολές του περιβάλλοντος ισοπεδώνουν την απόδοση του καναλιού. Η χρήση πολλαπλών κεραιών, σε συνδυασμό με οικονομικές αλυσίδες ραδιοσυχνοτήτων, ίσως να φέρουν απτά αποτελέσματα, λύνοντας το σημαντικό ζήτημα. Οι εξελίξεις στον τομέα των κεραιών και τεχνικών beam-steering και beam-tracking, παρέχουν την ευκαιρία για συστήματα mmW 5G, να βρουν ευρεία εφαρμογή σε πληθώρα περιβάλλοντα. Τα δίκτυα 5G στη mmW ζώνη συχνοτήτων στοχεύουν ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα για την παροχή υπηρεσιών με χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων.

Οι ακόλουθες περιπτώσεις χρήσης προσδιορίζονται, κοινώς, ως ευνοϊκές για την υιοθέτηση των 5G στη mmW συστημάτων, σύμφωνα με το κείμενο [35]. Όπως και το γενικό πρωτόκολλο οι βασικές κατηγορίες εφαρμογών είναι: eMBB, MTC και URLLC αντιστοίχως. Στην πρωταρχική κλάση συμπεριλαμβάνονται: Hotspots, Public transport, Smart Offices και Connected Vehicles (V2V, Vehicle to Pedestrian - V2P, Vehicle to Infrastructure - V2I). Στη δεύτερη ομάδα ανήκουν: Massive Internet of Things σε smart cities, agriculture, environment, medical monitoring και process monitoring είναι μερικές από τις εφαρμογές. Η τελική κατηγορία περιλαμβάνει κρίσιμες εφαρμογές IoT, που απαιτούν εξασφάλιση της αξιοπιστίας, διαθεσιμότητας και χαμηλών καθυστερήσεων. Μερικά από τα σενάρια χρήσης είναι: Process Automation, Tactile Interaction, Urgent Health Care/Remote Surgery και τα πολυσυζητημένα Emergency Networks, Disaster και Public Safety, με το έντονο χαρακτηριστικό της ενεργειακής απόδοσης στη χρήση της μπαταρίας της συσκευής του χρήστη.



## Κεφ II : Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Σενάριο Χρήσης

Ένα από τα βασικά πεδία στα οποία βρίσκει εφαρμογή το πρωτόκολλο D2D , είναι η διαχείριση κρίσεων, ιδίως στις σπάνιες έκτακτες περιστάσεις που η υποδομή του δικτύου, έχοντας υποστεί βλάβες, υπολειτουργεί. Ο σχηματισμός του συστήματος, σε αυτές τις συνθήκες, συγκροτείται από δύο φάσεις, Pre-Disaster και Post Disaster. Οι δύο φάσεις, πιθανώς περιθάλπουν μια κοινή κατάσταση, που είναι η στιγμή της κρίσης ή Just-After-Disaster. Σε κάθε στάδιο, το σύστημα ανάλογα με τις συνθήκες πρέπει να είναι σε θέση να υποσκελίζει πολυάριθμες συνδέσεις, είτε προκειμένου να προειδοποιήσει το μέγιστο αριθμό χρηστών για την επικείμενη καταστροφή (εφόσον αυτή μπορεί να προβλεφθεί), είτε για να συμβάλει στο έργο των ομάδων διάσωσης που θα τοποθετηθούν στην πληγείσα περιοχή.

Για το πρώτο στάδιο, το άρθρο [30] προβάλλει τη σημασία του Early Warning System (EWS), επιδεικνύοντας ότι το αποτελεσματικό σύστημα έγκαιρης ενημέρωσης με ισχυρή υποδομή ταχείας πληροφόρησης θα μπορούσε να σώσει, με το προληπτικό πρωτόκολλο του, ανθρώπινες ζωές. Παρότι το EWS εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος της κρίσης, η χρήση αναδυόμενων τεχνολογιών μετάδοσης θα εξασφαλίσει ισχυρά EWS σήματα για τη διάδοση μηνυμάτων σε άτομα στις επηρεαζόμενες περιοχές. Είναι απαραίτητο να τονιστεί αρκετά το γεγονός πως δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί μια φυσική ή ανθρώπινη έκτακτη κατάσταση με αποτέλεσμα η λειτουργία προειδοποιητικού συστήματος να μην μπορεί να συνδράμει στον περιορισμό των προβλημάτων που θα προκληθούν.

Στο κομμάτι της προσομοίωσης, η παραπάνω πρώτη φάση αποτελεί την έμπνευση για το πρώτο σενάριο λειτουργίας. Πιο αναλυτικά, στο πλαίσιο μονής και μικρής κυψέλης (Single Small Cell) σε σχήμα δίσκου, η οποία διαθέτει σταθμό βάσης στο κέντρο της και ταυτόχρονους χρήστες D2D (D2D User Equipment, DUE) και κινητής τηλεφωνίας (Cellular User Equipment, CUE), στόχος είναι να δημιουργηθούν επιτυχώς συνδέσεις για όλους τους D2D χρήστες, καταναλώνοντας το λιγότερο δυνατό ποσό ενέργειας και εξασφαλίζοντας υψηλή χωρητικότητα στο σύστημα. Μία φυσιολογική εκτέλεση του περιγραφόμενου συστήματος είναι το αρχικό μέρος του κώδικα της προσομοίωσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι τυπικά, για UL διαύλους επικοινωνίας, η ελάχιστη χωρητικότητα, για ένα δίκτυο 5G, σε πραγματικές συνθήκες και προκειμένου να ικανοποιεί τις ανάγκες του χρήστη, ισούται με 50 Mbps, σε αντίθεση με τα 100 Mbps που ισχύουν για τις DL μεταδόσεις [55]. Το παρόν σύστημα που θα εκτελείται λαμβάνει υπόψη μόνο τις UL μεταδόσεις, από τον D2D Tx, προς τον D2D Rx (απευθείας σύνδεση, ορθότερα sidelink) και από τον CUE προς τον σταθμό βάσης. Φυσικά, το σύστημα περιλαμβάνει παρεμβολές ανάμεσα στα αντικείμενα, που το συγκροτούν και αναλυτικότερα μεταξύ των D2D Rx και CUE όταν ο μετρίεται η χωρητικότητα για το σήμα που δέχεται ο Rx χρήστης, ενώ όταν ο παραλήπτης είναι ο σταθμός βάσης τότε οι παρεμβολές που θεωρήθηκαν αξιοσημείωτες είναι τα σήματα D2D Tx προς τον σταθμό βάσης. Δεν συνυπολογίζονται παρεμβολές ανάμεσα στα ζευγάρια των D2D χρηστών, καθώς και παρεμβολές, που μπορεί να δημιουργούνται από τους δύο διαφορετικούς παραλήπτες του δικτύου. Μόλις ολοκληρωθεί το πρώτο σενάριο θεωρείται πως πραγματοποιήθηκε έκτακτο περιστατικό, όπως έντονη σεισμική δόνηση, φαινόμενο που δεν μπορεί να προβλεφθεί, αλλά μπορεί να επιδράσει στη λειτουργία ενός συστήματος.

Η νέες συνθήκες συμπεριλαμβάνουν συντρίμμια που έχουν προκύψει με τυχαία κατανομή σε όλο το μήκος της κυψέλης (εμπόδια που να μπλοκάρουν την οπτική επαφή μεταξύ σημείων), ο σταθμός βάσης τίθεται μερικώς εκτός λειτουργίας εξαιτίας βλαβών, που προκλήθηκαν από τον σεισμό και αυτομάτως όλες οι συσκευές, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα, χρησιμοποιούν τις D2D επικοινωνίες ώστε να στήσουν μικρής κλίμακας δίκτυο. Οι λοιπές συσκευές που δεν μεταχειρίζονται στο δίκτυο τέτοιου τύπου συνδέσεις, θεωρείται ότι παρεμβάλουν στις D2D συζεύξεις. Με στόχο τις αξιόπιστες επικοινωνίες και τις ικανοποιητικές ταχύτητες μεταξύ των επικοινωνιών των D2D στοιχείων αξιοποιείται η mmW μπάντα συχνοτήτων. Τα σημεία του δικτύου που μετά τη σεισμική δόνηση εγκλωβίστηκαν στα συντρίμμια, δεν είναι δυνατό να συνάψουν καμία επικοινωνία χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Οι επικοινωνίες που λαμβάνονται σε υπόληψη είναι NLOS και LOS, που ο D2D Rx και ο D2D Tx είναι έξω από τα σημεία των αποκλεισμών. Οι πομποί του συστήματος αντιπροσωπεύουν τους πληγέντες της επηρεαζόμενης περιοχής και οι δέκτες για τις D2D επικοινωνίες, θεωρούνται μέλη μιας ομάδας δράσης που σκοπεύει στον εντοπισμό και στην επικοινωνία με τους πομπούς ώστε να διαπιστωθεί ότι είναι σε υγιή κατάσταση και να τους ενημερώσουν ποιές θα είναι οι επόμενες κινήσεις τους. Ένας πομπός αντιστοιχεί σε έναν δέκτη, ωστόσο οι παρεμβολές επηρεάζουν όλα τα ζευγάρια. Επομένως, είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί το D2D πρωτόκολλο προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες ζεύξεις αλλά και να προσδιοριστούν οι πληγέντες, αφού οι παρεμβολές που δημιουργούνται σε αυτό το σύστημα δεν είναι απαραίτητως από χρήστες κινητών επικοινωνιών. Πιθανώς, να είναι ηλεκτρικές συσκευές που εκπέμπουν και χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη συχνότητα. Στο τελικό σενάριο, επίσης, εξετάζονται οι τρόποι κατανομής ενέργειας όπως και στο πρώτο σενάριο με μικρές μεταβολές στην υλοποίησή τους.

Πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως μονάχα ένας δέκτης αντιστοιχίζεται και συνδέεται με έναν πομπό με την αρχή αυτή να διέπει όλη την παρούσα εργασία. Όταν ολοκληρωθούν οι εκτελέσεις των αντίστοιχων σεναρίων, τα αποτελέσματα που εμφανίζονται, συσχετίζονται με τον ρυθμό ροής του συστήματος, την κατανομή ενέργειας στα ζευγάρια των D2D συσκευών (οι ενεργειακοί πόροι που παρέχονται στον πομπό), τον αριθμό των ζευγαριών, που κατόρθωσαν να επικοινωνήσουν και τέλος με την απώλεια μονοπατιού (η οποία αναλύεται σε επόμενη υποενότητα).

## 2.2 Signal to Interference plus Noise Ratio

Σε αυτό το σημείο ορίζονται θεμελιώδεις έννοιες που αφορούν το αναλυτικό κομμάτι της προσομοίωσης και της θεωρίας των τηλεπικοινωνιών. Το κυριότερο στοιχείο, που χρησιμοποιείται εκτενώς, είναι η μετρική SINR. Όπως έχει προαναφερθεί, η μετρική καταδεικνύει την ποιότητα του σήματος που φτάνει στον δέκτη και καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τόσο την χωρητικότητα του συστήματος αλλά και τα QoS που το συνοδεύουν. Για την προσομοίωση και τους αντίστοιχους ελέγχους δίνεται η προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή  $SINR_{threshold} = 13dB$  (decibels) για τις συνδέσεις που ο αποδέκτης του σήματος, είναι ο D2D Rx. Στις περιπτώσεις που ο σταθμός βάσης παραλαμβάνει το επιθυμητό σήμα από τους CUE χρήστες, τότε η ελάχιστη τιμή είναι ορισμένη στα 15-20dB. Η SINR μετρική, λοιπόν, υπολογίζει την ποιότητα του σήματος μετρώντας την ισχύ του επιθυμητού σήματος σε συνάρτηση με τις ανεπιθύμητες παρεμβολές και τον θόρυβο του συστήματος. Οι πάροχοι δικτύων στοχεύουν στην μεγιστοποίηση της μετρικής, σε όλες τις τοποθεσίες του συστήματος, για να προσφέρουν την καλύτερη δυνατή εμπειρία στους χρήστες, είτε

μεταδίδοντας σήματα με υψηλότερη ισχύ, είτε ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές και τον θόρυβο. Ο γενικός τύπος για τον υπολογισμό της μετρικής είναι:

$$SINR = \frac{Signal}{Noise + Interference} ,$$

όπου στην παραπάνω εξίσωση η *Noise* μεταβλητή αντιπροσωπεύει τον θόρυβο του συστήματος, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία του Additive White Gaussian Noise (AWGN). Οι παρεμβολές μεταβάλλονται σύμφωνα με τον παραλήπτη του σήματος, το καθολικό σύστημα και τις αποστάσεις των συσκευών του. Συχνά, όπως έχει αποσαφηνιστεί, οι παρεμβολές πιθανώς να δημιουργούνται από διαφορετικού τύπου συσκευές, που χρησιμοποιούν τη συχνότητα μετάδοσης για άλλους σκοπούς.

Στη διάρκεια της προσομοίωσης και σε συνάρτηση με το σενάριο χρήσης, η εξίσωση για τον υπολογισμό της μετρικής, μεταβάλλεται, εξαρτώμενη από τις σχετικές παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με το πρώτο σενάριο της προσομοίωσης, απαιτούνται δύο τιμές της μετρικής. Η πρώτη σχετίζεται με την ποιότητα του σήματος, μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και του σταθμού βάσης, όπου οι D2D συσκευές παράγουν παρεμβολές στον τελικό αποδέκτη. Η δεύτερη μετρική αφορά τη λήψη σήματος στον D2D Rx υπό την επιρροή παρεμβολών, δημιουργήμα των CUE. Κάθε ζευγάρι D2D συσκευών (Rx - Tx) είναι ξεχωριστό, με τον σταθμό βάσης να μην επηρεάζει τη σύζευξη αυτών. Είναι απαραίτητο να γίνει ευδιάκριτο, ότι ο διάυλος επικοινωνίας που αναπτύσσεται ανάμεσα στα αντικείμενα του συστήματος έχει κατεύθυνση από τις συσκευές προς τον σταθμό βάσης ή τον D2D δέκτη (UL επικοινωνία).

Συνεχίζοντας με τη μετρική για την πρώτη προσομοίωση που ο σταθμός βάσης λαμβάνει το σήμα, ο SINR τύπος αποτυπώνεται με βάση το [43],[52],[56] και έστω ότι συμβολίζεται με  $\gamma_{BS}$ :

$$\gamma_{BS} = \frac{P_{CUE_k} h_{CUE_k,BS}}{N_o + I_{BS}} , (1)$$

όπου  $k$  είναι η εκάστοτε συσκευή που επιδιώκει να επικοινωνήσει με τον σταθμό βάσης και ανήκει στο σύνολο  $k \in \{1, \dots, M\}$ , το σύνολο των CUE συσκευών. Η παράμετρος  $P_{CUE}$  αντικατοπτρίζει την ισχύ που κατανέμεται από το σύστημα ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Το σύμβολο  $h_{CUE_k,BS}$  είναι το κέρδος του  $k$ -ου διαύλου επικοινωνίας για τη  $k$ -ή ζεύξη (από CUE σε BS). Η  $N_o$  μεταβλητή ανήκει στην AWGN, όπως προαναφέρθηκε, κατηγορία και η παράμετρος  $I_{BS}$  είναι το σύνολο των παρεμβολών που αναφύονται από τους D2D πομπούς προς τον σταθμό βάσης. Ο παραπάνω τύπος, επομένως, θα υπολογίσει την ποιότητα του σήματος, που έχει σαν αποδέκτη τον σταθμό βάσης, από όλες τις συσκευές κινητής τηλεφωνίας που τον αξιοποιούν, σε συνάρτηση με τις παρεμβολές των υπόλοιπων D2D συσκευών. Για την περίπτωση όπου ο αποδέκτης του σήματος είναι μία D2D συσκευή, ο τύπος παρουσιάζεται ως [52]:

$$\gamma_{Rx_k} = \frac{P_{Tx_k} h_{Rx_k, Tx_k}}{N_0 + I_{Rx_k}^{\mu W}}, \quad (2)$$

όπου  $k$  συμβολίζει τις DUE συσκευές και ανήκει στο σύνολο  $k \in \{1, \dots, N\}$  το σύνολο αυτών. Όπως και στην προηγούμενη συνάρτηση, χρησιμοποιούνται οι ενέργειες που έχουν κατανεμηθεί από το σύστημα στους D2D πομπούς ( $P_{Tx_k}$ ), καθώς και το κέρδος των διαύλων

$h_{Rx_k, Tx_k}$  (της απευθείας σύνδεσης). Το σύμβολο  $I_{Rx_k}^{\mu W}$ , αντικατοπτρίζει το σύνολο των παρεμβολών, από τους χρήστες παραδοσιακών επικοινωνιών, που καταφθάνουν στον  $k$ -ο D2D δέκτη. Τα σύνολα  $M$ ,  $N$ , καθώς και η μεταβλητή  $N_0$  είναι προκαθορισμένα με βάση τις απαιτήσεις του συστήματος. Οι παραπάνω δύο τύποι παράγουν το αποτέλεσμα των εκτελέσεων της πρώτης επιλογής σεναρίου. Είναι φανερό, πως στο δεύτερο και τελικό σενάριο χρήσης του δοκιμαστικού μοντέλου θα απουσιάζει ο αρχικός τύπος για τον σταθμό βάσης, αφού θεωρείται πως υπολειτουργεί και δε δύναται να καθορίσει τις κινήσεις του δικτύου. Άρα, η μετρική λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν ο αποδέκτης του παραγόμενου σήματος είναι D2D Rx. Ο τύπος κυρίως στηριζόμενος στο [5] περιγράφεται παρακάτω:

$$\gamma_{Rx_k} = \frac{P_{Tx_k} h_{Rx_k, Tx_k} G_{e_{D2D_k}} PL_{D2D_k}(d_{D2D_k})}{N_0 + I_{Rx_k}^{mmW}}, \quad (3)$$

Ο παραπάνω τύπος εισάγει τις έννοιες του άμεσου κέρδους και της απώλειας διαδρομής για τον υπολογισμό της SINR μετρικής. Το  $k \in \{1, \dots, N\}$  με  $N$  το πλήθος των D2D χρηστών. Η μεταβλητή  $PL(d)$ , αντιστοιχίζεται στην απώλεια μονοπατιού του  $k$ -ου ζεύγους, εξαρτώμενη από τη μεταξύ τους απόσταση  $d_{D2D}$ . Με την  $I_{Rx_k}^{mmW}$  παράμετρο, συμβολίζεται το σύνολο των παρεμβολών που επηρεάζει τον συγκεκριμένο D2D δέκτη. Το άμεσο κέρδος που καταγράφεται ως  $G_{e_{D2D}}$ , είναι το κέρδος που προκύπτει από τη γωνία διάδοσης των κεραιών του δέκτη και του πομπού. Η τιμή του γίνεται μέγιστη όταν αντικρίζονται οι κεραιές των δύο συσκευών. Στην περίπτωση που οι συζητούμενες κεραιές είναι ισοτροπικές τότε το  $G_{e_{D2D}} = G_{Rx} G_{Tx}$  θα ισούται με τη μονάδα, αφού  $G_{Rx} = G_{Tx} = 1$ . Στο σύστημα της πτυχιακής, ανακοινώνεται ότι, οι κεραιές δεν ανήκουν στο είδος των ισοτροπικών κεραιών. Όταν η κεραία δεν είναι ισοτροπική, το άμεσο κέρδος μπορεί να υπολογιστεί μέσα από την αποτελεσματική περιοχή κάλυψης της κεραίας με τον τύπο [42]:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G, \quad (4)$$

με  $A_e$  να είναι η αποτελεσματική περιοχή κάλυψης και  $\lambda$  να είναι το μήκος κύματος. Οι συνθήκες για την εξίσωση είναι ιδανικές με το μέσο μετάδοσης να είναι ο αέρας και με απώλειες ελεύθερου χώρου. Στη συνέχεια της εργασίας, ερευνάται πως, το κέρδος είναι

δυνατόν να μετρηθεί μέσα από τη γωνία μετάδοσης, σε 5G συστήματα όταν ακολουθούνται τεχνικές διαμόρφωσης σήματος και οι κεραιές είναι MIMO. Όταν ο D2D πομπός μεταδίδει με γωνία κλίσης που τείνει προς τον δέκτη και με την προϋπόθεση πως ο δέκτης είναι στραμμένος προς τον πομπό, τότε η υποδοχή του σήματος συμβαίνει στην mainlobe περιοχή της κεραίας, όπου η ισχύς λήψης και μετάδοσης είναι μέγιστη. Αυτή η αρχή υποστηρίζεται στο άρθρο [5], όταν είναι απαραίτητο να βρεθεί το άμεσο κέρδος των συσκευών που παρεμβάλλουν, τον μοναδικό δέκτη, σύμφωνα με το σύστημά που περιγράφεται.

## 2.3 Path Loss

Η απώλεια μονοπατιού ή διαδρομής αποτελεί θεσμική παράμετρο για τη μετάδοση ενός σήματος, η οποία σχετίζεται με το μέσο διάδοσης, με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και με το περιβάλλον που περικλείει τους χρήστες που επιδιώκουν να επικοινωνήσουν. Η συνηθέστερη μορφή απώλειας μονοπατιού ονομάζεται Free Space Path Loss (FSPL) και το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας, σε χώρους που δεν υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στις συνδέσεις των συσκευών.

### 2.3.1 Free Space Path Loss

Η απώλεια διαδρομής σε ελεύθερο μέσο εκδηλώνεται με τη μορφή εξασθένησης των ραδιοκυμάτων μεταξύ δύο τερματικών κεραιών και προκαλείται από σύγκλιση της περιοχής κάλυψης. Η θεωρία για τον υπολογισμό της παραμέτρου αναπτύχθηκε από τον Harald T. Friis τον Μάιο του 1946 [42] και απορρέει από τον γενικό τύπο μετάδοσης που ο ίδιος διατύπωσε (Friis Transmission Equation). Η εξίσωση αποτυπώνεται ως:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{A_r A_t}{d^2 \lambda^2}, (5).$$

Οι μεταβλητές  $P_r$  και  $P_t$  είναι η ισχύς που λαμβάνεται από τον τελικό δέκτη και αντιστοίχως, η ισχύς μετάδοσης που τροφοδοτείται σαν είσοδος στον πομπό και αξιοποιείται κατά τη διάρκεια της σύνδεσης. Οι  $A_r$  και  $A_t$  αποτελούν την αποδοτική περιοχή δράσης των κεραιών του δέκτη και του πομπού, όπως περιγράφονται από τον τύπο (4) και  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ των κεραιών ενώ  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος. Η εξίσωση προαπαιτεί το περικλείον περιβάλλον διάδοσης να ταυτίζεται με τον ελεύθερο χώρο μετάδοσης και η κεραία να κατηγοριοποιείται σε ιστροπική ή omnidirectional (πανκατευθυντική). Ο γενικός τύπος (5), συνδυαζόμενος με την εξίσωση (4) εισάγει στη βασική εξίσωση μετάδοσης την έννοια του κέρδους.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2, (6)$$

Η (6) είναι και η κοινότυπη εξίσωση εύρεσης της λαμβανόμενης ισχύος, όταν  $G_r$  και  $G_t$  είναι τα άμεσα κέρδη των κεραιών στο δέκτη και στον πομπό αντίστοιχα, τα οποία μετρώνται σε dBi (decibels over isotropic). Αντιλαμβανόμενος ο αναγνώστης τη σημασία και συμπεριφορά της εξίσωσης (6), θα διαπιστώσει πως κρύβεται στο εσωτερικό της η απώλεια διαδρομής

ελεύθερου χώρου. Η απώλεια ελεύθερου χώρου που συχνά συμβολίζεται ως  $L_{FS}$  προκύπτει από την απόσταση και το μήκος κύματος και καταγράφεται σύμφωνα με τα [5],[35],[43] ως:

$$L_{FS} = \left[ \frac{P_T}{P_R} \right]_{G_T=G_R=1} = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 d^a. \quad (7)$$

Η απώλεια ελεύθερου χώρου θεωρείται ένα από τα χαρακτηριστικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη, στον προϋπολογισμό της ισχύος σύνδεσης, του συστήματος ραδιοεπικοινωνίας [32]. Η εξίσωση (7) εκμεταλλεύεται την παραδοχή πως οι χρησιμοποιούμενες κεραίες χαρακτηρίζονται από ισοτροπική μετάδοση και δηλώνει τη σχέση εξάρτησης με την απόσταση  $d$ , αλλά και τη σχετική σταθερά  $a$ , ονόματι Path Loss Exponent (PLE). Αξίζει να αποτυπωθεί πως στην επιλογή omnidirectional κεραίας, η αύξηση του path loss ισοσταθμίζεται από ανάλογη αύξηση του κέρδους της κεραίας χρησιμοποιώντας τεχνικές διαμόρφωσης σήματος όπως beamforming. Αυτό διαφαίνεται στις συχνότητες της mmW μπάντας, όπου η απώλεια μονοπατιού είναι αρκετά υψηλή, μιάς και η μπάντα συχνοτήτων διέπεται από έντονες εξασθενήσεις του καναλιού, με τα σήματα να είναι σημαντικά ευάλωτα σε φαινόμενα σκίασης. Αποτέλεσμα είναι οι διακοπές, οι ραγδαίες μεταβολές στην κατάσταση του σήματος και η διακοπτόμενη συνδεσιμότητα, κυρίως σε ακατάστατα αστικά περιβάλλοντα που η κάλυψη απαιτεί NLOS συνδέσεις [36]. Τεχνικές που αυξάνουν το κέρδος της κεραίας φέρνουν το σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας.

Στην περίπτωση που η απώλεια ελεύθερου χώρου, είναι αναγκαίο να μετρηθεί σε dB ως μονάδα μέτρησης ο τύπος γίνεται [35]:

$$L_{FS}[dB] = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44. \quad (8)$$

Εδώ προάγεται και η συσχέτιση ανάμεσα στην απώλεια και στη συχνότητα μετάδοσης που έχει καθορίσει το σύστημα. Παραλλαγές της (8) δημιουργούν εξισώσεις υπολογισμού για LOS/NLOS συνδέσμους με τύπους που μπορούν να διαχωρίζονται με βάση την απόσταση των στοιχείων του συστήματος και το περιβάλλον μετάδοσης. Μερικές από αυτές αξιοποιούνται στο κομμάτι της προσομοίωσης της εργασίας και παρουσιάζονται λεπτομερώς σε επόμενη υπό-ενότητα.

### 2.3.2 Path Loss Exponent

Η σταθερά PLE καταδεικνύει τις συνθήκες που επικρατούν στο περικλείον περιβάλλον αναφορικά με το αν η περιοχή είναι αποδεδειγμένη από κτήρια, στάδια, ή άλλου τύπου εμπόδια ή ταυτίζεται με τον ελεύθερο χώρο. Η σταθερά προσδιορίζεται στο εύρος τιμών,  $a \in \{2, \dots, 6\}$ . Η τιμή 2 συγγεί τη μετάδοση με το ανοιχτό πεδίο και η απώλεια γίνεται ως εκ τούτου FSPL. Η συνηθέστερη τιμή της σταθεράς, για αστικά περιβάλλοντα, ισούται με 4 και περιγράφει την ύπαρξη μερικών εμποδίων και απωλειών, κυρίως σε μορφή κτηρίων. Η τιμή της παραμέτρου συνδέεται με τις NLOS/LOS επικοινωνίες και την κατηγοριοποίησή αυτών. Σε αστικά περιβάλλοντα και με την προϋπόθεση πως πολλαπλά κτήρια, απαρτίζουν τον περιβάλλοντα χώρο, η τιμή θα φτάσει το ανώτατο όριο της, 6, και θα εκφράζει τις μέγιστες απώλειες για τις μεταδόσεις σε ένα αφιλόξενο για συνδέσεις μέσο μετάδοσης.



Η παρακάτω Εικόνα 4 παρουσιάζει τις διαφορετικές τιμές που δύναται να έχει η σταθερά, σε γενικό πλαίσιο, από το άρθρο [57].

Environment	Path Loss Exponent
Free Space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line-of-sight	1.6 to 1.8
Obstructed in buildings	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3

Εικόνα 4: Path Loss Exponent values.

Τα σενάρια προσομοίωσης, με προφανείς διαφορές στις συνθήκες διεξαγωγής τους, θα έχουν και διαφορετικά χαρακτηριστικά περιβάλλοντος. Δηλαδή, το πρώτο σενάριο που αποσκοπεί σε ομαλή λειτουργικότητα 5G D2D δικτύου, θέτει σαν περιβάλλον υλοποίησής του, τον ελεύθερο χώρο μετάδοσης ( $\alpha = 2$ ) ώστε να απλουστεύεται η διαδικασία υπολογισμού της απώλειας μονοπατιού. Με παρόμοιο τρόπο καθορίζεται η φύση του δεύτερου σεναρίου με την προϋπόθεση ότι δημιουργούνται συντρίμια και εμπόδια, για να αυξηθούν οι τιμές των απωλειών με ρεαλιστική ανταπόκριση ( $\alpha \in \{4, \dots, 6\}$ ). Πολλαπλές έρευνες σχετικά με το path loss έχουν μετρήσει τιμές της path loss exponent σε πραγματικές συνθήκες σε περιοχές πόλεων όπως η Νέα Υόρκη, το Austin στο Texas και άλλες [36],[44],[58].

### 2.3.3 Path Loss Calculation Models

Στα περισσότερα συστήματα που προσπαθούν να προσομοιώσουν δίκτυα κινητών επικοινωνιών, η path loss παράμετρος διαιρείται σε δύο κύριες κατηγορίες [54]:

1. *Line of Sight (LOS)*: η διαδρομή μετάδοσης δεν εμποδίζεται από στοιχεία/αντικείμενα του περιβάλλοντος.
2. *Non Line of Sight(NLOS)*: η διαδρομή LOS διακόπτεται από εμπόδια.

Ο βασικός αυτός διαχωρισμός σε συνδυασμό με την απόσταση των αντικειμένων και συχνά με τη συχνότητα μετάδοσης, προσφέρει μια πληθώρα διαφορετικών εξισώσεων για τον υπολογισμό του path loss.

Το άρθρο [32] συζητά τον υπολογισμό της path loss μεταβλητής συγκριτικά με την απόσταση ανάμεσα στον D2D δέκτη και στον D2D πομπό. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των δύο συσκευών, ξεπερνάει προκαθορισμένη τιμή απόστασης, το άρθρο εκμεταλλεύεται τον τύπο (8) για ελεύθερες μεταδόσεις σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Αντιστρόφως, όταν η απόσταση είναι μικρότερη από την ορισμένη σταθερά, επιστρατεύεται ο ελαφρώς μεταβαλλόμενος τύπος:

$$PL_{D2D} = 12\log_{10}(d) + 12\log_{10}(fc) + 19.45, \forall d < threshold. (9).$$

Στην (9) η απώλεια για τον διάυλο επικοινωνίας μεταξύ D2D πομπού και δέκτη συμβολίζεται με  $PL_{D2D}$ , με τη μεταβλητή  $fc$  να υποδηλώνει την συχνότητα μεταφοράς. Αυξημένες τιμές

απώλειας διαδρομής συνεπάγονται χαμηλότερο κέρδος καναλιού και συνολικά χαμηλότερη απόδοση. Η συνθήκη ισοσταθμίζεται, αν συνυπολογίζονται οι κοντινές αποστάσεις και οι κατάλληλες συχνότητες μετάδοσης. Το άρθρο συνεχίζει με την απώλεια μονοπατιού για τις παρεμβολές, οι οποίες προκαλούνται από τους χρήστες παραδοσιακής επικοινωνίας, πάντα ως προς τη D2D Rx συσκευή, με αποτέλεσμα να αναφέρονται δύο ακόμα εξισώσεις που συνδέουν τις παρεμβολές με τον δέκτη, για μία ακόμα φορά συγκριτικά με την απόσταση μεταξύ των σημείων και τη συχνότητα μεταφοράς. Οι δύο εξισώσεις είναι:

$$PL_{INTF_{Rx}}^{short} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(fc) + 32.45, \forall d < threshold. (10)$$

και

$$PL_{INTF_{Rx}}^{long} = 34\log_{10}(d) + 34\log_{10}(fc) + 64.9, \forall d > threshold. (11)$$

Ο τύπος (10) ευδιάκριτα φαίνεται πως είναι ο τύπος (8), με τη διαφορά ότι εκτελείται υπό άλλες συσκευές και η εξίσωση (11) είναι μια παραλλαγή για τις παρεμβολές, που προκαλεί μεγαλύτερη απώλεια μονοπατιού στον D2D δέκτη, απόρροια της μεγάλης απόστασης. Σε αυτό το σημείο είναι αναγκαίο να αποτυπωθεί πως η απόσταση  $d$  έχει για μονάδα μέτρησης τα μέτρα (m) και η συχνότητα έχει τα kiloHertz (kHz). Οι παραπάνω τύποι (8),(9),(10),(11) καθορίζουν την απώλεια μονοπατιού κατά τη διάρκεια του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης, όπου το περιβάλλον αντιστοιχίζεται στον ελεύθερο χώρο. Στο πρόγραμμα η προκαθορισμένη σταθερά που χωρίζει τους τύπους με βάση τις αποστάσεις, έχει τεθεί στα 125m, δηλαδή τη μισή απόσταση της ακμής της κυψέλης για τους τύπους (8),(9) και στα 250m για τις παρεμβολές (10),(11). Η συχνότητα ανήκει στην Inband Underlay κατηγορία (αδειοδοτημένο φάσμα) συχνοτήτων και κυμαίνεται στα 2GHz. Οι εξισώσεις, είναι θεμιτό να ειπωθεί, ότι συνήθως αναγράφονται με την εξής μορφή:

$$PL = 20\log_{10}(d/d_o) + 20\log_{10}(fc/f_o) + 32.45.$$

Η γενική μορφή αυτή υποδηλώνει τη χρήση επιμέρους παραμέτρων αναφοράς για την απόσταση και τη συχνότητα. Συνηθέστερα, η απόσταση αναφοράς  $d_o$  ανάγεται στο 1m, ενώ η συχνότητα αναφοράς μετράται σε Hz. Οι παραπάνω τύποι αξιοποιούνται για LOS συνδέσμους και μπορούν να απλοποιηθούν, ώστε μονάχα η απόσταση να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Τα άρθρα [36],[44],[58] εισάγοντας ως βασικό παράγοντα την απόσταση, αναδεικνύουν την παρακάτω γενική εξίσωση:

$$PL(d) [dB] = \delta + \beta 10\log_{10}(d), (12)$$

Η εξίσωση (12) είναι φανερό πως, έχει την ικανότητα να υποστηρίξει τη μετάδοση σε ελεύθερο χώρο. Στον τύπο οι μεταβλητές  $\delta$  και  $\beta$  είναι τα ελάχιστα τετράγωνα προσαρμογής τομής και κλίσης στις μετρούμενες αποστάσεις. Στην ιδιάζουσα περίπτωση που ο διάυλος επικοινωνίας είναι NLOS τότε η εξίσωση εισάγει το φαινόμενο της σκίασης τον τύπο (12) σύμφωνα με τις έρευνες [36],[44],[58],[71]:

$$PL(d)[dB] = \delta + \beta 10\log_{10}(d) + \xi, \xi \sim N(0, \sigma^2), (13)$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση μετρημένη σε μέτρα. Η παραπάνω εξίσωση υπαγεται στην κατηγορία των μοντέλων *Floating Intercept* για την εύρεση της απώλειας [71]. Η μεταβλητή  $\delta$  ονομάζεται *floating intercept* και χρησιμοποιείται σε dB, ενώ η  $\beta$  είναι η κλίση (slope) για τα σήματα με τις αποστάσεις  $d$ . Σε ειδικές περιπτώσεις που είναι επιθυμητός ο υπολογισμός της μέσης απώλειας διαδρομής η  $\beta$  μεταβλητή ταυτίζεται με τη μέση τιμή της PLE σταθεράς. Έπειτα η παράμετρος  $\xi$  είναι τυχαίος αριθμός που ακολουθεί λογαριθμική κατανομή με λογαριθμική διακύμανση σκίασης,  $\sigma^2$ . Ο τύπος (13) αξιοποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του δεύτερου σεναρίου τόσο για τις NLOS ζεύξεις, όσο και για τις LOS συνδέσεις. Η διαφορά έγκειται στις τιμές που αποκτούν οι παράμετροι της εξίσωσης. Ο τύπος (13) συμμετέχει στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης. Οι τιμές των  $\delta$  και  $\beta$  πάρθηκαν από τα [36],[44],[58] και αφορούν αποστάσεις από περίπου 30 μέχρι 200 μέτρα. Ενδεικτικές τιμές παρουσιάζονται, σε συνδυασμό και με τον τρόπο απόκτησής τους, στο άρθρο [71] με την Εικόνα 5 να αποτυπώνει τον πίνακα τιμών. Ακόμα επισημαίνεται από το [36], να μην αποδοθεί οποιαδήποτε φυσική σημασία στις εκτιμώμενες τιμές  $\delta$  και  $\beta$ , αφού οι μεταβλητές είναι ευαίσθητες στα δεδομένα και στο περιβάλλον της εκάστοτε προσομοίωσης και δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται εκτός των δοκιμασμένων αποστάσεων.

Η πιθανότητα αποκλεισμού ως στατιστικό φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απώλεια μονοπατιού, όταν η απόσταση ξεπερνάει την περιοχή κάλυψης, Ως παράδειγμα καταγράφεται η ιδέα του άρθρου [36] που για αποστάσεις μεγαλύτερες του εύρους κάλυψης, ο υλοποιημένος αλγόριθμος, βρίσκει την πιθανότητα αποκλεισμού προκειμένου να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για τον ακριβή υπολογισμό της απώλειας για LOS/NLOS συνδέσεις.

Env.	Pol.	$\beta$	$\alpha$	$\sigma$ (dB)
LOS	V-V	2.3401	75.1359	9.0714
	V-H	1.9560	97.6545	6.5463
NLOS	V-V	6.6535	28.0051	7.0683
	V-H	6.9676	27.7466	6.9574

Εικόνα 5: Ενδεικτική καταγραφή των διαφορετικών τιμών για την εξίσωση (13) σε LOS και NLOS περιβάλλοντα. Το  $\alpha$  το *floating intercept* (dB), το  $\beta$  είναι η κλίση και  $\sigma$  είναι ο παράγοντας σκίασης. Τα διακριτικά *V-V*, *V-H* είναι αντίστοιχα τα *Vertical-Vertical* και *Vertical-Horizontal* και θεωρούνται σαν δύο διαφορετικές πολώσεις κεραίας [71].

Συνοψίζοντας για την απώλεια μονοπατιού και προκειμένου να φανεί η προσαρμοστικότητα των παραπάνω εξισώσεων, το άρθρο [54], ενσωματώνει πολλαπλές από τις αναφορές που καταγράφηκαν. Αναλυτικότερα, στο άρθρο, ο διαχωρισμός της απώλειας προκύπτει με βάση το περιβάλλον, αν δηλαδή οι συσκευές (οχήματα) είναι τοποθετημένες σε αστικό περιβάλλον ή σε αυτοκινητόδρομο. Στην πρώτη κατάσταση, οι απώλειες θα είναι μεγαλύτερες και η παράμετρος PLE υψηλότερη και αντίστροφα για τον αυτοκινητόδρομο. Οι εξισώσεις της απώλειας, όταν είναι LOS είναι εξαιρετικά γνώριμες:

$$PL_{LOS}^u(d) = 16.7 \log_{10}(d) + 18.2 \log_{10}(fc) + 38.77 + \xi,$$

$$PL_{LOS}^h(d) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(fc) + 32.4 + \xi,$$

Τα σύμβολα  $u$  και  $h$  αντιστοιχίζονται στο περιβάλλον (urban και highway). Η διαφορά των παραπάνω τύπων με τους προηγούμενους αφορά τη μεταβλητή  $\xi$  που ακολουθεί τη λογαριθμική κατανομή με συγκεκριμένη τυπική απόκλιση  $\chi_{\sigma_a}$ . Στην κατάσταση που οι

δίαυλοι επικοινωνίας ανήκουν στην NLOS κατηγορία, η εξίσωση της απώλειας μονοπατιού, όπως διατυπώνεται από το άρθρο, για αστικά κέντρα και για αυτοκινητόδρομους διατυπώνεται ως:

$$PL_{NLOS}(d) = 30\log_{10}(d) + 18.9\log_{10}(fc) + 36.85 + \xi.$$

Το άρθρο αναλύει εκτενώς τα μοντέλα απώλειας, τα οποία είναι επέκταση του 3GPP V2V path loss μοντέλου και αποδεικνύει αριθμητικώς την επικύρωσή τους για κόμβους που λειτουργούν κάτω από την mmW μπάντα συχνοτήτων.

## 2.4 SINR και Capacity

Με τις απαιτήσεις του εύρους ζώνης των ασύρματων εφαρμογών να αυξάνονται εκθετικά, τα 5G συστήματα καλούνται να αντιμετωπίσουν το ζήτημα της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Παράλληλα, η αποδοτική χωρητικότητα του δικτύου έχει αποδειχθεί πως αποτελεί εξίσου σοβαρό πρόβλημα και σε συνδυασμό με την ενεργειακή κατανομή πόρων, έχουν τραβήξει τα κεντρικά βλέμματα του επιστημονικού κλάδου.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Shannon περί χωρητικότητας (Shannon's Capacity Theorem), η ισχύς μετάδοσης συσχετίζεται με τη χωρητικότητα του συστήματος στους σταθμούς βάσης και η απόδοση του δικτύου συχνά αναγνωρίζεται ως η αναλογία του ρυθμού μετάδοσης προς την ενεργειακή κατανάλωση [59]. Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, το Shannon's Limit είναι το θεωρητικό μέγιστο εύρος ζώνης του καναλιού σε συνάρτηση με το SINR. Επομένως, με τη βελτιστοποίηση της μετρικής το σύστημα αποκτά αυξημένη χωρητικότητα επιτρέποντας την QAM (που έχει την καλύτερη φασματική απόδοση) διαμόρφωση υψηλότερης τάξης με αποτέλεσμα γρηγορότερους ρυθμούς δεδομένων και ελαττωμένο αριθμό κλήσεων που απορρίπτονται [38].

Το άρθρο [39] και συγκεκριμένα το Theorem 20, παρουσιάζει πως η χωρητικότητα καναλιού  $C$ , για μία μπάντα  $W$  διαταρασσόμενη από λευκό, θερμικό θόρυβο  $N$  δεσμεύεται ως:

$$C \geq W \log \left( \frac{2}{\pi e^3} \frac{S}{N} \right),$$

Το  $S$  είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς μετάδοσης. Με την προοπτική της μεγιστοποίησης της εντροπίας του λαμβανόμενου σήματος αποδείχτηκε πως, όσο το τιμές  $\frac{S}{N}$  πλησιάζουν στο μηδέν και δεδομένου ότι η ζώνη  $W$  ξεκινάει από το 0, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$C = W \log \left( 1 + \frac{S}{N} \right).$$

Στην περίπτωση που αντικατασταθεί ο όρος  $\frac{S}{N}$ , με την SINR μετρική, το αποτέλεσμα είναι η χωρητικότητα του καναλιού να παρουσιάζεται ανάλογη της ισχύος μετάδοσης και δυσανάλογη του αθροίσματος των παρεμβολών και του θορύβου.

$$C = W \log(1 + SINR). \quad (14)$$

Η εξίσωση (14) είναι ο κύριος τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας του καναλιού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και φυσικά έχουν παραχθεί παρόμοιοι πολυάριθμοι τύποι, ώστε να ανταπεξέρχονται στις παραμέτρους της εκάστοτε έρευνας. Ένα απλό παράδειγμα είναι ο διαχωρισμός της χωρητικότητας με βάση το φάσμα που χρησιμοποιείται ανάλογα με την απόσταση του πομπού με τον δέκτη του διαύλου [32].

## 2.5 Licensed & Unlicensed Spectrum

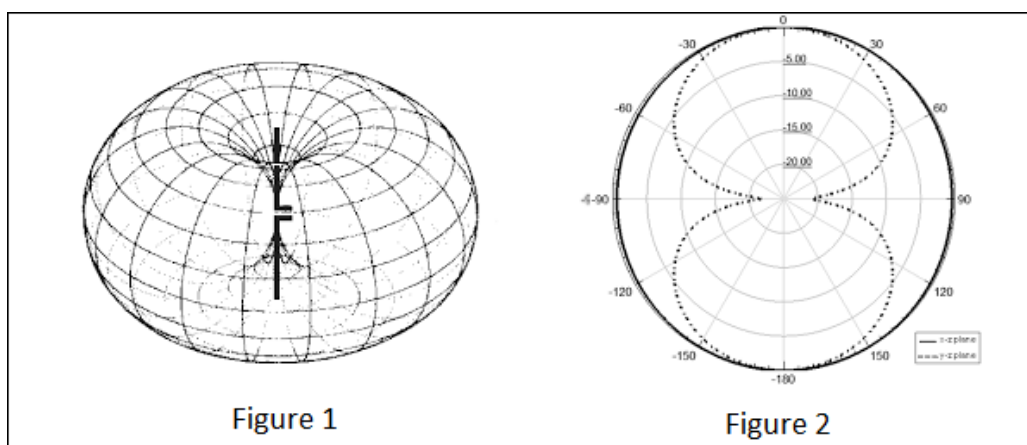
Ο διαχωρισμός του φάσματος έχει ιδιαίτερη σημασία για το δίκτυο και τις συνδέσεις, ανάμεσα στα στοιχεία του. Κάθε μπάντα συχνοτήτων απαρτίζεται από τα δικά της χαρακτηριστικά και κατ' επέκταση η επιλογή της ζώνης, σε ένα σύστημα 5G, κατηγοριοποιεί τους διαύλους που παράγονται. Σε προηγούμενη ενότητα συζητήθηκαν οι διαφορετικοί χαρακτηρισμοί που συνοδεύουν τις D2D επικοινωνίες με βάση τη φασματική επιλογή. Οι κύριες δύο ομάδες συνδέσεων συγκροτούνται από τις Inband και Outband συζεύξεις, δηλαδή από το αδειοδοτημένο και αντίστοιχα μη, φάσμα συχνοτήτων. Στο αδειοδοτημένο φάσμα συμπεριλαμβάνονται οι συζεύξεις τόσο για χρήστες κινητής τηλεφωνίας, όσο και για D2D χρήστες, ενώ στηριζόμενη στην κατανομή των φασματικών πόρων, η Inband επικοινωνία διαχωρίζεται σε Overlay (το φάσμα διαιρείται σε μη επικαλυπτόμενα τμήματα για D2D και CUE συνδέσεις) και σε Underlay (κανένας μοιρασμός των φασματικών πόρων, με αποτέλεσμα οι D2D δίαυλοι να χρησιμοποιούν κοινούς πόρους με τις CUE συζεύξεις). Η ευκολότερη εφαρμογή των overlay επικοινωνιών και η αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος στις underlay, με μεγαλύτερο κέρδος για τους χειριστές του δικτύου, προάγουν εξαιρετικά τη χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος για την καθολική λειτουργία του συστήματος [14]. Το άρθρο [32] θέτει ουσιαστικό ερώτημα για την επιλογή φάσματος, ενστερνιζόμενο τη μέθοδο επιλογής φάσματος με βάση την απόσταση. Ενδεικτικά παρατίθεται, πως το αδειοδοτημένο φάσμα προτιμάται σε D2D συζεύξεις μακρινών αποστάσεων, καθώς προσφέρει εξαιρετική αξιοπιστία, ενώ αντίστροφα σε κοντινές αποστάσεις αναδεικνύεται το μη αδειοδοτημένο φάσμα. Το φάσμα δίχως άδεια είναι άφθονο στη χαρακτηριστική mmW μπάντα συχνοτήτων, με αποτέλεσμα η σπανιότητα του φάσματος που αναφέρεται ως αυξανόμενο πρόβλημα, να μην αποτελεί πλέον σοβαρό ζήτημα [5]. Οι παρεμβολές ανάμεσα στους D2D χρήστες και στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας ελαττώνονται στο μη αδειοδοτημένο, ωστόσο εμφανίζονται δευτερεύοντες παρεμβολές από ηλεκτρικές συσκευές (Bluetooth, WiFi) που λειτουργούν στο συγκεκριμένο φάσμα και οι οποίες επιδρούν πάνω στις D2D συνδέσεις [14]. Είναι θεμιτό να αναφερθεί ότι δεν αποκλείεται η εναλλαγή των συχνοτήτων από το αδειοδοτημένο φάσμα στο μη, εφόσον διευκολύνονται οι επικοινωνίες και μεγιστοποιείται το κέρδος για τους χρήστες και τους χειριστές του δικτύου. Παρότι τέτοιου είδους συμπεριφορά θα αποφέρει μεταβολές στις περιφερειακές συνθήκες του δικτύου, όπως απώλεια διαδρομής και χωρητικότητα, πιθανώς οι συνδέσεις να πραγματοποιούνται με περισσότερη αξιοπιστία, ταχύτητα και ευκολία. Την αρχή αυτή ακολουθεί το άρθρο [32].

## 2.6 Isotropic & Omnidirectional Antenna

Αρκετές στιγμές έχει αναφερθεί πως το είδος της κεραίας συμβάλλει στον υπολογισμό της απώλειας μονοπατιού, ενώ μεταβάλλει και την έκβαση του σήματος. Η εξίσωση μετάδοσης, όπως αυτή αναπτύχθηκε από τον Friis, στηρίχθηκε στις δυνατότητες της ιστροπικής κεραίας. Ωστόσο, η ιστροπική κατηγορία είναι κατά βάση υποθετική με βασικό της προνόμιο, την ίση εκπομπή ισχύος προς όλες τις κατευθύνσεις, στον τρισδιάστατο χώρο. Επίσης, μια ιστροπική ορίζεται ως ιδανική κεραία που μπορεί να ακτινοβολεί προς όλες τις κατευθύνσεις και έχει κέρδος 1 (0 dB), που μεταφράζεται σε μηδενική απώλεια [60]. Στον πραγματικό κόσμο μια κεραία δε δύναται να υποστηρίξει την απαίτηση αυτή, με συνέπεια να βρίσκει χρήση μονάχα σε θεωρητικά μοντέλα, σαν μέτρο αναφοράς για τον προσδιορισμό της κατευθυντικότητας και του κέρδους των δοκιμαστικών κεραιών [41].

Η ιστροπική ομάδα κεραιών στο πλαίσιο μιας ρεαλιστικής προσομοίωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σα συγκριτικό εργαλείο. Αυτός είναι και ο λόγος που επιστρατεύεται η omnidirectional κατηγορία κεραιών. Η οικογένεια αυτών των κεραιών χαρακτηρίζεται από ίση εκπομπή ισχύος προς όλες τις οριζόντιες κατευθύνσεις σε επίπεδο, δισδιάστατο γεωμετρικό χώρο [40]. Η ακτινοβολούμενη ισχύς ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία ανύψωσης, όμως μειώνεται στην παράλληλη κατεύθυνση προς τον παράλληλο άξονα της κεραίας [41]. Μια πανκατευθυντική κεραία μπορεί να λαμβάνει σήματα ίδιας ποιότητας από όλες τις κατευθύνσεις με όμοιο τρόπο της ιστροπικής. Αυτό αντιτίθεται στις κατευθυντικές κεραίες, που είναι καλύτερες στη λήψη σημάτων από μία ορισμένη κατεύθυνση και για να το πετύχουν αυτό, καταργούν τη λήψη σημάτων από άλλες διευθύνσεις και προσηλώνονται σε ένα σήμα [60]. Οι πανκατευθυντικές κεραίες αξιοποιούνται στο πλήθος των καταναλωτικών συσκευών ασύρματων ραδιοκυμάτων, όπως κινητά τηλέφωνα και ασύρματα routers [40].

Είναι εύλογο να αναφερθεί, ότι το κέρδος της κεραίας είναι η ικανότητα της να ακτινοβολεί με μεγαλύτερη ή μικρότερη ισχύ προς οποιαδήποτε κατεύθυνση σε συνάρτηση με μία θεωρητική κεραία, όπως είναι οι ιστροπικές κεραίες. Οι πανκατευθυντικές κεραίες τυπικά εκπέμπουν με κέρδος 2.1 dBi περισσότερο από τις ιστροπικές κεραίες. Για μια κατακόρυφα προσανατολισμένη omnidirectional κεραία, το κέρδος μετάδοσης στις οριζόντιες αποστάσεις από την κεραία, συμβαίνει εις βάρος των μεταδόσεων πάνω και κάτω από αυτήν [72].



Εικόνα 6: Τα παραπάνω σχήματα δείχνουν το μοτίβο ακτινοβολίας ιστροπικής ή πανκατευθυντικής κεραίας. Το σχήμα 1 απεικονίζει το μοτίβο σε μορφή ντόνατ σε 3D και το σχήμα 2 απεικονίζει το το μοτίβο των οκτώ σε 2D [80].

## 2.7 Power Allocation Schemes

Η κατανάλωση των ενεργειακών πόρων με σκοπό την μείωση του συνολικού κόστους, την βέλτιστη και ομαλή λειτουργία των συστημάτων του δικτύου και την διευκόλυνση των δικτυακών συσκευών, μεγιστοποιώντας την διάρκεια χρήσης τους, είναι μερικά ζητήματα που διερευνά η επιστημονική κοινότητα. Μέχρι τη στιγμή της συγγραφής της παρούσας πτυχιακής, έχουν αποδειχθεί πολλαπλές μέθοδοι που ελαχιστοποιούν την ενεργειακή κατανάλωση, ικανοποιώντας παράλληλα τα QoS του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικές από αυτές τις ιδέες και υλοποιήσεις με τις διαφορετικές συνθήκες και παραμέτρους του συστήματος που υποστηρίζουν.

Αρχίζοντας από το άρθρο [13], οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα κυψελοειδές σύστημα δύο επιπέδων, ώστε να επιτρέπονται οι αναμεταδόσεις για τις D2D επικοινωνίες (RA-D2D) ως υποθάλπουσες παραδοσιακές UL συνδέσεις. Για την μεγιστοποίηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας, τόσο στον D2D Tx αλλά και στον D2D αναμεταδότη από κοινού, δημιούργησαν, οι συγγραφείς, πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο την μεγιστοποίηση της Energy Efficiency (EE) του RA-D2D διαύλου, διατηρώντας τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης που απαιτείται για έναν σύνδεσμο. Η λύση του προτεινόμενου προβλήματος σχετίζεται με αποδοτική επαναληπτική μέθοδο, εφαρμόζοντας μη γραμμικό κλασματικό προγραμματισμό. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προτεινόμενου συστήματος αναμετάδοσης ξεπέρασαν τις επιδόσεις που κατορθώνουν οι απευθείας D2D δίαυλοι. Το άρθρο [15], παρουσιάζει RA-D2D επικοινωνίες που ενσωματώνουν Relay Selection (RS) και Power Allocation (PA) σε underlaying δίκτυο κινητών επικοινωνιών, δύο επιπέδων, στο οποίο οι DUE μεταχειρίζονται τους πόρους για UL κανάλια, ταυτόχρονα με τους CUE. Η πρότασή τους δηλώνεται με την εφαρμογή της ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System) μεθοδολογίας, για αρχιτεκτονική που βασίζεται στην EE. Η ANFIS αρχιτεκτονική δέχεται σαν εισόδους, την SINR μετρική με τελικό αποδέκτη την D2D Rx συσκευή και την SINR στον σταθμό βάσης. Παράλληλα χρησιμοποιείται ο Particle Swarm Optimization (PSO) αλγόριθμος για την κατανομή της ισχύος μετάδοσης στη D2D πηγή και στον επιλεγμένο αναμεταδότη, μεγιστοποιώντας την EE του συστήματος. Τα αποτελέσματα φανερώνουν πως ο αλγόριθμος του άρθρου, επιλέγει με αποτελεσματικό τρόπο τον κατάλληλο D2D αναμεταδότη, χωρίς να υποβαθμίζει την απόδοση με εξαντλητικούς αλγορίθμους αναζήτησης και RS.

Συνεχίζοντας με το άρθρο [22], υποστηρίζεται πως σε ένα υβριδικό δικτυακό σύστημα που υποστηρίζει D2D και παραδοσιακές επικοινωνίες, όταν ο αριθμός των χρηστών στο εσωτερικό μονής κυψέλης αυξάνεται δραματικά, οι D2D συνδέσεις μπορούν να αξιοποιηθούν για τον διαμοιρασμό ενεργειακών πόρων σε πυκνά διασκορπισμένους χρήστες και να εγκαθιδρύνουν εκ νέου επικοινωνίες. Παρουσιάζονται δύο μέθοδοι για να επιλέγουν οι επηρεαζόμενοι D2D χρήστες τον τρόπο επικοινωνίας. Ο σταθμός βάσης καθορίζει τον τρόπο σύζευξης για κάθε ζευγάρι χρηστών σύμφωνα με τις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI) για κάθε πιθανό κανάλι και αναθέτει το βέλτιστο κανάλι στο ζευγάρι. Με αυτόν τον τρόπο το ζήτημα, μετατρέπεται σε πρόβλημα ακέραιας γραμμικής βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδεικνύουν ότι σε υβριδικό σύστημα επικοινωνιών, ο αποτελεσματικός αλγόριθμος διαμοιρασμού πόρων, περιορίζει την επίδραση δυσμενών παραγόντων πάνω στις συνδέσεις των χρηστών και των σταθμών βάσης και ακόμα, βελτιώνει τη φασματική χρήση, αυξάνοντας τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης. Το άρθρο [26] εξετάζει το σενάριο UL ζεύξης για απευθείας επικοινωνίες που επικαλύπτονται από κυψελοειδές δίκτυο χρησιμοποιώντας την SC-FDMA τεχνική. Διερευνάται αλγόριθμος φασματικής κατανομής που καλυτερεύει τις επιδόσεις των χρηστών με την ελαχιστοποίηση

των παρεμβολών, ελέγχοντας την ισχύ των στοιχείων του συστήματος. Ο αλγόριθμος υλοποιείται σύμφωνα με μαθηματικό μοντέλο της θεωρίας παιγνίων μικτής στρατηγικής και συγκεκριμένα μοντελοποιείται η κατανομή ενέργειας, με μη συνεργατικό παίγνιο μικτής στρατηγικής. Απόρροια αυτού είναι, κάθε χρήστης της κυψέλης να μεταδίδει με το κατάλληλο επίπεδο ισχύος, έτσι ώστε να ικανοποιεί τις SINR απαιτήσεις για αξιόπιστη ποιότητα σήματος.

Το άρθρο [32] χρησιμοποιεί εξαγωνικού σχήματος κυψέλη, για να εγκαταστήσει D2D συνδέσει υποσκελιζόμενες από κυψελοειδές δίκτυο επικοινωνιών και αναδεικνύει την σημασία της ισχύος μετάδοσης αναφορικά με τις παρεμβολές του συστήματος. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται, σχετίζεται περισσότερο με τη μείωση των απωλειών μονοπατιού, βασιζόμενο στην απόσταση, παρά με αλγόριθμο κατανομής ενεργειακών πόρων. Ωστόσο συμμερίζεται, πως η αύξηση της ισχύος εκπομπής δίνει την ικανότητα εξοικονόμησης ενέργειας. Η κατάσταση δικαιολογείται, από το γεγονός, πως αφού η κίνηση μεταδίδεται με μεγαλύτερη ισχύ, δύναται να φτάσει στο τερματικό στόχο γρηγορότερα από αναμενόμενες χρονικές τιμές. Το άρθρο παραδέχεται πως ο ακριβής εντοπισμός της καταλληλότερης ενεργειακής τιμής είναι δυσεύρετος, όμως προσπαθεί να μετρήσει την τιμή της επιτρεπόμενης ισχύος με τις συνέπειες των παρεμβολών, αποσκοπώντας στον εντοπισμό της ιδανικότερης. Τα τελικά ευρήματα αποδεικνύουν την καλύτερευση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος, κατανέμοντας φασματικούς πόρους με στοχευμένη ισχύ στις δικτυακές συσκευές. Στο άρθρο [45] προβάλλεται ένα σύστημα απευθείας συνδέσεων για οχήματα και προτείνεται διαχείριση πόρων στηριζόμενη σε φαινόμενα σκίασης και στατιστικές πληροφορίες, τις οποίες εξάγουν από το κανάλι ώστε να μην βασίζεται στα CSI δεδομένα. Ύστερα, για την ιδανική κατανομή φασματικών και ενεργειακών πόρων, δημιουργήθηκε αλγόριθμος που μεγιστοποιεί την εργοδοτική χωρητικότητα για καθορισμένο ζευγάρι CUE-DUE, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία της σύνδεσης και την επαναχρησιμοποίηση της D2D συσκευής. Αφού υπολογιστούν τα καλύτερα επίπεδα ισχύος για τα δύο τερματικά, ξεκινάει η λειτουργία κατάργησης των CUE-DUE συνδυασμών που δεν υποστηρίζουν τις ελάχιστες QoS απαιτήσεις.

Με το άρθρο [46] οι συγγραφείς θεωρούν ένα συγκεντρωτικό underlay σύστημα D2D επικοινωνιών, όπου τα D2D ζεύγη συνδέονται μεταξύ τους, επαναχρησιμοποιώντας τους καθοδικούς πόρους (Resource Blocks, RB σε Frequency Division Duplex, FDD μέθοδο) των χρηστών κινητής τηλεφωνίας, κάτω από κυψελοειδές σύστημα. Το διαμορφωμένο πρόβλημα διαχείρισης πόρων και ενέργειας ανήκει στην οικογένεια των MINLP (Mixed Integer Non-Linear Programming) προβλημάτων και είναι μη κυρτό. Οι συγγραφείς επιλέγουν, να διασπάσουν το πρόβλημα σε μικρότερα, αφού δεν είναι δυνατό να λυθεί αυτούσιο σε πολυωνυμικό χρόνο. Το υπό-πρόβλημα της κατανάλωσης ενέργειας μετατρέπεται σε ζήτημα μεγιστοποίησης που λειτουργεί με ισορροπημένο τρόπο, με την εξισορρόπηση να συσχετίζεται με την μείωση της ισχύος μετάδοσης και την μεγιστοποίηση του μέσου ρυθμού μετάδοσης. Επιπροσθέτως, η τιμή προτεραιότητας, που αντιστοιχεί σε κάθε ισχύ μετάδοσης για τους D2D πομπούς, ρυθμίζει μία ελεγκτική παράμετρο που φροντίζει, η μετρική SINR να ανάγεται στα προκαθορισμένα όρια, όσον αφορά για τις D2D συνδέσεις, αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης. Το άρθρο [47] ανάγει, όπως και προηγούμενες αναφορές, το ζήτημα της ενεργειακής απόδοσης, σε πρόβλημα βελτιστοποίησης των υπό-καναλιών και της διαχείρισης ενέργειας, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τον ρυθμό ροής του συστήματος για τους πομπούς ενός 5G mmW συστήματος. Ο σταθμός βάσης εντοπίζει την ιδανική ενεργειακή τιμή σύζευξης για όλους τους πομπούς αξιοποιώντας Difference of Convex (DC) προγραμματισμό. Επίσης ο BS, συλλέγει τις CSI πληροφορίες σε κάθε υπό-κανάλι για να μεταφέρει ενεργειακούς πόρους στον πομπό. Εκτεταμένες προσομοιώσεις, υπό πολλαπλές



δοκιμές με διάφορες παραμέτρους, εμφάνισαν βελτιωμένη απόδοση συγκριτικά με παρόμοιες μεθόδους.

Το άρθρο [48] ασχολείται με κυψελοειδές σύστημα μονής κυψέλης, πολλαπλών χρηστών, για DL συνδέσεις μέσα από τις τεχνικές OFDM και NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access). Παρουσιάζεται λεπτομερώς, αλγόριθμος για ομαδοποίηση των χρηστών σε groups υπό-φορέων (μέσω greedy λογικής) και έπειτα οι ομάδες χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο κατανομής ενέργειας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής ενέργειας εκμεταλλεύεται την Linear Water-Filling Fractional Power Allocation (LWF-FTP) τεχνική και την συγκρίνει με την Iterative Water-Filling Fractional Power Allocation (IWF-FTP), με την ισότιμη ενεργειακή κατανομή και με τον FTP αλγόριθμο μεταξύ overlay χρηστών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν, ότι οι αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν παρέχουν την δυνατότητα στο σύστημα να μειώσει περαιτέρω την πολυπλοκότητα στηριζόμενο στην βελτιστοποίηση της χωρητικότητας του NOMA συστήματος. Στο άρθρο [49] οι ερευνητές διερευνούν την κατανομή ενεργειακών πόρων σε 5G περιβάλλον χρησιμοποιώντας Soft Frequency Reuse (SFR). Το άρθρο αναφέρεται στην κατασκευή Stackelberg μοντέλο παιγνίου γειτονικών σταθμών βάσεων. Ο σταθμός βάσης που αξιοποιεί RB ως τους κύριους υπό-φορείς, θεωρείται η ηγετική δομή και οι υποφορείς του BS εκχωρούνται στους χρήστες. Ταυτόχρονα υπολογίζεται η κατανομή ισχύος με τις Karush-Kuhn-Tucker (KKT) συνθήκες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και μόλις ολοκληρωθεί εντοπίζεται το κατά προσέγγιση σημείο ισορροπίας. Οι προσομοιώσεις φαίνεται να συντονίζουν την παρεμβολή μεταξύ των υπό-φορέων στο ίδιο RB, για γειτονικές κυψέλες, ενώ στο σημείο ισορροπίας καταγράφεται η ιδανική ενεργειακή απόδοση. Το τελευταίο άρθρο [50], εξετάζει την κατανομή πόρων του συστήματος, σε σενάριο που αφορά την βιομηχανία αυτοματισμού, στο οποίο ο κύριος διαχειριστής επικεντρώνεται σε μεταδόσεις πολλαπλών πακέτων προς δύο προεπιλεγμένα αντικείμενα. Στην κατάσταση αυτή, διερευνώνται δύο είδη μεταδόσεων, η μετάδοση με υποβοήθηση αναμεταδότη και η Orthogonal Multiple Access (OMA). Οι συγγραφείς εξερεύνησαν από κοινού την ενεργειακή κατανομή και το μέγεθος των μπλοκ του καναλιού, ώστε να μειώσουν την πιθανότητα σφάλματος, που αντιστοιχίζεται στον συνδεδεμένο με το δεύτερο αντικείμενο, ενεργοποιητή, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την ελάττωση των περιοριστικών καθυστερήσεων. Σαν υποσημείωση, αξίζει να ειπωθεί, ότι για περισσότερες ιδέες, μεθόδους και αλγορίθμους κατανομής πόρων του συστήματος, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο άρθρο [51], από το οποίο εντοπίστηκαν οι αναφορές για τις παραπάνω μεθόδους.

## 2.8 Power Allocation Schemes for Simulations

Στην παρούσα εργασία, οι μέθοδοι κατανομής ενεργειακών πόρων, που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα προσομοίωσης, προήλθαν από τον συνδυασμό δύο πηγών. Το πρώτο άρθρο [43], προωθεί την ιδέα τριών διαφορετικών τρόπων διαχείρισης της συνολικής ενέργειας του δικτύου σχετικά με τις D2D συσκευές. Αναλυτικότερα:

- *1ος Τρόπος - Ισός Καταμερισμός:* Ο ίσος καταμερισμός στηρίζεται στον ισόποσο μοιρασμό ισχύος στους D2D πομπούς, ανάλογα με τον αριθμό των αντίστοιχων συσκευών. Επομένως όλοι οι D2D Tx θα έχουν την ίδια ισχύ μετάδοσης που υπολογίζεται ως:

$$P_{Tx_k} = \frac{P_{tot}}{N}, \quad k \in \{1, \dots, N\}. \quad (15)$$

Στην εξίσωση το σύμβολο  $P_{Tx_k}$  είναι η ισχύς μετάδοσης για τον κάθε πομπό,  $P_{tot}$

είναι η συνολική ενέργεια του συστήματος για τις D2D συσκευές και  $N$  είναι ο αριθμός των D2D Tx συσκευών στο δίκτυο.

- *2ος Τρόπος - Τυχαίος Καταμερισμός:* Η ενέργεια διαμοιράζεται τυχαίως στις συσκευές του δικτύου σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο.

$$P_{Tx_k} = v_k P_{tot}, \quad \forall k, v_k \in (0, 1), \text{ και } \sum_{k=1}^N v_k = 1. \quad (16)$$

Το  $v$  είναι παράμετρος, η οποία ανήκει στο σύνολο  $(0,1)$ , παράγεται με την συμβολή της ομοιόμορφης κατανομής και το άθροισμα όλων των  $v$  θα πρέπει να ισούται με την μονάδα, ώστε όλες οι συσκευές να παίρνουν τιμές χωρίς να υπερβαίνεται η  $P_{tot}$ .

- *3ος Τρόπος - Κατανομή ενέργειας με βάση το Path Loss:* Υπό την μεθοδολογία αυτή η ισχύς μετάδοσης του D2D πομπού υπολογίζεται ανάλογα με την αντίστοιχη απώλεια μονοπατιού, ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, για τον οποίο προορίζεται το μήνυμα. Ακριβέστερα, το σύστημα θα δώσει μεγαλύτερα ποσά ισχύος σε D2D ζεύγη, ώστε να αντισταθμίζεται η μακρινή απόσταση μεταφοράς δεδομένων. Η ισχύς εκπομπής του  $k$ -ου πομπού κάτω από αυτήν την ιδέα, υπολογίζεται ως:

$$P_{Tx_k} = \frac{PL_{dr_k, dt_k}}{\sum_{i=1}^N PL_{dr_i, dt_i}} P_{tot}, \quad \forall k. \quad (17)$$

Στην παραπάνω εξίσωση  $\Omega_{dr_k, dt_k}$  αναφέρεται ως η απώλεια μονοπατιού μεταξύ του πομπού ( $dt_k$ ) και του D2D δέκτη ( $dr_k$ ). Καθαρά απορρέει το συμπέρασμα ότι, η εκτιμώμενη ισχύς εξαρτάται από την απόσταση του διαύλου και την συνολική απώλεια διαδρομής του συστήματος.

Όλες οι συναρτήσεις υπολογισμού της κατανομής ισχύος μετάδοσης, μπορούν να συγκεντρωθούν σε μία εξίσωση:

$$P_{Tx_k}^s = \omega_k^s P_{tot}, \quad \forall k, s \in \{equ, ran, pl\},$$

όπου  $\omega_k^{equ} = \frac{1}{N}$ ,  $\omega_k^{ran} = v_k$  και τέλος,  $\omega_k^{pl} = \frac{PL_{dr_k, dt_k}}{\sum_{i=1}^N PL_{dr_i, dt_i}}$ . Στο άρθρο φανερώνεται

πως η κατανομή των πόρων του συστήματος, χωρίζεται σε συγκεντρωτική και αποκεντρωμένη. Ο πρώτος τρόπος, είναι εύκολο να υλοποιηθεί σε αποκεντρωμένο πλαίσιο. Από την στιγμή, που για την προσομοίωση το δίκτυο αποτελείται από μονή κυψέλη D2D, υποσκελιζόμενη από δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, τα δύο εναπομείναντα σχήματα κατανομής

είναι δυνατόν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά σε συγκεντρωτικό επίπεδο, στον πυρήνα του δικτύου. Ύστερα η ενέργεια ανατίθεται σε κάθε D2D μεταδότη.

Η δεύτερη επιρροή έρχεται από το άρθρο [52]. Το συγκεκριμένο άρθρο παρέχει μαζί με την ιδέα, που υλοποιείται για την κατανομή των πόρων, και την βάση του κώδικα που αξιοποιήθηκε κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων. Στόχος του άρθρου, είναι κάθε συσκευή να αποκτά ορισμένη ισχύ από το σύστημα, ώστε το άθροισμα των ρυθμών ροής, του χρήστη κινητής τηλεφωνίας και του D2D ζεύγους να μεγιστοποιείται. Για την επίτευξη του στόχου γίνεται για κάθε D2D συσκευή υπολογισμός του ρυθμού ροής, συνδυάζεται με τον αντίστοιχο ρυθμό ροής κάθε CUE και ανάλογα μπορεί να δοθεί η μέγιστη, ελάχιστη ή ενδιάμεση τυχαία τιμή ισχύος. Η ισχύς προσαρμόζεται και στους δύο διαφορετικούς χρήστες. Αυτό δύναται να σημαίνει πως, για τον καλύτερο δυνατό ρυθμό ροής, η DUE πιθανώς να χρειάζεται την μέγιστη παρεχόμενη ισχύ, ενώ ταυτόχρονα η CUE να αξιοποιεί την ελάχιστη ενέργεια, που το σύστημα της προσδίδει, ή και το αντίστροφο. Ο σταθμός βάσης είναι απαραίτητος, καθώς ελέγχει την ομαλή εκτέλεση της λειτουργίας και ύστερα αναθέτει τα ζευγάρια συζεύξεων, σύμφωνα με την ισχύ τους.

## 2.9 Channel Gain

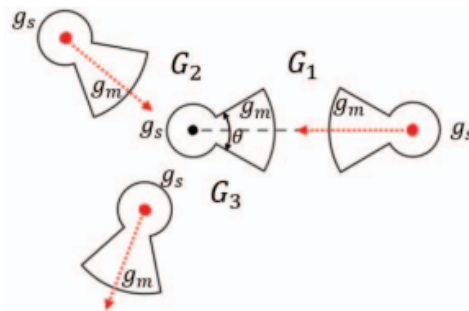
Το κέρδος του καναλιού ανάμεσα σε δύο D2D συσκευές αποτελεί σημαντικότατο παράγοντα για την τελική καταμέτρηση της SINR και της χωρητικότητας του καναλιού. Στο κέρδος περιλαμβάνονται οι απώλειες που αναστέλλουν την ομαλή διασύνδεση των συσκευών με φαινόμενα εξασθένησης και σκίασης. Κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων για τον υπολογισμό του κέρδους του διαύλου, τέθηκε αναγκαία η channel coefficient μεταβλητή, η οποία εξαρτάται πλήρως από την απώλεια διαδρομής και συμβολίζεται με  $g_{i,j}$  [26], με τις τιμές  $i,j$  να αντικατοπτρίζουν τις συσκευές για τις οποίες εμείς προσπαθούμε να υπολογίσουμε το κέρδος. Τα ζευγάρια για τα οποία αξιοποιείται το κέρδος είναι :

1. κέρδος ανάμεσα στον D2D Rx ( $i$ ) και στον D2D Tx ( $j$ )
2. κέρδος ανάμεσα στον BS ( $i$ ) και στον D2D Tx ( $j$ )
3. κέρδος ανάμεσα στον BS ( $i$ ) και στον CUE ( $j$ )
4. κέρδος ανάμεσα στον D2D Rx ( $i$ ) και στον CUE ( $j$ )

Για τα ζευγάρια (2,4) το κέρδος μεταφράζεται σε παρεμβολές από το  $j$  στο  $i$ . Η μεταβλητή  $h_{i,j}$  προκύπτει από σύνθετη γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή, ενώ στη θέση της διακύμανσης τοποθετείται η απώλεια διαδρομής, PL. Η απόλυτη τιμή της  $g_{i,j}$ , δηλαδή  $|g_{i,j}|$ , δίνεται ως είσοδος στην κατανομή Rayleigh, καθώς η Rayleigh, είναι η χειρότερη περίπτωση εξασθένησης για τα συμβατικά σήματα. Παρεπόμενο είναι, η συνολική απόδοση του συστήματος να παράγει χαμηλότερο κατώτατο όριο τιμών, συγκριτικά με εξασθενήσεις από κατανομές όπως Rician, Nakagami- $m$  και Weibull κ.α [43]. Είναι γεγονός πως η χωρητικότητα καναλιού σε περιβάλλον εξασθένησης Rayleigh, θα είναι πάντα χαμηλότερη, αναφορικά με περιβάλλον γκαουσιανού θορύβου, ενώ η μέση χωρητικότητα σε Rayleigh συνθήκες θα πλησιάζει και θα γίνει ίση με την μέση χωρητικότητα σε γκαουσιανές συνθήκες, μόνο όταν το εύρος ζώνης προσεγγίζει το άπειρο [29]. Το κέρδος που συχνά συμβολίζεται με  $h_{i,j}$  προκύπτει από την μεταβλητή  $g_{i,j}$  και προβάλλεται από τον τύπο:

$h_{i,j} = |g_{i,j}|^2$ . Το τελικό κέρδος επηρεάζει άμεσα και τις τιμές της ισχύος που κατανέμεται από τον σταθμό βάσης, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο τέταρτος τρόπος κατανομής, στην προσομοίωση, ωστόσο συνδέεται στενά και με την SINR μετρική.

Για το δεύτερο μέρος της προσομοίωσης το κέρδος ορίζεται ελαφρώς διαφορετικά. Στις mmW επικοινωνίες, η συνεργασία του 5G με τις κατευθυντικές κεραίες είχε ως στόχο την καταπολέμηση των αυξημένων απωλειών διαδρομής. Όπως έχει αναφερθεί η Beamforming τεχνική, δρομολογεί το σήμα από τον πομπό, προς την κατεύθυνση του δέκτη με αποτέλεσμα να αυξάνεται κατακόρυφα το κέρδος της μετάδοσης. Η κεραία συνάμα, αποκτά δύο κέρδη, το mainlobe (μεγαλύτερη ισχύς εκπομπής/λήψης) και το sidelobe (μικρότερη ισχύς εκπομπής/λήψης). Αν οι δύο συμμετέχοντες κεραίες εκπέμπουν προς την κατεύθυνση της άλλης τότε το κέρδος θα είναι το μέγιστο και για τις δύο κεραίες. Το ζήτημα που αντιμετωπίζεται, είναι αν υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσα στους συμμετέχοντες και αν η κεραία μεταδίδει εν τέλει προς την επικείμενη κατεύθυνση. Επομένως, ο υπολογισμός του κέρδους, υπό τις προσκείμενες συνθήκες, σχετίζεται αυστηρώς με την κατεύθυνση της εκπομπής της κεραίας του πομπού και το περιβάλλον μετάδοσης. Μία αναπαράσταση της συγκεκριμένης περίπτωσης αποτυπώνεται παρακάτω, στην εικόνα από το άρθρο [5].



Εικόνα 7: Απλοποιημένο τομεακό μοντέλο. Με τα συμβολα  $g_m$  εμφανίζονται τα mainlobe κέρδη των κεραίων και κατ' αντιστοιχία με  $g_s$ , τα sidelobe. Με τα κεφαλαία G, παρουσιάζονται τα κέρδη. Ο δέκτης του συστήματος, βρίσκεται στη μέση, με τις κόκκινες κουκίδες να είναι οι μεταδότες και τα κόκκινα βελάκια η κατεύθυνση εκπομπής τους [5].

## 2.10 Θόρυβος

Ο θόρυβος στον κλάδο της ακουστικής ορίζεται ως ο κάθε ανεπιθύμητος ήχος, είτε ο ήχος που είναι εγγενώς μη αποδεκτός, είτε ο ήχος που παρεμβαίνει στους θεμιτούς ήχους που ακούγονται. Στην θεωρία της ηλεκτρονικής και της πληροφορίας, ο θόρυβος αναφέρεται σαν τυχαία, απρόβλεπτα και ακούσια σήματα ή σε αλλαγές αυτών που συγκαλύπτουν το κύριο περιεχόμενο δεδομένων [61]. Στο πλήθος των περιπτώσεων προσομοίωσης σημάτων, ο θόρυβος παρουσιάζεται ως λευκός ή θερμικός ή γκαουσιανός ή ως συνδυασμός αυτών. Στην παρούσα εργασία, ο θόρυβος ενστερνίζεται την AWGN (Additive White Gaussian Noise) κατηγορία θορύβου και συγκεκριμένα ακολουθεί τον τύπο από τα [5],[43],[63]:

$$No[dBm] = -174 + 10 * \log(BW) + NF, (18)$$

όπου  $No$ , είναι ο συμβολισμός του θορύβου. Η τιμή -174 είναι μία σταθερά που χρησιμοποιείται από πολλές έρευνες για να προσδιοριστεί μια ρεαλιστική προσέγγιση του θορύβου σε dBm, ενώ η  $NF$  μεταβλητή, ονομάζεται Noise Figure και είναι μετρική της υποβάθμισης της αναλογίας σήματος προς θόρυβο και αξιοποιείται συνδυαζόμενη με την ευαισθησία του ραδιοφωνικού δέκτη [62]. Η εξίσωση ολοκληρώνεται με την  $BW$  παράμετρο, που αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης για κάθε συχνότητα μετάδοσης.

Ο θόρυβος αποκαλείται λευκός, διότι είναι σύνθετο σήμα που επικαλύπτει ολόκληρο το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων που έχουν την ίδια ένταση. Είναι αντίστοιχος, του λευκού φωτός, το οποίο περιέχει ίσες εντάσεις όλων των συχνοτήτων του ορατού φωτός [61]. Ύστερα, είναι additive γιατί προστίθεται στο επιθυμητό σήμα και γκαουσιανός, αφού το πλάτος μοντελοποιείται με κανονική κατανομή πιθανότητας [53].

## 2.11 Παρεμβολές

Σε κάθε σύστημα τηλεπικοινωνιών στελεχώνεται η έννοια των παρεμβολών. Σύμφωνα με το άρθρο [70], εδραιώνονται δύο κατηγορίες παρεμβολών σε συμβατικά συστήματα νέων γενεών. Το πρώτο είδος αποδίδεται στις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών κυψελών, όπως ανάμεσα στις micro και στις small κυψέλες. Ο τύπος παρεμβολής μετριάζεται με την χρήση τεχνικών ελέγχου ισχύος και προγραμματισμού ώστε να εγγυάται η απόδοση των συνδέσμων επικοινωνίας. Η επόμενη κατηγορία, ονομάζεται Intra-cell, εμφανιζόμενη μεταξύ των συσκευών της ίδιας κυψέλης και ελαχιστοποιείται με κατάλληλη διαχείριση ορθογωνίων πόρων στους χρήστες και με ορθή κατανομή της συνολικής ενέργειας μεταδόσεων, ανάλογα με τον τύπο της σύνδεσης (UL/DL).

Σε ένα παραδοσιακό δίκτυο που περιέχει D2D χρήστες, σταθμό βάσης και κυψελοειδείς χρήστες, οι παρεμβολές παρουσιάζονται στις τρεις παρακάτω μορφές:

1. Παρεμβολές που προκαλούν οι D2D πομποί στον σταθμό βάσης.
2. Παρεμβολές που δημιουργούν οι κυψελοειδείς χρήστες προς τους D2D δέκτες,
3. Παρεμβολές που αναπτύσσονται ανάμεσα στα D2D ζευγάρια.

Οι παρεμβολές που συμπεριλήφθηκαν στο πρόγραμμα της προσομοίωσης είναι οι πρώτες δύο μορφές όπως ακολουθείται στο άρθρο [52].

Το πρώτο είδος παρεμβολών υπάγεται αποκλειστικά στο σύστημα της προσομοίωσης και αφορά το πρώτο σενάριο, καθώς στο κέντρο της κυψέλης τοποθετείται ο σταθμός βάσης. Η συνολική παρεμβολή  $I_{BS}$  μετρίεται με την αρωγή του τύπου:

$$I_{BS} = \sum_{i=1}^N P_{Tx_i} h_{Tx_i,BS}, \text{ με } N \text{ το πλήθος των D2D Tx, (19).}$$

Στον παραπάνω τύπο, το άθροισμα του πολλαπλασιασμού της ενέργειας, που έχει δοθεί σε κάθε πομπό του συστήματος, με το κέρδος του καναλιού στο οποίο μεταδίδει, συνεπάγεται το σύνολο των παρεμβολών που δέχεται ο σταθμός βάσης. Στην περίπτωση που ο προορισμός των παρεμβολών είναι ο D2D δέκτης, η συνολική παρεμβολή για τον  $k$ -ο δέκτη,  $I_{Rx_k}^{\mu W}$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{Rx_k}^{\mu W} = \sum_{j=1}^M P_{CUE_j} h_{CUE_j, Rx_k}, \text{ με } k \in \{1, \dots, N\} \text{ και } M \text{ το πλήθος των CUE, (20).}$$

Το διακριτικό  $\mu W$ , υποδηλώνει την συχνότητα μετάδοσης, που το σύστημα αξιοποιεί. Ο τύπος μεταχειρίζεται την κατανομημένη ισχύ μετάδοσης των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και την πολλαπλασιάζει με το κέρδος του σήματος για κάθε δίαυλο επικοινωνίας ή αλλιώς

ανεπιθύμητο σήμα, από τον CUE προς τον D2D Rx. Το άθροισμα των πολλαπλασιασμών επιστρέφει το σύνολο των απωλειών, που επηρεάζουν τον δέκτη. Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιεί την mmW ζώνη, αφαιρείται ο σταθμός βάσης από την λειτουργία του συστήματος, με επακόλουθο όλες οι συνδέσεις να υλοποιούνται με τις D2D συσκευές. Παρεπόμενο είναι το σύνολο των παρεμβολών να απασχολεί μονάχα τους D2D δέκτες. Όμως, όπως και στην εξίσωση (3) για την SINR μετρική εισάγεται η έννοια του άμεσου κέρδους της κεραίας και της απώλειας διαδρομής, το ίδιο συμβαίνει και για το άθροισμα των παρεμβολών. Συγκεκριμένα το άθροισμα των παρεμβολών για κάθε D2D δέκτη ορίζεται ως:

$$I_{Rx_k}^{mmW} = \sum_{j=1}^M P_{CUE_j} h_{CUE_j, Rx_k} G e_{CUE_j} P L_{CUE_j, Rx_k} (d_{CUE_j, Rx_k}), (21) .$$

Η εξίσωση (21) επιδεικνύει πως οι παρεμβολές εξαρτώνται από την απώλεια της διαδρομής και το άμεσο κέρδος των κεραίων του ζευγαριού CUE και D2D Rx. Το σύνολο για μία ακόμη φορά περιλαμβάνει την ενεργειακή κατανομή στους CUE χρήστες, σε συνδυασμό με το κέρδος των παρεμβολών (προς τον κάθε D2D δέκτη), το οποίο υπολογίζεται με την συμβολή της channel coefficient παραμέτρου. Το άμεσο κέρδος στην συγκεκριμένη περίπτωση αφορά την γωνία μετάδοσης, στην οποία εκπέμπει ο χρήστης CUE και ποιά η θέση του σε σχέση με τον δέκτη. Η απώλεια διαδρομής αναφέρεται στο μη επιθυμητό σήμα από τον CUE στον D2D Rx, με παράγοντα την μεταξύ τους απόσταση. Είναι φανερό πως το  $k \in \{1, \dots, N\}$  και  $M$ , είναι το πλήθος των χρηστών κινητής τηλεφωνίας.

## Κεφ III : Μεθοδολογία Υλοποίησης

Το κεφάλαιο III περιγράφει λεπτομερώς όλη την διαδικασία υλοποίησης του κώδικα και παράλληλα συζητείται το σκεπτικό που κρύβεται πίσω από παραδοχές και λειτουργικότητες του κώδικα προσομοίωσης. Παραδίδονται με την ευκαιρία και οι τιμές των βασικών παραμέτρων του προγράμματος. Αποσαφηνίζεται ότι σε όλη την έκταση της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερα όταν γίνονται αναφορές στο προγραμματιστικό κομμάτι, ο όρος χωρητικότητα υποδηλώνει το *throughput capacity* και μετριέται σε *bits per second* [76].

### 3.1 Περιβάλλον Υλοποίησης

Για τον κώδικα των προσομοιώσεων αποφασίστηκε και αξιοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας MATLAB, ύστερα από συνεννόηση με τον επιβλέποντα καθηγητή. Συγκεκριμένα η MATLAB, είναι ένα εμπορικό περιβάλλον αριθμητικών υπολογισμών και μία γλώσσα προγραμματισμού. Στην πραγματικότητα είναι από τις περισσότερο προηγμένες και καλοσχεδιασμένες γλώσσες για υπολογιστές, με την ανάπτυξή της να ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970, από τον δημιουργό Cleve Moler. Σήμερα, η πλατφόρμα αναπτύσσεται και υποστηρίζεται από την MathWorks [67]. Η πλατφόρμα αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για χειρισμούς πολυδιάστατων πινάκων, γραφικές απεικονίσεις, ανάλυση πολύπλοκων δεδομένων, πραγματοποίηση αλγορίθμων, δημιουργία διεπαφών χρήστη και προσομοίωση και μοντελοποίηση συστημάτων.

Σε σύγκριση με την προσιτή γλώσσα προγραμματισμού Python, στην οποία αναπαράγονται προγράμματα για επεξεργασία σημάτων ή εικόνων, η MATLAB παρουσιάζει εμφανώς καλύτερη απόδοση. Η ειδοποιός διαφορά των δύο σχετίζεται με την διαχείριση πολυδιάστατων πινάκων. Η πλατφόρμα μεταχειρίζεται όλες τις μεταβλητές του προγράμματος, σαν πίνακες μονοδιάστατους (vectors) ή πολυδιάστατους (matrices), ενώ οι υπολογιστικές της ικανότητες είναι πράγματι εντυπωσιακές. Το χαρακτηριστικό αυτό μετατρέπει την MATLAB ως την ιδανική γλώσσα για επεξεργασία σημάτων και εικόνων, ενώ αντιθέτως η Python δυσκολεύεται να φέρει σε πέρας τους υπολογισμούς, διότι πέρα από την βιβλιοθήκη NumPy που μπορεί να πλησιάσει την απόδοση της MATLAB, δεν είναι ικανή να μεταχειριστεί πίνακες. Επίσης οι υπολογιστικές δυνατότητες της Python υστερούν σε συνάρτηση με την πλατφόρμα και η γλώσσα δεν διαθέτει γραφική διεπαφή ώστε να μπορεί να εκτελέσει προχωρημένες συναρτήσεις.

Για την δημιουργία του προγράμματος, μετά την εγκατάσταση της MATLAB, χρησιμοποιήθηκαν τα standard εργαλεία που προσφέρει η πλατφόρμα. Δεν υιοθετήθηκε περαιτέρω toolbox, όπως ονομάζονται οι έξτρα βιβλιοθήκες. Η υλοποίηση των προσομοιώσεων ξεκίνησε με την βοήθεια δύο προγραμμάτων που αφορούσαν τις D2D επικοινωνίες. Οι επόμενες υπό ενότητες θα επεξηγήσουν τα στοιχεία των αλγορίθμων που αξιοποιήθηκαν για τα σενάρια χρήσης. Ο κώδικας υλοποίησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας μπορεί να εντοπιστεί στον σύνδεσμο [83].

## 3.2 Βασικοί κώδικες

Στην υπό ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δύο βασικοί κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του προγράμματος, ενώ αναδεικνύονται και τα στοιχεία από τους κώδικες που διατηρήθηκαν κατά την διάρκεια της υλοποίησης.

### 3.2.1 Resource Allocation using Matching Theory for Device-to-Device Underlay Communication

Το άρθρο με τον τίτλο της υπό ενότητας αποτυπώνει τον βασικό κώδικα πάνω στον οποίο βασίστηκε η εργασία για την παραγωγή των σεναρίων. Το πρόγραμμα διακυβεύεται ένα σύστημα που περιέχει D2D χρήστες, CUE και έναν BS στο κέντρο της κυψέλης. Σκοπός του είναι να δημιουργήσει ζευγάρια DUE-CUE προκειμένου ο συνολικός ρυθμός ροής που προκύπτει από τις δύο διαφορετικές συνδέσεις να είναι μέγιστος. Οι διαφορετικοί δίαυλοι επικοινωνίας που συζητούνται είναι:

- A) από τον CUE προς τον σταθμό βάσης,
- B) από τον D2D Tx στον D2D Rx.

Το δίκτυο μεταχειρίζεται UL διαύλους, είναι ένα Underlay 5G κυψελοειδές σύστημα και απαρτίζεται από μονή κυψέλη. Ο κεντρικός σταθμός βάσης προσπαθεί να ρυθμίσει την ισχύ που αναλογεί σε κάθε συσκευή ώστε να μεγιστοποιήσει το συνολικό throughput του συστήματος. Ο αλγόριθμος συνυπολογίζει τα φαινόμενα σκίασης και εξασθένησης, ενώ συμπεριλαμβάνει και παρεμβολές ανάμεσα στις συσκευές του δικτύου. Επίσης, εξετάζεται η απόσταση μεταξύ των συσκευών της κυψέλης. Για τις D2D ζεύξεις οι αποστάσεις ανήκουν στο πεδίο τιμών  $\{60m, 100m\}$ , με τις λοιπές αποστάσεις να εντοπίζονται με την συμβολή της Ευκλείδειας εξίσωσης για σημεία σε δισδιάστατο γεωμετρικό χώρο.

$$d(p, q) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2}, \quad (22),$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ καρτεσιανών σημείων  $p, q$  με  $p = (p_1, p_2)$  και  $q = (q_1, q_2)$  οι συντεταγμένες [68]. Η εξίσωση (22) χρησιμοποιείται εκτενώς για όλες τις προσομοιώσεις που εκτελούνται από το πρόγραμμα.

Ο αλγόριθμος, αφού δημιουργήσει τα τυχαία σημεία υπολογίζει τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Οι αποστάσεις είναι τέσσερις και είναι:

- 1) Απόσταση των D2D συσκευών (Rx - Tx), που δίνεται στη μορφή τυχαίας ομοιόμορφης κατανομής και ανήκει στο προκαθορισμένο σύνολο.
- 2) Απόσταση μεταξύ του D2D Tx και του σταθμού βάσης, που υπολογίζεται με βάση την (22).
- 3) Απόσταση μεταξύ του CUE και του σταθμού βάσης, που υπολογίζεται με βάση την (22).
- 4) Απόσταση μεταξύ του D2D Tx και του CUE, που υπολογίζεται με βάση την (22).

Ο σταθμός βάσης τοποθετείται στο κέντρο της κυψέλης που συνάδει με το κέντρο των αξόνων και επομένως έχει συντεταγμένες  $(0,0)$ . Ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί όλες τις επικοινωνίες της κυψέλης και δεν λαμβάνονται υπόψη οι παρεμβολές μεταξύ κυψελών. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία προσδιορισμού των αποστάσεων, ο αλγόριθμος προσκομίζει τα κέρδη για κάθε μία από τις παραπάνω αποστάσεις, υποθέτοντας ότι υπάρχουν φαινόμενα Fast Fading και σκίασης (Shadowing).



Συγκεντρώνοντας τις μέχρι τώρα μετρήσεις, αρχίζει η διαδικασία προσδιορισμού της κατάλληλης ισχύος για τις συσκευές D2D Tx, CUE, σύμφωνα με το throughput που μπορούν να αναπτύξουν. Δοκιμάζεται η μέγιστη δυνατή ενέργεια που το δίκτυο μπορεί να προσφέρει στις συσκευές του και ενδιάμεσες τιμές ισχύος που προκύπτουν από το κέρδος και τον θόρυβο που επηρεάζει τα επιθυμητά σήματα. Ο θόρυβος ανήκει στην κατηγορία του AWGN χωρίς να ακολουθεί την εξίσωση (18) και ισούται με  $-144\text{dBm}$ . Στηριζόμενο σε αυτές τις προσωρινές τιμές, το σύστημα υπολογίζει τον ρυθμό ροής με την βοήθεια της SINR μετρικής και τον τύπο (14). Ύστερα, συγκρίνει την χωρητικότητα των συσκευών και προσδίδει τα κατάλληλα επίπεδα ισχύος για κάθε συσκευή. Το επόμενο βήμα είναι το ταίριασμα μεταξύ των ευνοϊκότερων ζευγαριών D2D Tx και CUE, έτσι ώστε το άθροισμα των ρυθμών ροής να είναι το υψηλότερο.

Σε αυτό το σημείο ο αλγόριθμος εμφανίζει την τεχνική ταιριάσματος Gale - Shapley, που αναπτύχθηκε από τους David Gale και Lloyd Shapley. Η μέθοδος σταθερού “γάμου” όπως συχνά μετονομάζεται, λειτουργεί ως εξής: θεωρείται πως  $N$  γυναίκες αντιστοιχίζονται σε  $N$  άνδρες, σύμφωνα με μία λίστα αμοιβαίων προτιμήσεων. Κατά την εκτέλεση της μεθόδου, ένας άνδρας προσπαθεί να ταιριάξει με μία γυναίκα με την αντιστοίχιση να μπορεί να διακοπεί. Στην περίπτωση της γυναίκας, μόλις τοποθετηθεί με τον κατάλληλο άντρα δεν είναι δυνατό να σταματήσει η διαδικασία και να διακοπεί. Οι άντρες βρίσκουν τον πιο εύλογο σύντροφο (ανδρική αισιοδοξία), ωστόσο για τις γυναίκες είναι αβέβαιο (γυναικεία απαισιοδοξία). Συνεπώς το βέλτιστο αποτέλεσμα από την σκοπιά του άνδρα, πιθανώς να συμπίπτει με το χειρότερο για την γυναίκα. Στο πρόγραμμα οι D2D Tx αντιπροσωπεύουν τους άνδρες και οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας παραπέμπουν στις γυναίκες. Το πρόγραμμα ολοκληρώνεται με τον τελικό υπολογισμό της χωρητικότητας, πλέον με τις βέλτιστες τιμές ισχύος, και τα αποτελέσματα αποδεικνύονται εξαιρετικά ωφέλιμα, αφού η συνολική απόδοση του συστήματος ανέρχεται πάνω από τα 300Mbps. Όμως, σημειώνεται ότι η τιμή αυτή είναι το άθροισμα των throughput των D2D Tx και των CUE.

Από τον επικείμενο κώδικα, στην παρούσα πτυχιακή αξιοποιήθηκαν:

- Ο τρόπος παραγωγής της κυψέλης
- Ο τρόπος δημιουργίας των σημείων με ομοιόμορφη κατανομή.
- Η μέθοδος κατανομής ενέργειας σαν ξεχωριστό σενάριο αναφοράς για τα τελικά αποτελέσματα, σε συνάρτηση με τους υπόλοιπους τρόπους διαχείρισης ισχύος.
- Αυτούσιος ο κώδικας για την τεχνική Gale-Shapley και επιστρατεύεται για τους διαφορετικούς τρόπους κατανομής ενέργειας.
- Ο γενικός τρόπος συγγραφής του κώδικα, δηλαδή διατηρήθηκε η βασική επανάληψη και ο τρόπος που συνδέονται τα αρχεία, καθώς και ο τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα, τα αρχεία `admiss_contr.m`, `cross_pt.m`, `galeshapley.m`, `get_coordinates.m`, `pl_script.m`, `simulation.m`, `compiling.m`, και `cell_lay.m` είναι τα αρχεία που με μεταβολές συμμετέχουν στον κώδικα της παρούσας πτυχιακής.

Ο αναγνώστης παραπέμπεται στον σύνδεσμο [81], στον οποίο μπορεί να εντοπίσει τον κώδικα του άρθρου μαζί με το άρθρο [52], καθώς η υπό ενότητα προβάλλει μία συνοπτική αναφορά στις δυνατότητες του κώδικα.

### 3.2.2 Device-to-Device Communications in the Millimeter Wave Band: A Novel Distributed Mechanism

Το άρθρο [5] κρύβει την βασική ιδέα για το δεύτερο σενάριο του προγράμματος που υλοποιήθηκε. Το σύστημα που θεμελιώνεται είναι D2D Underlaid κυψελοειδές δίκτυο, πολλαπλών κυψελών στο οποίο οι D2D πομποί είναι χωρικά διασκορπισμένοι σύμφωνα με την Poisson Point Process (PPP) κατανομή. Το ίδιο ισχύει και για τους χρήστες παραδοσιακών επικοινωνιών (CUE, παρεμβολείς) και για τους σταθμούς βάσης. Όλες οι συσκευές είναι εφοδιασμένες με MIMO κεραίες, συνεχώς εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης στην  $\mu W$  μπάνα συχνοτήτων προκειμένου να γνωστοποιήσουν την παρουσία τους στις υπόλοιπες συσκευές της κυψέλης και είναι ικανές να επικοινωνήσουν τόσο στη mmW ζώνη, όσο και στην  $\mu W$  μπάνα συχνοτήτων. Η προϋπόθεση για την επιλογή της mmW μπάνας είναι η ύπαρξη LOS συνδέσμου. Ο μηχανισμός που προτείνεται εξετάζει την απόδοση, όπως αυτή μετράται σε δοκιμαστικό δέκτη με συντεταγμένες (0,0), μολονότι τα αποτελέσματα ισχύουν για κοινότυπους δέκτες, σύμφωνα με το *Slivnyak's theorem*. Η απόδοση μετράται με την SINR μετρική, στηριζόμενη στον τύπο (3).

Για την προσομοίωση λοιπόν τοποθετείται, ένας βασικός D2D δέκτης στο κέντρο των αξόνων και ένας πομπός σε απόσταση 50m από τον δέκτη με συγκεκριμένες συντεταγμένες και γωνία κλίσης τις  $30^\circ$ . Ο περιβάλλοντας χώρος της κυψέλης εμπεριέχει κτήρια, τετραγωνικού σχήματος τα οποία παράγονται στην ευρύτερη περιοχή κάλυψης με βάση την PPP κατανομή. Το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας και οι απώλειες διαδρομής ταυτίζονται με τις απώλειες ελεύθερου χώρου. Για κάθε δίαυλο D2D στην διάρκεια της προσομοίωσης, ελέγχεται αν η σύνδεση ανήκει στην LOS ή NLOS κατηγορία, ώστε στην περίπτωση που τα σημεία έχουν οπτική επαφή να προτιμάται η mmW ζώνη, με συχνότητα ρυθμισμένη στα 28GHz. Σε κάθε επανάληψη αλλάζουν οι τοποθεσίες των συσκευών παρεμβολής, ενώ σε κάθε εποχή αλλάζουν οι διευθύνσεις των κτηρίων και των D2D δεκτών.

Η διεργασία προσδιορισμού της οπτικής επαφής των δύο D2D συσκευών πορεύεται ως εξής: οι συσκευές με το που λάβουν τα σήματα αναγνώρισης, κατασκευάζουν το Angle of Arrival (AoA) φάσμα, συγκρίνοντας την φάση του λαμβανόμενου σήματος στις πολλαπλές κεραίες τους. Το AoA αντιπροσωπεύει την λαμβανόμενη ισχύ ως συνάρτηση της γωνίας επίπτωσης. Κάθε συσκευή χτίζει το φάσμα που προορίζεται για την ομότιμη D2D συσκευή, με την αποθήκευση του φάσματος σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα. Η απουσία ανακλαστήρων στο περιβάλλον μαζί με την ύπαρξη LOS διαύλου, θέτουν την κορυφή του AoA φάσματος να διακρίνεται ως η κατεύθυνση του πομπού. Όταν η σύνδεση χαρακτηρίζεται ως NLOS, η κορυφή του φάσματος καταδεικνύει την κατεύθυνση ισχυρού ανακλαστήρα που προκάλεσε το σήμα πολλαπλών διαδρομών να καταφθάσει στον δέκτη. Σχεδόν ασήμαντες μεταβολές στην θέση του ανακλαστήρα, οδηγούν σε σημαντικές ανισότητες στο φάσμα. Συμπτωματικά, για να ανιχνευθεί η LOS σύνδεση, οι χρήστες σχηματίζουν το *combined AoA* φάσμα διατηρώντας τις επικαλυπτόμενες κορυφές και απορρίπτοντας τις υπόλοιπες. Στο άρθρο ορίζεται η εξίσωση του *combined AoA*. Το φάσμα προσδίδει την δυνατότητα στις D2D συσκευές να ανακαλύψουν τους LOS διαύλους μαζί με την κατεύθυνσή τους και επιλέγουν την συχνότητα μετάδοσης. Επιπροσθέτως, η γωνία επίπτωσης του συνδέσμου, δείχνει την κατεύθυνση της ομότιμης συσκευής που θα χρησιμοποιηθεί για την ευθυγράμμιση της ακτίνας.

Το άρθρο συνεχίζει υποστηρίζοντας πως όλοι οι πομποί και ο σταθμός βάσης, εκπέμπουν με σταθερή ισχύ. Για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος που

υλοποιείται, λογαριάζεται η μετρική SINR σύμφωνα με την εξίσωση (3). Η εξίσωση καταγράφει την εξάρτηση της μετρικής με το άμεσο κέρδος της κεραίας στον δέκτη, το οποίο ορίζεται ως  $Ge = G_{Tx} G_{Rx}$ , με  $G_{Tx}$  και  $G_{Rx}$  να είναι τα κέρδη των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Το απλοποιημένο τομεακό μοντέλο που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 7, ορίζει το άμεσο κέρδος από πομπό σε απόσταση  $d$ , για τον κεντρικό δέκτη στην αρχή των αξόνων ως:

$$\begin{aligned} 1. \quad Ge &= GmGm, & p_1 &= p^2 \\ 2. \quad Ge &= GmGs, & p_2 &= 2p(1 - p) \\ 3. \quad Ge &= GsGs, & p_3 &= (1 - p)^2, \end{aligned} \quad (23)$$

όπου  $p = \frac{\theta}{2\pi}$ , με  $\theta$  να διακρίνεται το πλάτος δέσμης για την περιοχή μέγιστης ισχύος μετάδοσης/λήψης της κεραίας (*mainlobe*). Η πρώτη συνθήκη θα υπολογιστεί, εφόσον η ευθυγράμμιση της δέσμης για τον δίαυλο των συσκευών, θεωρείται τέλεια. Απλούστερα, όταν ο πομπός εκπέμπει το σήμα από την *mainlobe* περιοχή της κεραίας του και ο δέκτης το λαμβάνει στην *mainlobe* περιοχή της δικής του κεραίας, τότε το άμεσο κέρδος θα είναι μέγιστο.

Αναφέρεται πως από τον κώδικα του άρθρου [5] για την πτυχιακή, αξιοποιούνται:

- Ο τρόπος παραγωγής εμποδίων. Το τετραγωνικό σχήμα είναι ευνοϊκό για τις συγκρίσεις συντεταγμένων και για την κατηγοριοποίηση των συνδέσμων σε LOS/NLOS.
- Ο τρόπος υπολογισμού του άμεσου κέρδους της κεραίας του κάθε δέκτη σε σχέση με τις συσκευές που προκαλούν ανεπιθύμητα σήματα.
- Ο τρόπος σύγκρισης των σημείων με τα εμπόδια και ο τρόπος διαπίστωσης αν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ των σημείων.
- Η διαδικασία υπολογισμού της μετρικής SINR και ο τύπος για το σύνολο των παρεμβολών (21).

Αξίζει να αναφερθεί πως τα αρχεία που συμπεριλαμβάνονται στον κώδικα της πτυχιακής από το άρθρο, με μεταβολές, είναι τα: AntGain.m, FindOutdoorUser.m, Intersect1.m, isBlocked.m και RandBlockage.m. Τα αρχεία αυτά μεταβλήθηκαν για τις ανάγκες του κώδικα, όμως οι θεμελιώδεις αρχές τους παραμένουν. Ο κώδικας που επεξηγεί το άρθρο μπορεί να εντοπιστεί στον σύνδεσμο [82].

### 3.3 Υλοποίηση του Κώδικα Προσομοίωσης

Ο κώδικας της προσομοίωσης στοχεύει στην ανάδειξη του D2D πρωτοκόλλου επικοινωνίας υποσκελιζόμενο σε 5G κυψελοειδή δίκτυα. Συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικά συστήματα, όπου συμπεριλαμβάνονται χρήστες κινητής τηλεφωνίας (CUE), D2D χρήστες (πομποί και δέκτες) και ο σταθμός βάσης. Ο σταθμός βάσης είναι ιδιόζουσα παρουσία στα συστήματα, αφού για το πρώτο σενάριο είναι το θεμελιώδες στοιχείο που κατευθύνει και ελέγχει όλα τα σήματα και συσκευές, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, υπολειτουργεί. Η προσομοίωση, παράλληλα, συμμερίζεται την κατανομή ενεργειακών πόρων, ώστε να βελτιώνει την συνολική απόδοση του δικτύου. Επομένως, οι D2D

επικοινωνίες προβάλλονται σε συνδυασμό με πολλαπλούς τρόπους διαμοιρασμού της ισχύος του δικτύου στους κατάλληλους χρήστες. Σημειώνεται, ότι η κατεύθυνση των συνδέσεων είναι από τις συσκευές D2D Tx και CUE προς τους ανάλογους δέκτες τους, άρα εξετάζονται οι UL επικοινωνίες. Παρεπόμενο είναι, η κατανομή της ισχύος να αφορά τις συσκευές που εκπέμπουν το σήμα.

Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης, το 5G δίκτυο λειτουργεί υπό φυσιολογικές συνθήκες, προσπαθώντας να μειώσει την καθολική κατανάλωση ενέργειας βελτιώνοντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία των σημάτων και την συνολική χωρητικότητα του. Οι στοχευμένες ιδανικές ενεργειακές τιμές, μειώνουν την επίδραση των παρεμβολών και των ισχυρών απωλειών στα επιθυμητά σήματα. Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του σεναρίου, χρησιμοποιούνται μέθοδοι για τον υπολογισμό των απωλειών, του κέρδους, της εύρεσης του κοντινότερου πομπού για κάθε δέκτη, της εκτίμησης της χωρητικότητας και χρησιμοποιείται για συγκρίσεις ο αλγόριθμος Gale-Shapley. Με την ολοκλήρωση του σεναρίου παρουσιάζεται η συνολική απόδοση (χωρητικότητα) του δικτύου, η κατανομή ισχύος για τους D2D πομπούς κατά την διάρκεια των επαναλήψεων και το πλήθος των ζευγαριών που κατάφεραν να επικοινωνήσουν επιτυχώς.

Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, το 5G δίκτυο έχει υποστεί βλάβες που εμποδίζουν τον σταθμό βάσης από τον πλήρη έλεγχο όλων των καναλιών του δικτύου και την σύναψη συνδέσεων με τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Όμως, είναι εξαιρετικά ωφέλιμο το γεγονός πως οι συσκευές που υποστηρίζουν το D2D πρωτόκολλο, είναι ικανές να συνδεθούν χωρίς την υποβοήθηση του σταθμού βάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο σταθμός βάσης αξιοποιείται στην device discovery τεχνική όπου οι D2D δέκτες εντοπίζουν όλους τους πομπούς και επιλέγουν τον κοντινότερο, αλλά συμβάλλει και στην κατανομή ενέργειας για τους πομπούς και τις συσκευές που παρεμβάλλουν στα σήματα. Αποσαφηνίζεται ότι, ο σταθμός βάσης υπολειτουργεί, δεν προσφέρει την εκπόνηση επίπονων υπολογιστικά διαδικασιών και δεν εξυπηρετεί κανάλια επικοινωνίας για τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Υποστηρίζει αποκλειστικά την κατανομή ενέργειας με τους τρόπους που παρουσιάστηκαν στο Κεφ II, καθώς και βοηθά τους δέκτες να συνδεθούν με τον κοντινότερο πομπό. Έπειτα, ισχύει η παραδοχή πως δεν υπάρχει καμία επικοινωνία πριν την οριστικοποίηση των σημείων στο δίκτυο. Στο σενάριο αυτό, θεωρείται ότι μία έκτακτη καταστροφή έχει συμβεί, όπως σεισμική δόνηση. Συνεπώς το φαινόμενο δημιουργεί συντρίμια και εμπόδια για τις συνδέσεις, τραυματίζει την υποδομή του συστήματος και τα σημεία στο εσωτερικό αυτών των εμποδίων δεν προσμετρώνται στις τελικές συνδέσεις. Το τέλος της προσομοίωσης σηματοδοτείται με την εμφάνιση αντίστοιχων αποτελεσμάτων με το πρώτο σενάριο.

Ο κώδικας είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού πολυάριθμων άρθρων, τόσο για τη θεωρητική υπόσταση, όσο και για την συγγραφή του. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται λεπτομερώς όλες οι λειτουργικότητες του κώδικα, αναδεικνύονται οι επιρροές από τα επιμέρους άρθρα και αναλύονται οι παραδοχές και το περιβάλλον κάθε συστήματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κάθε προσομοίωση εκτελεί 50 επαναλήψεις που για λόγους απλοποίησης, ονομάζονται εποχές. Κάθε εποχή υποσκελίζει 35 Monte Carlo (MC) επαναλήψεις. Μία προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της πιθανότητας διαφορετικών αποτελεσμάτων σε μία διαδικασία που δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί εξαιτίας της παρεμβατικότητας τυχαίων μεταβλητών [73]. Η προσομοίωση Monte Carlo συμβάλλει στην κατανόηση του ρίσκου και της αβεβαιότητας. Συνολικά για μία προσομοίωση συστήματος πραγματοποιούνται 1750 επαναλήψεις του προγράμματος. Τα σενάρια προσομοίωσης είναι δύο, όπως έχει δηλωθεί, αλλά χρησιμοποιούνται για τέσσερις

κατανομές ισχύος (το πρώτο σενάριο) και για τρεις κατανομές ενέργειας (το δεύτερο σενάριο). Επομένως, τα σενάρια χρήσης είναι επτά και παρουσιάζονται παρακάτω.

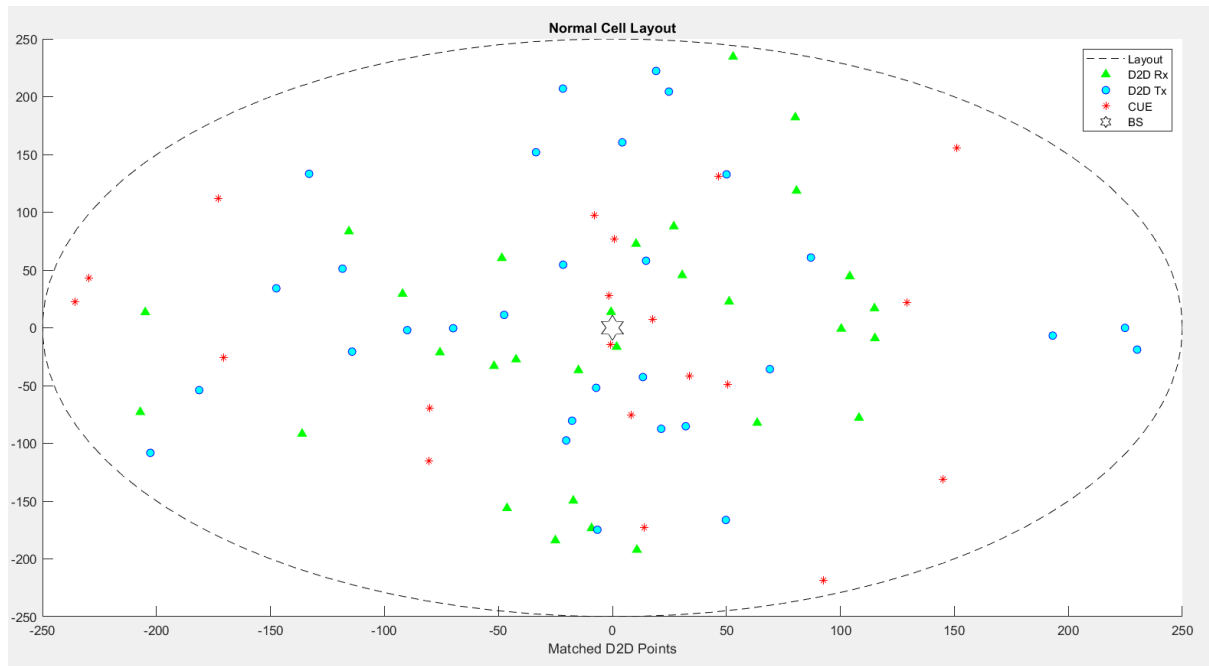
### 3.3.1 Πρώτο Σενάριο Προσομοίωσης

Έχει ειπωθεί αρκετές φορές μέχρι στιγμής πως το πρώτο σενάριο λειτουργίας καταδεικνύει την φυσιολογική λειτουργία κυψελοειδές συστήματος 5G, που υποθάλλει τις D2D συνδέσεις. Το δίκτυο αποτελείται από μονή κυψέλη, σε σχήμα δίσκου με ακτίνα  $R = 250m$ . Στο κέντρο της κυψέλης τοποθετείται ο θεμελιώδης σταθμός βάσης με συντεταγμένες (0,0), δηλαδή στο κέντρο των αξόνων δισδιάστατου χώρου. Γύρω από τις συντεταγμένες του σταθμού βάσης, παράγονται όλα τα υπόλοιπα σημεία/συσκευές του δικτύου, αξιοποιώντας την παραγωγή ομοιόμορφων κατανεμημένων αριθμών. Οι συσκευές του συστήματος χωρίζονται σε D2D Rxs, D2D TxS και χρήστες κινητών τηλεπικοινωνιών CUE. Στην αρχή κάθε προσομοίωσης ισχύει η παραδοχή πως καμία σύνδεση δεν έχει ενεργοποιηθεί και τα σημεία δεν γνωρίζουν εξ' αρχής την ύπαρξη των υπολοίπων.

Η δημιουργία της κυψέλης είναι αποτέλεσμα της συνάρτησης `cell_lay.m` που δέχεται σαν είσοδο την ακτίνα του δίσκου και δημιουργεί το περίγραμμα της. Οι συντεταγμένες των σημείων που απαρτίζουν το περίγραμμα, προκύπτουν από το συνημίτονο και ημίτονο γωνίας  $t$ . Στο εσωτερικό της κυψέλης, το πλήθος των D2D συσκευών, με τους δέκτες και τους πομπούς να είναι ισόποσοι, συμβολίζεται με  $N$  και ισούται με  $N = 30$ . Με όμοιο τρόπο ορίζεται το πλήθος των CUE συσκευών, με το σύμβολο  $M$  να δέχεται την τιμή  $M = 20$ . Οι συντεταγμένες όλων των συσκευών προέρχονται από την συνάρτηση `user_distribution.m`. Η συνάρτηση με τις τιμές του κάθε πλήθους και της ακτίνας εμφανίζει τυχαία σημεία στο εύρος της κυψέλης. Στη συνάρτηση κάνει την εμφάνισή της η `rand` μέθοδος, της MATLAB, που ορίζεται ως ο τρόπος παραγωγής ομοιόμορφων κατανεμημένων τυχαίων αριθμών. Η ολοκληρωμένη μορφή της κυψέλης, ύστερα από την δημιουργία των σημείων, απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Με την ομοιόμορφη κατανομή σχηματίζονται όλες οι συντεταγμένες των συσκευών, με το σύστημα να υποθάλλει 30 D2D Rxs, 30 D2D TxS και 20 CUE. Οι συντεταγμένες των σημείων καταχωρούνται στους πίνακες `d2d_rx`, `d2d_tx` και `intfs`. Οι D2D συσκευές και οι CUE μεταβάλλονται για κάθε επανάληψη, ενώ οι δέκτες και προφανώς ο σταθμός βάσης διατηρούν τις συντεταγμένες τους για την διάρκεια μιας εποχής. Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης, μόλις δημιουργηθούν τα σημεία, αποζητά την εκτίμηση των αποστάσεων μεταξύ αυτών, επικεντρώνοντας την αναζήτησή του στις D2D συσκευές. Επιδιώκει να οργανώσει τους δέκτες με τους πομπούς, στηριζόμενο στην ελάχιστη μεταξύ τους απόσταση.

#### 3.3.1.1 Ελάχιστη απόσταση μεταξύ των D2D συσκευών

Το αρχείο `dist.m` αναλαμβάνει να συγκροτήσει τα ζευγάρια των D2D συσκευών με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί μία τεχνική *device discovery*, όπου με την αρωγή του σταθμού βάσης, ανιχνεύονται τα σημεία με τις μικρότερες αποστάσεις για τον δέκτη και επιλέγεται το κοντινότερο. Η MATLAB μας παραχωρεί την συνάρτηση `pdist2`, που δέχεται σαν εισόδους δύο πίνακες, οι οποίοι θα περιέχουν τις συντεταγμένες για τους πομπούς και για τους δέκτες. Η συνάρτηση εκμεταλλευόμενη την ευκλείδεια απόσταση υπολογίζει όλες τις αποστάσεις ανάμεσα στον δέκτη και σε όλους τους πομπούς και ξεχωρίζει την ελάχιστη, σημειώνοντας τον ομότιμο πομπό. Αυτό πραγματοποιείται για όλους τους δέκτες.



Σχήμα 1: Το ολοκληρωμένο σχέδιο της κυψέλης του πρώτου σεναρίου χρήσης. Με το αστέρι συμβολίζεται ο σταθμός βάσης, με τα τρίγωνα οι D2D δέκτες, με τους κύκλους οι D2D πομποί και με μικρά αστεράκια οι CUE.

Πιο αναλυτικά, η συνάρτηση κατασκευάζει, έναν μονοδιάστατο πίνακα *distances* για τις ελάχιστες αποστάσεις του κάθε δέκτη και δεύτερο μονοδιάστατο πίνακα *Ind*, για να σημειωθούν οι θέσεις των κοντινότερων D2D Tx, όπως αυτές αναγράφονται στον πίνακα *d2d\_tx*. Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση *pdist2*, και αποτυπώνοντας τα αποτελέσματα, γίνεται γρήγορα φανερό πως, ο ίδιος πομπός αντιστοιχίζεται σε πολλαπλούς δέκτες, επειδή η τοποθεσία του είναι η πλησιέστερη σε πολλά σημεία. Στο σύστημα ακολουθείται η παραδοχή πως ένας D2D δέκτης είναι σε θέση να επικοινωνήσει με έναν D2D πομπό. Συνεπώς αν ένας πομπός ανάγεται σαν η καλύτερη επιλογή για πολλαπλούς δέκτες, μόνο ο δέκτης με την ελάχιστη απόσταση θα καταφέρει να συνδεθεί μαζί του. Το αρχείο *dist.m* σχεδιάστηκε με σκοπό να επιλύσει το ζήτημα χωρίς την εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία του brute force και για αυτό το πρόβλημα υπάγεται στην κατηγορία των αναδρομικών προβλημάτων. Η αναδρομή στον αλγόριθμο:

- Με τα πρώτα σύνολα *d2d\_rx* και *d2d\_tx* και την συμβολή της *pdist2* συνάρτησης, ανακαλύπτεται ο κοντινότερος πομπός για τον κάθε δέκτη.
- Οι διπλότυπες τιμές των πομπών επιλύονται ως εξής: αρχικά συγκεντρώνονται οι διπλότυπες θέσεις από τον πίνακα *Ind*. Για αυτές τις τιμές συγκρίνονται οι αποστάσεις των ίδων θέσεων που αντιστοιχούν στον *distances* και αποσπάται η μικρότερη απόσταση.
- Ελέγχεται αν η αποσπώμενη τιμή έχει χρησιμοποιηθεί ήδη. Ο πίνακας *matched\_nums* καταγράφει, κάθε φορά, την θέση του επιλεγμένου στοιχείου (είναι η θέση του D2D Rx) και την τιμή που υπάρχει σε αυτήν την θέση στον *Ind* πίνακα (η θέση του D2D Tx). Για να μην συνεχίζουν να υπάρχουν διπλότυπα στον πίνακα *Ind*, όλες οι ισάξιες καταγραφές, μετατρέπονται σε 0.
- Το τέλος της επανάληψης των στοιχείων του πίνακα *Ind*, σηματοδοτεί και το τέλος της αρχικής εκτέλεσης. Τα σημεία για τα οποία ο αλγόριθμος ανταποκρίθηκε επιτυχώς αποθηκεύονται όλα (συντεταγμένες D2D Rx και

D2D Tx) σε έναν πίνακα 4 διαστάσεων, *pairs*. Οι δύο πρώτες στήλες είναι για τα D2D Rx και οι λοιπές για τα D2D Tx.

- Μόλις περαστούν επιτυχώς στον *pairs*, εκτελείται η αναδρομή της συνάρτησης. Όμως προηγουμένως, ελέγχεται το μήκος του πίνακα και στην περίπτωση που ξεπερνάει το μέγιστο πλήθος (25 ζευγάρια), η αναδρομή σταματάει. Η αναδρομή επίσης διακόπτεται όταν δεν δύναται να φτιάξει κανένα νέο ζευγάρι από τα εναπομείναντα στοιχεία, όπου στην προκειμένη περίπτωση η απόσταση μεταξύ των σημείων είτε είναι εξαιρετικά αυξημένη, είτε δεν μπορεί να προσδιοριστεί, είτε ισούται με μηδέν.

Αξίζει να τονιστεί ότι όσο λιγοστεύουν οι διαθέσιμες συσκευές τόσο πιθανώς να αυξάνονται οι αποστάσεις, αφού η πρώτη επιλογή (το κοντινότερο σημείο) έχει ήδη ταιριαστεί κατά πάσα πιθανότητα και αποκλείεται από την αναζήτηση. Έπειτα, όταν ολοκληρωθεί η αναδρομή, το αρχείο επιστρέφει τον πολυδιάστατο πίνακα, *pairs*, ο οποίος συμπεριλαμβάνει όλες τις συντεταγμένες των σημείων D2D, με την σειρά τους να υποδηλώνει τα ζεύγη. Ο αριθμός των συσκευών πλέον δεν θα είναι  $N$  αλλά  $N'$  και ισχύει η σχέση  $N' < N$ , επειδή ο μέγιστος αριθμός των λειτουργικών ζευγαριών ορίζεται ως την τιμή, 25. Τα οριστικά σημεία που θα αξιοποιηθούν αποτυπώνονται στο Σχήμα 2, το οποίο προβάλλει την κυψέλη μετά από την ολοκλήρωση της εκτέλεσης του *dist.m* αρχείου. Με το πρόσχημα ότι η εύρεση των ζευγαριών D2D, με την ελάχιστη απόσταση είναι τεχνική *device discovery*, επαναλαμβάνεται ότι στην διαδικασία θα συμμετέχει ο σταθμός βάσης. Η *centralized* μέθοδος εύρεσης των κοντινότερων σημείων απαιτεί από τον σταθμό βάσης, να συμβάλλει στην ανίχνευση οντότητας από τις υπόλοιπες συσκευές που χρησιμοποιούνται και αντιστρόφως. Η οντότητα ενημερώνει τον σταθμό βάσης για την πρόθεσή της να συνδεθεί με γειτονική συσκευή και θέτει και παραμέτρους για το κανάλι επικοινωνίας. Για παράδειγμα μία D2D συσκευή δεν επιθυμεί να επικοινωνήσει με CUE εξοπλισμό.

### 3.3.1.2 Αναζήτηση αποστάσεων

Τα εναπομείναντα D2D σημεία χαρακτηρίζονται από τις ελάχιστες για αυτά, αποστάσεις. Το πεδίο ορισμών των αποστάσεων ορίζεται  $\{1,R\}$  μέτρα. Οποιαδήποτε απόσταση ξεπερνάει το ανώτατο όριο θεωρείται αυτομάτως εκτός κάλυψης και θα έχει μειωμένη ή μηδενική απόδοση, ενώ αν η απόσταση είναι μηδέν, τα σημεία επικαλύπτονται. Στο παρόν σύστημα αίρεται η παραδοχή, πως κάθε σημείο έχει μοναδικές συντεταγμένες. Η προσομοίωση συνεχίζει με την εύρεση των υπόλοιπων αποστάσεων μεταξύ όλων των αντικειμένων της κυψέλης. Όπως και στο 3.2.1, επιστρατεύεται η ευκλείδεια απόσταση για να υπολογιστούν οι παρακάτω αποστάσεις:

1. Απόσταση από τους D2D πομπούς, με τους D2D δέκτες.
2. Απόσταση από τους D2D πομπούς, με τον σταθμό βάσης, για τις παρεμβολές που ταλαιπωρούν το επιθυμητό σήμα.
3. Απόσταση από τους CUE, με τον σταθμό βάσης.
4. Απόσταση από τους CUE με όλους τους D2D δέκτες.

Για τη εύρεση των αποστάσεων αξιοποιείται η συνάρτηση *distance.m*.

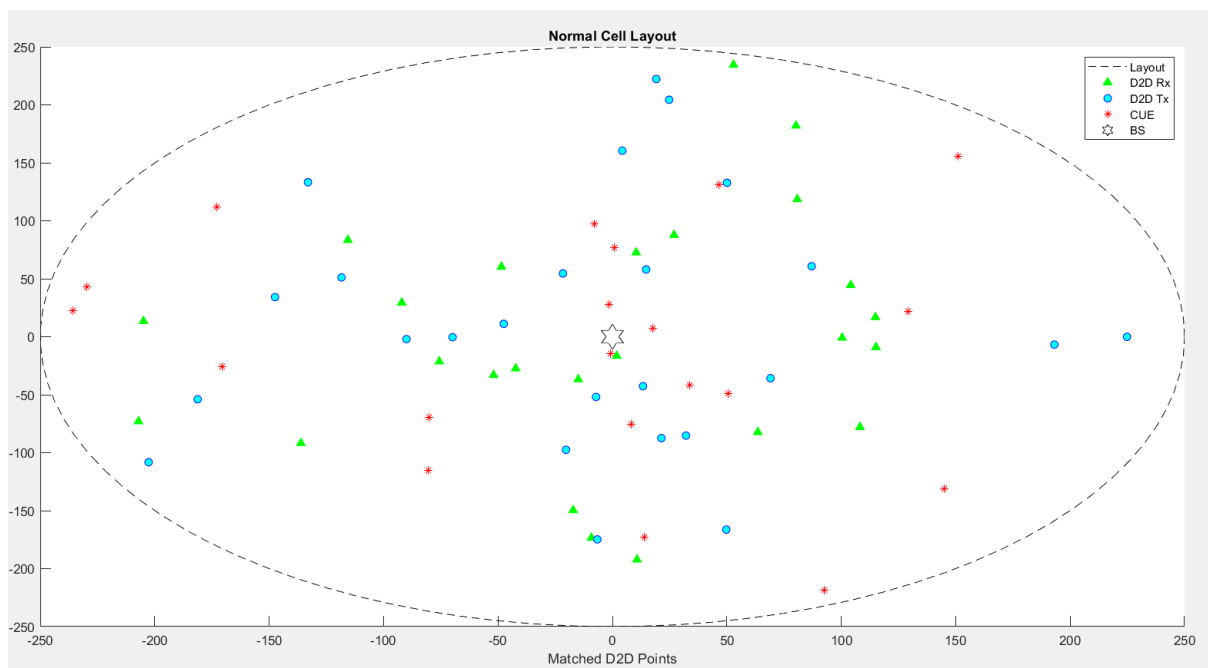
### 3.3.1.3 Path Loss & Channel Gain

Έπειτα το πρόγραμμα της προσομοίωσης εξετάζει τις απώλειες διαδρομών για όλες τις αποστάσεις που συγκεντρώθηκαν. Οι απώλειες μονοπατιού υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις (8),(9),(10),(11). Οι τύποι (8),(9) εξετάζουν την απώλεια των D2D συνδέσμων,

των D2D πομπών με το σταθμό βάσης και των χρηστών κινητής τηλεφωνίας με τον σταθμό βάσης. Οι τύποι (10),(11), αφορούν τις παρεμβολές που προέρχονται από τους CUE με αποδέκτες τις D2D Rx συσκευές, για αυτό και μετρώνται οι αποστάσεις μεταξύ τους και όχι οι αποστάσεις μεταξύ των πομπών και των CUE. Η απόσταση αναφοράς *threshold* είναι προκαθορισμένη στα 125m για τις πρώτες εξισώσεις, ενώ στην περίπτωση των παρεμβολών το όριο αυξάνεται στα 250m, ώστε να συμπεριλαμβάνονται οι παρεμβολές από την μία άκρη της κυψέλης στην άλλη. Οι απώλειες επιστρέφονται από το αρχείο *pathloss.m* σε μονάδα μέτρησης dB, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να απεικονιστούν γραφικά σε σύγκριση με τη μέση τιμή απώλειας μονοπατιού στις επικρατούσες συνθήκες. Η τιμή της συχνότητας που χρησιμοποιείται είναι τα 2 GHz, ωστόσο για την χρήση στον τύπο, η τιμή αναγράφεται σε kHz. Η Inband επικοινωνία στο αδειοδοτημένο φάσμα, υπενθυμίζεται πως αποφέρει αξιολογικά αποτελέσματα στην απόδοση του συστήματος, ειδικά για μακρινές αποστάσεις.

Από την απώλεια διαδρομής, εκτιμάται η μεταβλητή *channel coefficient* με τον εξής τρόπο σύμφωνα με το [12]:

- I. Υπολογίζεται η τιμή του *path loss* σε dB.
- II. Προετοιμάζεται η μεταβλητή *variance* η οποία θα ισούται με  $variance[dB] = -PL[dB]$ . Η εξίσωση αυτή δηλώνει την αρνητική εξασθένιση καναλιού σε dB που αξιολογείται από την εξεταζόμενη απώλεια διαδρομής.
- III. Δημιουργία παραμέτρου κλίμακας,  $sigma = \sqrt{\left(\frac{2}{4-\pi}\right)}\sqrt{10^{(0.1 \cdot variance)}}$ .
- IV. Συμβολίζεται ως  $g_{sd}$  το κανάλι εξασθένισης Rayleigh μεταξύ του πομπού και του προορισμού. Απομένει να παραχθεί ο τυχαίος αριθμός Rayleigh μέσω της αξιολογημένης παραμέτρου κλίμακας. Ο τύπος που χρησιμοποιείται με την συμβολή της MATLAB, είναι:  $g_{sd} = random('rayl', sigma)$ .



Σχήμα 2: Το ολοκληρωμένο σχέδιο της κυψέλης μετά την εκτέλεση της *dist* συνάρτησης.



Η  $g_{sd}$  μεταβλητή εκτιμάται για όλα τα ζευγάρια των οποίων παρέχονται οι αποστάσεις. Με την καθοδήγηση του άρθρου [43], η μεταβλητή channel coefficient διακρίνεται πως ακολουθεί σύνθετη Gaussian τυχαία μεταβλητή με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση (variance) την απώλεια του μονοπατιού. Από την  $g_{sd}$  εξάγεται το κέρδος του καναλιού. Το κέρδος συμβολίζεται με  $h_{i,j}$ , όπου  $i, j$  ανήκουν στα σύνολα  $i \in \{Rx, bs\}$  και  $j \in \{Tx, CUE\}$  αντίστοιχα, ενώ η αξία του κέρδους δίνεται από την εξίσωση:  $h_{i,j} = |g_{i,j}|^2$ ,  $\forall i, j$  με  $i \neq j$ . Η παραπάνω διαδικασία αποκαλύπτει την εξάρτηση του κέρδους με την απώλεια μονοπατιού και αναγράφεται στο αρχείο channel\_coefficient.m.

### 3.3.1.4 Κατανομή Ενέργειας

Στο σύστημα όλες οι μεταδόσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα. Προκειμένου να διασφαλιστεί η εξισορρόπηση των παρεμβολών και η ποιότητα των υπηρεσιών των D2D δικτύων χρειάζεται να ενεργοποιηθεί ένα σχέδιο ελέγχου στις συσκευές του δικτύου. Η διαχείριση των ενεργειακών πόρων γίνεται σύμφωνα με τους τρόπους που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 2.8. Το πρόγραμμα ενεργοποιείται με την εκτέλεση του script αρχείου, ονόματι *Scenarios*. Το αρχείο διαλέγει κάθε φορά μία από τις τέσσερις διαφορετικές κατανομές και εκτελεί την προσομοίωση. Παρόλα αυτά τα τελικά αποτελέσματα για την χωρητικότητα εμφανίζονται στο ίδιο γράφημα ώστε να διακρίνονται με ευκολία οι ανισότητες των αποτελεσμάτων κάθε τρόπου. Η αναγωγή της ισχύος για το σύστημα, συμβαίνει τόσο για τους D2D πομπούς όσο και για τους CUE χρήστες. Το θεωρητικό υπόβαθρο θέτει την ανάγκη για κατανομή της ενέργειας μονάχα στους D2D πομπούς. Αυτή η αρχή εφαρμόστηκε στο αρχικό πλαίσιο των πειραματικών δοκιμών του κώδικα, στο οποίο όλες οι συσκευές που παρεμβάλουν έχουν συγκεκριμένη τιμή, ενώ για τις D2D συσκευές εφαρμόζεται το σχέδιο ελέγχου. Τα αποτελέσματα όμως παρουσίαζαν κατά πολύ χαμηλωμένη την χωρητικότητα του συστήματος. Έτσι δοκιμάστηκε η εφαρμογή των τρόπων κατανομής και στους CUE χρήστες με ωφέλιμη ανταπόκριση.

Ο σταθμός βάσης ελέγχει τις παραμέτρους κάθε τρόπου και ξεκινάει τον διαμοιρασμό της ενέργειας. Αξίζει να συζητηθεί ότι οι τρεις τελευταίοι τρόποι διαμοιρασμού ενέργειας, μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο με *centralized* τρόπο, δηλαδή έχουν ανάγκη από σταθερή μονάδα βάσης για την εκτέλεσή τους. Όμως, ο πρώτος τρόπος κατανομής εφαρμόζεται με ευκολία σε κατανεμημένα δίκτυα χωρίς την υποστήριξή του σταθμού βάσης. Η δυναμική φύση μερικών παραμέτρων, δυσκολεύει την εκπόνηση του τρόπου κατανομής σε κατανεμημένο δίκτυο, χωρίς ωστόσο να το καθιστά ακατόρθωτο.

Ο διαμοιρασμός των ενεργειακών πόρων τελείται για όλους τους πομπούς του δικτύου. Η συνολική ενέργεια που διαθέτει το σύστημα, για τις D2D επικοινωνίες διακρίνεται ως  $P_{tot}$ , και δέχεται την τιμή  $P_{tot} = 35dBm$  (περίπου 3 Watt), ενώ κατά αναλογία, η ενέργεια που δίνεται για τους κυψελοειδείς χρήστες συμβολίζεται με  $P_c = 34dBm$  (περίπου 2.5 Watt). Οι τιμές αυτές αποδόθηκαν μετά από πειραματική μελέτη με σκοπό οι τιμές ισχύος που εν τέλει θα δοθούν στις συσκευές να εντοπίζονται εντός προκαθορισμένων ορίων. Εξαιτίας της τυχαιότητας των τιμών στις αποστάσεις, απώλεια μονοπατιού και αριθμό επιτυχημένων D2D συνδέσμων, έγκειται η πιθανότητα το σύστημα να προσδίδει ενεργειακές τιμές εκτός των επιτρεπτών ορίων. Η ελάχιστη τιμή ισχύος για επιτυχημένη σύνδεση που απλώς να καλύπτει τις βασικές ανάγκες του χρήστη ορίζεται ως

$\min_{d2d} = 20dBm = 100mW$ . Τα 100mW αποδεικνύεται από πολυάριθμες επαναλήψεις πως είναι η ελάχιστη ισχύς μετάδοσης, ώστε κάθε συσκευή να έχει την δυνατότητα να παράγει επιτυχώς σήματα. Το ανώτατο όριο ισχύος καθορίζεται από το άρθρο [52] και ισούται με  $\max_{d2d} = 24dBm$ , περίπου 0.25 W. Τονίζεται πως σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις μία συσκευή ξεπερνούσε το μέγιστο όριο ισχύος. Οι περισσότερες έρευνες που αναφέρουν την ισχύ μιας D2D συσκευής για ανοδικού διαύλους θέτουν την μεγαλύτερη ισχύ στα 23dBm (περίπου 200mW). Το άρθρο [74] δηλώνει ότι, μία τηλεφωνική κινητή συσκευή μεταδίδει με μέγιστη ενεργειακή στάθμη τα 23dBm, αλλά τυπικά η ισχύς, τηλεφωνικής συσκευής είναι σημαντικά μικρότερη. Ο σταθμός βάσης, διαχειρίζεται την ενέργεια για τις συσκευές, θέτοντας την σε τέτοιο επίπεδο ώστε όλα τα σήματα να λαμβάνονται με την ίδια περίπου ισχύ. Μόλις ολοκληρωθεί η κατανομή ισχύος, ελέγχεται από το σύστημα αν η δοσμένη ενεργειακή τιμή ανήκει στο πεδίο τιμών και στην περίπτωση που είναι εκτός ορίων, το σύστημα αλλάζει αυτομάτως την τιμή στην ελάχιστη ή στην μέγιστη, αναλόγως με το ποιο όριο παραβιάστηκε.

Κατά την διάρκεια του διαμοιρασμού σχηματίζεται πολυδιάστατος πίνακας, με τον συμβολισμό  $\rho = [M, N']$ , που καταδεικνύει τους βέλτιστους πόρους (συνήθως RBs) οι οποίοι εκχωρούνται για CUE και DUE [69]. Οι D2D χρήστες ενεργούν υπό το *Underlay* πρωτόκολλο που τους παρέχει με συνεχή πρόσβαση στο αδειοδοτημένο φάσμα, με την προϋπόθεση ότι η αθροιστική παρεμβολή στο σταθμό βάσης, είναι μικρότερη από προκαθορισμένο όριο. Ολόκληρη η μετάδοση πραγματοποιείται σε 1RB, όπου οι D2D πομποί στέλνουν την πληροφορία τους στον αποκλειστικό δέκτη τους. Το ένα μπλοκ πόρων, είναι ένας πόρος χρόνου ή ένας πόρος συχνότητας ανάλογα με την μέθοδο εγκαθίδρυσης διαύλων [43]. Το σύστημα της προσομοίωσης υποστηρίζει την FDD μέθοδο [52].

Η προκαθορισμένη αξία του  $\rho$ , για όλο το περιεχόμενο του είναι μηδενική, ωστόσο όταν καταδείξει τον ιδανικό πόρο για τις συσκευές, καταχωρεί στην θέση του πίνακα, την μονάδα. Η κατασκευή του πίνακα  $\rho$  γίνεται με την συνάρτηση  $\rho\_mat$ , σύμφωνα με το αρχείο `admiss_contr.m` του [52]. Στη συνάρτηση λογαριάζονται οι μέγιστες τιμές ισχύος, όταν η SINR μετρική είναι η ελάχιστη και παράλληλα εκτιμώνται και οι μικρότερες ενεργειακές τιμές, όταν οι παρεμβολές μαζί με τον θόρυβο επικαλύπτουν το σήμα. Ο έλεγχος αυτός γίνεται για τις παραδοσιακές αλλά και τις D2D επικοινωνίες. Έπειτα, οι ενεργειακές στάθμες που αποτιμήθηκαν συγκεντρώνονται σε μία μεταβλητή  $A$ , με την βοήθεια της `cross_pt` συνάρτησης, με την οποία τα ποσά που υπολογίστηκαν συνδυάζονται για να κατασκευαστεί ένα ζευγάρι τιμών, που είναι θεμιτό να είναι θετικές. Εφόσον το ζευγάρι περιέχει δύο τιμές μεγαλύτερες του 0 και αν η μέγιστη ισχύς για τον D2D πομπό, όταν το SINR είναι το λιγότερο δυνατό, είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ για τον CUE σε αντίστοιχες συνθήκες, τότε η θέση αυτή του πίνακα  $\rho$  θα ισούται με την μονάδα.

Η πρώτη κατανομή του ίσου καταμερισμού χρησιμοποιεί τον τύπο (15) για να μοιράσει ισόποσα την ολική ενέργεια στις επιμέρους συσκευές του δικτύου. Για παράδειγμα, όταν  $P_{tot} = 35dBm$  τότε  $P_{Tx_k} = 0.1265W$ ,  $k \in \{1, \dots, 25\}$ , όπου με  $P_{Tx_k}$  συμβολίζεται η ισχύς για την  $k$ -ή D2D συσκευή και με παρόμοιο τρόπο προκύπτουν τα ενεργειακά επίπεδα για τους κυψελοειδείς χρήστες. Η τυχαία κατανομή, (16), προαπαιτεί την παράμετρο  $a_k$  ως τον παράγοντα διαμοιρασμού, η οποία ανήκει στο σύνολο  $a_k \in \{0, 1\}$  και το αθροιστικό σύνολο των  $a_k$  πρέπει να ισούται με την μονάδα. Η παραγωγή των τυχαίων αυτών τιμών προγραμματίζεται στο αρχείο `random_value.m`. Ο πίνακας που συγκεντρώνει τις τυχαίες

τιμές πολλαπλασιάζεται με την καθολική ενέργεια του δικτύου για να δώσει την ισχύ σε κάθε D2D Tx συσκευή. Ο πίνακας με τις τυχαίες αριθμητικές αξίες, είναι διαφορετικός για τους D2D Tx και CUE, επειδή έχουν άλλη τιμή πλήθους. Έπειτα, για την τρίτη επιλογή που ενστερνίζεται τον τύπο (17), είναι απαραίτητο να καταμετρηθεί το συνολικό άθροισμα όλων των απωλειών διαδρομής μεταξύ των D2D Rxs και D2D Txs και το συνολικό άθροισμα των απωλειών διαδρομής ανάμεσα στους CUE χρήστες και στον σταθμό βάσης. Τα σύνολα συμπεριφέρονται ως διαιρέτες με την απώλεια μονοπατιού, που αντιστοιχεί στο ζεύγος, να είναι ο διαιρετέος.

Ο τελευταίος τρόπος κατανομής προσφέρεται από το γνωστό μέχρι τώρα άρθρο [52], στο οποίο ελέγχεται το άθροισμα της χωρητικότητας των διαύλων D2D και CUE με τους αντίστοιχους αποδέκτες και προσαρμόζονται τα επίπεδα ισχύος ώστε το άθροισμα τους να είναι το μέγιστο. Συνέπεια αυτού είναι πολυάριθμες συσκευές να έχουν ανάγκη να καταναλώνουν την μέγιστη επιτρεπόμενη ενέργεια, μετατρέποντας το σύστημα σε ενδεχομένως, κοστοβόρο δίκτυο. Όμως οι υψηλές ταχύτητες και η αξιοπιστία των συνδέσμων εξισορροπούν την αναλογία κόστους - απόδοσης. Ο συνεχής έλεγχος των ρυθμών ροής για όλους τους συνδέσμους του δικτύου στηρίζεται εξ ολοκλήρου στον κεντρικό σταθμό βάσης της κυψέλης. Αξίζει να σημειωθεί πως όλοι οι πομποί του συστήματος μεταδίδουν με σταθερή ισχύ.

### 3.3.1.5 Υπολογισμός SINR και χωρητικότητας

Με το πέρας του ενεργειακού διαμοιρασμού, υπάρχουν δύο επιλογές που οδηγούν στον υπολογισμό της SINR μετρικής και έπειτα στην χωρητικότητα του συστήματος. Το αρχείο `scrip.m` είναι η πρώτη επιλογή, η οποία καλεί την συνάρτηση `throughput` για τον σταθμό βάσης και για τους D2D δέκτες και συνυπολογίζει την χωρητικότητα για όλες τις συνδέσεις. Το πρόγραμμα υλοποιεί το αρχείο `throughput.m`, με την ομώνυμη συνάρτηση το οποίο δέχεται ως παραμέτρους, τις κατανομημένες ενέργειες των συσκευών του δικτύου, τα κέρδη των διαύλων τους, τον πίνακα  $\rho$ , τον θόρυβο που επηρεάζει τα σήματα, το άθροισμα των παρεμβολών για κάθε δέκτη και το εύρος ζώνης. Ο θόρυβος, εκπληρώνεται από την εξίσωση (18) με  $NF = 10$ , ενώ το εύρος ζώνης μετρίεται σε GHz. Στην εκτέλεση του `scrip` αρχείου, το εύρος ζώνης ορίζεται ως το ανώτατο όριο bandwidth, για 5G κυψελοειδές δίκτυο όταν το εύρος συχνοτήτων είναι το FR1 (Frequency Range 1, 450 MHz - 6 GHz). Το παρόν σύστημα εκμεταλλεύεται την αδειοδοτημένη συχνότητα στα 2GHz και επομένως το μέγιστο bandwidth ορίζεται στα 100MHz [21]. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην (18), ο θόρυβος  $N_0$  προκύπτει  $N_0 = -187.0259 \text{ dBm}$ . Στη *throughout* συνάρτηση καταγράφονται οι δύο εξισώσεις για τον υπολογισμό της SINR μετρικής όταν ο παραλήπτης είναι ο σταθμός βάσης και όταν ο αποδέκτης είναι ο D2D δέκτης. Σχετικά με την μετρική της ποιότητας των D2D συνδέσμων, συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό οι συσκευές που αναγράφονται στον πίνακα  $\rho$ . Η μετρική, για τις θέσεις του  $\rho$  που είναι μηδενικές, μετατρέπεται ίση με μηδέν. Αποσαφηνίζεται πως οι παρεμβολές είναι διαφορετικές όταν ο αποδέκτης είναι ο σταθμός βάσης σε σύγκριση με όταν ο αποδέκτης είναι ο D2D Rx. Ο τύπος (19) αποτελεί το σύνολο των παρεμβολών που δημιουργούνται από τους D2D πομπούς προς τον σταθμό βάσης και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετρικής με την εξίσωση (1). Ομοίως οι συνολικές παρεμβολές για  $k$ -ο D2D δέκτη, ανιχνεύονται με την βοήθεια του τύπου (20) και ενσωματώνονται στην εξίσωση (2). Μέσα από την αξία της μετρικής καθορίζεται η χωρητικότητα του διαύλου χρησιμοποιώντας το Shannon's Capacity Theorem, (14). Έστερα, οι τιμές που αφορούν την χωρητικότητα αθροίζονται και συγκεντρώνονται σε μία μεταβλητή που επιστρέφεται στο κύριο κομμάτι του προγράμματος

και αποθηκεύεται στον βασικό πίνακα της προσομοίωσης, για κάθε επανάληψη. Ωστόσο, το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει μια δεύτερη επιλογή για τον υπολογισμό της χωρητικότητας. Αυτή είναι η Gale-Shapley δυνατότητα του άρθρου [52].

Η δεύτερη επιλογή για τον υπολογισμό της χωρητικότητας αρχίζει από το αρχείο `pl_thr_sc.m`, το οποίο λαμβάνει σαν παραμέτρους, την ενεργειακή τιμή κάθε συσκευής, τα κέρδη των συνδέσμων, τον θόρυβο, την μέγιστη δύναμη ισχύος, τον πίνακα  $\rho$  και το εύρος ζώνης. Προκειμένου να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα με τον συγκεκριμένο τρόπο ώστε να είναι συγκρίσιμα με τον πρώτο, αυξήθηκε το εύρος ζώνης σύμφωνα με το άρθρο [52] που ορίζει το Bandwidth ίσο με 0.5 MHz, ξεφεύγοντας ίσως από την  $\mu W$  μάλιστα. Ο λόγος για τον οποίο είναι αναγκαία η αλλαγή είναι πως, σε σχέση με το άρθρο, έχουν αλλάξει οι τιμές του κέρδους, των αποστάσεων και του θορύβου (ανάμεσα σε άλλες). Η χρήση του Gale-Shapley αλγορίθμου θα αποφέρει το μέγιστο ρυθμό ροής για τον συνδυασμό συσκευών, επομένως η χωρητικότητα για τον D2D σύνδεσμο ίσως να είναι η μέγιστη, αλλά από την άλλη η χωρητικότητα για τον CUE πιθανώς να είναι η ελάχιστη. Το αποτέλεσμα θα είναι το μέγιστο για τον συνδυασμό των συσκευών, συνεπώς οι τιμές της χωρητικότητας με μικρότερο εύρος ζώνης παρουσιάζονται σημαντικά ελαττωμένες. Αυξάνοντας το εύρος ζώνης στην τιμή που προτείνει το άρθρο, είχε σαν επακόλουθο η χωρητικότητα να εμφανίζει ευνοϊκότερες τιμές. Παράλληλα οι ιεραρχία των αποτελεσμάτων ταιριάζει στις συνθήκες του κάθε συστήματος. Το Κεφάλαιο IV πλήρως αναλύει την κατάληξη των προσομοιώσεων.

Η μεταβολή του εύρους ζώνης επιδρά στον θόρυβο του συστήματος του οποίου η τελική τιμή θα είναι  $N_0 = -170.9315 \text{ dBm}$ . Η αρχική λειτουργία του `pl_thr_sc.m` αρχείου είναι η εκτέλεση της συνάρτησης `match_pairs`, με τις ίδιες παραμέτρους. Η συνάρτηση, βρίσκει την χωρητικότητα κάθε διαθέσιμης ζεύξης και την αποθηκεύει προσωρινά σε πολυδιάστατο πίνακα, έναν για τις CUE συνδέσεις και έναν για τις D2D. Η επόμενη διεργασία της είναι η σύγκριση της χωρητικότητας των όμοιων αντικειμένων, δηλαδή συσχετίζει την χωρητικότητα, για παράδειγμα του  $k$ -ου D2D συνδέσμου με  $k \in \{1, \dots, N\}$  αναφορικά με όλες τις υπόλοιπες τιμές throughput παρόμοιων διαύλων. Έχοντας σχηματίσει δύο πολυδιάστατους πίνακες, `pair_d2d`, `pair_intf`, με πρωταρχικές τιμές σε όλες τις θέσεις την μονάδα, όταν η παραπάνω συνθήκη τίθεται σε ισχύ, προσαυξάνεται κατά 1, η συγκεκριμένη θέση στον πίνακα, `pair_d2d` και αντίστοιχα για τον `pair_intf`. Εφόσον, η χωρητικότητα δύο συνδέσεων είναι ίση, η συνάρτηση στρέφεται στον παράγοντα της τύχης για την θέση στην οποία θα προσθέσει την μονάδα στον κατάλληλο πίνακα. Οι D2D συσκευές που με βάση τον πίνακα  $\rho$ , δεν κατέχουν τον καλύτερο συστημικό πόρο σε συνδυασμό με τους CUE χρήστες (οι μηδενικές τιμές του  $\rho$ ), δεν λαμβάνονται υπόψη για την σύγκριση. Σε αυτό το σημείο οι παράμετροι που απαιτούνται στην `galeshapley` συνάρτηση, έχουν προετοιμαστεί και η μέθοδος είναι έτοιμη να διεξαχθεί. Σημειώνεται ότι, ο παράγοντας της τυχαιότητας αποβλέπει στην ρεαλιστικότερη προσέγγιση που δηλώνει πως οι συσκευές πιθανώς να υπολειτουργούν ή να μην είναι σε θέση να συνάψουν επιτυχημένες συζεύξεις με τις επικρατούσες συνθήκες.

Ο αλγόριθμος εκτελείται με την βασική αρχή που περιγράφηκε σε προηγούμενη υπό-ενότητα. Με τον τερματισμό του, έχουν σχηματιστεί τα κατάλληλα ζευγάρια D2D Tx και CUE και συγκεντρώνονται σε μονοδιάστατο πίνακα, με τον συμβολισμό `ptr`. Το Σχήμα 3 αποτυπώνει τον πίνακα που δημιουργεί ο Gale-Shapley αλγόριθμος.

<code>ptr =</code>	Ο πίνακας οργανώνεται ως εξής: η θέση του πίνακα <i>ptr</i> , είναι κάθε CUE σημείο. Οι τιμές του, είναι οι D2D συσκευές όπως αυτές καταγράφονται από τον αρχικό πίνακα των στοιχείων <i>d2d_tx</i> . Για παράδειγμα, η πρώτη CUE συσκευή (1η θέση του <i>ptr</i> ), αντιστοιχίζεται με τον D2D δέκτη στην θέση 12 του πίνακα <i>d2d_tx</i> . Παρατηρείται ότι, ο αλγόριθμος δεν διαγράφει τα σημεία των D2D συσκευών, για τα οποία διαμορφώθηκαν ζεύγη, για αυτό και υπάρχουν διπλότυπες τιμές των D2D Tx. Οι αρνητικές τιμές συνεπάγονται τη μη εύρεση κατάλληλου D2D Tx, ώστε η χωρητικότητα να είναι μέγιστη για τον συγκεκριμένο CUE χρήστη. Αυτό, όμως, δηλοποιεί ότι εξαιρούνται τα D2D σημεία από τον υπολογισμό χωρητικότητας, όχι όμως και τα CUE. Η αλλαγή αφορά τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στην συνάρτηση throughput, και στοχευμένα στην ενεργειακή ισχύ που αποσκοπεί στην μετάδοση των CUE συσκευών. Συνεπώς τα σημεία των D2D πομπών που δεν υφίστανται στο <i>ptr</i> , δεν λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της χωρητικότητας. Η προτεραιότητα των συνδέσμων σχετικά με την συνολική χωρητικότητα του συστήματος, αποδίδεται στους CUE χρήστες. Παρεπόμενο είναι η χωρητικότητα του συστήματος να είναι μειωμένη, σε σχέση με τον υπολογισμό της χωρητικότητας όταν όλοι οι D2D Tx δίαυλοι και CUE δίαυλοι συμμετέχουν στο σύνολό της.
12	
-1	
4	
13	
3	
14	
17	
4	
9	
12	
17	
14	
13	
14	
13	
12	
4	
-1	Γίνεται φανερό ότι ο <i>ptr</i> καθορίζει τις συσκευές που θα συμπεριληφθούν στον υπολογισμό του συνολικού throughput. Οι δύο επιλογές που συζητήθηκαν, επιστρέφουν την καθολική χωρητικότητα του συστήματος και την αποθηκεύουν στον κεντρικό πίνακα <i>thr_vector</i> , για τον οποίο η κάθε θέση περιέχει το άθροισμα όλων των ρυθμών ροής, για κάθε επανάληψη.
3	
12	

Σχήμα 3: Πίνακας του Gale Shapley.

Μόλις εκτελεστούν όλες οι επαναλήψεις της κάθε εποχής, ο συνολικός πίνακας *thr\_vector*, διαιρείται με τον προκαθορισμένο αριθμό των Monte Carlo ανεξάρτητων επαναλήψεων, ώστε να βρεθεί ο μέσος όρος της χωρητικότητας. Ακόμα για κάθε εποχή, καταχωρείται στον πίνακα *power\_vector*, η ενεργειακή κατανομή των D2D πομπών και αποτυπώνεται γραφικά σε συνάρτηση με το κατώτατο και ανώτατο όριο ισχύος. Τέλος, στην διάρκεια της εκτέλεσης του κάθε σεναρίου, σημειώνονται τα ζευγάρια που κατάφεραν να πραγματοποιήσουν ζεύξεις, με μέγιστο πλήθος τα 25. Το πλήθος των ικανών ζεύξεων απεικονίζεται για κάθε προσομοίωση ώστε να φανουν στο διάγραμμα, τα σφάλματα ή η απόρριψη μερικών ζευγαριών από το σύστημα. Η δυνατότητα αυτή, γίνεται ξεκάθαρη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης.

### 3.3.2 Δεύτερο Σενάριο Προσομοίωσης

Η δεύτερη ιδέα του προγράμματος επικεντρώνεται στην δημιουργία δικτύου που λειτουργεί χωρίς την πλήρη υποστήριξη του σταθμού βάσης. Στο σενάριο ο σταθμός βάσης υπολειτουργεί μερικώς, ύστερα από την σεισμική δόνηση που προκλήθηκε. Αυτό σημαίνει πως ο κεντρικός χειριστής του δικτύου, δεν διαθέτει, υπό τις έκτακτες συνθήκες, την δυνατότητα να ελέγχει όλες τις συνδέσεις και να εκτελεί υπολογιστικά έντονες υπηρεσίες. Οι

συσκευές ενός 5G δικτύου, όμως κατέχουν την ικανότητα να δρουν ανεξάρτητα και μέσω του D2D πρωτοκόλλου, συνδράμουν στην υλοποίηση αξιόπιστου δικτύου, μικρής εμβέλειας. Η θεωρία του D2D πρωτοκόλλου αναγγέλλει πως η χρήση των συσκευών ως αναμεταδότες, διευρύνει την επικράτεια του δικτύου και επίσης διευκολύνει την σύναψη των επικοινωνιών στην περίπτωση που, η απευθείας σύνδεση του πομπού με τον αναμεταδότη είναι LOS, ενώ η απευθείας μετάδοση του ίδιου πομπού με τον δέκτη είναι NLOS. Επίσης επιτρέπει στον πομπό να ανακαλύψει περισσότερες γειτονικές συσκευές που θα αναμεταδώσουν την πληροφορία ώστε το επιθυμητό μήνυμα να φτάσει στον τελικό του προορισμό. Στο παρόν σύστημα δεν συμμετέχουν οι αναμεταδότες καθώς είναι έξω από τον σκοπό των προσομοιώσεων.

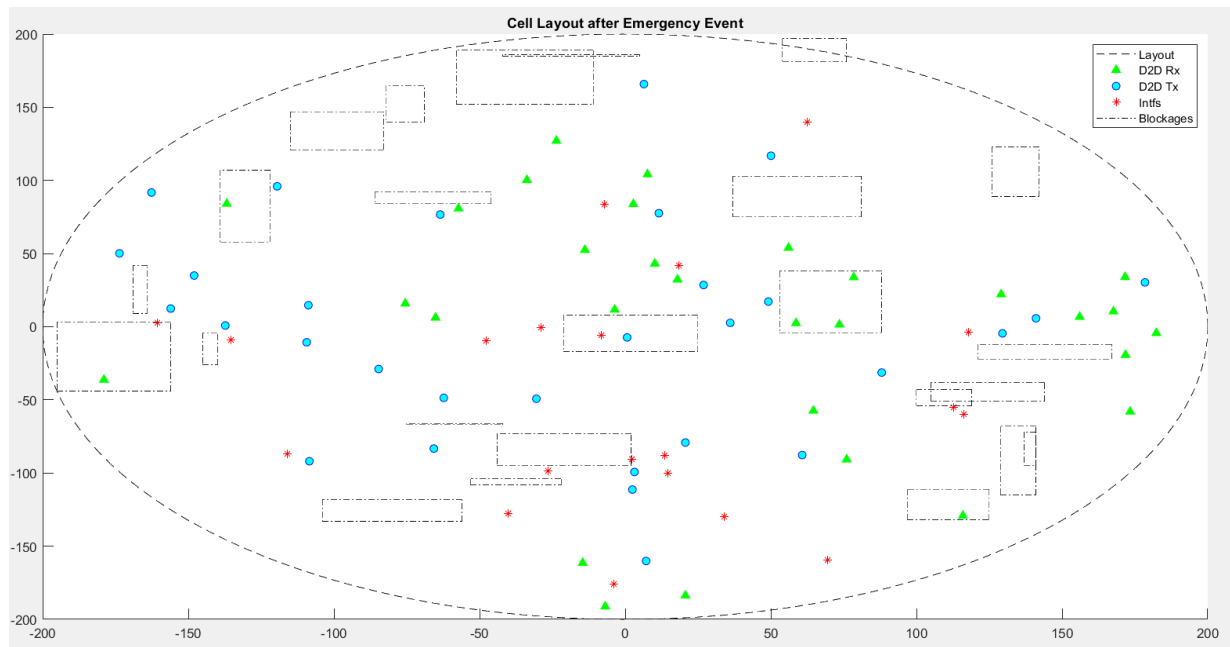
Το σύστημα που παρουσιάζεται είναι ένα 5G κυψελοειδές δίκτυο που λειτουργεί στο εύρος, FR2 (Frequency Range 2: 24.25 με 52.6 GHz), συγκεκριμένα στην συχνότητα των 28 GHz με το Bandwidth να ισούται με  $BW = 0.8$  και είναι το μέγιστο εύρος ζώνης για αυτό το φάσμα συχνοτήτων. Παρότι ο σταθμός βάσης υπολειτουργεί και αδυνατεί να υποστηρίξει τις παραδοσιακές τηλεπικοινωνίες, εξακολουθεί να είναι απαραίτητος για την ανίχνευση των συσκευών και για την ενεργειακή κατανομή όλων των πομπών της κυψέλης (συμπεριλαμβανομένων των συσκευών που παρεμβάλουν). Το δίκτυο συνεπώς χαρακτηρίζεται ως centralized σύστημα. Ο σταθμός βάσης αναλαμβάνει τον ρόλο του οργανωτή της συνολικής ισχύος που είναι διαθέσιμη και στηρίζει τις συσκευές, ώστε να ανακαλύψουν η μία την άλλη. Είναι αποδεκτό πως δεν προηγείται καμία επικοινωνία πριν την δημιουργία των σημείων στην κυψέλη, ενώ όλες οι συσκευές μετά την οριστικοποίηση τους στο πρόγραμμα, ανακοινώνουν την παρουσία τους με την χρήση ανιχνευτικού σήματος. Το σήμα μεταδίδεται στην  $\mu W$  μάλιστα για να είναι ικανό να φτάσει σε όλο το μήκος της κυψέλης. Ωστόσο, όλες οι D2D συσκευές μεταχειρίζονται την mmW ζώνη συχνοτήτων για τις συνδέσεις τους και είναι εφοδιασμένες με MIMO κεραίες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του άμεσου κέρδους στον δέκτη.

Σκοπός του δεύτερου σεναρίου της προσομοίωσης είναι η ανάδειξη της συνεισφοράς του D2D πρωτοκόλλου όταν το δίκτυο δεν μπορεί να υποστηρίξει παραδοσιακές επικοινωνίες. Σε αυτό το πλαίσιο, ο κατάλληλος προσδιορισμός της ενέργειας μετάδοσης, συμβάλλει στην βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και στην αξιοπιστία των συνδέσεων. Με την παραδοχή πως ο σταθμός βάσης υπολειτουργεί με μειωμένη υπολογιστική δύναμη και δεν επιτρέπει τις παραδοσιακές συνδέσεις, οι αποδεκτοί τρόποι διαχείρισης ενέργειας, είναι οι τρεις πρώτοι τρόποι. Αποσαφηνίζεται ότι η ιδέα για το δεύτερο σενάριο, όπως έχει επεξηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα, στηρίχθηκε στο άρθρο [5].

Ο τρόπος σχηματισμού κυψέλης, είναι ισοδύναμος με την μέθοδο του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης. Καλείται το αρχείο *cell\_lay.m* με ακτίνα δίσκου,  $R$ , στα 200m, με το κεντρικό σημείο της κυψέλης να διαφαίνεται κενό. Χρησιμοποιείται ελαφρώς μικρότερη ακτίνα, διότι η μέγιστη απόσταση για επιτυχημένες D2D συνδέσεις στην mmW συχνότητα δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 200m. Ο σταθμός βάσης του συστήματος υπολειτουργεί, δεν μπορεί να πραγματοποιήσει ζεύξεις με τους CUE χρήστες της κυψέλης, για αυτό και δεν τοποθετείται στο κέντρο της. Ωστόσο, υπάρχουν υπηρεσίες που προσφέρει ακόμα και σε μερικώς λειτουργική κατάσταση. Οι συσκευές που συναντώνται στο δίκτυο συγκροτούνται από D2D Rxs, D2D TxS και συσκευές παρεμβολών που μπορεί να μην είναι απαραίτητως CUEs. Όταν ξεκινάει η εκτέλεση του προγράμματος παράγονται 30 ζευγάρια D2D συσκευών και 20 σημεία παρεμβολών. Όπως έχει ειπωθεί, επικρατεί η παραδοχή πως τα σημεία που δημιουργούνται δε συνδέονται μεταξύ τους αμέσως. Οι συντεταγμένες των σημείων κατοχυρώνονται από την *user\_distribution* συνάρτηση, μέσω της ομοιόμορφης κατανομής.

Επιπροσθέτως, ακολουθείται η παραδοχή πως κανένα σημείο δεν επικαλύπτεται από έτερο του.

Με τον ισχυρισμό της έκτακτης καταστροφής, δημιουργούνται κατά το μήκος της κυψέλης συντρίμμια/εμπόδια σε τυχαία σημεία, σύμφωνα με την PPP κατανομή, δοσμένης περιοχής δράσης. Κατά μέσο όρο στις εκτελέσεις του προγράμματος, προκύπτουν 35 εμπόδια, τετραγωνικού σχήματος. Διευκρινίζεται πως επιλέγεται το τετραγωνικό σχήμα σαν αναπαράσταση των εμποδίων, εξαιτίας των συγκρίσεων που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν και της απλότητας που το συνοδεύει. Οι συσχετισμοί των συντεταγμένων των τεσσάρων γωνιών, σε σχέση με τις συντεταγμένες των καθολικών χρηστών του δικτύου, είναι σημαντικά ευκολότεροι. Απορρίπτονται τα κτήρια που έστω μία γωνία του εμποδίου, ξεπερνά την αξία της ακτίνας της κυψέλης. Το Σχήμα 4 απεικονίζει το ολικό σχέδιο της κυψέλης με το που έχουν δημιουργηθεί όλα τα στοιχεία στο εσωτερικό της. Για την δημιουργία του σχεδίου της κυψέλης αξιοποιείται το αρχείο *plot\_cell.m* (διατίθεται και η δυνατότητα να δημιουργηθεί η κυψέλη σε εξάγωνο σχήμα).



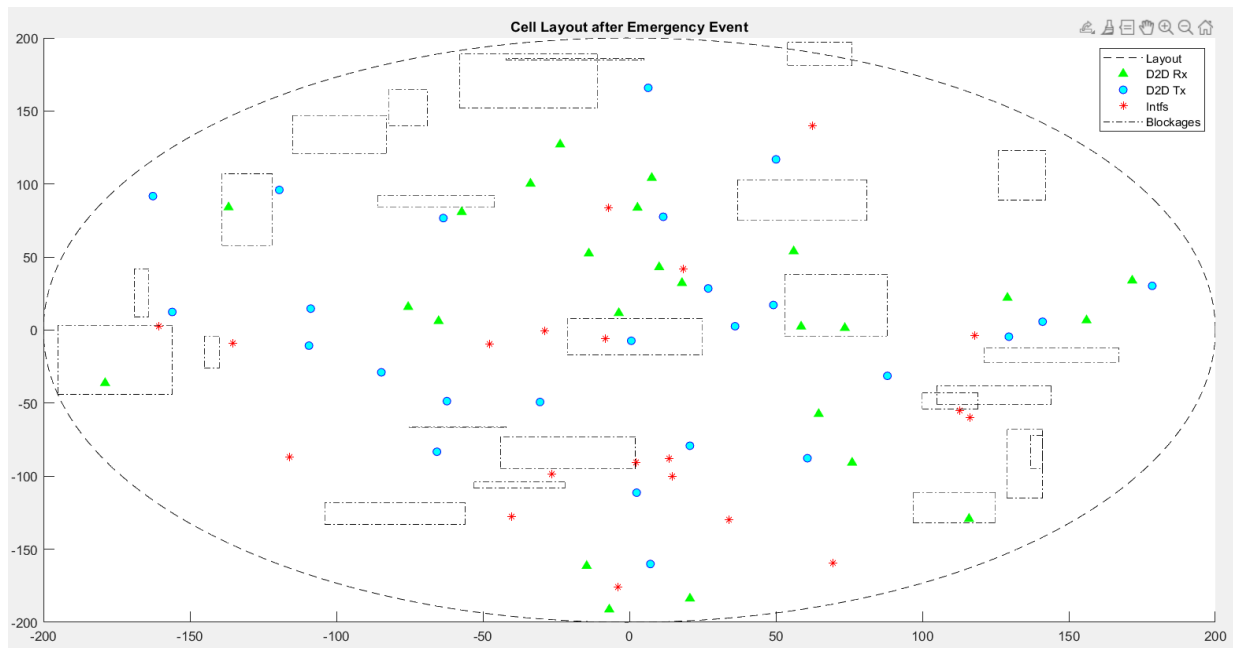
Σχήμα 4: Ολοκληρωμένο αρχικό σχέδιο της κυψέλης δεύτερου σεναρίου. Τα τρίγωνα συμβολίζουν τους D2D δέκτες, οι κύκλοι τους D2D πομπούς και με αστεράκια συμβολίζονται οι συσκευές που παρεμβάλλουν στις D2D συνδέσεις.

### 3.3.2.1 Υπολογισμός Αποστάσεων

Είναι επιθυμητό οι D2D συνδέσεις να ολοκληρώνονται σε κοντινές αποστάσεις. Η μπάνα συχνοτήτων που ενεργοποιείται στο σενάριο, καθορίζει την μέγιστη απόσταση επιτρεπτών καναλιών. Το ταβάνι των 200m δεν δύναται να ξεπεραστεί για τις απευθείας συνδέσεις δύο συσκευών. Από την άλλη τα σήματα των παρεμβολών δεν υπόκεινται σε τέτοιους περιορισμούς και θεωρείται ότι επηρεάζουν τους δέκτες ακόμα και από μακρινές αποστάσεις. Ακολουθείται ο ισχυρισμός ότι οι συσκευές παρεμβολής λειτουργούν στην μW μπάνα συχνοτήτων, αφού αναζητούν από άκρη σε άκρη ανταπόκριση. Δηλώνεται πως η παρεμβολή κυμάτων συμβαίνει κάθε φορά που αλληλεπιδρούν δύο κύματα οποιασδήποτε συχνότητας, ίδιας ή όμοιας ή εντελώς διαφορετικής σύμφωνα με την πηγή [75].

Για την εξακρίβωση των κοντινότερων ζευγαριών (D2D Rx - D2D Tx) χρησιμοποιείται το αρχείο *dist.m* με την ίδια διαδικασία όπως περιγράφηκε για το πρώτο σενάριο. Το μέγιστο πλήθος D2D συσκευών ανέρχεται στις συνολικά 50 (25 δέκτες και 25 πομπούς). Το Σχήμα 5 παρουσιάζει την κυψέλη αμέσως μετά την ολοκλήρωση του *dist.m* αρχείου, όπου το νέο σύνολο των των D2D συσκευών, εμφανίζεται μειωμένο, σε συνάρτηση με το Σχήμα 4. Διότι το αρχικό πλήθος των D2D συσκευών που διακρίνεται ως  $N = 30$ , σε πρώτη φάση μεταρρυθμίζεται σε  $N'$  και ισχύει η σχέση  $N' < N$ .

Για τις συντεταγμένες των σημείων που παραμένουν στην λειτουργική υπηρεσία του δικτύου, δημιουργήθηκαν τρεις πολυδιάστατοι πίνακες, *d2d\_rx\_full*, *d2d\_tx\_full*, *intfs\_full*. Οι τρεις πίνακες συμπληρώνονται με τα εναπομείναντα λειτουργικά σημεία της κυψέλης.



Σχήμα 5: Κυψέλη ακριβώς μετά την αντιστοίχιση των κοντινότερων D2D ζευγαριών με την συνάρτηση *dist*.

Στην Σχήμα 5 φαίνεται καθαρά, ότι πολλαπλά σημεία και από τις τρεις κατηγορίες χρηστών βρίσκονται στο εσωτερικό των εμποδίων. Το θεωρητικό πλαίσιο αναφορικά με την mmW ζώνη συχνοτήτων, δηλώνει την αδυναμία των σημάτων να διαπερνούν εμπόδια. Οι υψηλές συχνότητες μικραίνουν το μήκος κύματος των σημάτων με αποτέλεσμα, τα σήματα να είναι ευάλωτα σε φαινόμενα αντανάκλασης. Στην περίπτωση τοίχων και άλλων υλικών που δεν παρουσιάζουν ανοίγματα αρκετά μεγάλα για να διεισδύσει το μήκος κύματος, το σήμα δεν μπορεί να διαπεράσει το υλικό. Επομένως, οι συσκευές που είναι εντός των εμποδίων δεν διαθέτουν τρόπο επικοινωνίας και απορρίπτονται από την προσομοίωση. Το ζήτημα που ξεπροβάλλει, σχετίζεται με την τυχαιότητα των αποτελεσμάτων. Τα σημεία για τους δέκτες παραμένουν σταθερά κατά την διάρκεια μιας εποχής, το ίδιο και τα εμπόδια. Σε κάθε επανάληψη μεταβάλλονται οι τοποθεσίες των πομπών και των CUE χρηστών που παρεμβάλλουν.

Ο αλγόριθμος σε αυτό το σημείο επεξεργάζεται τις συντεταγμένες των σημείων ως εξής: Όλοι οι D2D Rx και D2D Tx χρήστες του συστήματος, πρέπει να είναι εκτός της περιοχής που καταναλώνεται από τα τα τυχαία εμπόδια. Εισέρχεται στο προσκήνιο, η συνάρτηση *findoutdooruser*. Η μέθοδος ικανοποιεί δύο βασικές λειτουργίες σχετικά με την



κατάσταση του χρήστη. Αρχικά, ελέγχει τις συντεταγμένες του χρήστη και αν αυτές ανήκουν στο τετραγωνικό πλαίσιο.

- Οι τρεις από τις τέσσερις γωνίες του εμποδίου είναι τα σημεία αναφοράς για τους χρήστες. Η θέση στον άξονα των  $x$  του χρήστη αντιπροσωπεύεται στην θέση στον άξονα των  $x$ , της πρώτης γωνίας του εμποδίου (κάτω αριστερά). Στην περίπτωση που η τιμή είναι μεγαλύτερη για τον χρήστη, ελέγχεται αν ο χρήστης ξεπερνάει την οριζόντια θέση του εμποδίου, με την βοήθεια της δεύτερης γωνίας (κάτω δεξιά). Αν η συντεταγμένη  $x$  για τον χρήστη είναι μικρότερη από τη δεύτερη γωνία, τότε η οριζόντια τοποθεσία του χρήστη εμφανίζεται στο εσωτερικό των δύο γωνιών.
- Έπειτα είναι εγγενές να βρεθεί η κατακόρυφη διεύθυνση του χρήστη σε συνάρτηση με τις κατακόρυφες τιμές της μιας πλευράς του εμποδίου. Άρα η συντεταγμένη  $y$  του χρήστη συγκρίνεται άμεσα με την συντεταγμένη  $y$  της πρώτης γωνίας. Αν ο χρήστης είναι πάνω από την γωνία, επαληθεύεται αν ανήκει στα κατακόρυφα όρια του εμποδίου. Η τρίτη γωνία (πάνω αριστερά) είναι η ανώτερη σταθερά, όπου αν η  $y$  θέση του χρήστη είναι μικρότερη από την αντίστοιχη, δικής της τότε ο χρήστης εντοπίζεται οριστικά μέσα στο εμπόδιο.
- Αν εξ' αρχής η τιμή της  $x$  συντεταγμένης του χρήστη είναι μικρότερη από την τιμή της πρώτης γωνίας, παρεπόμενο είναι να υπάγεται εκτός του εμποδίου. Αντίστοιχα αν οι συντεταγμένες του είναι μεγαλύτερες από τα ανώτατα όρια των πλευρών του εμποδίου, για ακόμη μία φορά θα βρίσκεται εκτός, της περιοχής απόρριψης. Η διαδικασία ανάγεται για όλες τις συσκευές και για όλα τα εμπόδια.

Η δεύτερη δυνατότητα που προσδίδεται από την συνάρτηση *findoutdooruser*, κρίνει τότε, ο υποθετικός δίαυλος επικοινωνίας, αρμόζει σε LOS ή NLOS επικοινωνίες, δηλαδή τότε η οπτική επαφή δύο σημείων διακόπτεται από εμπόδιο. Η κατηγοριοποίηση κατορθώνεται με το αρχείο *Intersect1.m*. Το αρχείο δέχεται για είσοδο, τις συντεταγμένες του  $k$ -ου D2D Rx και του D2D Tx, καθώς και δύο από τις γωνίες κάθε εμποδίου και επιστρέφει αν ο δίαυλος για τα σημεία  $k$ , χάνει το χαρακτηριστικό της οπτικής επαφής και μπλοκάρεται από εμπόδιο. Αναλυτικότερα και σύμφωνα με το άρθρο [5], το αρχείο *Intersect1.m*, για να εκτελεστεί, χρειάζεται τις συντεταγμένες για τις D2D συσκευές που λαμβάνονται υπόψη και τις θέσεις των γωνιών που σχηματίζουν μια πλευρά του εμποδίου. Τα άκρα του διαύλου και τα άκρα της πλευράς του εμποδίου συγκεντρώνονται σε αντίστοιχες μεταβλητές. Ύστερα, ξεκινάει η διεξοδική επιθεώρηση για την αναζήτηση της σχέσης των μεταβλητών.

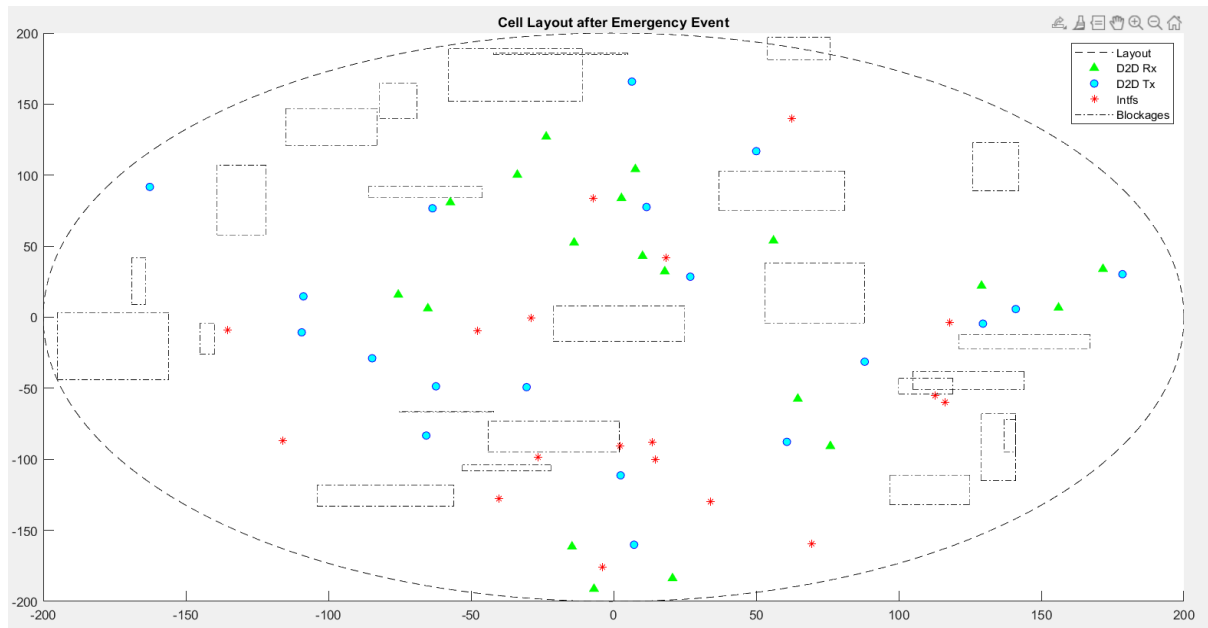
1. Η πρώτη περίπτωση εξετάζει αν οι συντεταγμένες των συσκευών για τον οριζόντιο άξονα, είναι ίσες την ώρα που η ίδια συνθήκη επαληθεύεται για τα άκρα της πλευράς του εμποδίου. Με απλά λόγια αν η υποθετική ευθεία που ενώνει τα σημεία είναι κατακόρυφη. Όταν η συνθήκη είναι αληθής, αναζητείται τότε τα ύψη κάθε γωνίας της πλευράς, τοποθετούνται ανάμεσα στα ύψη των άκρων του διαύλου.
2. Ο δεύτερος έλεγχος χρησιμοποιείται όταν οι οριζόντιες τιμές των δύο γωνιών του εμποδίου δεν είναι ίσες. Η ισχύς της συνθήκης, απορρέεται την δημιουργία της παραμέτρου  $y\_intersect$ , που είναι ο συνδυασμός της κλίσης της ευθείας που ενώνει τα σημεία της πλευράς, επί την απόσταση των οριζόντιων θέσεων της πλευράς με του συνδέσμου, συν το ύψος της μιας γωνίας (προσέγγιση για τα σημεία τομής). Η  $y\_intersect$  περιέχει δύο τιμές οι οποίες συσχετίζονται με τις τιμές του υποθετικού διαύλου, όπως και πριν.
3. Ο τρίτος έλεγχος παρομοιάζεται με τον δεύτερο, ωστόσο με την βασική συνθήκη να είναι ίσα τα άκρα της πλευράς για τον οριζόντιο άξονα, με τα

άκρα του διαύλου να είναι διαφορετικά. Η εξαγωγή του αποτελέσματος είναι όμοια με τον δεύτερο έλεγχο.

4. Όταν τα άκρα του διαύλου ή της πλευράς δεν είναι ισόποσα μεταξύ τους, τότε επιστρατεύεται αυτούσια η κλίση των ευθειών των δύο στοιχείων. Αν οι κλίσεις τους είναι ισάξιες, τότε ελέγχονται όλα τα άκρα μεταξύ τους, σύμφωνα με τον άξονα που αντιπροσωπεύουν. Εφόσον οι κλίσεις δεν ταυτίζονται υπολογίζονται οι μεταβλητές  $y\_intersect1$ ,  $y\_intersect2$ , οι οποίες προσθέτουν την απόσταση των  $y$  θέσεων συσκευής και γωνίας με τις κλίσεις πολλαπλασιαζόμενες από την  $x$  συντεταγμένη των ίδιων σημείων. Το σύνολο αυτό διαιρείται από την διαφορά των κλίσεων, με την νέα τιμή να συνδυάζεται με τις συντεταγμένες της μίας συσκευής, για το  $y\_intersect1$ , και με την μία γωνία για το  $y\_intersect2$ . Με βάση αυτές εκτελούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Η συνάρτηση επιστρέφει την μονάδα όταν τα σημεία δεν έχουν άμεση οπτική επαφή και μηδέν όταν δεν εντοπίστηκε εμπόδιο ανάμεσά τους. Εκτελείται για τις δύο συσκευές σε σχέση με όλες τις γωνίες και όλες τις πλευρές που αυτές σχηματίζουν. Οι συναρτήσεις *findoutdooruser* και *Intersect1* προέρχονται από τον κώδικα του άρθρου [5]. Αφού ολοκληρωθούν, όσα σημεία εντοπίστηκαν στο εσωτερικό εμποδίων, αποσύρονται και παράλληλα οι δίαυλοι, πρώτα για τις D2D συσκευές κατηγοριοποιούνται σε LOS/NLOS. Όλη η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται και για τα CUE σημεία και για τα μη επιθυμητά σήματα που εκπέμπουν. Οι δίαυλοι μεταξύ των CUE και των D2D Rx θα χαρακτηριστούν με βάση την οπτική επαφή των άκρων και οι CUE που είναι στο εσωτερικό των εμποδίων δεν συμπεριλαμβάνονται στην υπόλοιπη εκτέλεση του προγράμματος. Ξεκαθαρίζεται το γεγονός, ότι δεν είναι απαραίτητο και τα δύο σημεία ενός διαύλου να εγκλωβίζονται για την κατάργησή του. Αντιθέτως, αρκεί μονάχα το ένα από τα δύο να εντοπίζεται στο εσωτερικό εμποδίων, προκειμένου να αποσυρθούν και τα δύο σημεία που έχουν αντιστοιχιστεί. Είναι η χειρότερη πιθανότητα απόρριψης των συσκευών της κυψέλης. Η τελική κυψέλη διαφαίνεται στο Σχήμα 6, στο οποίο έχουν αφαιρεθεί τα σημεία που εντοπίστηκαν μέσα στις ζώνες εμποδίων, σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη απεικόνιση στο Σχήμα 5.

Τονίζεται πως τα σημεία που μοιάζουν να εφάπτονται στα εμπόδια, στην πραγματικότητα δεν ακουμπούν καθόλου. Επίσης, το γεγονός ότι ένα εμπόδιο εμπεριέχει πιθανόν κομμάτι άλλου εμποδίου, δεν επηρεάζει την έκβαση του προγράμματος. Παρατηρείται, σύμφωνα με το Σχήμα 6 ότι το καινούργιο πλήθος των D2D συσκευών θα είναι μικρότερο ή ίσο με το  $N'$ . Αν θεωρήσουμε το οριστικό σύνολο  $\Omega$ , θα ισχύει η σχέση  $\Omega \leq N'$ . Ομοίως για τις CUE συσκευές όπου  $M' \leq M$ , με  $M'$  να είναι το τελικό σύνολο. Αν το πλήθος  $\Omega$ , είναι μικρότερο από την ελάχιστη σταθερά, με τιμή 10, το πρόγραμμα θα προσπεράσει την επανάληψη, με σκοπό να είναι περισσότερο ισορροπημένα τα αποτελέσματα. Τα εναπομείναντα, τελικά σημεία εφοδιάζουν τους πολυδιάστατους πίνακες *d2d\_rx\_full*, *d2d\_tx\_full*, *intfs\_full*, με τις συντεταγμένες τους. Ο *d2d\_rx\_full*, δεν χρειάζεται περαιτέρω δεδομένα. Ο *d2d\_tx\_full*, αντιθέτως στις κατάλληλες θέσεις αντιστοιχίζει την απόσταση, του κάθε D2D συνδέσμου και σημειώνει την κατάσταση αυτού (LOS/NLOS). Όσον αφορά τον πίνακα *intfs\_full*, καταχωρίζονται μόνο οι αποστάσεις των CUE με τους D2D Rxs. Οι αποστάσεις υπολογίζονται από την συνάρτηση του αρχείου *distance.m* με την εκμετάλλευση της ευκλείδειας απόστασης.



Σχήμα 6: Τελική μορφή της κυψέλης δεύτερου σεναρίου για μία επανάληψη, μετά την διαγραφή των σημείων που εντοπίζονται εντός εμποδίων.

### 3.3.2.2 Path Loss & Channel Gain

Οι καταγεγραμμένες αποστάσεις επιτρέπουν στον αλγόριθμο να υπολογίσει την απώλεια διαδρομής για τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας. Σε αυτό το σενάριο, η χρήση του γενικού τύπου για απώλειες στον ελεύθερο χώρο, δεν συνάδει με το περιβάλλον του συστήματος. Με την ύπαρξη εμποδίων και τον διαχωρισμό των διαύλων στις γνωστές LOS/NLOS κατηγορίες, η εξίσωση που θα βρίσκει την απώλεια μονοπατιού ορίζεται να είναι η (13). Αποδομώντας κανείς την εξίσωση, καταλήγει με τις παρακάτω παραμέτρους:

1. Η παράμετρος  $\delta$  (*floating intercept*), για μεταδόσεις LOS τύπου, συχνά κυμαίνεται περίπου στα 60 dB [58]. Στις NLOS συνδέσεις η τιμή αυξάνεται και σύμφωνα με τα άρθρα [36,44] αποκτά μία μέση τιμή, περίπου στα 74 dB. Στο άρθρο χρησιμοποιείται το μέσο των τιμών  $\delta = 72dB$  [36] και  $\delta = 75.85dB$  [44].
2. Η κλίση  $\beta$  των σημάτων συνήθως δέχεται τιμές που υπάρχουν στο πεδίο ορισμών  $\{1,6\}$ , με μικρές αποκλίσεις ανάλογα στο περιβάλλον. Σε LOS συνδέσεις, η  $\beta$  ισούται με την ελάχιστη PLE τιμή για ελεύθερο χώρο,  $\beta = 2$ . Σε NLOS διαύλους, η  $\beta$  υπολογίζεται ως το μέσο των τιμών των άρθρων [36,44] στα οποία  $\beta = 2.92$  και  $\beta = 3.73$  αντίστοιχα.
3. Ο  $\sigma$ , παράγοντας της λογαριθμικής διακύμανσης σκίασης, εμφανίζεται γενικότερα με την τιμή (όταν οι δίαυλοι είναι LOS)  $\sigma \approx 5.9 dB$  [36], ενώ για περιπτώσεις NLOS καναλιών επικοινωνίας, τα άρθρα [36,44] προτείνουν τις τιμές  $\sigma = 8.7$  και  $\sigma = 8.36$ , αντίστοιχα. Για ακόμη μία φορά χρησιμοποιείται το μέσο των τιμών αυτών.

Οι τιμές αυτές είναι εξαιρετικά συνδεδεμένες με τις αποστάσεις των σημείων, συχνά με το ύψος στο οποίο βρίσκονται οι κεραιές και με το περιβάλλον διάδοσης. Για παράδειγμα στο άρθρο [58], εξετάζει τις παραμέτρους σε αποστάσεις, όπου η ακτίνα της κυψέλης  $R \in \{10m, \dots, 10000m\}$ , με τις κεραιές να υψώνονται στα 2m και φυσικά να χρησιμοποιούνται οι συχνότητες της mmW μπάντας, σε αστικό περιβάλλον.

Έχοντας κατηγοριοποιήσει όλους τους διαύλους του συστήματος, υπολογίζεται αναλόγως η απώλεια διαδρομής που αποτυπώνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Το επόμενο βήμα όπως και στο πρώτο σενάριο είναι η εκτίμηση του κέρδους των καναλιών που υλοποιούνται. Αξιοποιώντας το *channel\_coefficient.m*, αρχείο, προκύπτει το κέρδος για όλους τους διαύλους.

### 3.3.2.3 Antenna Gain

Το κέρδος της κεραίας αποτελεί θεμελιώδη προσθήκη για τον τελικό τύπο της SINR μετρικής και μια σημαντική διαφοροποίηση των δύο συστημάτων. Το μέγιστο κέρδος της κεραίας, υποστηρίζεται όταν ο πομπός εκπέμπει το επιθυμητό σήμα από την κατεύθυνση υψηλότερης ισχύος (mainlobe) και ο δέκτης, παραλαμβάνει το σήμα από την δική του mainlobe περιοχή που έχει κατεύθυνση προς τον πομπό. Τότε το άμεσο κέρδος της κεραίας όπως συζητήθηκε σε προηγούμενη υποενότητα, θα ισούται με  $Ge = GmGm$ . Στην προσομοίωση θεωρείται ότι το κέρδος της κεραίας στην mainlobe περιοχή, για τις D2D συσκευές ισούται με 10dBi σύμφωνα με το άρθρο [5] (λίγο πάνω από την μέση τιμή κέρδους κεραίας για 5G σήματα) και πως σε για κάθε ζευγάρι επικοινωνίας οι κεραίες λειτουργούν με κατεύθυνση προς την έτερη συσκευή. Συνεπώς, το άμεσο κέρδος των κεραίων για όλους τους D2D διαύλους, θα είναι  $Ge = GmGm = 10 \cdot 10 = 100dBi$ .

Το ερώτημα που αναφύεται σχετίζεται με το άμεσο κέρδος της κεραίας από τις παρεμβολές των CUE χρηστών, προς τους D2D δέκτες. Σε αυτήν την κατάσταση το άρθρο [5], αποδέχεται πως οι CUE εκπέμπουν σε τυχαίες κατευθύνσεις, δεδομένο που ταιριάζει στο σκεπτικό ότι δεν υπάρχει σταθμός βάσης, ώστε να τις εξυπηρετήσει. Η τυχαιότητα της κατεύθυνσης αναγράφεται με την *phi\_intf*, μεταβλητή και χρησιμοποιείται στο αρχείο *ant\_gain.m*, εμπνευσμένο από το ίδιο άρθρο. Η συνάρτηση στοχεύει στην αποκόμιση του συνολικού άμεσου κέρδους του *k-ou* D2D Rx από τις παρεμβολές. Αναλυτικότερα το αρχείο χρησιμοποιεί τις συντεταγμένες του δέκτη και του CUE ώστε να εντοπίσει την υποθετική ιδανική κατεύθυνση μετάδοσης. Ορίζονται οι τιμές για το mainlobe κέρδος  $Gm = 10dBi$ , για το sidelobe κέρδος  $Gs = 0.1dBi$  και το πλάτος δέσμης για την mainlobe περιοχή,  $hpBW = 30^\circ$ .

Η συνάρτηση αρχίζει, προσπαθώντας να εντοπίσει την σχετική θέση της CUE συσκευής με την έτερη D2D Rx. Για παράδειγμα, ελέγχεται αν οι συντεταγμένες του CUE τοποθετούνται πάνω από τον δέκτη. Επιπροσθέτως, αφού προσδιοριστεί η σχετική θέση των σημείων, υπολογίζονται τα *intercept points* υπό την κλίση  $slope = \tan(\frac{phi_{intf} + hpBW}{2})$ , για την ευθεία  $y = 0$  και για την γραμμή  $x = 0$ . Τα *intercept points*, συγκρίνονται με τις συντεταγμένες του εν λόγω D2D δέκτη. Ανάλογα με την έκβαση της σύγκρισης καθορίζεται το άμεσο κέρδος, σύμφωνα με την σχέση (23). Η ολοκλήρωση της συνάρτησης επιστρέφει στο κεντρικό πρόγραμμα, πολυδιάστατο πίνακα με όλα τα άμεσα κέρδη κεραίας που λαμβάνει ο D2D δέκτης από τις παρεμβολές.

### 3.3.2.4 Κατανομή Ενέργειας

Η δυνατότητα κατανομής των ενεργειακών πόρων σύμφωνα με τον καλύτερο δυνατό ρυθμό ροής, μέσα από τον συνδυασμό των παραδοσιακών και των D2D διαύλων, αποφαίνεται κοστοβόρα διαδικασία για τον σταθμό βάσης. Διότι, εκτιμά τον ρυθμό ροής για πιθανές ενεργειακές στάθμες, για όλους τους πομπούς και για όλους τους χρήστες

παραδοσιακών επικοινωνιών, συσχετίζοντας παράλληλα και όλα τα πιθανά ζευγάρια για το βέλτιστο throughput. Πιστεύεται ότι, σε ένα σύστημα με μερικώς λειτουργική υποδομή, διεργασίες αυτού του βελτινικού δεν μπορούν να υλοποιηθούν. Όμως, η διαχείριση των πόρων στηριζόμενη στην απώλεια διαδρομής κάθε διαύλου, δεν υποχρεώνει τον σταθμό βάσης σε δυσβάσταχτους υπολογισμούς. Αντιθέτως, επειδή οι συσκευές έχουν γνωστοποιήσει την παρουσία τους και έχουν κατασκευάσει τα κοντινότερα πιθανά ζεύγη, ο σταθμός βάσης εφαρμόζοντας τους κατάλληλους τύπους και τις υπολογισμένες αποστάσεις, είναι σε θέση με απλές μεθόδους να ανιχνεύσει την απώλεια για κάθε σύνδεσμο. Ύστερα, αθροίζει όλες τις τιμές για να παράξει την συνολική απώλεια, με στόχο να διαμοιράσει την συνολική ισχύ. Ο δεύτερος τρόπος εμφανίζεται ακόμα πιο απλοϊκός. Η μόνη διεργασία που καλείται να φέρει εις πέρας ο σταθμός είναι να υπολογίσει τις τυχαίες  $a_k$  τιμές όταν  $k \in \{1, \dots, \Omega\}$  (για τους D2D πομπούς) και έπειτα να κατανέμει αντιστοίχως την ενέργεια. Οι συγκεκριμένοι τρόποι κατανομής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά σε συστήματα με έστω και μερικώς λειτουργική δικτυακή υποδομή. Αντιθέτως ο πρώτος τρόπος δεν στηρίζεται ολοκληρωτικά στον σταθμό βάσης και υλοποιείται με επαρκή αποτελέσματα, σε κατανεμημένα δίκτυα. Το μειονέκτημα των κατανεμημένων τρόπων, σχετίζεται με τις αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις που βαραίνουν τις συσκευές, με το υψηλό ενεργειακό κόστος που καταναλώνει για να ανταπεξέλθει και με τον συγχρονισμό με τις υπόλοιπες συσκευές. Η πολυπλοκότητα ενός συστήματος με κατανεμημένη αρχιτεκτονική, αναδεικνύεται σημαντικά μεγαλύτερη από ότι σε συγκεντρωτικά δίκτυα. Οι παραπάνω τρόποι κατανομής εφαρμόζονται πρωτίστως για τους D2D πομπούς και σε δεύτερο χρόνο, για του χρήστες κινητής τηλεφωνίας.

Συνεπώς, ο σταθμός βάσης είναι αποδεκτό ότι υπολειπεται και αδυνατεί να πραγματοποιήσει συνδέσεις με CUE χρήστες, καθώς και να εκτελέσει δυσμενείς υπολογιστικές διεργασίες. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να είναι υπεύθυνος για την κατανομή της συνολικής ενέργειας που παρέχει το σύστημα, στους κατάλληλους χρήστες, ενώ βοηθάει στον εντοπισμό των γειτονικών συσκευών και στον σχηματισμό των κοντινότερων διαύλων. Οι τρόποι διαμοιρασμού ισχύος που, τελικά, αξιοποιούνται, αναγνωρίζονται με τους τύπους (15),(16),(17) και συμβαίνουν με την επεξεργασία που προσφέρει ο σταθμός βάσης. Ο τρόπος εκτέλεσής τους είναι αναλλοίωτος, σε συνάρτηση με το πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Οι κύριες τιμές ισχύος  $P_{tot}$ ,  $P_c$ ,  $\min_{d2d}$ ,  $\max_{d2d}$  παραμένουν ίδιες. Ωστόσο, με την αιτιολογία ότι ο σταθμός βάσης δεν μπορεί να ελέγχει όλες τις συνδέσεις, δεν πραγματοποιείται έλεγχος για τις στάθμες ισχύος κάθε συσκευής, προκειμένου να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων.

### 3.3.2.5 Υπολογισμός SINR και χωρητικότητας

Ο υπολογισμός της μετρικής SINR πραγματοποιείται στο αρχείο *thr\_mnw.m*. Η συνάρτηση δέχεται ως παραμέτρους, τις ενέργειες για τους D2D πομπούς, τις ενέργειες για τις συσκευές που προκαλούν παρεμβολές, την απώλεια διαδρομής για τους D2D συνδέσμους, την απώλεια διαδρομής των μη επιθυμητών σημάτων, το άμεσο κέρδος που λαμβάνει ο δέκτης από τις δύο πηγές σημάτων, τον θόρυβο και τέλος το εύρος ζώνης. Οι ενεργειακές στάθμες αποδίδονται από τους τρόπους κατανομής σύμφωνα με τις προκαθορισμένες τιμές. Η απώλεια μονοπατιού και το άμεσο κέρδος υπολογίζονται με τη μεθοδολογία που προαναφέρθηκε σε προηγούμενη υποενότητα. Ο θόρυβος εξάγεται από την εξίσωση (18) με εύρος ζώνης  $BW = 0.8GHz$  και ισούται με  $N_0 = -166.2314dBm$ . Η συνάρτηση παράγει δύο πίνακες *signal* και *Int* οι οποίοι ορίζονται ως:

- Ο *signal* κατοχυρώνει τις τιμές του εκπεμπόμενου σήματος που δέχεται κάθε D2D δέκτης. Υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:
  - $signal = P_{Tx_k} h_{Rx_k, Tx_k} Ge_{D2D_k} Pl_{D2D_k}(d_{D2D_k}), \forall k \in \{1, \dots, \Omega\}.$

Η εξίσωση, φανερώς, επιστρέφει το σήμα που καταφθάνει στον δέκτη, για κάθε δέκτη.

- Ο *Int* πίνακας συγκεντρώνει όλες τις παρεμβολές που δέχεται ένας D2D δέκτης, με βάση την εξίσωση (21). Ο πίνακας θα εμπεριέχει με το τέλος της εκτέλεσης, την συνολική παρεμβολή που αντιμετωπίζει κάθε D2D δέκτης σε κάθε επανάληψη.

Ο τελικός υπολογισμός για την μετρική ορίζεται από τον γενικό τύπο:

$$SINR = \frac{Signal}{Noise + Interference} ,$$

όπου σύμφωνα με τους πίνακες που δημιουργήθηκαν στο αρχείο και τις μεταβλητές της προσομοίωσης, ξαναγράφεται ως εξής:

$$SINR_{Rx_k} = \frac{signal(k)}{No + Int(k)}, \forall k \in \{1, \dots, \Omega\} .$$

Στη συνέχεια η μετρική με τον μέχρι τώρα διαρκώς χρησιμοποιούμενο τύπο (14), μετατρέπεται στην χωρητικότητα του διαύλου και προσμετράται στην συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Η συνάρτηση ολοκληρώνεται επιστρέφοντας στον κεντρικό κώδικα, την συνολική χωρητικότητα κάθε επανάληψης. Από εκεί, η τιμή αποθηκεύεται στον πίνακα *thr\_vector*, για κάθε εποχή. Τα τελικά αποτελέσματα αποτυπώνονται με τον ίδιο τρόπο όπως και για το πρώτο σενάριο της προσομοίωσης.

## Κεφ IV : Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει και εξηγεί εκτενώς τα όλα τα αποτελέσματα που παράγονται όταν εκτελείται το πρόγραμμα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, που επίσης αναφέρονται. Η δομή του κεφαλαίου στηρίζεται στον τύπο των αποτελεσμάτων, σε αντίθεση με τα σενάρια προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα τονίζεται ότι δεν εκτυπώνονται όλα από την εκτέλεση και χρησιμοποιούν διαφορετικά κομμάτια κώδικα για να καταφέρουν να τα αναπαραστήσουν. Τα κυριότερα αρχεία που αποσκοπούν στην αποτύπωση των αποτελεσμάτων είναι τα *Scenarios.m* και *plot\_pl.m*.

Η εκτέλεση του προγράμματος εκκινείται από την ενεργοποίηση του *script* αρχείου, με το όνομα *Scenarios.m* και είναι δυνατόν να λειτουργήσει μόνο στην πλατφόρμα, MATLAB. Η πλατφόρμα χρειάζεται να βρίσκεται στο directory του φακέλου με τα αρχεία. Επίσης ανάλογα με τις επιλογές που αποφασίζει το *script*, δηλαδή ποιά κομμάτια κώδικα θα εκτελεστούν, ρυθμίζονται οι τελικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων. Επομένως, μόλις έχει φορτώσει η πλατφόρμα, τοποθετείται το επιθυμητό directory στο file explorer της πλατφόρμας, ώστε να ταιριάζει με την θέση του φακέλου και ενεργοποιείται το *Scenarios*, είτε από το *command window* της αρχικής οθόνης, είτε μέσα από το ίδιο το αρχείο.

### 4.1 Χωρητικότητα των συστημάτων

Η χωρητικότητα είναι το κυριότερο ίσως χαρακτηριστικό του συστήματος καταδεικνύοντας την απόδοσή του και είναι το θεμελιώδες αποτέλεσμα που εξάγεται από τις προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα το *Throughput* ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός πακέτων που καταφθάνουν επιτυχώς στον χρήστη. Όπως έχει ειπωθεί, η χωρητικότητα στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως *throughput capacity* και μετριέται σε *bits* ανά δευτερόλεπτα. Οι τιμές που παράγονται έχουν ως βάση για τις συγκρίσεις το άρθρο [52] για το συνολικό throughput του συστήματος.

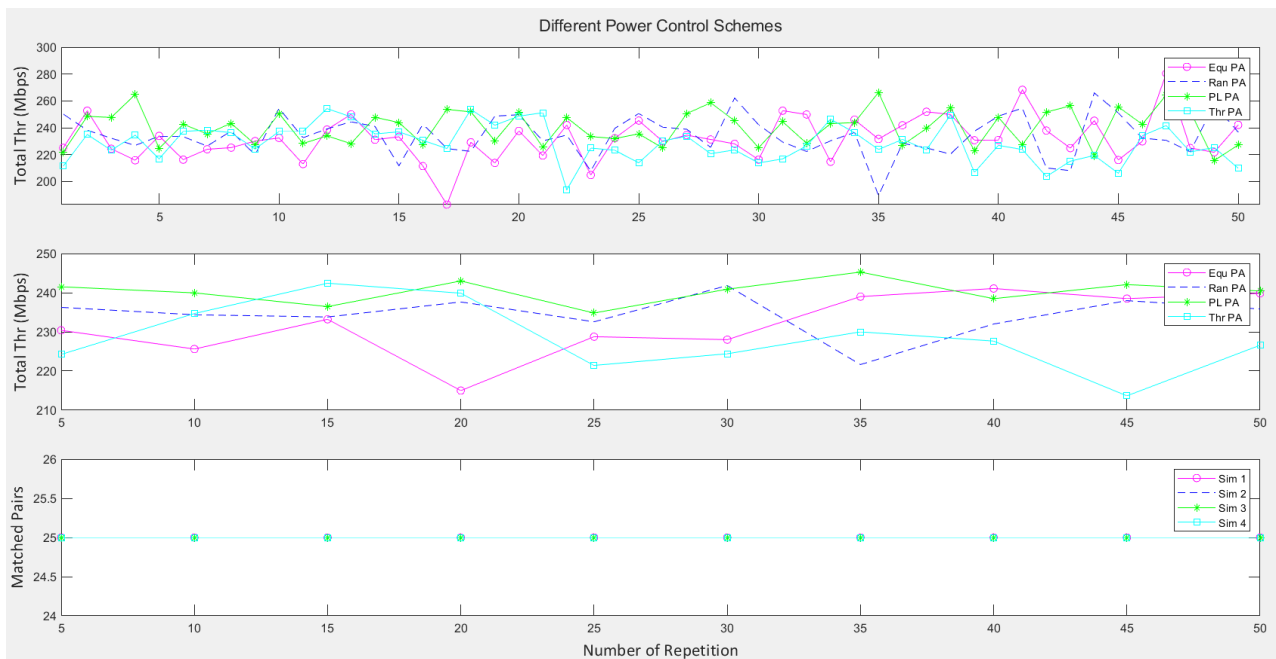
#### 4.1.1 Χωρητικότητα Πρώτου Σεναρίου Προσομοίωσης

Το αποτέλεσμα της χωρητικότητας δίνεται από το αρχείο *throughput* και αποθηκεύεται στον κεντρικό μονοδιάστατο πίνακα *thr\_vector* μεγέθους 50 θέσεων, μία για κάθε εποχή εκτέλεσης της προσομοίωσης. Σε κάθε θέση η χωρητικότητα αθροίζεται για όλες τις επαναλήψεις MC και έπειτα από την τελευταία επανάληψη της τελευταίας εποχής, διαίρεται με το πλήθος των MC, για να βρεθεί ο μέσος όρος.

##### 4.1.1.1 Χωρίς τον αλγόριθμο Gale-Shapley

Η πρώτη εκτέλεση του πρώτου σεναρίου εμφανίζεται στο Σχήμα 7. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις εκτελέσεις είναι το εύρος ζώνης, όπου σε αυτήν την εκτέλεση ισούται με  $BW = 0.1GHz$ , καθώς και ο τελικός τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας. Στην παρούσα επιλογή εκτέλεσης δεν προηγείται η χρήση του αλγόριθμου Gale-Shapley και απλώς υπολογίζεται ο ρυθμός ροής σύμφωνα με τους ανελυμένους τύπους. Το αρχείο που αξιοποιείται για την εκτίμηση της χωρητικότητας είναι το *scrip.m*. Το γράφημα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7, χωρίζεται σε τρεις απεικονίσεις.

Η πρώτη απεικόνιση αναδεικνύει την συνολική χωρητικότητα του συστήματος, κατά την διάρκεια των 50 επαναλήψεων. Η μέτρηση γίνεται για Mbps και τυπικά είναι η μέση τιμή για όλες τις θέσεις του *thr\_vector* πίνακα. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως το πλήθος των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της χωρητικότητας, είναι δυναμικές και μεταβάλλονται ανάμεσα στις επαναλήψεις. Για παράδειγμα, τα D2D Tx σημεία αλλάζουν σε κάθε επανάληψη, άρα αλλοιώνονται οι αποστάσεις, οι απώλειες διαδρομής και το κέρδος των καναλιών, μεταξύ άλλων. Οι διακυμάνσεις που αποτυπώνονται στο διάγραμμα επηρεάζονται από την δυναμική συμπεριφορά των επαναλήψεων. Το πεδίο τιμών που παρατηρείται και κατασκευάζεται μετά από πολυάριθμες εκτελέσεις, διαφαίνεται προσεγγιστικά ως {180 Mbps, 300 Mbps}. Στο ίδιο διάγραμμα, αναδεικνύονται όλοι οι τρόποι κατανομής, με διαφορετικό χρωματισμό και σύμβολο.



Σχήμα 7: Συνολική αποτύπωση των αποτελεσμάτων χωρητικότητας για το πρώτο σενάριο χωρίς της συμβολή του Gale-Shapley μηχανισμού.

Οι μηχανισμοί κατανομής συμβολίζονται στις απεικονίσεις ως:

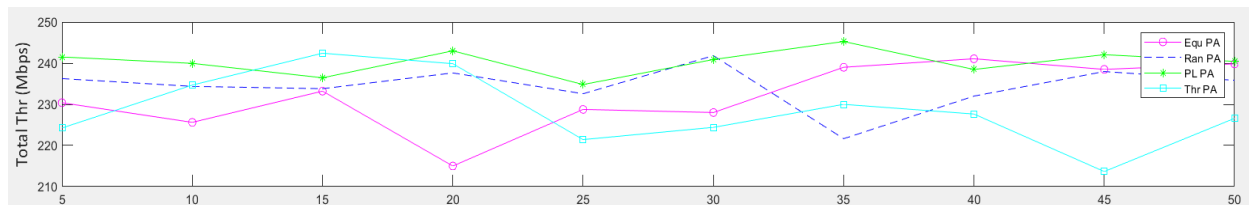
- i) Equ PA (Equal Power Allocation) → Ίσος Καταμερισμός ενέργειας (magenta).
- ii) Ran PA (Random Power Allocation) → Τυχαίος Καταμερισμός ισχύος (blue).
- iii) PL PA (Path Loss based Power Allocation) → Κατανομή με βάση το Path Loss (green).
- iv) Thr PA (Throughput based Power Allocation) → Κατανομή με βάση το ρυθμό ροής (cyan).

Κατά κανόνα ο ίσος καταμερισμός και ο τυχαίος καταμερισμός, είναι οι περισσότεροι ασταθείς τρόποι οι οποίοι δυσκολεύονται να παράγουν υψηλούς ρυθμούς ροών σε αντίξοες συνθήκες (απόδειξη σε επόμενο σενάριο). Στο παρόν σενάριο, συνήθως παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις (διαφορά μέγιστου και ελάχιστου, όπως για τον Equ PA στο Σχήμα 7) και τα παράγωγά τους τοποθετούνται μεταξύ των υπόλοιπων δύο τρόπων. Ο Thr PA τρόπος κατανομής, σε συνθήκες χωρίς τον αλγόριθμο ταιριάσματος παράγει τον πιο σταθερό μέσο ρυθμό ροής σε σύγκριση με τους λοιπούς τρόπους, με ελαφρώς μικρότερες τιμές. Η



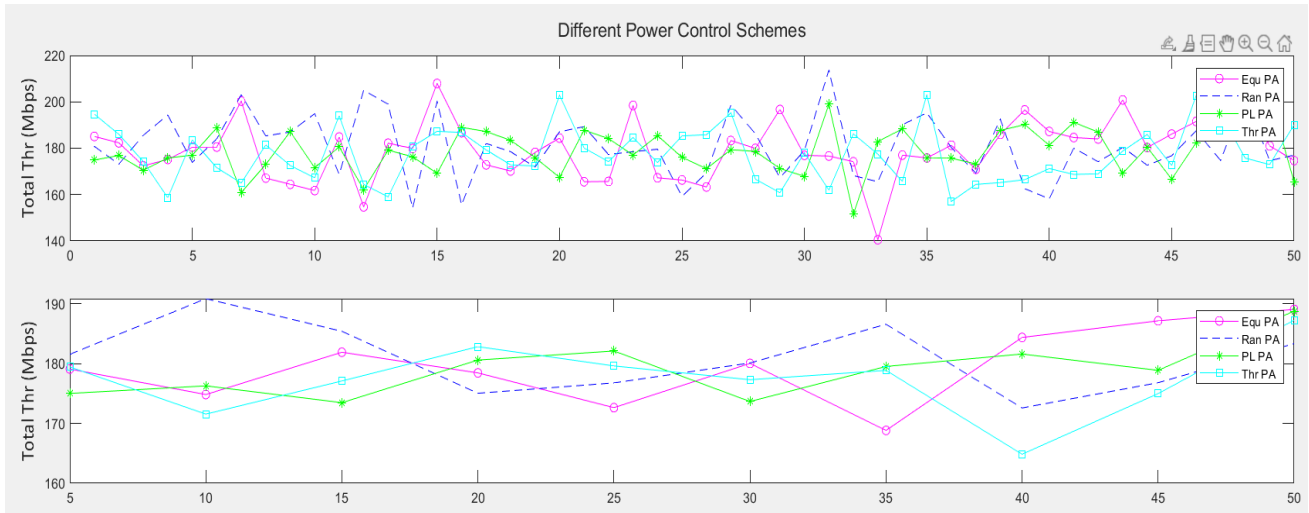
συμπεριφορά του Thr PA δείχνει να παράγει τα περισσότερα ελάχιστα επίπεδα χωρητικότητας, χωρίς όμως να υστερεί στην καθολική απόδοση. Οι ταχύτητες που υποστηρίζονται, είναι αρκετά ενθαρρυντικές, καθώς επαρκούν για να δημιουργηθούν αξιόπιστες επικοινωνίες. Ενδιαφέρονσα είναι η συμπεριφορά της τρίτης κατανομής PL PA, η οποία επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις αποστάσεις των τυχαίων σημείων. Κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, εμφάνιζε συχνά την καλύτερη συνολική χωρητικότητα, όταν οι αποστάσεις ήταν ευνοϊκές, ενώ παράλληλα διατηρεί μια σταθερότητα στην απόδοσή της.

Η δεύτερη απεικόνιση, δέχεται τα αποτελέσματα του *thr\_vector* και τα ομαδοποιεί σε γκρουπ των πέντε επαναλήψεων, έτσι ώστε να ξεκαθαριστούν τα αποτελέσματα. Το Σχήμα 8 είναι το δεύτερο γράφημα της αρχικής απεικόνισης και αποκαλύπτει την ιεραρχία των κατανομών με βάση το ρυθμό ροής. Με πολλές επαναλήψεις των πειραμάτων, ο PL PA συστηματικά χαρίζει με μικρή διαφορά, τον μεγαλύτερο ρυθμό ροής συστήματος. Η τρίτη και τελευταία απεικόνιση του γραφήματος καταγράφει τον μέσο αριθμό επιτυχημένων ζευγαριών κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Όλες οι εκτελέσεις του πρώτου σεναρίου, ανεξαρτήτως του πως υπολογίζεται η χωρητικότητα, υλοποιούν 25 D2D ζεύγη, όσες φορές και αν εκτελέστηκε το πρόγραμμα κατά την διάρκεια των δοκιμών.



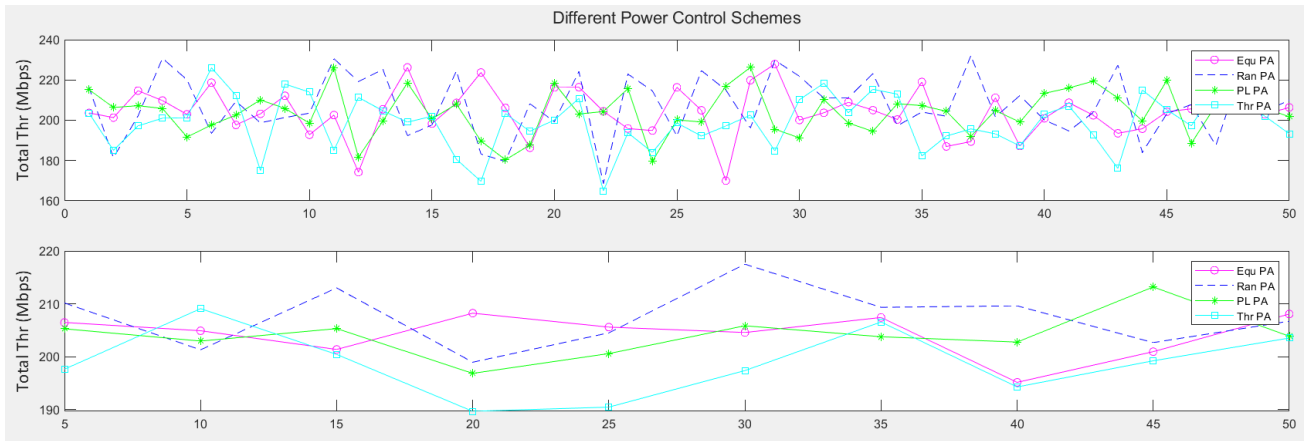
Σχήμα 8: Ομαδοποιημένη χωρητικότητα (δεύτερο διάγραμμα) στην ίδια εκτέλεση με το Σχήμα 7.

Μία σημαντική παρατήρηση είναι η επιρροή των διαφορετικών μεταβλητών στην επίδοση των τρόπων κατανομής. Πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές για τις τιμές του θορύβου, των απωλειών μονοπατιού και για τις ενέργειες κάθε συνόλου συσκευών, ανάμεσα σε άλλες. Για παράδειγμα, η αύξηση του θορύβου από  $N_0 = -187.0259 \text{ dBm}$  σε  $N_0 = -144 \text{ dBm}$ , ρίχνει την συνολική απόδοση κατά περίπου 50Mbps - 70Mbps, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 9 για όλες τις επιλογές κατανομής. Ωστόσο το μεγαλύτερο πλήγμα το αντιμετωπίζει ο PL PA μηχανισμός, διότι ο έντονος θόρυβος πλήττει σοβαρά τις συνδέσεις στις κοντινές αποστάσεις, μιας και για τον αλγόριθμο, όσο πιο μικρή η απόσταση μεταξύ των άκρων του διαύλου, τόσο πιο μικρή η ισχύς που τους αναλογεί. Πιθανώς σε μεγαλύτερες αποστάσεις με μεγαλύτερη ισχύ, να τα πηγαίνει καλύτερα ο PL PA, κάτι που αφήνεται στην ευχέρεια του αναγνώστη να ανακαλύψει. Με αντίστοιχο τρόπο επηρεάζεται ο Thr PA χωρίς όμως να μεταβάλλεται σε τόσο δραστικό βαθμό. Η αύξηση του θορύβου, ελαττώνει την χωρητικότητα και ο Thr χρειάζεται να αποδώσει υψηλότερα ποσά ισχύος στις συσκευές. Αλλά η μεταρρύθμιση της ενέργειας στις CUE συσκευές εξισορροπεί τις επιδόσεις του Thr PA.



Σχήμα 9: Συνολικά αποτελέσματα της πρώτης εκτέλεσης για  $N_o = -144 \text{ dBm}$ .

Εξίσου σημαντική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, είναι η αύξηση των απωλειών μονοπατιού. Στο σύστημα υπό κανονικές συνθήκες και με την συχνότητα συγχρονισμένη στα  $f_c = 2 \cdot 10^6 \text{ kHz}$  όπως προβλέπεται από το άρθρο [32], η απώλεια διαδρομής για μέση απόσταση τα 125m σε ελεύθερο χώρο (εξίσωση (8)), ισούται με  $PL = 200.4088 \text{ dB}$ . Αν θεωρηθεί πως ο τύπος (8), αξιοποιεί την συχνότητα μεταφοράς σε Hz τότε η συχνότητα μεταφοράς μπορεί να γραφεί ως  $f_c = 2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ . Η τιμή είναι φαινομενικά η ίδια αλλά όταν εισάγεται στην εξίσωση, η απώλεια προκύπτει ίση με  $PL = 260.4088 \text{ dB}$ . Η επίδραση που έχει η επαύξηση της απώλειας μονοπατιού, επιδεικνύεται παρακάτω στο Σχήμα 10.

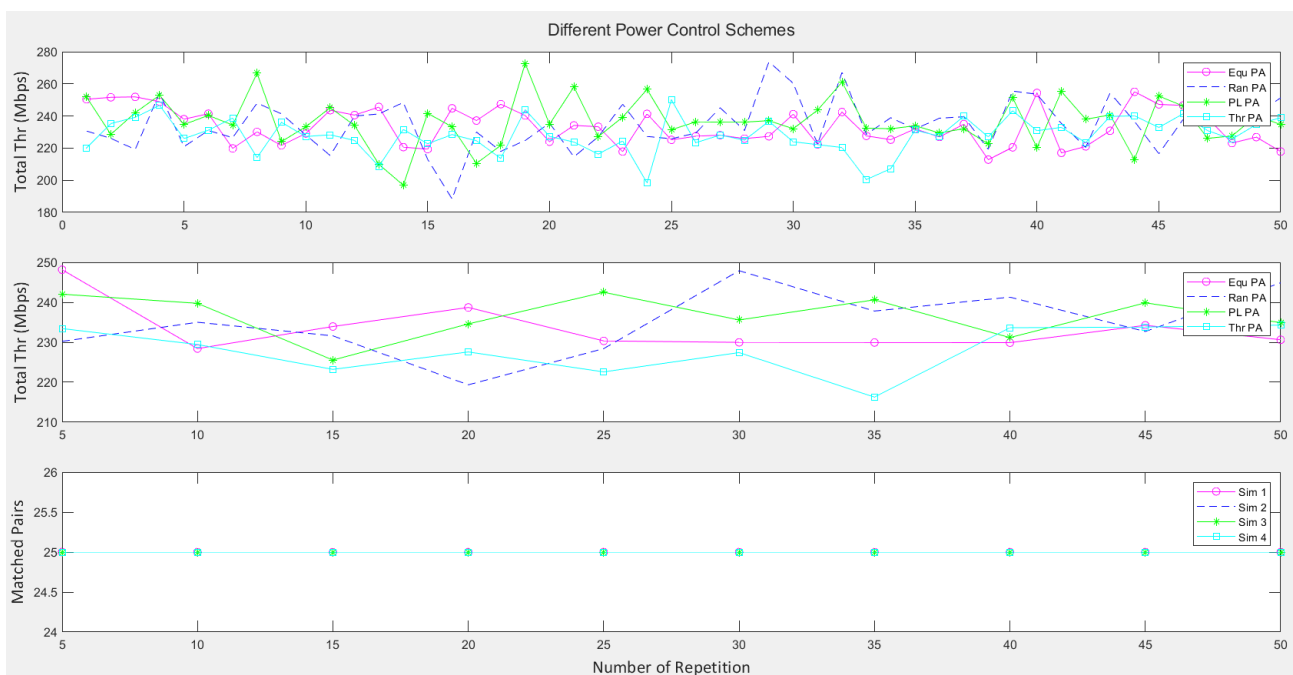


Σχήμα 10: Συνολικά αποτελέσματα χωρητικότητας με αύξηση της απώλειας μονοπατιού για το πρώτο σενάριο χωρίς τον αλγόριθμο Gale-Shapley.

Η μέση χωρητικότητα πλαισιώνεται μέσα στο πεδίο τιμών της πρώτης προσομοίωσης. Η ειδοποιός διαφορά είναι η διακριτή ελάττωση της μέγιστης χωρητικότητας που μπορούν να παράγουν οι τρόποι κατανομής. Με πιο απλά λόγια περιορίζεται το ανώτατο όριο των δυνατών τιμών του ρυθμού ροής. Επίσης μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η απόδοση του PL PA μηχανισμού, με τις αστάθειες στις τιμές να είναι έντονες για όλες τις επιλογές. Αυτό γιατί με την αύξηση της απώλειας, ο PL PA διαμοιράζει μεγαλύτερες

ενεργειακές τιμές στα άκρα των διαύλων όταν οι αποστάσεις είναι μακρινές. Ακόμα ο Thr PA, δυσκολεύεται να ξεπεράσει την απόδοση των υπόλοιπων κατανομών, επειδή είναι αλληλένδετος με το κέρδος των διαύλων. Μεγαλύτερη απώλεια συνεπάγεται μικρότερο κέρδος. Σε αυτό το σημείο είναι εξαιρετικά θεμιτό, να παρουσιαστεί ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου διέπονται από συνέπεια. Δηλαδή αν το πρόγραμμα παράγει αποτελέσματα που να ανήκουν σε ένα πεδίο τιμών με μικρές αποκλίσεις (λόγω τυχαιότητας), για κάθε τρόπο κατανομής. Το περιβάλλον χρήσης χαρακτηρίζεται από την δυναμικότητα των στοιχείων του, συνεπώς ποτέ τα αποτελέσματα δεν θα είναι ακριβώς πανομοιότυπα. Ωστόσο επιδιώκεται οι τελικές τιμές και τα συμπεράσματα να είναι παρεμφερή και να μην είναι απροσδιόριστα, ανάμεσα στις εκτελέσεις του κώδικα. Με αυτό το πρόσχημα προβάλλεται το Σχήμα 11, το οποίο αντιπροσωπεύει την διαδεχόμενη εκτέλεση του προγράμματος με τις ίδιες προκαθορισμένες συνθήκες του σεναρίου.

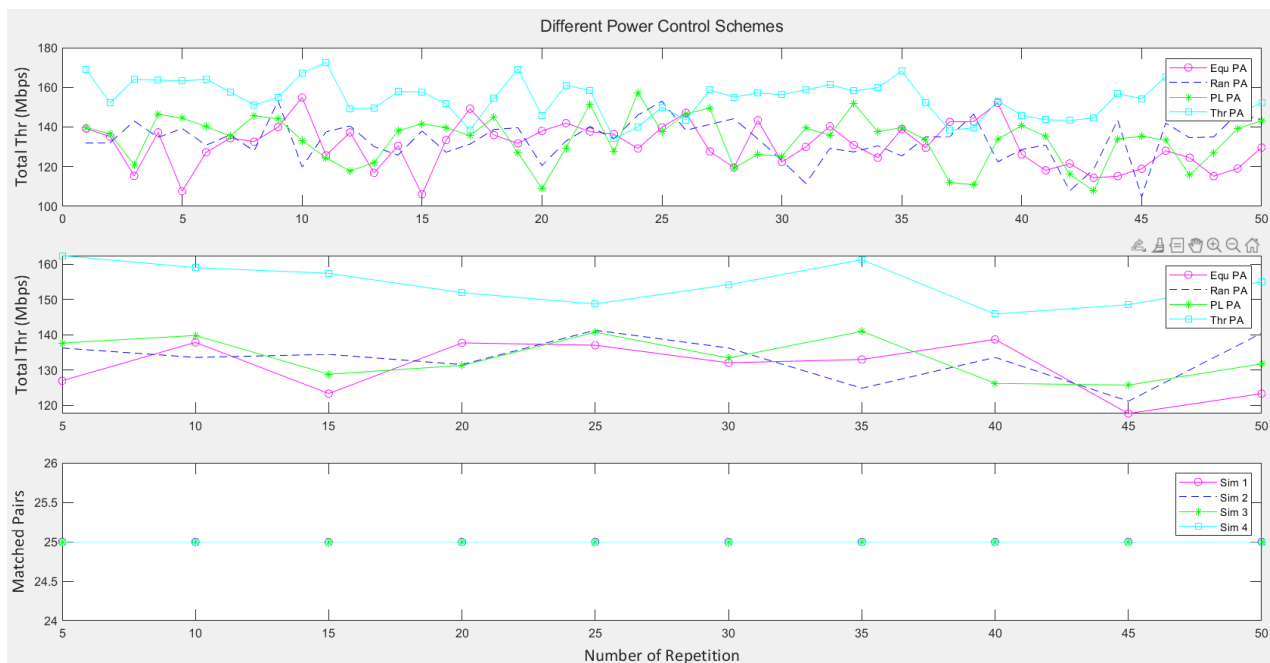
Από το Σχήμα 11, διαφαίνεται ότι η συνολικά καλύτερη επίδοση παράγεται από τον PL PA μηχανισμό. Διακρίνεται επίσης, η μεγάλη διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης τιμής που αποφέρει, αυτήν την φορά ο Ran PA μηχανισμός. Ενδεικτικά, η μικρότερη παραγόμενη τιμή του αριθμείται περίπου στα 190Mbps και η υψηλότερη χωρητικότητα αγγίζει τα 270Mbps. Αναφορικά με τον Thr PA τρόπο κατανομής ισχύος, εξακολουθεί να έχει συλλογικά τον χαμηλότερο ρυθμό ροής, ωστόσο εδώ προδίδεται η σχετική σταθερότητα των αποτελεσμάτων του. Αξίζει να αναφερθεί πως υπήρξαν περιπτώσεις που ο Ran PA αλγόριθμος δημιουργούσε τις καλύτερες τιμές σε διαδοχικές επαναλήψεις. Η συμπεριφορά αυτή του μηχανισμού πιθανώς να οφείλεται στην συνολική τυχαιότητα των μεταβλητών του δικτύου.



Σχήμα 11: Δεύτερη εκτέλεση του πρώτου σεναρίου ακριβώς μετά την πρώτη χωρίς ταίριασμα. Διακρίνεται μία συνέπεια στα αποτελέσματα των εκτελέσεων παρά την δυναμικότητα των στοιχείων.

#### 4.1.1.2 Με τον αλγόριθμο Gale-Shapley

Με την χρήση του αλγορίθμου, προβλέπεται ο Thr PA τρόπος κατανομής να ευνοείται σημαντικά γιατί τότε αξιοποιείται πλήρως η κατανομή ενέργειας με βάση την χωρητικότητα. Η δημιουργία των ιδανικών ζευγαριών D2D - CUE, με στόχο την υψηλότερη αθροιστική χωρητικότητα δίνει την δυνατότητα στον αλγόριθμο που διαμοιράζει τους ενεργειακούς πόρους του συστήματος σύμφωνα με το throughput, Thr PA, θεωρητικά να είναι ο πιο ικανός μηχανισμός υπό αυτές τις συνθήκες. Μέχρι την παρούσα πτυχιακή οι υπόλοιποι αλγόριθμοι δεν έχουν δοκιμαστεί ξανά με τον αλγόριθμο Gale-Shapley, όμως από το θεωρητικό υπόβαθρο αναμένεται να παραχθούν χαμηλότερες τιμές. Διότι ο αλγόριθμος με τις τρεις πρώτες κατανομές σχηματίζει ζευγάρια συσκευών που η ενεργειακή ισχύς τους δεν προκλήθηκε αμοιβαία για τους χρήστες, με σκοπό το μέγιστο ρυθμό ροής. Η μεταβλητή του εύρους ζώνης ισούται με  $BW = 0.5GHz$ , διότι με αυτήν την τιμή χρησιμοποιείται ο μηχανισμός στο αρχικό άρθρο [52]. Όμως σε αντίθεση με τον κώδικα του άρθρου, οι αποστάσεις δεν προέρχονται από στενό πεδίο τιμών {60m,100m} και το πλήθος των συσκευών που συμμετέχουν στις προσομοιώσεις είναι το μισό. Επομένως, είναι πιθανό η συνολική χωρητικότητα να εμφανίζεται μειωμένη σε σχέση με το πρώτο σενάριο και σε σχέση με το άρθρο. Το Σχήμα 12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα φυσιολογικής εκτέλεσης του σεναρίου.

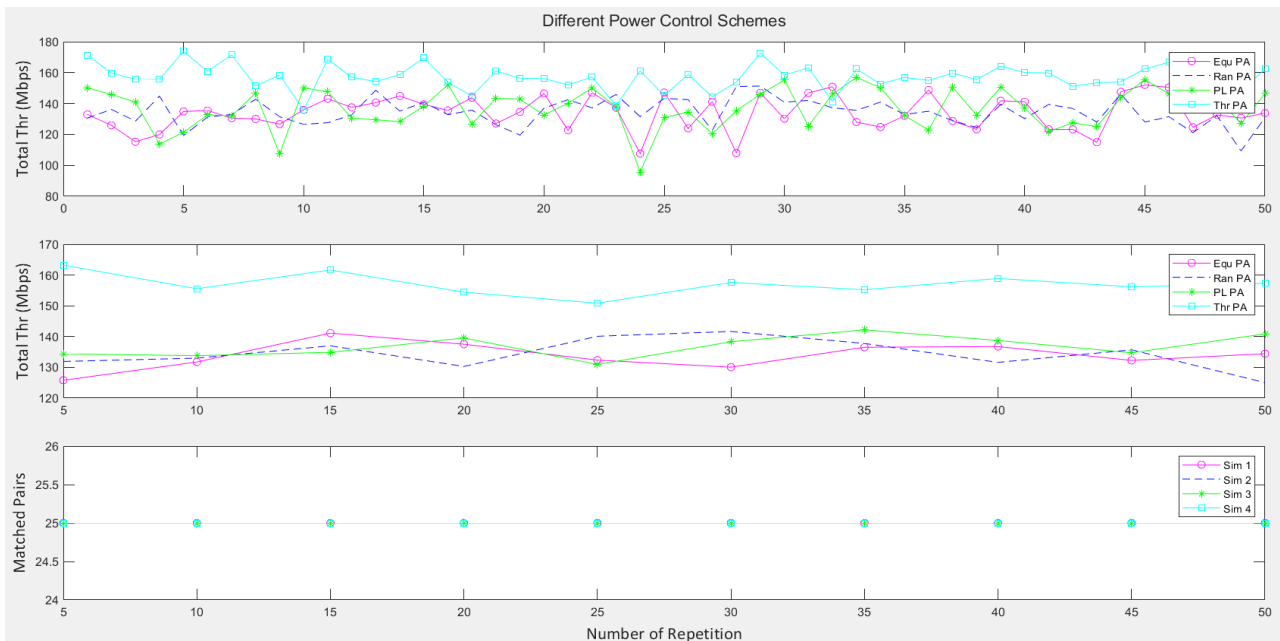


Σχήμα 12: Ολοκληρωμένη αποτύπωση των αποτελεσμάτων του πρώτου σεναρίου για την χωρητικότητα με την χρήση Gale-Shapley αλγορίθμου.

Για κάθε σενάριο ή περίπτωση χρήσης της προσομοίωσης διεξήχθησαν πολλαπλές επαναλήψεις, για να εξακριβωθεί η συνέπεια των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας μικρές αποκλίσεις τιμών. Μέσα από την πειραματική προσέγγιση αποδεικνύεται, πως ο Thr PA όντως παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα και μάλιστα με εμφανή διαφορά από τους λοιπούς μηχανισμούς. Παρότι το πεδίο τιμών για την χωρητικότητα μειώθηκε σε σημαντικό βαθμό

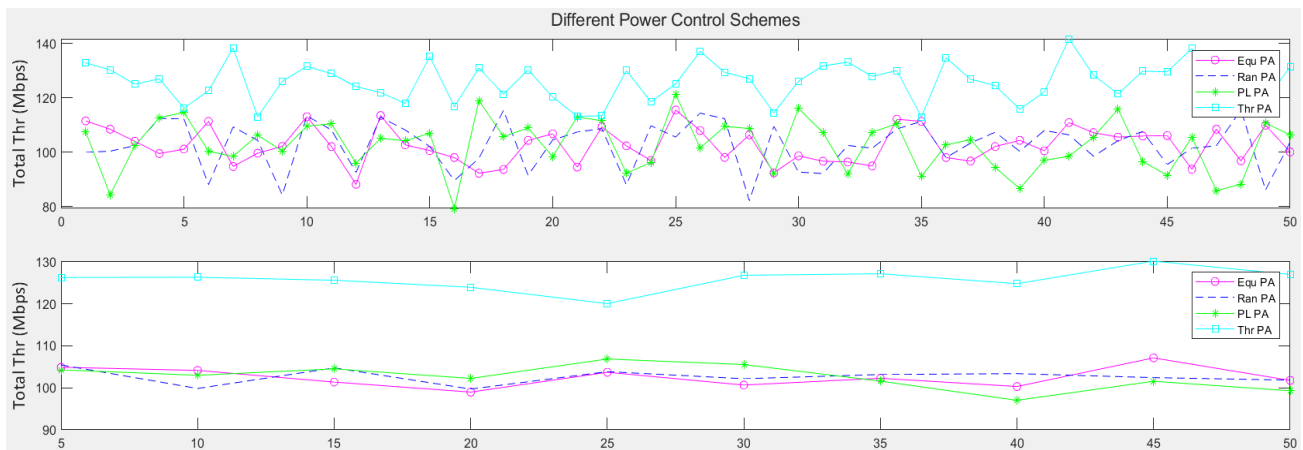
και στην συγκεκριμένη εκτέλεση περιλαμβάνει τις τιμές {100,180}, ο Thr PA πλησιάζει αρκετά, τα αποτελέσματα του ίδιου τρόπου κατανομής στην εκτέλεση του σεναρίου χωρίς την βοήθεια του αλγορίθμου. Η εφαρμογή του αλγορίθμου ταιριάσματος για όλους τους τρόπους κατανομής ενέργειας συνεπάγεται συγκριτικά περισσότερη σταθερότητα των αποτελεσμάτων και συνέπεια των συμπεριφορών των μηχανισμών. Μειώνονται οι αποκλίσεις μέγιστης και ελάχιστης τιμής για όλους τους μηχανισμούς. Το ερώτημα που αναδύεται σχετίζεται με την επιλογή του Gale-Shapley αλγορίθμου, όταν μάλιστα η χωρητικότητα του συστήματος εμφανίζεται μειωμένη από την χωρητικότητα στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται η μέθοδος.

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν μπορεί να αποτυπωθεί γραφικά στο πρόγραμμα. Ωστόσο, δηλώνεται πως η αξία του αλγορίθμου αποκαλύπτεται πλήρως όταν απομονώνονται οι χωρητικότητες των διαύλων ανά κατηγορία δέκτη (D2D Rx, BS). Όταν μετριέται ο ρυθμός ροής του δικτύου, αθροίζονται οι χωρητικότητες των παραδοσιακών και των απευθείας διαύλων επικοινωνίας. Στην περίπτωση που καταγραφεί αποκλειστικά ο ρυθμός ροής των D2D διαύλων και αντίστοιχα για τους CUE χρήστες τότε η χωρητικότητα είναι μέγιστη για τους D2D χρήστες και όσο αυξάνεται το πλήθος των συσκευών, ανέρχεται και η τελική τιμή. Το ίδιο δεν μπορεί να δηλωθεί και για τους κυψελοειδείς χρήστες κινητής τηλεφωνίας όπου σταδιακά και με την αύξηση του πλήθους των συσκευών η χωρητικότητα των δικών τους καναλιών έχει καθοδική πορεία. Μπορεί να μην συνάδει η παραγόμενη χωρητικότητα με την μέγιστη τιμή όλων των υπόλοιπων διαύλων του δικτύου, αλλά είναι η μέγιστη για το συγκεκριμένο ζευγάρι συσκευών και ιδίως για τους D2D χρήστες. Η αποτελεσματικότερη κατανομή για τον μηχανισμό δημιουργίας των ζευγαριών είναι η Thr PA και αξιοποιείται στο έπακρο από τον αλγόριθμο.



Σχήμα 13: Ολοκληρωμένη δεύτερη αναπαράσταση της χωρητικότητας του συστήματος για το πρώτο σενάριο με χρήσης του αλγορίθμου ταιριάσματος.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο χρήσης, για την επαλήθευση της συνέπειας των αποτελεσμάτων δίνεται ακόμα μία ολοκληρωμένη εκτέλεση του προγράμματος προσομοίωσης στο Σχήμα 13, όμως παρακάτω εξετάζονται και μερικές αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος. Το Σχήμα 13, καταδεικνύει την αμέσως επόμενη εκτέλεση του προγράμματος, στην οποία ο Thr PA μηχανισμός εξακολουθεί να εξάγει με διαφορά τα καλύτερα αποτελέσματα. Συνολικά παρατηρείται πως η φυσιολογική εκτέλεση με την χρήση του Gale-Shapley, περιορίζει το πεδίο τιμών μετατρέποντάς το σε ένα κλειστό σύστημα, δηλαδή οι διαφορές των αποτελεσμάτων δεν είναι σφοδρές. Τα ιδανικά ζευγάρια που σχηματίστηκαν για τον υψηλότερο ρυθμό αθροιστικής ροής εξισορροπούν την αναλογία ενέργειας προς παρεμβολές. Αν στον αλγόριθμο μεταβληθεί η τιμή του θορύβου με πρότυπο το πρώτο σενάριο αυτή η αύξηση, στη θεωρία, θα μειώνει την συνολική απόδοση και ο PL PA μηχανισμός θα πλήττεται περισσότερο από τους υπόλοιπους. Ο θόρυβος μειώνει την SINR μετρική για όλες τις συνδέσεις επομένως, ο PL PA που διαμοιράζει την λιγότερη ενέργεια σε πολύ κοντινές συνδέσεις προβλέπεται να δυσκολεύεται στην παραγωγή ικανοποιητικού ρυθμού ροής. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, δεν συντελείται η παραπάνω υπόθεση. Αντιθέτως, η ιεράρχηση των throughput αποτελεσμάτων, αντιστοιχίζεται πλήρως με τις πρώτες εκτελέσεις του σεναρίου υπό την χρήση του Gale-Shapley. Δηλαδή, τις υψηλότερες τιμές τις παράγει ο Thr PA αλγόριθμος και η αμέσως καλύτερη επιλογή είναι ο PL PA μηχανισμός. Οι υπόλοιποι δύο τρόποι περιορίζονται σε σχετικές για το δίκτυο, χαμηλές αποδόσεις με το μέσο των τιμών τους να διέπεται, ωστόσο από συνεχή σταθερότητα.



Σχήμα 14: Εκτέλεση του πρώτου σεναρίου με αλγόριθμο ταιριάσματος για  $N_o = -144 \text{ dBm}$

Η μέθοδος του Gale-Shapley όπως συμπεραίνεται από το άρθρο [52], αυξάνει την απόδοση των D2D διαύλων επικοινωνίας και ταυτόχρονα ελαττώνει την απόδοση των CUE χρηστών. Το τελικό όμως αποτέλεσμα κρατάει σε ισοσκελισμένα επίπεδα την καθολική χωρητικότητα, αν το πλήθος των συσκευών που λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση είναι σταθερό. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών τόσο μεγαλώνει και η συνολική χωρητικότητα ενός συστήματος. Τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν πως με κάθε τρόπο κατανομής, η συνολική χωρητικότητα έχει την ίδια συμπεριφορά, με όμως διαφορετικό πεδίο ορισμού όπως στην περίπτωση του ανεβασμένου θορύβου, με τις στάθμες των ρυθμών ροής να χαμηλώνουν κατά περίπου 40



Mbps και να ανήκουν στο πεδίο τιμών  $\{80,140\}$ . Για το παραπάνω συμπέρασμα, εξετάζεται ο αλγόριθμος στο παρόν σενάριο, όταν μειώνεται η καθολική ενέργεια του συστήματος μόνο για τους D2D χρήστες, μιάς και για το δικό τους κέρδος κυρίως σχηματίζονται τα ζευγάρια. Η μεταβολή αυτή ελαττώνει τις παρεμβολές από τους D2D συνδέσμους προς τον σταθμό και η χωρητικότητα των CUE-BS διαύλων αποκτά υψηλότερες τιμές. Αναμένεται η συνολική χωρητικότητα να είναι πιθανώς μειωμένη, ο καλύτερος τρόπος κατανομής να είναι ο Thr PA ακολουθούμενος από τον PL PA, οι διακυμάνσεις στο throughput να μην είναι έντονες και οι διαφορές των αποτελεσμάτων να είναι ανάλογες με τις προηγούμενες εκτελέσεις του σεναρίου. Για  $P_{tot} = 30dBm = 1W$  η χωρητικότητα του συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 15.

Η τελική απεικόνιση είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσα. Απευθείας προκαλεί εντύπωση πως η συνολική χωρητικότητα του συστήματος παραμένει στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση που  $P_{tot} = 35dBm$ . Διαφυλάσσεται η κυριαρχία του Thr PA μηχανισμού με την δεύτερη καλύτερη επιλογή να είναι ο PL PA, ωστόσο όχι όμως κατά πολύ. Για τους τρεις πρώτους τρόπους κατανομής ενέργειας, σημειώνεται αύξηση στη μέση τιμή χωρητικότητας κατά περίπου 20 Mbps, το οποίο οφείλεται στις ελαττωμένες παρεμβολές και στο γεγονός ότι οι τρόποι κατανομής εφαρμόζονται τόσο για τους D2D, όσο και για τους CUE χρήστες.



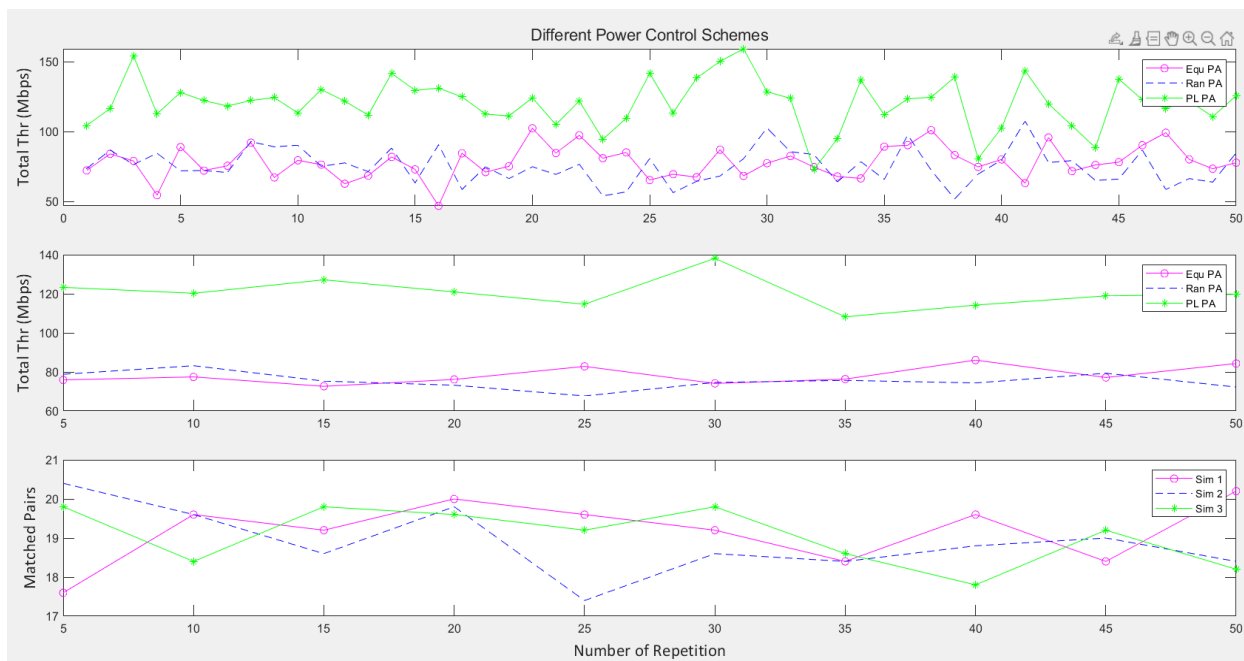
Σχήμα 15: Αποτελέσματα της ολοκλήρωσης του πρώτου σεναρίου με την χρήση μηχανισμού ταιριάσματος, όταν  $P_{tot} = 30dBm$ .

Συνεπώς τα σήματα των CUE χρηστών ευνοούνται ιδιαίτερα, όταν το σύστημα λειτουργεί με υψηλές ενέργειες και χαμηλές παρεμβολές, ενώ τα εξασθενημένα D2D σήματα, με την αρωγή του αλγόριθμου δεν καταστέλλουν την συνολική λειτουργία του συστήματος. Τονίζεται πως στην περίπτωση όπου δεν είναι επιθυμητό να μειωθεί η ενέργεια των D2D συσκευών δοκιμάζεται η ελάττωση της ισχύος των CUE, με τα αποτελέσματα ξανά είναι παρεμφερή. Η διαφορά έγκειται στις ανομοιότητες των αποτελεσμάτων μεταξύ των μηχανισμών κατανομής, με τους πρώτους τρόπους διαμοιρασμού να πλησιάζουν τα κατά μέσο όρο 170 Mbps που παράγει ο Thr PA. Ο Thr PA είναι εξαιρετικά ευσταθής σε όλες τις εκτελέσεις και ικανός να υποστηρίξει τις υψηλότερες τιμές για το συνολικό throughput.

Αποσαφηνίζεται ότι για όλο το πρώτο σενάριο ελέγχονται πάντα οι τιμές ισχύος ώστε να ανήκουν στα επιτρεπτά όρια. Η ρίψη της ενεργειακής στάθμης συνεπάγεται περισσότερες συσκευές να μεταδίδουν με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια.

#### 4.1.2 Χωρητικότητα Δεύτερου Σεναρίου Προσομοίωσης

Το δεύτερο σενάριο, χρησιμοποιεί την mmW μπάντα συχνοτήτων και συγκεκριμένα τη συχνότητα των 28 GHz με εύρος ζώνης  $BW = 0.8GHz$ . Οι δίαυλοι επικοινωνίας χωρίζονται σε LOS/NLOS και δεν συνυπολογίζονται οι συσκευές που εντοπίζονται στο εσωτερικό των εμποδίων. Με την παραδοχή ότι ο σταθμός βάσης υπολειτουργεί εξαιρούνται από το σενάριο οι Thr PA και Gale-Shapley μηχανισμοί, καθώς απαιτούν ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους από τον σταθμό βάσης, τους οποίους δεν έχει την δυνατότητα να διαθέσει. Ακόμα, ο σταθμός βάσης δεν μπορεί να υποστηρίξει επικοινωνίες με τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας, οπότε μόνο η SINR μετρική για τον D2D Rx λαμβάνεται υπόψη. Εφόσον ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις μία βασική εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου για την μετρική της χωρητικότητας, παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 16. Οι αρχικές παράμετροι για την ισχύ που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση είναι:  $P_{tot} = 35dBm$  και  $P_c = 34dBm$  όπως στο πρώτο σενάριο ενώ στο δεύτερο σενάριο δεν χρησιμοποιείται αλγόριθμος που να ελέγχει αν οι δοσμένες ενεργειακές τιμές είναι ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη ισχύ. Οι συγκρίσεις του σεναρίου γίνονται με το πρώτο σενάριο και την εκτέλεση χωρίς τον αλγόριθμο Gale-Shapley.

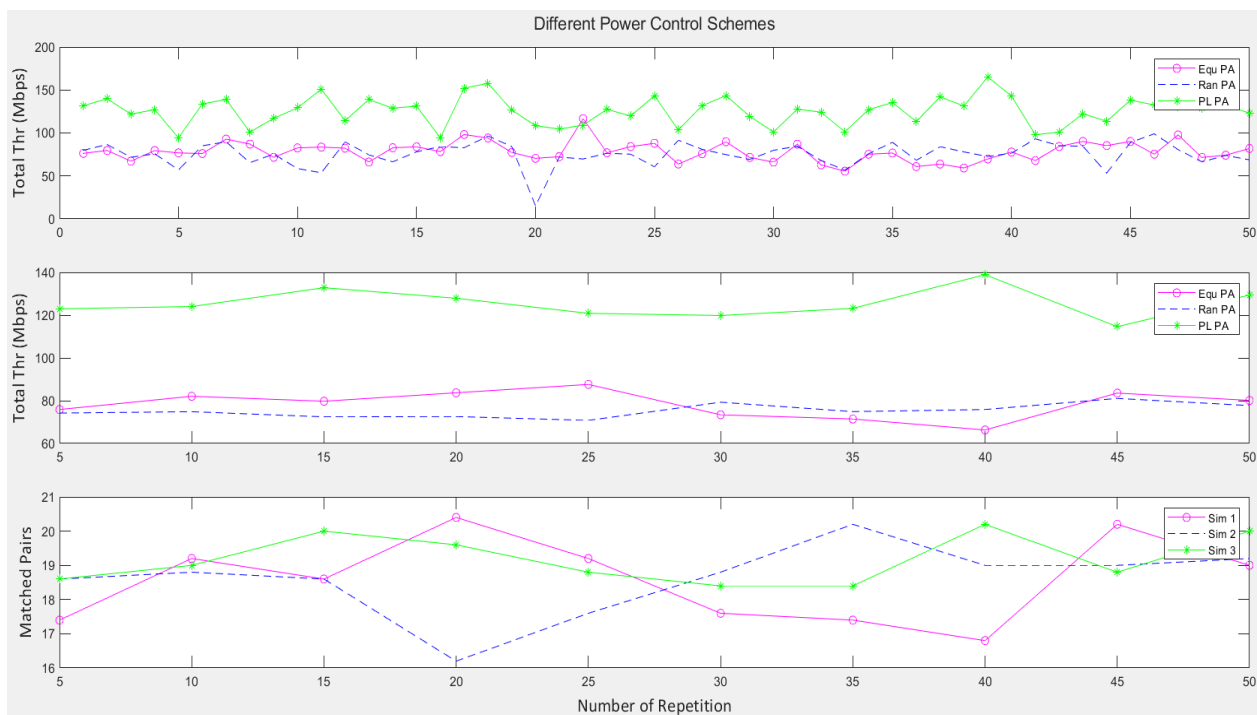


Σχήμα 16: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση του δεύτερου σεναρίου για την χωρητικότητα

Η διαμόρφωση των αποτελεσμάτων ταυτίζεται με του πρώτου σεναρίου. Αμέσως ξεπροβάλλουν τρεις σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο προσομοιώσεων. Αρχικά το εύρος τιμών για την συνολική χωρητικότητα των D2D διαύλων στο παρόν σύστημα, τίθεται με κατώτατο όριο τα 50-60 Mbps και μέγιστη τιμή περίπου τα 160 Mbps. Σημαντική μείωση από το πεδίου τιμών του πρώτου σεναρίου. Επιπροσθέτως, απουσιάζουν οι συνεισφορές του Thr PA, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, ενώ το τελευταίο γράφημα της απεικόνισης



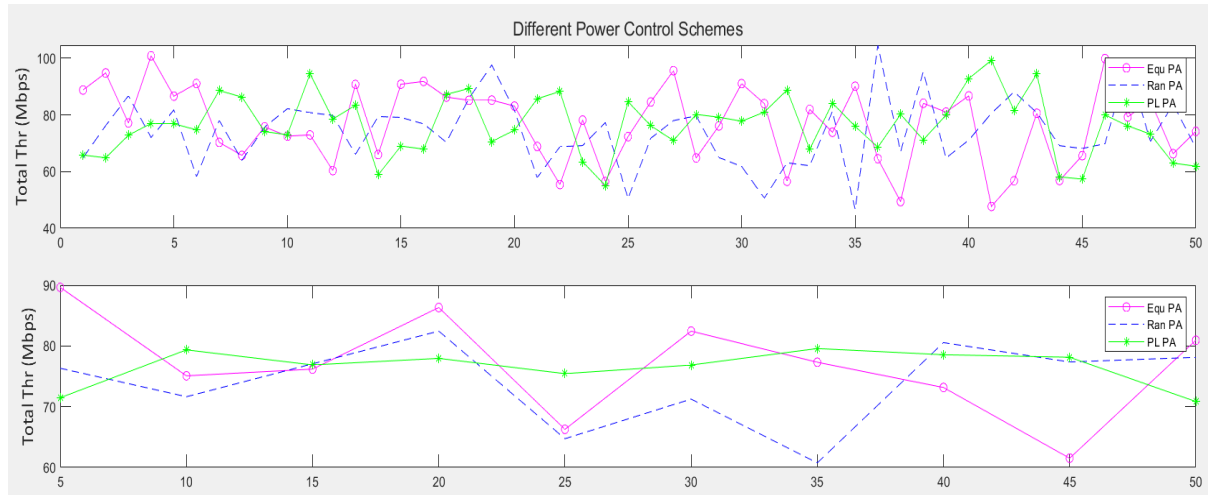
δεν ταυτίζεται με το ευσταθές γράφημα του πρώτου σεναρίου, όπου το πλήθος των επιτυχημένων διαύλων εδραιώνεται στην τιμή των 25. Η διαδικασία εντοπισμού των σημείων και η κατηγοριοποίηση των διαύλων έχουν ως αποτέλεσμα, το πλήθος των D2D ζευγαριών να μην είναι σταθερό. Ο αριθμός των σημείων που απορρίπτονται είναι καθαρά τυχαίος για κάθε επανάληψη μίας εποχής. Όσον αφορά στην απόδοση των τρόπων κατανομής, ο PL PA εμφανίζεται ο ικανότερος τρόπος κατανομής ενέργειας στις επικρατούσες συνθήκες. Ο μηχανισμός PL PA ευνοείται από τα μοντέλα υπολογισμού της απώλειας διαδρομής και από τις μικρότερες αποστάσεις ανάμεσα στα άκρα των διαύλων. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στο πρώτο διάγραμμα στο Σχήμα 16, είναι αναμενόμενες εξαιτίας του ασταθούς πλήθους, των αποστάσεων, του είδους των διαύλων και της απώλειας μονοπατιού. Παρότι υπάρχει συστηματική συνέπεια στα αποτελέσματα των τρόπων κατανομής, η σταθερότητα στις τιμές αναδεικνύεται μόνο μετά την ομαδοποίηση τους, δηλαδή στο δεύτερο γράφημα. Μία δεύτερη διαδοχική κανονική εκτέλεση αποτυπώνεται στο Σχήμα 17. Στην δεύτερη αναπαράσταση φαίνεται ευδιάκριτα πως η ελάχιστη τιμή όλης της προσομοίωσης συγχέεται με το ολικό ελάχιστο πλήθος συσκευών. Υπάρχει το ενδεχόμενο κανένα ζευγάρι να μην είναι διαθέσιμο για επικοινωνία και άρα η συνολική χωρητικότητα να είναι μηδενική. Στο διάστημα των πειραματικών δοκιμών ωστόσο δεν προέκυψε το θέμα αυτό.



Σχήμα 17: Δεύτερη διαδοχική εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου για χωρητικότητα

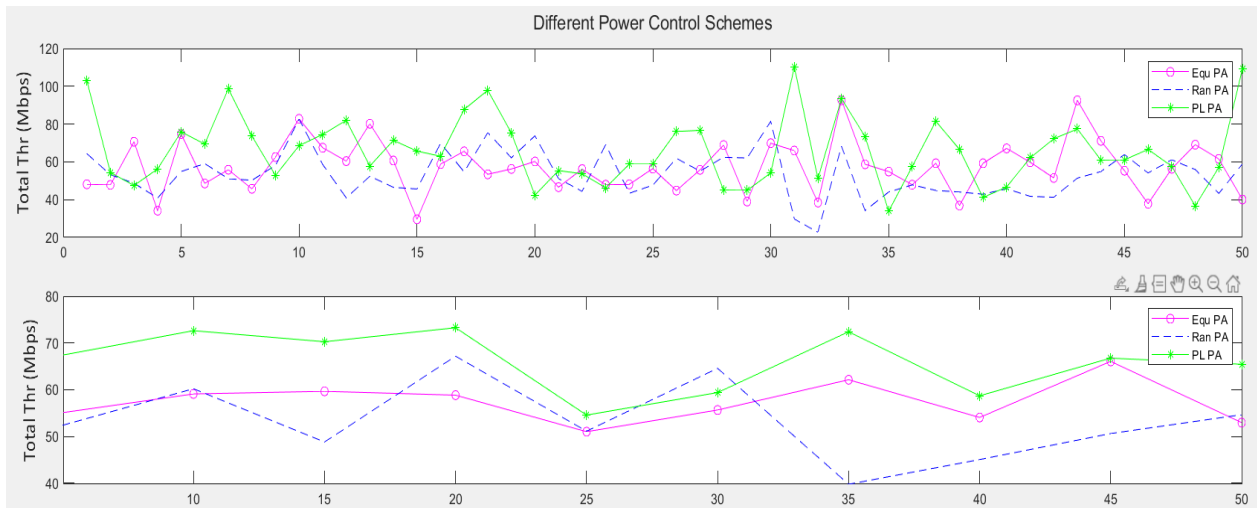
Οι δύο πρώτοι τρόποι κατανομής δυσκολεύονται να περάσουν το φράγμα των 100 Mbps και η συνολική τους επίδοση κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Εξετάστηκε το σενάριο όπου η κατανομή ενέργειας αφορούσε μόνο τους D2D χρήστες και για τις συσκευές που παρεμβάλουν η ενέργεια αποδόθηκε από τον ίσο καταμερισμό με μέγιστο πλήθος τις 20 συσκευές. Επιλέχθηκε ο ίσος καταμερισμός, στην περίπτωση που ο σταθμός βάσης δεν

μπορεί να οργανώνει τις συσκευές που παρεμβάλλουν, διότι είναι μηχανισμός κατανομής που εφαρμόζεται και σε αποκεντρωμένα συστήματα. Σκοπός της δοκιμής είναι να φανεί η σημασία των τρόπων κατανομής όταν συμβαίνουν και για τις συσκευές που παρεμβάλλουν. Το Σχήμα 18 καταγράφει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 18: Χωρητικότητα όταν οι ενέργειες των συσκευών που παρεμβάλλουν δίνεται αποκλειστικά από τον Equ PA για το δεύτερο σενάριο.

Στο Σχήμα 18, το συνολικό throughput σημειώνει σημαντική πτώση, κυρίως για τον PL PA μηχανισμό. Το πλεονέκτημα του PL PA αλγορίθμου είναι πως οι κοντινές παρεμβολές που δέχεται ένας δέκτης διακατέχονται από την μικρότερη ισχύ. Συνειδητά ο αλγόριθμος μειώνει τις κοντινές παρεμβολές, ενώ οι μακρινές παρεμβολές για τις οποίες αφιερώνεται το υψηλότερο ποσό ενέργειας εξισορροπούνται από τις μακρινές αποστάσεις και την έντονη απώλεια μονοπατιού. Τώρα που τα σήματα των παρεμβολών μεταδίδονται με ίση ενέργεια οι κοντινές παρεμβολές αυξάνονται με τα επακόλουθα αποτελέσματα στο Σχήμα 18. Σε περιβάλλοντα που αξιοποιείται η mmW μπάντα συχνοτήτων η απώλεια του μονοπατιού είναι ανεβασμένη. Στο παρόν σύστημα με τους τύπους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μέση τιμή για LOS διαύλους κυμαίνεται στο πεδίο τιμών {110dB, 140dB} και για NLOS είναι {145dB, 200dB}. Οι διαφοροποιήσεις αναφύονται από τον τυχαίο παράγοντα σκίασης που χρησιμοποιείται στον τύπο (13). Ανεβάζοντας και τις δύο παραμέτρους κατά 100dB ώστε να ξεπεράσουν τα 200dB το σύστημα ανταποκρίνεται με τις ενδείξεις που καταγράφονται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Δεύτερο σενάριο για χωρητικότητα όταν  $PL \approx 250dB$ .

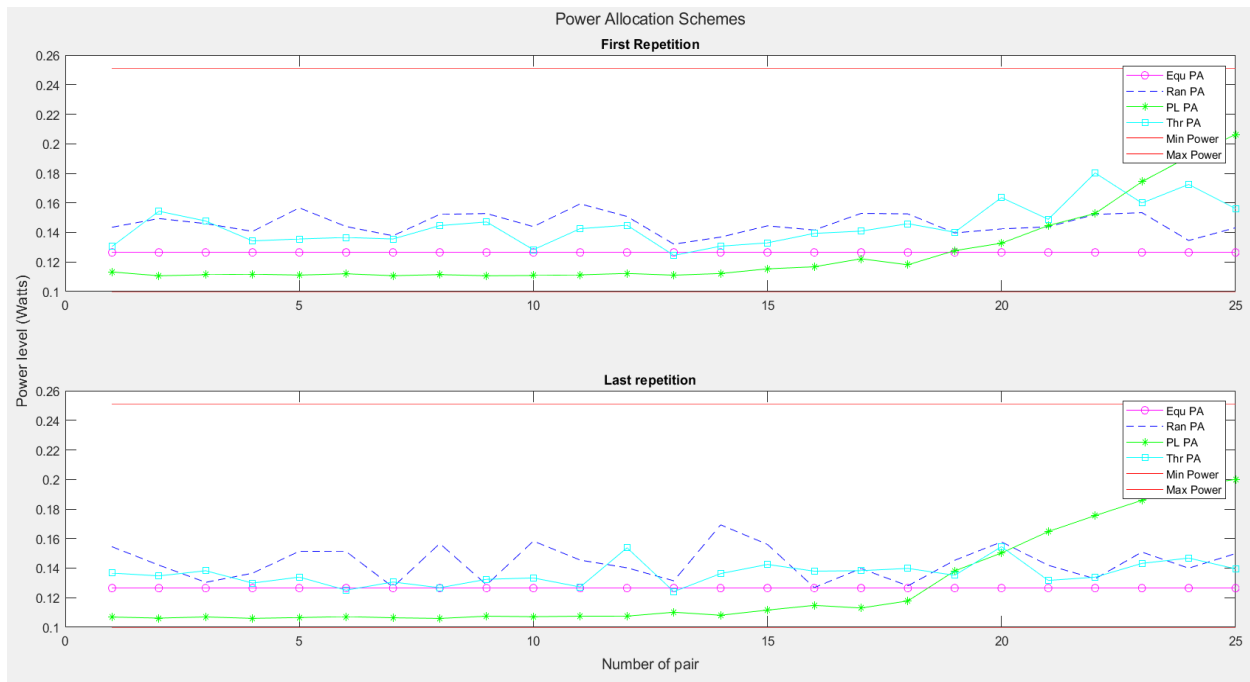
Ελαττωμένη χωρητικότητα με τιμές ελαφρώς πάνω από 20 Mbps, ο PL PA μηχανισμός δημιουργεί όμοιες τιμές με τους πρώτους δύο τρόπους και αξιοσημείωτες διαφορές μεγίστου ελαχίστου είναι τα χαρακτηριστικά του δικτύου όταν ανέρχεται η path loss τιμή. Το μικρότερο κέρδος, σε συνδυασμό με μικρότερο πλήθος λειτουργικών συσκευών μειώνουν την SINR μετρική. Είναι απαραίτητο να ειπωθεί, πως το υψηλό Bandwidth, καταφέρνει και εδραιώνει τις επικοινωνίες. Αν για παράδειγμα  $BW = 0.1GHz$  τότε μειώνεται ο θόρυβος αλλά μεταβάλλεται η δυναμική της εξίσωσης (14). Το δίκτυο παράγει στην καλύτερη 25 Mbps, με μέση τιμή τα 15 Mbps. Δηλαδή το κανάλι επικοινωνίας στις συχνότητες των 28GHz δεν μπορεί να μεταδώσει την πληροφορία στο μέσο μετάδοσης του περιβάλλοντος, όταν το εύρος ζώνης είναι τόσο ελαττωμένο. Η SINR μετρική τυπικά αυξάνεται με τον χαμηλό θόρυβο, αλλά η χωρητικότητα του συστήματος πέφτει ειδικά όταν ο χαμηλός θόρυβος συνδυάζεται με χαμηλό εύρος ζώνης.

## 4.2 Ενεργειακή Κατανομή

Η υποενότητα παρουσιάζει με διαγράμματα τις ενεργειακές κατανομές ανάμεσα στα σενάρια χρήσης, σε σύγκριση με τις οριακές τιμές ισχύος που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα της προσομοίωσης.

### 4.2.1 Ενεργειακή Κατανομή Πρώτου Σεναρίου

Η πρώτη απεικόνιση που παρουσιάζεται με το Σχήμα 20, ξεχωρίζει τους τέσσερις τρόπους κατανομής ισχύος και καταδεικνύει την μέση ενεργειακή ισχύ που αποδόθηκε σε κάθε ζευγάρι για την πρώτη και την τελευταία εποχή κάθε προσομοίωσης, μετρημένη σε Watts.



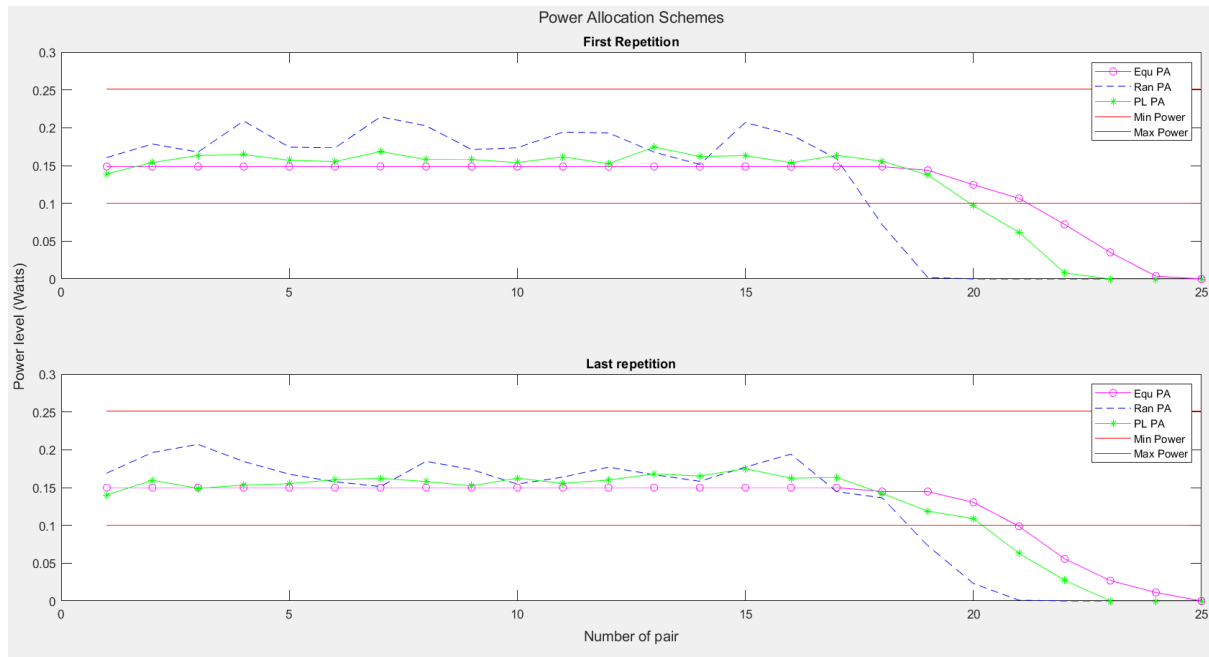
Σχήμα 20: Ενεργειακή κατανομή για το πρώτο σενάριο όταν  $BW = 0.5GHz$ .

Κάθε κουκίδα συμβολίζει την μέση τιμή ισχύος που λαμβάνει το συγκεκριμένο ζευγάρι, της κουκίδας, κατά την διάρκεια της πρώτης και της τελευταίας εποχής σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου. Σύμφωνα με το Σχήμα 20, ο ίσος καταμερισμός φαίνεται να παραμένει πιστός στην ονομασία του αφού σε όλες τις εκτελέσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά το πειραματικό στάδιο, η ενέργεια μετά την εφαρμογή του μηχανισμού, ισούται με  $P_{D2D} = \frac{P_{tot}}{N} = \frac{35 (dBm)}{25} = 0.1265W$ . Όλα τα ζευγάρια, φαίνεται να λαμβάνουν το ίδιο ποσό ενέργειας. Ο μηχανισμός της τυχαίας κατανομής επίσης υλοποιεί το έργο του, και διαμοιράζει την ενέργεια στα ζευγάρια, συχνά με μεγαλύτερες αποκλίσεις και τότε με μικρότερες. Η τυχειότητα του παράγοντα  $a_k$  σημαίνει πως σε απροσδιόριστη χρονική στιγμή όλα τα ζευγάρια ίσως να πάρουν την μέγιστη ή την ελάχιστη ενεργειακή τιμή. Προφανώς σε όλους τους τρόπους διαμοιρασμού ισχύος αλλά κυρίως στους δύο πρώτους, η αύξηση των συσκευών του δικτύου συνεπάγεται και μείωση της ενέργειας, ιδιαίτερα στην περίπτωση που δεν ανανεώνεται η ενέργεια του συστήματος. Ο τρίτος τρόπος κατανομής κεντρίζει το ενδιαφέρον με την ιδιόζουσα γραφική απεικόνισή του. Στο πρόγραμμα η συνάρτηση *dist* δημιουργεί τα κοντινότερα δυνατά ζεύγη και στον πίνακα που επιστρέφει η συνάρτηση, η σειρά των στοιχείων υποδηλώνει και την κλίμακα της απόστασης. Δηλαδή οι πρώτες θέσεις του πίνακα είναι οι κοντινότερες και όσο λιγοστεύουν τα διαθέσιμα σημεία, τόσο μεγαλώνει η απόσταση. Το γεγονός αυτό συνάδει πλήρως με την κατανομή ενέργειας του PL PA στο Σχήμα 20. Για τα πρώτα ζευγάρια θα αναλογεί το μικρότερο ποσό ισχύος και για τα τελευταία το μεγαλύτερο. Έτσι δικαιολογείται η βαθμιαία ανύψωση του μηχανισμού PL PA. Ο παράγοντας της απόστασης επηρεάζει και την κατανομή που προσφέρει ο Thr PA μηχανισμός. Για μακρινές αποστάσεις σε συνδυασμό με την χωρητικότητα των CUE

σημείων, ο μηχανισμός θα κληθεί να ανεβάσει την απόδοση του καναλιού από τον D2D Tx και άρα την ενέργεια στον πομπό. Ο Thr PA είναι και ο μοναδικός αλγόριθμος που στηρίζεται στο εύρος ζώνης για την κατανομή ενέργειας. Όταν  $BW = 0.1GHz$ , δεν παρατηρούνται βαρυσήμαντες αλλαγές σε συνάρτηση με την κατάσταση όπου  $BW = 0.5GHz$ , με την υποσημείωση πως οι ενεργειακές ανομοιότητες μεταξύ των ζευγαριών είναι δραστικές.

#### 4.2.2 Ενεργειακή Κατανομή Δεύτερου Σεναρίου

Η χαρακτηριστική αλλαγή στα αποτελέσματα των τρόπων κατανομής, καθώς οι αλγόριθμοι είναι οι ίδιοι, οφείλεται στις μεταπτώσεις του αριθμού των D2D συσκευών στο σύστημα και στις αποστάσεις μεταξύ αυτών. Στο δεύτερο σενάριο υπενθυμίζεται πως δεν υλοποιείται ο Thr PA μηχανισμός. Το Σχήμα 21 αντιστοιχεί στην διαγραμματική αναπαράσταση της μέσης ενέργειας κάθε ζεύγους για κάθε πρώτη και τελευταία εποχή. Για την διευκόλυνση των συγκρίσεων με το πρώτο σενάριο, το διάγραμμα χωρίζεται για 25 ζεύγη. Στο παρόν σενάριο ο μέσος αριθμός συσκευών ισούται με  $N = 21$  συσκευές. Η μέση βασική τιμή ισχύος όπως σημειώνεται στο Σχήμα 21, απορρέει από τον ίσο καταμερισμό και ισχύει:  $P_{D2D} = \frac{P_{tot}}{N} = \frac{35(dBm)}{21} = 0.1506W$ . Όλες οι κατανομές μετά από τα 20 ζεύγη καταρρακώνονται γιατί στην διάρκεια της δειγματοληψίας δεν έχουν δημιουργηθεί περισσότερα από 20-21 σημεία σε αρκετές εποχές. Καθ' όλη την περίοδο των πειραματικών δοκιμών, για τα τελευταία ζευγάρια η μέση ενεργειακή στάθμη προκύπτει ίση με μηδέν. Παράδοξο αποφαίνεται το γεγονός ότι στο πρώτο σενάριο η PL PA μέθοδος, έδινε τις υψηλότερες δυνατές τιμές στα τελευταία ζευγάρια και στο δεύτερο σενάριο τα τελευταία ζευγάρια δεν συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην πάροδο των εκτελέσεων, πιθανώς τα D2D ζευγάρια να χρειάζονται την μέγιστη επιτρεπτή ισχύ ή αντίστοιχα να αξιοποιούν την ελάχιστη ενέργεια για τις μεταδόσεις του. Η συνθήκη αυτή, όμως δε δύναται να επαληθευτεί από το Σχήμα 21 και παρά μόνο μέσα από τον κώδικα προσομοίωσης μπορούν χειροκίνητα να εντοπιστούν οι συσκευές που εκμεταλλεύονται τις ακραίες ενεργειακές στάθμες.



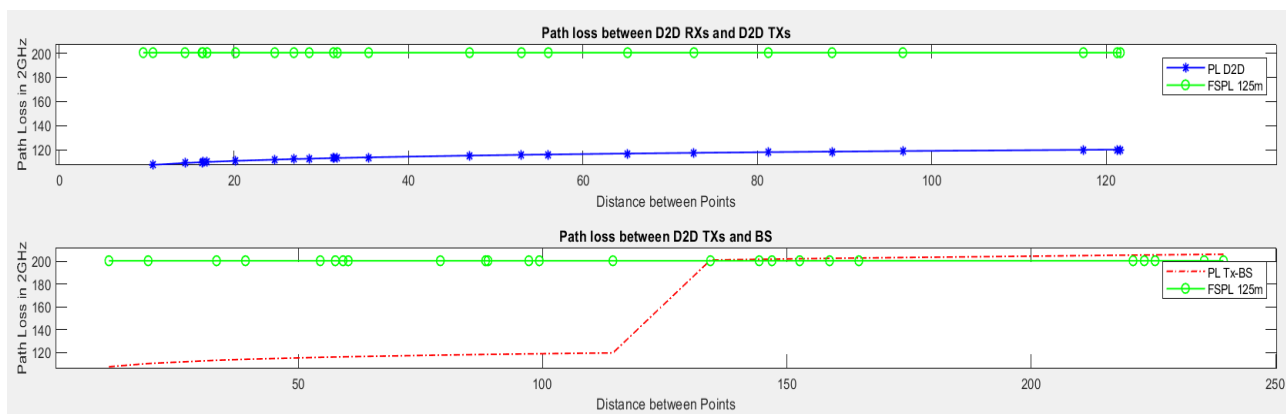
Σχήμα 21: Ενεργειακή κατανομή για το δεύτερο σενάριο όταν  $BW = 0.8\text{GHz}$ .

### 4.3 Path Loss

Η απώλεια διαδρομής είναι ένα από τα θεμελιώδη κομμάτια της παρούσα πτυχιακής. Σε αυτήν την υποενότητα αναδεικνύονται οι απώλειες μονοπατιού για κάθε σενάριο. Η απώλεια δεν επηρεάζεται από τους τρόπους κατανομής, ούτε από το εύρος ζώνης, αλλά εξαρτάται από τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων, από την συχνότητα μεταφοράς (τουλάχιστον για το πρώτο σενάριο) και από το περιβάλλον του συστήματος που, ιδίως στο δεύτερο σενάριο κατηγοριοποιεί τους διαύλους επικοινωνίας σε LOS/NLOS. Η αποτύπωση των αποτελεσμάτων είναι συνέπεια του αρχείου *plot\_pl.m* και καλείται από το *pathloss.m* αρχείο. Ξεκαθαρίζεται ότι, η απώλεια καταγράφεται για την πρώτη επανάληψη της πρώτης εποχής, ώστε να είναι ευανάγνωστα τα αποτελέσματα. Οι απώλειες για κάθε ζευγάρι συγκρίνονται με την μέση τιμή path loss κάθε σεναρίου.

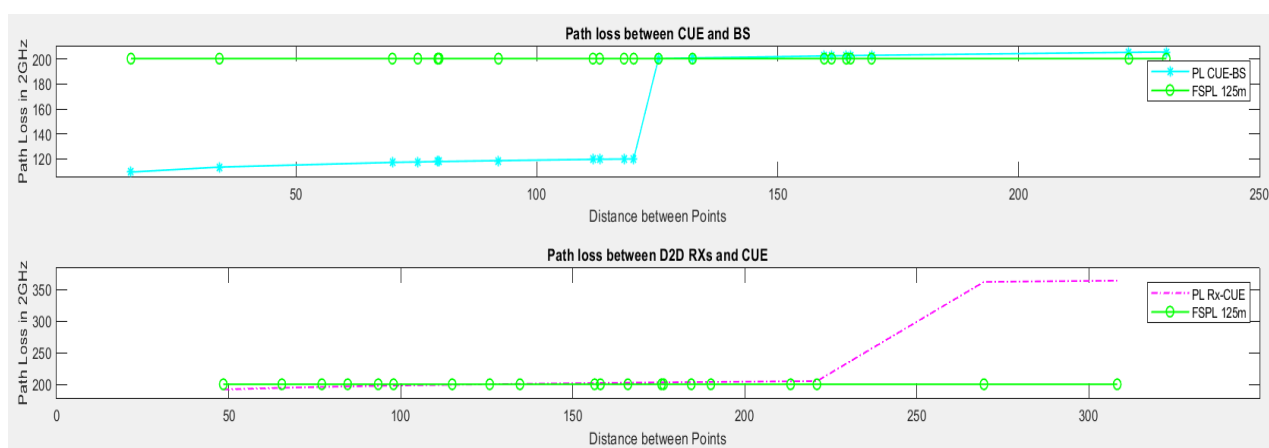
#### 4.3.1 Path Loss Πρώτου Σεναρίου

Τα διαγράμματα που προσκομίζονται είναι μία ενδεικτική απογραφή της απώλειας διαδρομής για το πρώτο σενάριο, όταν η συχνότητα μεταφοράς ορίζεται στα 2 GHz και η μέση τιμή απώλειας ισούται με  $PL = 200.4088\text{ dB}$ . Απο τα διαγράμματα που εισάγονται σε αυτήν την υπό ενότητα, εξακριβώνεται η πραγματική εξάρτηση της απώλειας με τις αποστάσεις των άκρων των διαύλων. Το Σχήμα 22 κατοχυρώνει την απώλεια μονοπατιού για τους διαύλους επικοινωνίας D2D Rx - D2D Tx και για τα σήματα παρεμβολών D2D Tx - BS.



Σχήμα 22: Απώλεια μονοπατιού για τον D2D διάυλο και για την σύνδεση Tx - BS

Κάθε σύμβολο στο Σχήμα 22 (όπως κατηγοριοποιούνται στο υπόμνημα κάθε διαγράμματος) αντιστοιχεί σε ένα ζευγάρι συσκευών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Για τους D2D διαύλους έχει ειπωθεί πολλαπλές στιγμές κατά την διάρκεια της πτυχιακής ότι ενώνονται με την κοντινότερη έτερη συσκευή σύμφωνα με τη συνάρτηση *dist*. Επισημαίνεται πως πριν την απεικόνιση των διαγραμμάτων, ταξινομήθηκαν οι αποστάσεις και οι απώλειες μονοπατιού ώστε να εξωραϊστεί το γράφημα. Παρατηρείται λοιπόν ότι, για αποστάσεις των D2D άκρων μικρότερες των 125m οι απώλειες είναι μικρότερες των 120dB. Η συντριπτική διαφοροποίηση από τα περίπου 200dB της μέσης τιμής είναι αποτέλεσμα των μοντέλων για τον υπολογισμό της απώλειας με βάση την απόσταση. Σε άλλες εκτελέσεις που η απόσταση των D2D άκρων είναι μεγαλύτερη από τα 125m, η απώλεια στελεχώνεται στις τιμές λίγο πάνω από το ταβάνι των 200dB, όπως ακριβώς συμβαίνει για τους D2D Tx - BS διαύλους. Η εμφαντική εναλλαγή των τιμών της απώλειας στο δεύτερο σχήμα, πραγματοποιείται στην προκαθορισμένη απόσταση και όταν οι αποστάσεις την υπερβαίνουν, η απώλεια ανήκει στο όριο  $200 < PL(dB) < 210$ .



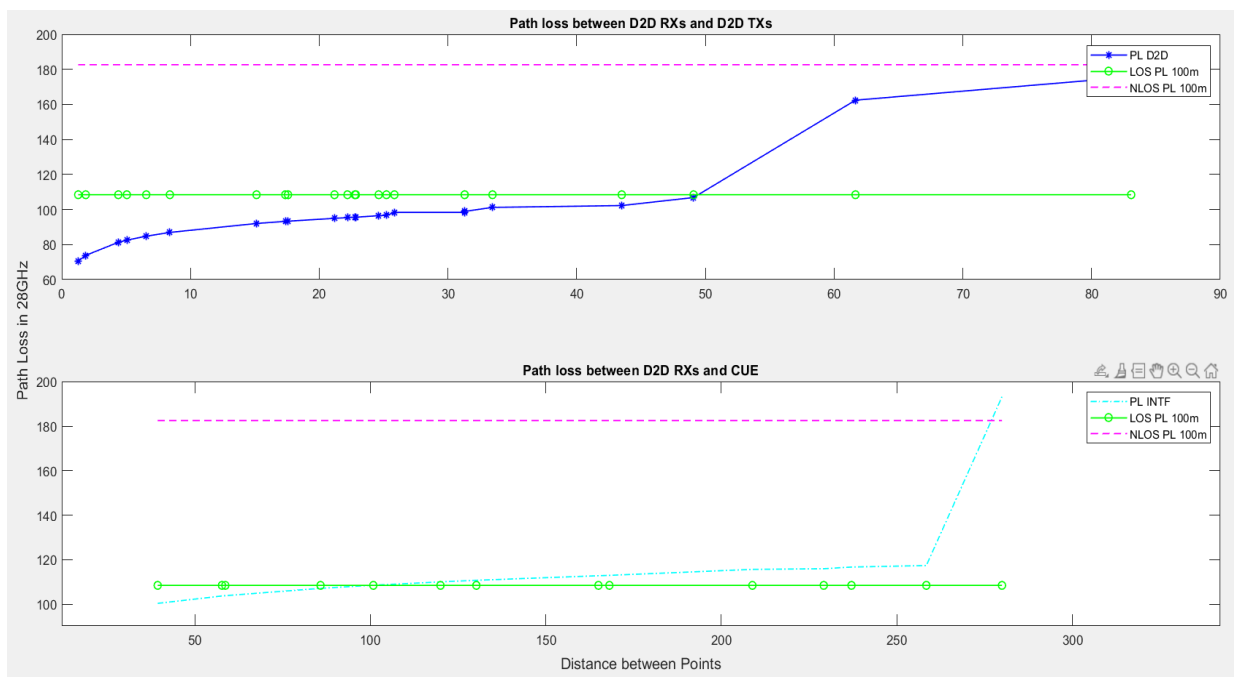
Σχήμα 23: Απώλεια μονοπατιού για τους CUE - BS και CUE - Rx διαύλους, πρώτο σενάριο

Το Σχήμα 23 εμφανίζει την απώλεια μονοπατιού για τους διαύλους των χρηστών κινητής τηλεφωνίας με τον σταθμό βάσης και των παρεμβολών που δημιουργούν στον D2D Rx. Στο πρώτο γράφημα η απώλεια των άκρων της παραδοσιακής σύνδεσης μοιάζει με τις

παρεμβολές που παράγει ο Tx στον σταθμό βάσης. Το τελευταίο διάγραμμα αναδεικνύει την απώλεια διαδρομής των παρεμβολών που δημιουργούνται σε σχέση με τις μεταξύ τους αποστάσεις. Το όριο που καθορίζει την επιλογή της κατάλληλης εξίσωσης, ανέρχεται στα 250m. Σε κοντινές αποστάσεις η απώλεια είναι ήδη αρκετά υψηλή και μάλιστα από τις πρώτες συνδέσεις υπερβαίνεται η μέση τιμή απώλειας. Στο διάγραμμα με μέγιστη απόσταση τα 300+ μέτρα η απώλεια ξεπερνάει τα 350 dB. Σε απώλειες άνω των 500dB το πρόγραμμα λογάριζε το επακόλουθο κέρδος ίσο με μηδέν. Είναι προφανές ότι αλλαγές στις αποστάσεις ή στην συχνότητα μεταφοράς προκαλούν και ανάλογες αλλαγές στις απώλειες διαδρομής.

#### 4.3.2 Path loss Δεύτερου Σεναρίου

Για το δεύτερο σενάριο η απώλεια μονοπατιού συγκρίνεται με δύο τιμές: i) την απώλεια διαδρομής όταν ο δίαυλος επικοινωνίας ανήκει στην LOS κατηγορία και ii) την απώλεια διαδρομής όταν ο δίαυλος επικοινωνίας χαρακτηρίζεται από την NLOS κατηγορία. Στο Σχήμα 24, παραδίδονται τα αποτελέσματα της απώλειας μονοπατιού για το σενάριο. Υπενθυμίζεται ότι η μέση απώλεια των διαύλων στα 100m δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τον τυχαίο παράγοντα σκίασης.



Σχήμα 24: Απώλειες διαδρομής του δεύτερου σεναρίου.

Το Σχήμα 24 περιέχει τις απώλειες μονοπατιού για τους D2D διαύλους (πάνω διάγραμμα) και για τις παρεμβολές που δημιουργούνται από συσκευές και CUE χρήστες προς τον D2D δέκτη (κάτω διάγραμμα). Με την παραδοχή που έχει γίνει για την λειτουργία του σεναρίου, δεν υπάρχουν δίαυλοι επικοινωνίας που να σχετίζονται με τον υπολειτουργικό σταθμό βάσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέση τιμή απώλειας για τις LOS συνδέσεις ισούται περίπου με  $PL_{LOS} \approx 110dB$  και κατά αντιστοιχία η μέση τιμή για τις NLOS είναι



$PL_{NLOS} \simeq 180dB$ . Για τις D2D συνδέσεις, διαπιστώνεται το γεγονός ότι ακόμα και για αποστάσεις  $d_{D2D} < 100m$ , οι απώλειες είναι αρκετά υψηλότερες σε σύγκριση με τις τιμές του πρώτου σεναρίου. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 22 το όριο των 120dB που ήταν η μέση τιμή για τους D2D διαύλους, σε αυτήν την περίπτωση υπερνικάται ήδη από τα 50m, αποδεικνύοντας τις εντονότερες απώλειες στην mmW ζώνη. Η εναλλαγή που σημειώνεται στο διάγραμμα σηματοδοτεί την μεταφορά από LOS συνδέσμων σε NLOS. Ακόμα, σε αντίθεση με τις παρεμβολές που αντιμετώπιζαν οι D2D δέκτες στο πρώτο σενάριο, εδώ οι απώλειες είναι εμφαντικά μικρότερες. Οι απώλειες περιορίζονται από το μοντέλο υπολογισμού απώλειας με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται. Επακόλουθο είναι τα κέρδη των D2D καναλιών αλλά και των παρεμβολών να είναι υψηλότερα.

## Κεφ V : Συμπεράσματα

Στα σύγχρονα 5G δίκτυα το D2D πρωτόκολλο έχει αποκτήσει πρωταγωνιστικό ρόλο, με τις επιδόσεις που αποφέρει, με την προσαρμοστικότητα του και με το ευρύ πλήθος εφαρμογών που μπορεί να υποστηρίξει. Η παρούσα εργασία έθεσε ως βασικό στόχο την ανάδειξη του D2D πρωτοκόλλου, εξαιτίας των λύσεων που παρουσιάζει για τα 5G συστήματα.

Στην εργασία παρουσιάστηκε εκτενώς το θεωρητικό πλαίσιο που σχετίζεται με το πρωτόκολλο. Αναδείχθηκαν οι εφαρμογές που χρησιμοποιεί, οι κατηγορίες των επικοινωνιών που προσφέρει και πως δύναται να συνδυαστεί με το καινοτόμο mmW φάσμα συχνοτήτων. Με αυτό το πρόσχημα η εργασία πρόβαλε τα βασικά χαρακτηριστικά της ζώνης συχνοτήτων καθώς και πως υπολογίζεται το κέρδος κεραίας όταν η κεραία είναι MIMO. Προκειμένου να αναδειχθεί η χρησιμότητα του πρωτοκόλλου, προτάθηκαν δύο σενάρια λειτουργίας. Το πρώτο αφορούσε την φυσιολογική λειτουργία ενός 5G συστήματος το οποίο περιέχει σταθμό βάσης, CUE και D2D χρήστες. Στο συγκεκριμένο σενάριο, οι D2D συνδέσεις συνυπολογίζονται στο σύστημα αλλά τα σήματα μεταδίδονται ανεξάρτητα από τον σταθμό βάσης, παρότι ελέγχονται οι ενεργειακές τιμές των D2D πομπών. Όπως ειπώθηκε το πρωτόκολλο αποφορτώνει τον σταθμό βάσης και μειώνει τον λανθάνοντα χρόνο καθώς οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς να είναι απαραίτητο να επικοινωνήσουν πρώτα με τον σταθμό βάσης, με επακόλουθο να αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος είναι που εξετάζεται καθόλη την διάρκεια των προσομοιώσεων.

Το δεύτερο σενάριο αναδεικνύει την δυνατότητα του συστήματος να λειτουργεί χωρίς την πλήρη υποστήριξη του σταθμού βάσης, στηριζόμενο στις D2D επικοινωνίες. Οι συσκευές επικοινωνούν από μόνες τους και η τελική χωρητικότητα που εκτιμάται είναι το αποκλειστικό αποτέλεσμα των D2D διαύλων επικοινωνίας. Κάθε σενάριο κατέγραψε την χωρητικότητα, τις ενέργειες κάθε D2D πομπού για κάθε εποχή εκτέλεσης και την απώλεια μονοπατιού, που είναι ουσιώδης παράγοντας των σεναρίων. Ακόμα, κατοχυρώθηκε για κάθε σενάριο ο αριθμός των επιτυχημένων συνδέσεων που πραγματοποιούνται.

Το κύριο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι πως οι D2D επικοινωνίες συμβάλλουν θετικά στην συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Η υπόθεση αποδεικνύεται και από τα δύο σενάρια χρήσης. Για το πρώτο σενάριο χωρίς την αξιοποίηση του αλγορίθμου ταιριάσματος Gale-Shapley, ο ρυθμός ροής είναι σε επιθυμητά επίπεδα επειδή οι D2D δίαυλοι ευνοούνται από τις κοντινές αποστάσεις και από τη μικρότερη απώλεια μονοπατιού σαν συνέπεια των μοντέλων απώλειας που χρησιμοποιήθηκαν. Η διαφορά στα δύο σενάρια χρήσης του πρώτου σεναρίου έγκειται στο γεγονός πως στην περίπτωση που αξιοποιείται ο αλγόριθμος Gale-Shapley, ο D2D πομπός επηρεάζεται από την συμπεριφορά και την σχέση του με τους CUE χρήστες και επιλέγεται με συγκεκριμένο CUE χρήστη, διότι το ζευγάρι θα παράξει την υψηλότερη συνολική χωρητικότητα. Τα αποτελέσματα αυτού του συστήματος

παρουσίασαν έναν μειωμένο γενικό ρυθμό ροής, ωστόσο με περισσότερη ευστάθεια για όλους τους τρόπους κατανομής ενέργειας. Αντιθέτως όταν δεν αξιοποιείται ο αλγόριθμος στο πρώτο σενάριο, ο ρυθμός ροής είναι εμφαντικά υψηλότερος, αλλά το ίδιο σημειώνεται και για τις διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων.

Το δεύτερο σενάριο αποδεικνύει την σημασία των D2D συσκευών. Υπό αυτές τις συνθήκες, η συνολική χωρητικότητα του δικτύου προσφέρεται εξ' ολοκλήρου από τις D2D επικοινωνίες. Με τις τελικές τιμές να πλησιάζουν την απόδοση του συστήματος του πρώτου σεναρίου, αποφαίνεται η δυναμική του πρωτοκόλλου. Επίσης, με τις D2D επικοινωνίες εξυπηρετούνται κατά μέσο όρο 21 χρήστες από τους 25 του πρώτου σεναρίου (μην συμπεριλαμβάνοντας τους CUE χρήστες). Αυτό σημαίνει πως το πρωτόκολλο μπορεί να υποστηρίξει μικρής κλίμακας δίκτυο ακόμα και σε συνθήκες που ο κεντρικός σταθμός βάσης της κυψέλης υπολειτουργεί.

Συνοψίζοντας, η χωρητικότητα που παράγεται στα συστήματα των δύο σεναρίων είναι αρκετά ικανοποιητική και είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες των χρηστών. Οι τέσσερις τρόποι κατανομής ενέργειας που παρουσιάστηκαν, ευνοούνται από διαφορετικές παραμέτρους και για όλους παρατηρήθηκαν αδυναμίες ως προς τα αποτελέσματα που τους αποδίδονται. Οι τέσσερις μηχανισμοί συνδυάστηκαν σε πειραματικό επίπεδο με τον αλγόριθμο Gale-Shapley, προκειμένου να αποδειχθεί αν όλοι οι αλγόριθμοι που συζητούνται, ωφελούνται από τέτοιου τύπου μεθόδους. Τα τελικά αποτελέσματα αφήνουν ανοιχτά ερωτήματα για τους τρεις πρώτους τρόπους κατανομής όμως το σίγουρο είναι πως ο Thr PA ευνοείται εξαιρετικά από την διαδικασία ταιριάσματος των συσκευών. Το δεύτερο σύστημα παρουσιάζει τις δυνατότητες του D2D πρωτοκόλλου σε δυσμενείς συνθήκες με αρκετά ωφέλιμα αποτελέσματα. Τόσο η χωρητικότητα, όσο και το πλήθος των συσκευών που εξυπηρετούνται είναι θετικές παρατηρήσεις ενώ, η δημιουργία ενός δικτύου που στηρίζεται εντελώς στις D2D επικοινωνίες θα γίνει η αφορμή για μελλοντικές έρευνες.

Οι δυνατότητες του πρωτοκόλλου δεν έχουν αποκαλυφθεί εντελώς για την ώρα. Η επιστημονική κοινότητα διερευνά τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας στις συσκευές, ζήτημα που χρήζει αντιμετώπισης, ειδικά στη σύγχρονη ενεργειακή κρίση. Όμως ο συγγραφέας της παρούσας πτυχιακής, θεωρεί πως σύντομα η κοινότητα θα στραφεί στο νεοσύστατο 6G που ήδη αρχίζει και διαβουλεύεται, ενώ παράλληλα θα διερευνηθούν οι πιθανοί συνδυασμοί τεχνολογιών όπως MIMO, Beamforming με το D2D πρωτόκολλο για συστήματα οχημάτων όπως UAVs και αυτοκίνητα, και για τους κλάδους υγείας, που με αργά βήματα αρχίζουν να εκμεταλλεύονται τις ικανότητες των αισθητήρων και των μικροσκοπικών συσκευών.

## Παράρτημα Α'

Στο παράρτημα παρουσιάζεται το κεντρικό αρχείο που οργανώνει όλες τις συναρτήσεις και εκτελεί το πρόγραμμα. Το αρχείο ονομάζεται *simulation.m*.

```
function [simul_1,simul_2,simul_3,simul_4] =  
simulation(num_rep,option,power_alloc_opt,BW)  
  
    %This function represents the main function for the execution of every  
    %simulation.  
  
    %Parameters to run a standalone simulation manually  
    %num_rep = ~;  
    %option = ~;  
    %power_alloc_opt = ~;  
    %BW = ~;  
  
    %Basic System Parameters  
    MC = 35; %Monte Carlo Repetitions  
    num_intf = 20; %number of CUE devices to interfere  
    num_d2d = 30; %Number of points to be created. Not used points.  
  
    %Power related parameters  
    d2d_minPower = 10^(20/10-3); %Minimum power for transmission is a little less  
    than 0.1 W  
    d2d_maxPower = 10^(24/10-3); %Maximum power for transmission given by korean  
    article  
    Ptot = 10^(35/10-3); %Total System power for D2D  
    PC = 10^(34/10-3); %Total System power for interferers  
  
    %Calculation Matrices  
    thr_vector = zeros(1,50); %Throughput for each repetition.  
    thr_port = zeros(1,10);  
    power_vector = zeros(50,25); %Power allocated to each pair  
    D2D_pairs_matched = zeros(1,50);  
  
    for i = 1:num_rep  
  
        d2d_pairs = 0; %Hold the number of D2D pairs created every time.  
  
        if option == 1 %Normal Execution of the System.  
            R = 250; %Cell's Radius  
            No = 10^((-174 + 10*log(BW) + 10)/10-3); %Noise calculation formula  
            d2d_rx = user_distribution(num_d2d,R); %Create the d2d_rx coordinates  
  
        elseif option == 2 %Abnormal execution with no BS  
            R = 200; %Smaller Radius because mmW can hold up to 200m
```

```

communications.
    No = 10^((-174 + 10*log(BW) + 10)/10-3); %Same noise formula as above.
    d2d_rx = user_distribution(num_d2d,R); %Create the d2d_rx coordinates
    %Create Blockages
    blocklen = 50; blockwid = 55;
    num_blockages = poissrnd(5e-5 * (4*R)^2); %~35
    [coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4] =
rand_blockage(blocklen,blockwid,num_blockages,R);
end

for N = 1:MC %Start every unrelated repetition.
    %X = ['|Repetition = ',num2str(i),' | MC = ',num2str(N),' | Simulation
= ',num2str(power_alloc_opt)];
    %display(X);

    if option == 1 %First Environment for simulations

        %Create the points of the cell (D2D TxS and CUE)
        d2d_tx = user_distribution(num_d2d,R);
        intfS = user_distribution(num_intf,R);

        %Plot the cell before dist.m
        %plot_cell(1,d2d_rx,d2d_tx,intfS,R,0,0,0,0);

        %Get the minimum distance pairs between D2D RxS and TxS.
        %Number of usable pairs is set to 25.
        [d2d_rx,d2d_tx,num_d2d] = rec_dist(d2d_tx,d2d_rx,num_d2d);

        %Plot the cell after dist.m
        %plot_cell(1,d2d_rx,d2d_tx,intfS,R,0,0,0,0);

        %Get the distances between all the points of the network.
        [rx_tx_d,tx_bs_d,intf_bs_d,d2d_intf_d] =
distance(option,num_d2d,num_intf,d2d_rx,d2d_tx,intfS);

        %Calculate the path loss for each connection based on distance and
frequency (microwave band - 2GHz licenced)
        [pl_d2d,pl_tx_bs,pl_intf_bs,pl_d2d_intf] =
pathloss(option,num_d2d,num_intf,rx_tx_d,tx_bs_d,intf_bs_d,d2d_intf_d);

        %Get the total value of pairs matched.
        d2d_pairs = d2d_pairs + num_d2d;

        %Calculate the channel Coefficient based on the path loss
        %values and then that channel coefficient is returned as channel
gain.

        h_d2d_link = channel_coefficient(pl_d2d,1,num_d2d);
        h_tx_bs = channel_coefficient(pl_tx_bs,1,num_d2d);
        h_intf_bs = channel_coefficient(pl_intf_bs,1,num_intf);
        h_d2d_intf = channel_coefficient(pl_d2d_intf,num_d2d,num_intf);

```

```

%POWER ALLOCATION SCHEMES
power_d2d = zeros(num_d2d,num_intf);
power_intf = zeros(num_d2d,num_intf);

switch power_alloc_opt
case 1 %First Option - Equal Allocation
    for k = 1:num_d2d
        for j = 1:num_intf
            power_d2d(k,j) = Ptot/num_d2d;
            power_intf(k,j) = PC/num_intf;
        end
    end
    %Relations based on channel coefficients to find the
points for D2D and CUE to allow communications
    rho =
rho_mat(num_d2d,num_intf,h_d2d_link,h_tx_bs,h_intf_bs,h_d2d_intf,No);

case 2 %Second Option - Random Allocation
    rand_source = random_value(num_d2d); %Random factor
    rand_intf_value = random_value(num_intf);
    for k = 1:num_d2d
        for j = 1:num_intf
            power_d2d(k,j) = rand_source(k)*Ptot;
            power_intf(k,j) = rand_intf_value(j)*PC;
        end
    end
    rho =
rho_mat(num_d2d,num_intf,h_d2d_link,h_tx_bs,h_intf_bs,h_d2d_intf,No);

case 3 %Third Option - Allocation based on path loss.

    temp_sum = 0;
    temp_intf_sum = 0;

    %Calculate the total path loss for d2d and
interferers.

    for k = 1:num_d2d
        temp_sum = temp_sum + pl_d2d(k);
    end

    for j = 1:num_intf
        temp_intf_sum = temp_intf_sum + pl_intf_bs(j);
    end

    for k = 1:num_d2d

```

```

        for j = 1:num_intf
            power_d2d(k,j) = Ptot*(p1_d2d(k)/temp_sum);
            power_intf(k,j) = PC*(p1_intf_bs(j)/temp_intf_sum);
        end
    end

    rho =
rho_mat(num_d2d,num_intf,h_d2d_link,h_tx_bs,h_intf_bs,h_d2d_intf,No);

    case 4 %Fourth Option - Allocation based on throughput

        [p_d,p_c,rho] =
admiss_control(num_d2d,num_intf,h_d2d_link,h_tx_bs,h_intf_bs,h_d2d_intf,No,d2d_maxP
ower,BW);

        for k = 1:num_d2d
            for j = 1:num_intf
                power_d2d(k,j) = p_d(j,k);
                power_intf(k,j) = p_c(j,k);
            end
        end

        otherwise
            fprintf("Wrong input for simulations. Use the
default options to run the simulations.")
            quit;
        end

        %Check the power values to be between the max and minimum predefined

        for k = 1:num_d2d
            for j = 1:num_intf
                if power_d2d(k,j) > d2d_maxPower
                    power_d2d(k,j) = d2d_maxPower;
                elseif power_d2d(k,j) < d2d_minPower
                    power_d2d(k,j) = d2d_minPower;
                end
            end
        end

        for k = 1:num_d2d
            power_vector(i,k) = power_d2d(k,1) + power_vector(i,k);
        end

        %Get the sum of interference for each usable SINR metric when
not all devices interfere with the receiver, due to lack of

        %power, distance and pathloss. This effect could be random.

        sum_bs = 0;
        for k = 1:num_d2d
            for j = 1:num_intf

```

```

                                sum_bs = sum_bs +
(rho(j,k)*power_d2d(k,j)*h_tx_bs(k));
                                end
                                end

                                interference = zeros(1,num_d2d);
                                for k = 1:num_d2d
                                    for j = 1:num_intf
                                        interference(k) = interference(k) +
(rho(j,k)*power_intf(k,j)*h_d2d_intf(k,j));
                                    end
                                end

                                if BW == 0.1
                                    %Calculate the total throughput for the repetition without
                                    Gale-Shapley Matching
                                    thr =
                                    scrip(num_d2d,num_intf,power_d2d,power_intf,rho,h_d2d_link,h_intf_bs,No,sum_bs,interference,BW);
                                elseif BW == 0.5
                                    %Calculate the total throughput for the repetition with
                                    Gale-Shapley Matching
                                    thr =
                                    pl_thr_sc(num_d2d,num_intf,power_d2d,power_intf,rho,h_d2d_link,h_intf_bs,No,d2d_max
                                    Power,sum_bs,interference,BW);
                                end

                                thr_vector(1,i) = thr + thr_vector(1,i);

                                elseif option ==2 %Second Scenario

                                    %Create the points for the system without base station.
                                    d2d_tx = user_distribution(num_d2d,R);
                                    intfs = user_distribution(num_intf,R);

                                    %Plot the cell before excluding points

                                %plot_cell(2,d2d_rx,d2d_tx,intfs,R,coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4);

                                %Get the minimum distance pairs between D2D Rxs and TxS.
                                %Number of usable pairs is set to 25.

                                [d2d_rx,d2d_tx,num_d2d] = rec_dist(d2d_tx,d2d_rx,num_d2d);

                                %Matrices to include all the values related to the D2D and CUE.

                                d2d_rx_full = zeros(num_d2d,2);
                                d2d_tx_full = zeros(num_d2d,4);

```



```

intfs_full = zeros(num_intf,3);

%Plot the cell before excluding points

%plot_cell(2,d2d_rx,d2d_tx,intfs,R,coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4);

%Check if Rx user is indoor and if he is then don't include them
%into the simulation. Do the same for Tx. MMW cannot go
%through buildings.
for k = 1:num_d2d
    outdoor =
findoutdooruser(1,d2d_rx(k,1),d2d_rx(k,2),coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4,d
2d_rx);

    outdoor_tx =
findoutdooruser(1,d2d_tx(k,1),d2d_tx(k,2),coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4,d
2d_rx);

    if (outdoor == 1) && (outdoor_tx == 1)
        d2d_rx_full(k,1) = d2d_rx(k,1);
        d2d_rx_full(k,2) = d2d_rx(k,2);
        d2d_tx_full(k,1) = d2d_tx(k,1);
        d2d_tx_full(k,2) = d2d_tx(k,2);

        %Check if the link between the points with minimum
        %distances, is blocked by an obstacle. Conclude if that
        %link is NLOS/LOS
        isBlocked =
findoutdooruser(2,d2d_tx(k,1),d2d_tx(k,2),coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4,d
2d_rx);

        if isBlocked
            d2d_tx_full(k,4) = 1; %NLOS
        else
            d2d_tx_full(k,4) = 2; %LOS
        end
    else
        continue;
    end
end

idx = find(d2d_tx_full(:,4) == 0); %Exclude all not usable points.
d2d_tx_full(idx,:) = [];
d2d_rx_full(idx,:) = [];

[new_N,~] = size(d2d_tx_full);

if new_N <= 10 %For better conclusions.
    continue;
end

```

```

        %Check if the interferer is indoor and if he is exclude them
        %from the simulation.
        for j = 1:num_intf
            outdoor =
findoutdooruser(1,intfs(j,1),intfs(j,2),coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4,d2d
_rx_full);

            if ~outdoor
                %If the interferer is not outdoor then it cannot
                %generate any interference.
                continue;
            else
                intfs_full(j,1) = intfs(j,1);
                intfs_full(j,2) = intfs(j,2);

                %Check to see if the hypothetical link of the interferer
and every rx is blocked.
                isBlocked =
findoutdooruser(2,intfs(j,1),intfs(j,2),coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coordB1P4,d2d
_rx_full);

                if isBlocked
                    intfs_full(j,3) = 1; %NLOS
                else
                    intfs_full(j,3) = 2; %LOS
                end
            end
        end

        %Delete every point which was skipped and get the new length
        intfs_full((intfs_full(:,3)~=0),:) = [];
        n_intfs = length(intfs_full);

        %Plot the cell after excluding points

%plot_cell(2,d2d_rx_full,d2d_tx_full,intfs_full,R,coordB1P1,coordB1P2,coordB1P3,coo
rdB1P4);

        %Get the distances between the points of the system.
        [rx_tx_d,~,intf_rx_d,~] =
distance(option,new_N,n_intfs,d2d_rx_full,d2d_tx_full,intfs_full);

        d2d_tx_full(:,3) = rx_tx_d(:);
        d2d_pairs = d2d_pairs + new_N;

        %Calculate differently the path loss between the points based on
distance. Not using frequency for this metric.
        [pl_d2d,~,pl_intf_rx,~] =
pathloss(option,new_N,n_intfs,d2d_tx_full,d2d_rx_full,intfs_full,intf_rx_d);

```

```

and Rxs
    %Channel Coefficient for D2D link and for the link between interferer
    h_d2d_link = channel_coefficient(pl_d2d,1,new_N);
    h_intf_rx = channel_coefficient(pl_intf_rx,new_N,n_intfs);

    %Effective Antenna Gain at the receiver from D2D link.
    G = db2pow(10); %10dBi
    G_d2d = zeros(1,new_N);
    G_d2d(:) = G*G; %Assume that the angle of transmission sees the
    receiver. Therefore the total gain of the antennas is the main lobe

    %Effective Antenna Gain at the receiver from interferers - Rx link
    G_intf = zeros(new_N,n_intfs);

    %Random angles of transmission for interferers.
    phi_intf = 2*pi*rand(1,n_intfs);

    for k = 1:new_N
        for j = 1:n_intfs
            %Get the antenna gain based on the angle of transmission
            and the location of the interferer.
            G_intf(k,j) =
            ant_gain(intfs_full(j,1),intfs_full(j,2),phi_intf(j),d2d_rx_full(k,:));
        end
    end

    %POWER ALLOCATION SCHEMES
    power_d2d = zeros(new_N,n_intfs);
    power_intf = zeros(new_N,n_intfs);
    %power_intf(:, :) = PC/n_intfs;

    switch power_alloc_opt
        case 1 %First Option - Equal Allocation
            for k = 1:new_N
                for j = 1:n_intfs
                    power_d2d(k,j) = Ptot/new_N;
                    power_intf(k,j) = PC/n_intfs;
                end
            end
        case 2 %Second Option - Random Allocation
            rand_source = random_value(new_N);
            rand_intf_value = random_value(n_intfs);
            for k = 1:new_N
                for j = 1:n_intfs
                    power_d2d(k,j) = Ptot * rand_source(k);
                    power_intf(k,j) = PC * rand_intf_value(j);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    case 3 %Third Option - Allocation based on path loss.
        temp_sum = 0;
        temp_intf_sum = 0;

        %Calculate the total path loss for d2d and interferers.
        for k = 1:new_N
            temp_sum = temp_sum + pl_d2d(k);
        end
        for k = 1:new_N
            for j = 1:n_intfs
                temp_intf_sum = temp_intf_sum + pl_intf_rx(k,j);
            end
        end

        for k = 1:new_N
            for j = 1:n_intfs
                power_d2d(k,j) = Ptot*(pl_d2d(k)/temp_sum);
                power_intf(k,j) =
PC*(pl_intf_rx(k,j)/temp_intf_sum);
            end
        end
        otherwise
            fprintf("Wrong input for simulations. Use the default
options to run the simulatios.");
            quit
        end
        for k = 1:new_N
            power_vector(i,k) = power_d2d(k,1) + power_vector(i,k);
        end

        %Calculate the total throughput of the system which is based on the
SINR of Rxs. No matching is allowed because there is no BS

        [thr,~] =
thr_mmw(new_N,n_intfs,power_d2d,power_intf,pl_d2d,pl_intf_rx,h_d2d_link,h_intf_rx,G
_d2d,G_intf,No,BW);

        thr_vector(1,i) = thr + thr_vector(1,i);
    else
        fprintf("Wrong input for simulations. Use the default options
to run the simulatios.");
        quit
    end
    end
    D2D_pairs_matched(i) = d2d_pairs/MC;
end

%Mean Value of throughput

```

```

thr_vector = thr_vector/MC;
simul_1 = thr_vector;

%Gather the values into one value.
thr_port(1) = mean(thr_vector(1:5));
thr_port(2) = mean(thr_vector(6:10));
thr_port(3) = mean(thr_vector(11:15));
thr_port(4) = mean(thr_vector(16:20));
thr_port(5) = mean(thr_vector(21:25));
thr_port(6) = mean(thr_vector(26:30));
thr_port(7) = mean(thr_vector(31:35));
thr_port(8) = mean(thr_vector(36:40));
thr_port(9) = mean(thr_vector(41:45));
thr_port(10) = mean(thr_vector(46:50));
simul_2 = thr_port;

%Mean value of D2D pairs matched.
temp = zeros(1,10);
D2D_pairs_matched = fix(D2D_pairs_matched);
temp(1) = mean(D2D_pairs_matched(1:5));
temp(2) = mean(D2D_pairs_matched(6:10));
temp(3) = mean(D2D_pairs_matched(11:15));
temp(4) = mean(D2D_pairs_matched(16:20));
temp(5) = mean(D2D_pairs_matched(21:25));
temp(6) = mean(D2D_pairs_matched(26:30));
temp(7) = mean(D2D_pairs_matched(31:35));
temp(8) = mean(D2D_pairs_matched(36:40));
temp(9) = mean(D2D_pairs_matched(41:45));
temp(10) = mean(D2D_pairs_matched(46:50));
simul_3 = temp;

%Mean Value of power
power_vector= power_vector/MC;
simul_4 = power_vector;

```

**end**

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Jameel, F., Hamid, Z., Jabeen, F., Zeadally, S., & Javed, M. A. (2018). A survey of device-to-device communications: Research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3), 2133-2168.
- [2] Jack, I. (2021, September 10). *What is a Millimeter Wave? | What is 5g mmWave?* weBoost. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.weboost.com/blog/what-is-a-millimeter-wave>
- [3] Osman, E. A. M. (2018). Device discovery methods in D2D communications for 5G communications system. *Tallinn University of Technology*.
- [4] Ibrahim, R. (2019). *Use of Device-to-Device communications for efficient cellular networks* (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).
- [5] Bahadori, N., Namvar, N., Kelley, B., & Homaifar, A. (2018, April). Device-to-device communications in the millimeter wave band: A novel distributed mechanism. In *2018 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Al-Namari, M. A., Mansoor, A. M., & Idris, M. Y. I. (2017). A brief survey on 5G wireless mobile network. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(11).
- [7] Adnan, M. H., & Ahmad Zukarnain, Z. (2020). Device-to-device communication in 5G environment: Issues, solutions, and challenges. *Symmetry*, 12(11), 1762.
- [8] da Silva, J. M. B., Fodor, G., & Maciel, T. F. (2014, December). Performance analysis of network-assisted two-hop D2D communications. In *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (pp. 1050-1056). IEEE.
- [9] Arribas, E., & Mancuso, V. (2020). Millimeter-Wave Meets D2D: A Survey.
- [10] Barua, S. (2018). *D2D communications in 5G mobile cellular networks: we propose and validate a novel approach to mobility management* (Doctoral dissertation).
- [11] Bulashenko, A., Piltyay, S., & Demchenko, I. (2020, October). Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G networks. In *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 537-542). IEEE.
- [12] Raut, Prasanna. (2020). Re: How i can code the channel gain in the following equation using MATLAB?. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/post/How\\_i\\_can\\_code\\_the\\_channel\\_gain\\_in\\_the\\_following\\_equation\\_using\\_MATLAB/See1350221184906850f57d6/citation/download](https://www.researchgate.net/post/How_i_can_code_the_channel_gain_in_the_following_equation_using_MATLAB/See1350221184906850f57d6/citation/download).
- [13] Wang, R., Liu, J., Zhang, G., Huang, S., & Yuan, M. (2017). Energy efficient power allocation for relay-aided D2D communications in 5G networks. *China Communications*, 14(6), 54-64.
- [14] Kar, U. N., & Sanyal, D. K. (2018). An overview of device-to-device communication in cellular networks. *ICT express*, 4(4), 203-208.
- [15] Rahman, M. A., Lee, Y., & Koo, I. (2018). Energy-efficient power allocation and relay selection schemes for relay-assisted d2d communications in 5g wireless networks. *Sensors*, 18(9), 2865.
- [16] Lien, S. Y., Deng, D. J., Lin, C. C., Tsai, H. L., Chen, T., Guo, C., & Cheng, S. M. (2020). 3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X. *IEEE Access*, 8, 35368-35382.
- [17] techopedia. (n.d.). *What is the Industrial Scientific and Medical Radio Band (ISM Band)? - Definition from Techopedia*. Techopedia. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.techopedia.com/definition/27785/industrial-scientific-and-medical-radio-band-ism-band>

- [18] Janecek, A., Valerio, D., Hummel, K. A., Ricciato, F., & Hlavacs, H. (2015). The cellular network as a sensor: From mobile phone data to real-time road traffic monitoring. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 16(5), 2551-2572.
- [19] Palomino Lozano, G. (2020). An open source project for learning 5G waveforms at an electrical engineering graduate level.
- [20] Gkonis, P. K., Trakadas, P. T., & Kaklamani, D. I. (2020). A comprehensive study on simulation techniques for 5g networks: State of the art results, analysis, and future challenges. *Electronics*, 9(3), 468.
- [21] DeTomas, S. (2018, October 31). *Understanding 5G New Radio Bandwidth Parts*. Keysight Blogs. Retrieved September 11, 2022, from [https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2018/10/31/understanding\\_5gnew-ran.html](https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2018/10/31/understanding_5gnew-ran.html)
- [22] Hou, G., & Chen, L. (2020). D2D communication mode selection and resource allocation in 5G wireless networks. *Computer Communications*, 155, 244-251.
- [23] Karjalainen, J., Nekovee, M., Benn, H., Kim, W., Park, J., & Sungsoo, H. (2014, June). Challenges and opportunities of mm-wave communication in 5G networks. In *2014 9th international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications (CROWNCOM)* (pp. 372-376). IEEE.
- [24] Qiao, J., Shen, X. S., Mark, J. W., Shen, Q., He, Y., & Lei, L. (2015). Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, 53(1), 209-215.
- [25] Jayakumar, S. (2021). A review on resource allocation techniques in D2D communication for 5G and B5G technology. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14(1), 243-269.
- [26] Selmi, S., & Bouallegue, R. (2019, October). Interference and power management algorithm for D2D communications underlay 5G cellular network. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)* (pp. 1-8). IEEE.
- [27] Shakir, M. Z., Ismail, M., Wang, X., Qaraqe, K. A., & Serpedin, E. (2017). From D2D to Ds2D: prolonging the battery life of mobile devices via Ds2D communications. *IEEE Wireless Communications*, 24(4), 55-63.
- [28] Ganesan, K., Mallick, P. B., & Löhr, J. (2021). NR sidelink enhancement in 3GPP release 17. *Journal of ICT Standardization*, 79-90.
- [29] Lee, W. C. (1990). Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 39(3), 187-189.
- [30] Ahmed, S., Rashid, M., Alam, F., & Fakhrudin, B. (2019, November). A disaster response framework based on IoT and D2D communication under 5G network technology. In *2019 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [31] Rathi, R., & Gupta, N. (2017, December). A review of D2D communication with game-theoretic resource allocation models. In *2017 International Conference on Next Generation Computing and Information Systems (ICNGCIS)* (pp. 142-146). IEEE.
- [32] Randhava, K. S., Roslee, M., Nmenme, P. U., & Yusoff, Z. (2021, June). Radio Resource Allocation for Interference Management in Device to Device (D2D) 5G Networks. In *2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [33] Rebato, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., Boccardi, F., & Zorzi, M. (2016, May). Understanding noise and interference regimes in 5G millimeter-wave cellular networks. In *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference* (pp. 1-5). VDE.

- [34] Fan, H., Kilari, A., Vemuri, K., Daffron, I., Wang, J., & Ramamurthy, V. (2019). Indoor location for emergency responders using LTE D2D communications waveform. In *IPIN (Short Papers/Work-in-Progress Papers)* (pp. 347-354).
- [35] 5G Americas. (n.d.). *Understanding Millimeter Wave Spectrum for 5G Networks*. 5G Americas. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.5gamericas.org/understanding-millimeter-wave-spectrum-for-5g-networks/>
- [36] Akdeniz, M. R., Liu, Y., Samimi, M. K., Sun, S., Rangan, S., Rappaport, T. S., & Erkip, E. (2014). Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation. *IEEE journal on selected areas in communications*, 32(6), 1164-1179.
- [37] H. Shokri-Ghadikolaei and C. Fischione, "The Transitional Behavior of Interference in Millimeter Wave Networks and Its Impact on Medium Access Control," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 2,
- [38] ISCO International. (n.d.). *What is SINR (Signal to Interference & Noise Ratio)?* ISCO International. Retrieved September 11, 2022, from <https://iscointl.com/sinr-optimization/>
- [39] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423.
- [40] TechTarget Contributor. (n.d.). *What is omnidirectional antenna? - Definition from WhatIs.com*. TechTarget. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.techtarget.com/whatis/definition/omnidirectional-antenna>
- [41] Wikiwand. (n.d.). *Antenna types*. Wikiwand. Retrieved September 11, 2022, from [https://www.wikiwand.com/en/Antenna\\_types](https://www.wikiwand.com/en/Antenna_types)
- [42] Friis, H. T. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5), 254-256.
- [43] Nguyen, T. N., Nguyen, V. S., Nguyen, H. G., Tu, L. T., Van Chien, T., & Nguyen, T. H. (2022). On the Performance of Underlay Device-to-Device Communications. *Sensors*, 22(4), 1456.
- [44] MacCartney, G. R., Zhang, J., Nie, S., & Rappaport, T. S. (2013, December). Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells. In *2013 IEEE global communications conference (GLOBECOM)* (pp. 3948-3953). IEEE.
- [45] Liang, L., Li, G. Y., & Xu, W. (2017). Resource allocation for D2D-enabled vehicular communications. *IEEE Transactions on Communications*, 65(7), 3186-3197.
- [46] Khuntia, P., & Hazra, R. (2021). An efficient channel and power allocation scheme for D2D enabled cellular communication system: An IoT application. *IEEE Sensors Journal*, 21(22), 25340-25351.
- [47] Hong, S. G., Park, J., & Bahk, S. (2020). Subchannel and power allocation for D2D communication in mmWave cellular networks. *Journal of Communications and Networks*, 22(2), 118-129.
- [48] Saraereh, O. A., Alsaraira, A., Khan, I., & Uthansakul, P. (2019). An efficient resource allocation algorithm for OFDM-based NOMA in 5G systems. *Electronics*, 8(12), 1399.
- [49] Huo, L., & Jiang, D. (2019). Stackelberg game-based energy-efficient resource allocation for 5G cellular networks. *Telecommunication Systems*, 72(3), 377-388.
- [50] Ren, H., Pan, C., Deng, Y., Elkashlan, M., & Nallanathan, A. (2019, May). Resource allocation for URLLC in 5G mission-critical IoT networks. In *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [51] Kamal, M. A., Raza, H. W., Alam, M. M., Su'ud, M. M., & Sajak, A. B. A. B. (2021). Resource allocation schemes for 5G network: A systematic review. *Sensors*, 21(19), 6588.



- [52] Lee, S. H., Lee, Y., & Shin, J. (2016, 2016). Resource Allocation using Matching Theory for Device-to-Device Underlay Communication. *CEIC*, 4. Retrieved September 11, 2022, from <https://github.com/dreamian/D2DCommSimul>
- [53] MathWorks. (n.d.). *Add white Gaussian noise to signal - MATLAB awgn*. MathWorks. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/awgn.html>
- [54] Giordani, M., Shimizu, T., Zanella, A., Higuchi, T., Altintas, O., & Zorzi, M. (2019, September). Path loss models for V2V mmWave communication: Performance evaluation and open challenges. In *2019 IEEE 2nd Connected and Automated Vehicles Symposium (CAVS)* (pp. 1-5). IEEE.
- [55] Devopedia. 2021. "5G UE Data Rate." Version 4, March 24. Accessed 2022-06-15. <https://devopedia.org/5g-ue-data-rate>
- [56] Cheng, P., Deng, L., Yu, H., Xu, Y., & Wang, H. (2012, April). Resource allocation for cognitive networks with D2D communication: An evolutionary approach. In *2012 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)* (pp. 2671-2676). IEEE.
- [57] Miranda, J., Abrishambaf, R., Gomes, T., Gonçalves, P., Cabral, J., Tavares, A., & Monteiro, J. (2013, July). Path loss exponent analysis in wireless sensor networks: Experimental evaluation. In *2013 11th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN)* (pp. 54-58). IEEE.
- [58] Lam, T. (2016, June). Fading model for wireless 5G mmW transmission. In *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)* (pp. 2067-2068). IEEE.
- [59] Huo, L., & Jiang, D. (2019). Stackelberg game-based energy-efficient resource allocation for 5G cellular networks. *Telecommunication Systems*, 72(3), 377-388.
- [60] RF Engineering. (2019, March 22). *Basic Information on Isotropic and Omni Antennas - RFEQ*. RF Engineering. Retrieved September 11, 2022, from <https://rfeq.com/post/isotropic-omni-antennas/>
- [61] Britannica. (2022, August 12). *noise | acoustics*. Britannica. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.britannica.com/science/noise-acoustics>
- [62] Electronics Notes. (n.d.). *What is Noise Figure: Calculation Measurement » Electronics Notes*. Electronics Notes. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/radio-receiver-sensitivity/what-is-noise-figure-measurement-calculation-formula.php>
- [63] Nguyen, T. H., Jung, W. S., Tu, L. T., Van Chien, T., Yoo, D., & Ro, S. (2020). Performance analysis and optimization of the coverage probability in dual hop LoRa networks with different fading channels. *IEEE Access*, 8, 107087-107102.
- [64] International Strategy for Disaster Reduction. (n.d.). *Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters - full text*. PreventionWeb.net. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.preventionweb.net/publication/hyogo-framework-action-2005-2015-building-resilience-nations-and-communities-disasters>
- [65] J.Z. Moghaddam, M. Usman and F. Granelli, "A Device-to-Device Communication-Based Disaster Response Network", *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, Vol. 4, No. 2, pp. 288-298, June 2018
- [66] Cheng, E. (2022, June 20). *The impact of 5G on location technology: what's real and what's hype?* Pointr. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.pointr.tech/blog/5g-indoor-positioning>
- [67] Vadapalli, P. (n.d.). *MATLAB Vs Python: Difference Between Matlab & Python [2022]*. upGrad. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.upgrad.com/blog/matlab-vs-python/>

- [68] Engati. (n.d.). *Euclidean distance*. Engati. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.engati.com/glossary/euclidean-distance>
- [69] Guizani, Z., & Hamdi, N. (2016, June). mmWave E-Band D2D communications for 5G-Underlay networks: Effect of power allocation on D2D and cellular users throughputs. In *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)* (pp. 114-118). IEEE.
- [70] Alzoubi, K. H., Roslee, M. B., & Elgamati, M. A. A. (2019, November). Interference management of D2D communication in 5G cellular network. In *2019 Symposium on Future Telecommunication Technologies (SOFTT)* (Vol. 1, pp. 1-7). IEEE.
- [71] Qamar, F., Hindia, M. N., Dimyati, K., Noordin, K. A., Majed, M. B., Abd Rahman, T., & Amiri, I. S. (2019). Investigation of future 5G-IoT millimeter-wave network performance at 38 GHz for urban microcell outdoor environment. *Electronics*, 8(5), 495.
- [72] Norman, T. (2014). *Integrated Security Systems Design (Second Edition)*. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/antenna-gain>
- [73] Kenton, W. (2022, August 11). *Monte Carlo Simulation: History, How it Works, and 4 Key Steps*. Investopedia. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.investopedia.com/terms/m/montecarlosimulation.asp>
- [74] Behnke, K. (2019, March 26). *Is this anything to worry about? 5G health issues explained*. Grandmetric. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.grandmetric.com/2019/03/26/5g-health-issues-explained/>
- [75] *Does wave interference happen only to same frequency waves?* (2014, December 22). Physics Stack Exchange. Retrieved September 11, 2022, from <https://physics.stackexchange.com/questions/154525/does-wave-interference-happen-only-to-same-frequency-waves>
- [76] DNSstuff. (2019, September 19). *Bandwidth and Throughput in Networking: Guide and Tools*. DNSstuff. Retrieved September 11, 2022, from <https://www.dnsstuff.com/network-throughput-bandwidth>
- [77] Future integrated communication network architectures enabling heterogeneous service provision-Scientific Figure on ResearchGate. [accessed 11 Sep, 2022] Available from: [https://www.researchgate.net/figure/5G-use-case-families-source-ITU-R-2015\\_fig1\\_327439779](https://www.researchgate.net/figure/5G-use-case-families-source-ITU-R-2015_fig1_327439779)
- [78] Ivezic, M. (n.d.). *Introduction to 3GPP and 3GPP 5G Releases 15, 16 and 17*. 5G Security by Marin Ivezic. Retrieved September 11, 2022, from <https://5g.security/5g-edge-miot-technology/5g-3gpp-releases-15-16-17/>
- [79] Joint power allocation and subcarrier assignment for device to device in 5G time division duplex networks - Scientific Figure on ResearchGate. [accessed 11 Sep, 2022] Available from: [https://www.researchgate.net/figure/System-model-device-to-device-D2D-communication-a-D2D-communication-in-uplink-stage\\_fig1\\_329098105](https://www.researchgate.net/figure/System-model-device-to-device-D2D-communication-a-D2D-communication-in-uplink-stage_fig1_329098105)
- [80] Tutorialspoint. (n.d.). *Antenna Theory - Isotropic Radiation*. Tutorialspoint. Retrieved September 11, 2022, from [https://www.tutorialspoint.com/antenna\\_theory/antenna\\_theory\\_isotropic\\_radiation.htm](https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_isotropic_radiation.htm)
- [81] <https://github.com/dreamian/D2DCommSimul>
- [82] <https://github.com/niloobah/D2D-network-in-mmWave-band>
- [83] <https://github.com/Jimborg7/-D2D-5G->