ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαθηματική Μοντελοποίηση και Ανάλυση δικτύων 5ης Γενιάς

Αικατερίνη Ν. Κωστή

Επιβλέπων: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαθηματική Μοντελοποίηση και Ανάλυση δικτύων 5ης γενιάς

Αικατερίνη Ν. Κωστή
Α.Μ.: Μ1393

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: **Ευστάθιος Χατζηευθυμιάδης,** Αναπληρωτής Καθηγητής

ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μαθηματικά, μηχανή και άνθρωπος είναι τρεις πολύπλευρες έννοιες που δύσκολα σκέφτεται κανείς ότι συνδυάζονται. Και όμως, μέσα από την «απόμακρη» και δυσνόητη, από πολλούς, ομορφιά των μαθηματικών μπορούμε να κατανοήσουμε τους νόμους που διέπουν την φύση και κατ΄ επέκταση τον τρόπο λειτουργίας των μηχανών. Η αξιοποίηση της γνώσης και της δύναμης των μηχανών μπορεί να συντελέσει στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου της ανθρωπότητας, και όχι μόνο. Στην εργασία που ακολουθεί έγινε μια προσπάθεια μελέτης, μαθηματικής ανάλυσης και μοντελοποίησης των ασύρματων κινητών δικτύων 5^{ης} γενιάς.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κίνητρα ανάπτυξης μιας νέας τεχνολογικής γενιάς. Γίνεται μια επισκόπηση των προϋποθέσεων και των προκλήσεων που έχει να αντιμετωπίσει η γενιά 5G. Παρουσιάζονται οι σκοποί και οι στόχοι που έχουν θέσει διαφορετικοί οργανισμοί προτυποποίησης. Αναλύονται οι αρχιτεκτονικές και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ήδη από τα υπάρχοντα ασύρματα κινητά δίκτυα. Τέλος, παρουσιάζονται επιγραμματικά τα βασικά ερευνητικά προγράμματα για το «πέρασμα» στα δίκτυα της 5^{ης} γενιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σημαντικά εργαλεία, οι μετρικές και τα μεγέθη που μπορούν να υπολογίζουν οι σταθμοί βάσης και οι συσκευές ώστε να αξιολογούν την ποιότητα της επικοινωνίας σε ένα ασύρματο δίκτυο. Αναλύονται κάποιες βασικές οικογένειες στοχαστικών διεργασιών οι οποίες μοντελοποιούν τις θέσεις των συσκευών στον χώρο και αξιοποιώντας τις μαθηματικές τους ιδιότητες και τα θεωρήματα της στοχαστικής γεωμετρίας εξάγουν πληροφορίες για τις μετρικές των δικτύων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται μια κριτική σύγκριση ώστε να διαχωρίσουμε τα οφέλη κάθε διεργασίας και τις πρακτικές τους εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται κάποιες ενδεικτικές εργασίες οι οποίες περιγράφονται μέσω της στοχαστικής γεωμετρίας και βρίσκουν εφαρμογή σε συγκεκριμένους τύπους δικτύων εξάγοντας ενδιαφέροντα αποτελέσματα για τις μετρικές και «επιλύοντας» κάποια ανοιχτά προβλήματα των δικτύων προηγούμενης γενιάς.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ασύρματα κινητά δίκτυα 5^{ης} γενιάς.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ασύρματα κινητά δίκτυα, σταθμός βάσης, ασύρματη συσκευή, πομπός, δέκτης, δίκτυα 5^{ης} γενιάς, στοχαστική γεωμετρία, διεργασία σημείων, ποιότητα λαμβανόμενου σήματος

ABSTRACT

It is difficult to think that mathematics, machines and humanity are three concepts that could be combined. And yet, through the "distant" and tricky beauty of mathematics, we understand the laws that govern the nature and operation of machines. We are able to improve the standard of living of humanity by utilizing the knowledge and power of machines. In the following work there is an attempt to study, analyze and model the 5th generation of wireless mobile networks.

The first chapter presents the incentives to develop a new technology generation. There is an overview of the conditions and challenges that the 5G generation has to face. The aims and objectives set by different standardization organizations are presented. It analyzes the architectures and technologies already used by existing wireless mobile networks. Finally, we present in brief the basic research projects that explore the technological options of 5th generation networks.

The second chapter presents the important tools and metrics that base stations and devices can calculate to measure the quality of experience in a wireless network. We analyze some basic stochastic processes that model the positions of the devices in the space. These processes exploit mathematical properties and theorems of stochastic geometry and derive information about the network metrics. At the end of the chapter we compare the processes in order to separate the benefits of each one and the practical applications to wireless networks.

In the third chapter we analyze some indicative papers that are described through stochastic geometry and find application in specific types of networks. We export interesting results for the metrics and find solutions on some open problems and challenges of the previous generation networks.

SUBJECT AREA: Wireless mobile 5G Networks

KEYWORDS: wireless mobile networks, base station, wireless appliance, transmitter, receiver, 5G networks, stochastic geometry, point processes, quality of receiving signal

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **12**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ **13**

1.1 Κίνητρα ανάπτυξης και απαιτήσεις **13**
1.1.1 Ετερογένεια δικτύου 14
1.1.2 Πυκνότητα δικτύου 16
1.1.3 Επικοινωνίες D2D και M2M 16
1.1.4 Απαιτήσεις δικτύου 5G 18

1.2 Προτυποποίηση **19**
1.2.1 International Telecommunication Union – ITU 19
1.2.2 3rd Generation Partnership Project – 3GPP 20
1.2.3 5th Generation Public Private Partnership – 5GPP 23
1.2.4 Institute of Electrical and Electronics Engineers 24

1.3 Αρχιτεκτονικές 5G **25**
1.3.1 Πυκνά Δίκτυα UDN 25
1.3.2 Καθολική Διαχείριση Πόρων URM 28
1.3.3 Cloud Radio Access Networks (C-RAN) 29
1.3.4 Αρχιτεκονική all – IP 31

1.4 Τεχνολογίες 5G **31**
1.4.1 Massive MIMO 32
1.4.2 Λειτουργίες Εικονικού Δικτύου NFV 33
1.4.3 Καθορισμένη Δικτύωση Λογισμικού SDN 34
1.4.4 Small cells (Μικρές Κυψέλες) 36

1.5 Επισκόπηση των ερευνητικών προγραμμάτων **38**
1.5.1 ABSOLUTE project 38
1.5.2 METIS 2020 project 39
1.5.3 5G NOW project 40
1.5.4 CROWD project 41
1.5.5 i JOIN project 42
1.5.6 MiWaves project 42
1.5.7 Fantastic 5G 44

2. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ **46**

2.1 Μετρικές και βασικά μεγέθη της Στοχαστικής Γεωμετρίας **46**
2.1.1 Void probability 48

2.1.2 Ο λόγος της παρεμβολής προς τον θόρυβο – SINR 49
2.1.3 Συνδεσιμότητα και κάλυψη 50
2.1.4 Throughput και πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης 51
2.1.5 Παρεμβολή I_{agg} 52

2.2 Βασικά στοιχεία - θεωρήματα και οικογένειες διεργασιών 56
2.2.1 Poisson Point Process – PPP 58
2.2.2 Binomial Point Process – BPP 62
2.2.3 Thomas Poisson Cluster Process – Thomas PCP 65
2.2.4 Matern διεργασία σημείων 67
2.2.5 Determinental Point process 69
2.2.6 Ginibre Point Process 73

2.3 Σύγκριση τεχνικών για τα διάφορα δικτυακά περιβάλλοντα 76

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 80

3.1 Μοντελοποίηση και Ανάλυση k–πολυεπίπεδου ετερογενούς δικτύου. 80
3.1.1 Περιοχή – πρόβλημα 80
3.1.2 Μοντελοποίηση 80
3.1.3 Βασικά αποτελέσματα 82
3.1.4 Συμπεράσματα 83

3.2 Κακόβουλες επιθέσεις σε ασύρματα κινητά δίκτυα. 83
3.2.1 Περιοχή – πρόβλημα 83
3.2.2 Μοντελοποίηση 84
3.2.3 Βασικά αποτελέσματα 85

3.3 Παρεμβολή και πιθανότητα διακοπής σε ασύρματα Clustered Ad Hoc δίκτυα 87
3.3.1 Περιοχή – πρόβλημα 87
3.3.2 Προτεινόμενη μοντελοποίηση 87
3.3.3 Βασικά αποτελέσματα 88

3.4 Κατανομή της απόστασης και της εκτίμησης της εγγύτητας της θέσης σε ετερογενές ασύρματο δίκτυο. 90
3.4.1 Περιοχή – πρόβλημα 90
3.4.2 Μοντελοποίηση 91
3.4.3 Βασικά αποτελέσματα 92
3.4.4 Συμπεράσματα 93

3.5 Μοντελοποίηση και Ανάλυση Ασύρματων δικτύων μακροκυψελών με Determinental διεργασία σημείων. 95
3.5.1 Περιοχή – πρόβλημα 95
3.5.2 Μοντελοποίηση 95

3.5.3 Βασικά αποτελέσματα 95
3.5.4 Συμπεράσματα 97

3.6 Ginibre Point process 97
3.6.1 Περιοχή – πρόβλημα 97
3.6.2 Μοντελοποίηση 99
3.6.3 Βασικά αποτελέσματα 100
3.6.4 Συμπεράσματα 100

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 102

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ 103

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ 104

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 107

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Πολύ-επίπεδο ετερογενές δίκτυο 14

Σχήμα 2: Διάφορες αρχιτεκτονικές για το 5G δίκτυο 25

Σχήμα 3: UDN τοπίο 26

Σχήμα 4: Τοπολογία Cloud RAN 30

Σχήμα 5: Σύστημα massive MIMO με k χρήστες και N σταθμούς βάσης. 32

Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική SDN 35

Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική ABSOLUTE 39

Σχήμα 8: Το πρόβλημα συγχρονισμού CoMP downlink 41

Σχήμα 9: Αναμενόμενη επίδραση σε τοπολογία δικτύου 43

Σχήμα 10: Αλληλεπιδράσεις και εξαρτήσεις ανάμεσα στις ερευνητικές εργασίες 44

Σχήμα 11: Διάγραμμα Voronoi 46

Σχήμα 12: Τυπικό περιβάλλον 5G δικτύου 47

Σχήμα 13: Ετερογενές δίκτυο με σταθμούς βάσης μάκρο και μίκρο κυψελών 48

Σχήμα 14: Το ασύρματο περιβάλλον που επηρεάζει την συνδεσιμότητα 51

Σχήμα 15: Παρεμβολή σε (α) μακροκυψέλη, (b) μικρή κυψέλη 52

Σχήμα 16: Κύκλος ευπάθειας 54

Σχήμα 17: Κύκλοι b(X,r) και b(0,r) 60

Σχήμα 18: Ετερογενές δίκτυο με 3 επίπεδα 80

Σχήμα 19: Περιοχή κάλυψης σε δίκτυο με 3 επίπεδα 81

Σχήμα 20: Πιθανότητα κάλυψης 83

Σχήμα 21: Μοντελοποίηση δικτύου με σταθμούς βάσης και παρεμβολείς 84

Σχήμα 22: Συσκευές οργανωμένες σε clusters. Σε κάθε cluster η πυκνότητα των πομπών είναι 3. 87

Σχήμα 23: Επικοινωνία συσκευής Tier-2 με συσκευή Tier-3 91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διάφορες απαιτήσεις του χρήστη. 15

Εικόνα 2: Εφαρμογές και σενάρια υλοποίησης του 5G 16

Εικόνα 3: Συνδέσεις δικτύου 17

Εικόνα 4: Απαιτήσεις συστήματος 5G 18

Εικόνα 5: Χρονοδιάγραμμα για IMT-2020 στην ITU-R 20

Εικόνα 6: Αρχιτεκτονικές και χρονοδιάγραμμα για την 3GPP 21

Εικόνα 7: Χρονοδιάγραμμα της ITU και 3GPP 22

Εικόνα 8: Τα μέλη της 5GPP 23

Εικόνα 9: Μέλη της IEEE 24

Εικόνα 10: Υλοποίηση της URM 28

Εικόνα 11: Ανάγκες χρήστη και δυνατότητες πάνω σε Cloud RAN στοιχεία 30

Εικόνα 12: Από τον ειδικό εξοπλισμό στις Virtual Network Functions 33

Εικόνα 13: Σενάριο μικρών κυψελών 37

Εικόνα 14: 5G projects 38

Εικόνα 15: Σύντομη επισκόπηση των στόχων και της δομής 40

Εικόνα 16: Joint Optimization of RAN and Backhaul 42

Εικόνα 17: Positioning of Fantastic 5G with respect to ITU, 3GPP and NGMN* 45

Εικόνα 18: Η πιθανή τοπολογία του δικτύου μετά την επιλογή BS 48

Εικόνα 19: Απόσταση ανάμεσα σε πομπό (tx) και δέκτη (rx) 49

Εικόνα 20: Απεικόνιση στοχαστικών διεργασιών στον χώρο 56

Εικόνα 21: Σταθμοί βάσης κατανεμημένοι με Poisson Point Process 58

Εικόνα 22: BPP διεργασία με N=16 κόμβους σε ένα συμπαγές σύνολο B 63

Εικόνα 23: Μοντελοποίηση PCP με συσκευές κανονικά κατανεμημένες γύρω από τα κέντρα 65

Εικόνα 24: Μοντελοποίηση δικτύου με Matern Poisson Process 67

Εικόνα 25: Μοντελοποίηση δικτύου με Determinental PP και με ανεξάρτητη PPP. 70

Εικόνα 26: Η συνάρτηση J σε σχέση με την παράμετρο β.....75

Εικόνα 27: Μέσος ρυθμός και όριο SINR 82

Εικόνα 28: Επίδραση του αριθμού των jammers στην πιθανότητα διακοπής.....85

Εικόνα 29: Επίδραση της σκίασης και της πυκνότητας του δικτύου στον αριθμό N_j^* 86

Εικόνα 30: Η επίδραση του φορτίου, του αριθμού των jammers και της σκίασης στον ASEP.....86

Εικόνα 31: Σύγκριση της παρεμβολής για διαφορετικά μοντέλα path loss και συντελεστές σκίασης 88

Εικόνα 32: Σύγκριση της πιθανότητας επιτυχίας με τον αριθμό των κόμβων σε κάθε cluster. 89

Εικόνα 33: Σύγκριση της πιθανότητας επιτυχίας για την PCP και την PPP διεργασία ...90

Εικόνα 34: Σχετικές θέσεις και κάλυψη κοντινότερου γειτονικού κόμβου.....92

Εικόνα 35: Η πιθανότητα προσέγγισης σε συνάρτηση με την διασπορά σ.....93

Εικόνα 36: Η πιθανότητα προσέγγισης σε σχέση με την γωνία. 94

Εικόνα 37: Η πιθανότητα προσέγγισης σε συνάρτηση με την πυκνότητα του δικτύου ..94

Εικόνα 38: Η συνάρτηση κενού χώρου και κοντινότερου κόμβου σε σχέση με την απόσταση. 96

Εικόνα 39: Η μέση παρεμβολή στην περίπτωση που συνδέεται σε συγκεκριμένο σταθμό βάσης. 96

Εικόνα 40: Η μέση παρεμβολή στην περίπτωση που συνδέεται στον κοντινότερο σταθμό βάσης. 97

Εικόνα 41: Υλοποίηση μοντέλου SWIPT 98

Εικόνα 42: Συσκευή που τροφοδοτείται με RF σηματοδοσία.....98

Εικόνα 43: Η πιθανότητα διακοπής της μετάδοσης σε αρχιτεκτονική εναλλαγής χρόνου. 101

Εικόνα 44: Η πιθανότητα διακοπής της μετάδοσης σε αρχιτεκτονική διαχωρισμού ισχύος. 101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών.....13

Πίνακας 2: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των PPP δικτύων ...58

Πίνακας 3: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των BPP δικτύων ...62

Πίνακας 4: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των PCP δικτύων ...65

Πίνακας 5: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των Matern δικτύων68

Πίνακας 6: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των Determinental δικτύων 70

Πίνακας 7: Μετρικές για την μοντελοποίηση των Ginibre διεργασιών.....74

Πίνακας 8: Σύγκριση των διάφορων στοχαστικών διεργασιών 79

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια της εκπόνησης διπλωματικής εργασίας για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Συστήματα Επικοινωνιών και Δίκτυα» .

Διενεργήθηκε στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών εν έτη 2017 – 2018.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ

1.1 Κίνητρα ανάπτυξης και απαιτήσεις

Κάθε γενιά των κινητών επικοινωνιών, από την πρώτη γενιά που εισήχθη στη δεκαετία του 1980, είχε σημαντικό αντίκτυπο στον τρόπο που οι άνθρωποι και οι επιχειρήσεις λειτουργούν. Το 1G ήταν μια μορφή αναλογικής επικοινωνίας. Είναι επίσης γνωστό ως προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας, AMPS. Ωστόσο, η ανάγκη για καλύτερη απόδοση του υπάρχοντος φάσματος, οδήγησε στην επόμενη τεχνολογία.

Έτσι, το 1991 έχουμε το 2G που ήταν η πρώτη τεχνική ψηφιακής επικοινωνίας. Τόσο η φωνή, όσο και τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ψηφιακά. Εισήχθηκαν για πρώτη φορά υπηρεσίες όπως μηνύματα κειμένου (SMS) και μηνύματα πολυμέσων (MMS) στα κινητά τηλέφωνα. Είναι επίσης γνωστή σαν τεχνολογία ως «Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών» GSM. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στην ψηφιακή επικοινωνία είναι ότι, ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες, μπορούσε να είναι είτε πολύ καλή είτε ανύπαρκτη. [1] [2]

Τα πρώτα δίκτυα 3G (CDMA2000, UMTS) εισήχθησαν το 2000. Βρήκαν εφαρμογή στην κινητή τηλεφωνία προσφέροντας για πρώτη φορά υπηρεσίες όπως κινητή πρόσβαση στο Internet, σταθερή ασύρματη πρόσβαση στο Internet, κλήσεις βίντεο και κινητής τηλεόρασης. Υποστήριξε μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης και υποστήριξε την εξάπλωση του φάσματος ραδιομετάδοσης. [1] [2]

Πίνακας 1: Σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών

Technology	1G	2G/2.5G	3G	4G	5G
Deployment	1980	1990	2000	2010	2020
Bandwidth	2kbps	14-64kbps	2mbps	200mbps	>1gbps
Technology	Analog cellular	Digital cellular	Broadbandwidth/cdma/ip technology	Unified ip &seamless combo of LAN/WAN/WLAN/PAN	4G+WWWW
Service	Mobile telephony	Digital voice,short messaging	Integrated high quality audio, video & data	Dynamic information access, variable devices	Dynamic information access, variable devices with AI capabilities
Multiplexing	FDMA	TDMA/CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Switching	Circuit	Circuit/circuit for access network&air interface	Packet except for air interface	All packet	All packet
Core network	PSTN	PSTN	Packet network	Internet	Internet
Handoff	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal& Vertical	Horizontal& Vertical

Το 4G (Mobile WiMax, LTE) είναι η πλέον πρόσφατη τεχνολογία με ακόμη περισσότερο βελτιωμένες ταχύτητες δεδομένων και αποτελεσματικότητας. Τελειοποιήθηκε το 2010 και προσφέρει πρόσβαση στο διαδίκτυο από το κινητό, IP τηλεφωνία, υπηρεσίες

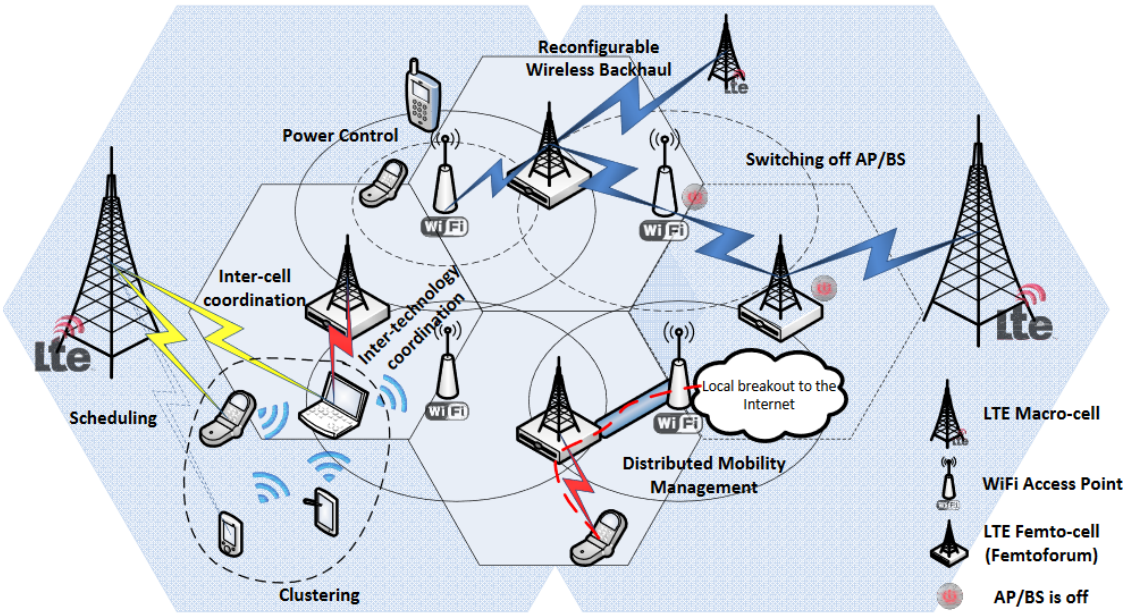
τυχερών παιχνιδιών, υψηλής ευκρίνειας κινητή τηλεόραση, video conferencing, και 3D τηλεόραση. Αναπτύχθηκε ένα σημαντικό επίπεδο βελτίωσης στην απόδοση και τις δυνατότητες των υπηρεσιών σε σχέση με αυτές που υπήρχαν στα συστήματα τρίτης γενιάς.[1], [2]

Το 5G είναι το προτεινόμενο πρότυπο για την νέα γενιά τηλεπικοινωνιών. Αναμένεται να οριστικοποιηθεί η προτυποποίηση του το 2020. Θα δώσει στους χρήστες πρόσβαση σε πληροφορίες και τη δυνατότητα να μοιραστούν τα δεδομένα οπουδήποτε, οποτεδήποτε. Τα δίκτυα 5G θα πρέπει εκτός από την αύξηση της ταχύτητας, να ανταποκριθούν στις νέες περιπτώσεις χρήσης. Ένα από τα βασικά οράματα είναι η υλοποίηση του IOT διαδικτύου των πραγμάτων (internet of things), όπου θα επιτυγχάνεται υποστήριξη της επικοινωνίας μηχανή με μηχανή. Ολοένα και περισσότερες συσκευές χρειάζεται να επικοινωνούν μεταξύ τους με στόχο την υποστήριξη των «έξυπνων συσκευών». Έτσι, το έξυπνο σπίτι, το έξυπνο αυτοκίνητο καθώς και η τηλεϊατρική θα είναι πλέον υλοποιήσιμες ιδέες.

Ένα δεύτερο μεγάλο όραμα είναι η δυνατότητα επικοινωνίας, σε κρίσιμες στιγμές για την ανθρωπότητα, όπως είναι οι καταστροφές από ένα φυσικό φαινόμενο, το οποίο δεν μπορεί να προβλεφθεί. Στόχος είναι εκεί που όλες οι επικοινωνίες καταρρέουν να υπάρξει «σανίδα σωτηρίας». Είναι κρίσιμο και απαραίτητο να μπορεί να υπάρξει στοιχειώδης μορφή επικοινωνίας των ομάδων διάσωσης προς όφελος της ανθρωπότητας, και αυτό καλείται να πετύχει το νέο δίκτυο.

1.1.1 Ετερογένεια δικτύου

Παρόλο που κάθε γενιά από τις υπάρχουσες τέσσερις είχε μια απλή τοπολογία δικτύου και ήταν ομογενείς ως προς την ποιότητα της επικοινωνίας, τα δίκτυα 5ης γενιάς καλούνται να ομογενοποιήσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες μεταξύ τους και να αντιμετωπίσουν τις ετερογένειες που παρουσιάζονται.



Σχήμα 1: Πολύ-επίπεδο ετερογενές δίκτυο

Έτσι, σε ένα υπάρχων δίκτυο θα συναντήσουμε διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας όπως, μακροκυψέλες, μικροκυψέλες, φεμτοκυψέλες, small cells, τεχνολογίες WiFi, επικοινωνίες μεταξύ συσκευών (D2D), επικοινωνίες μεταξύ κινητών(M2M). Συχνά αυτές αλληλεπικαλύπτονται με αποτέλεσμα ένας κινητός χρήστης να έχει περισσότερες από μια επιλογές κυψέλης. Πολλές φορές δύο ή περισσότερες κυψέλες έχουν την ευθύνη μιας γεωγραφικής περιοχής. Αυτό συμβαίνει κυρίως στα όρια των κυψελών όπου ο χρήστης καλείται να μεταβεί από την μια περιοχή κάλυψης στην άλλη. Τότε λέμε ότι υπάρχει αλληλοκάλυψη σε οριζόντιο επίπεδο, για παράδειγμα από μικροκυψέλη σε μικροκυψέλη. Όμως, θα μπορούσαμε να έχουμε αλληλοκάλυψη από κυψέλες που βρίσκονται σε δυο ή περισσότερα διαφορετικά επίπεδα. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε αλληλοκάλυψη σε διαφορετικά επίπεδα, όπως για παράδειγμα στην απόφαση μετάβασης από μικροκυψέλη σε μακροκυψέλη.

Επίσης, θα συναντήσουμε ετερογένεια ως προς τις συσκευές που χρησιμοποιούνται. Ενώ παλαιότερα δεν υπήρχαν πολλές επιλογές ως προς τις συσκευές, στις μέρες μας έχουμε δεκάδες συσκευές που στόχο έχουν την επικοινωνία μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας όπως κινητά τηλέφωνα, smart phones, tablets, notebooks, προσωπικοί υπολογιστές(pc s) και με την πάροδο των χρόνων ολοένα και περισσότερες συσκευές θα χρειάζονται πρόσβαση στο διαδίκτυο. [3]

Εικόνα 1: Διάφορες απαιτήσεις του χρήστη.

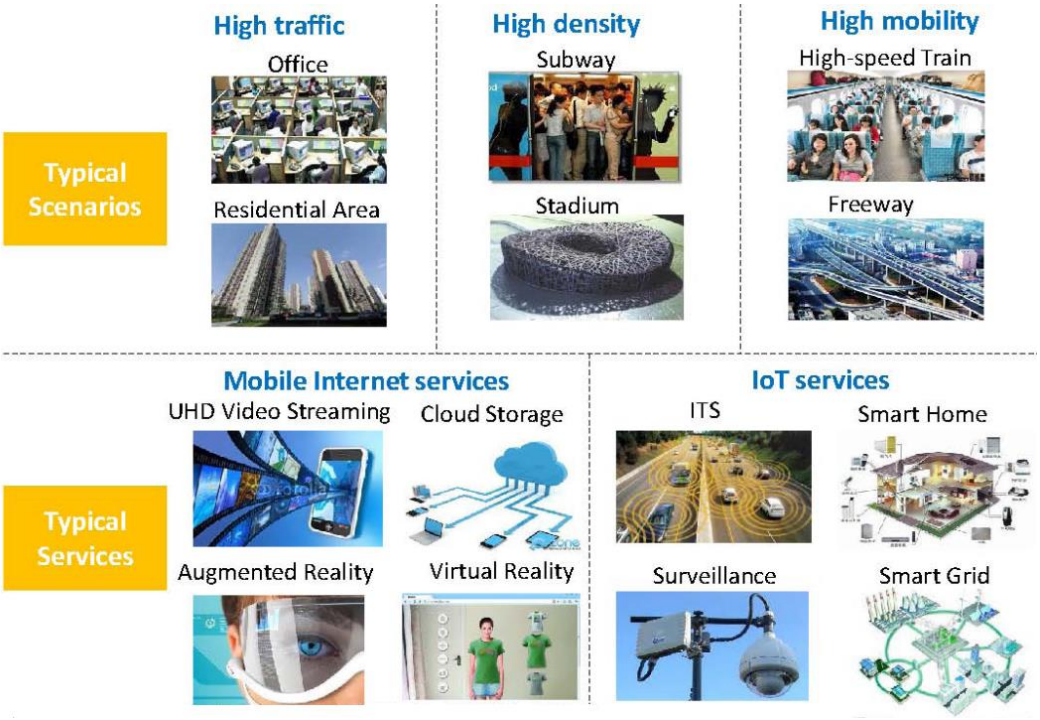
Μια πρόσθετη ετερογένεια παρουσιάζεται και ως προς το είδος της υπηρεσίας που ζητά ο εκάστων χρήστης. Έτσι, εκτός από την καλή ποιότητα της επικοινωνίας μέσω φωνής, η οποία θεωρείται δεδομένη αυτήν την εποχή, θα πρέπει να εξυπηρετηθούν και οι ανάγκες του χρήστη για καλή ποιότητα εικόνας, ανάλυση βίντεο, ταχύτητα φόρτωσης και μετάδοσης, ταχεία επεξεργασία γραφικών, παιχνίδια μέσω διαδικτύου, επικοινωνία με «έξυπνες συσκευές» και άλλα. [3]

Επιπλέον, ας μην ξεχνάμε ότι το 5G δεν περιορίζεται πλέον μόνο στην επικοινωνία, αλλά περιλαμβάνει και την αποθήκευση σε ένα πολύ ευρύτερο μέσο από τους διακομιστές. Αυτό είναι κοινώς γνωστό ως cloud RAN, το οποίο θα αναλυθεί στην παράγραφο 1.3.3. [3]

1.1.2 Πυκνότητα δικτύου

Με βάση τις προβλέψεις εξέλιξης των δικτύων , είναι δυνατόν να συναχθεί το συμπέρασμα ότι μετά το 2020, τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών θα πρέπει να υποστηρίξουν περισσότερες από 1.000 φορές το σημερινό όγκο κυκλοφορίας. Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για συσκευές που μπορούν να υποστηρίξουν επικοινωνία τόσο με το διαδίκτυο όσο και με άλλες συσκευές, ο όγκος των δεδομένων που αναπτύσσεται θα πρέπει και να μεταφερθεί. Επίσης, θα πρέπει να υποστηρίζεται η ταυτόχρονη πρόσβαση εκατοντάδων χρηστών στις υπηρεσίες που ζητούν. [3], [4]

Όπως συνέβη και για το 3G και το 4G, η τροφοδοσία με υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων θα συνεχίσει να αποτελεί βασική κινητήρια δύναμη στην ανάπτυξη του δικτύου και την εξέλιξη. Για συγκεκριμένα περιβάλλοντα, όπως εσωτερικά γραφεία και τοποθεσίες εντός της πανεπιστημιούπολης, τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης επόμενης γενιάς θα πρέπει να υποστηρίζουν ταχύτητες δεδομένων γύρω στα 10Gbps. Αλλά και σε περιοχές όπου συνωστίζεται πολύς κόσμος θα πρέπει να υπάρχει ανάλογη εξυπηρέτηση. Τέτοιες περιοχές είναι το μετρό, τα αεροδρόμια, πολυκαταστήματα (όπως Mall), το στάδιο όπου γίνεται ένας αγώνας, ο χώρος που διεξάγεται μια συναυλία κ.α. [3] , [4]

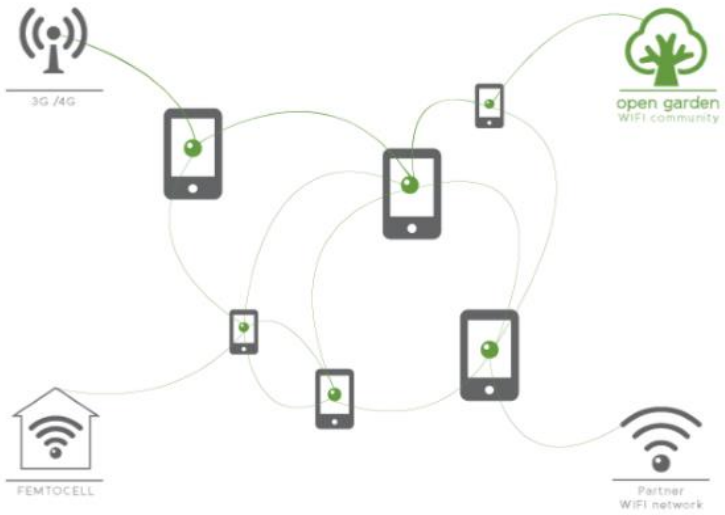


Εικόνα 2: Εφαρμογές και σενάρια υλοποίησης του 5G

1.1.3 Επικοινωνίες D2D και M2M

Ο κύριος στόχος του δικτύου 5G είναι να συνδεθεί ολόκληρος ο κόσμος, και να επιτευχθεί η απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων, ατόμων με συσκευές και μεταξύ μηχανημάτων, όπου κι αν βρίσκονται, όποτε χρειάζεται (ανά πάσα στιγμή), με

όποιες ηλεκτρονικές συσκευές / υπηρεσίες / δίκτυα επιθυμούν. Αυτό είναι ένα από τα βασικά οράματα του καινούριου δικτύου.



Εικόνα 3: Συνδέσεις δικτύου

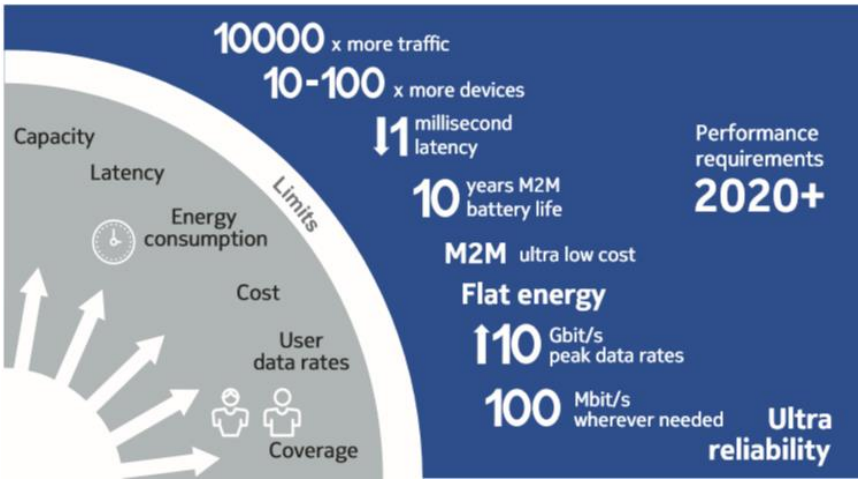
Η M2M (machine to machine) επικοινωνία αναφέρεται στην άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών που χρησιμοποιούν οποιοδήποτε κανάλι επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των ενσύρματων και ασύρματων. Οι επικοινωνίες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν βιομηχανικά όργανα, επιτρέποντας σε έναν αισθητήρα ή μετρητή να στέλνει τα δεδομένα που καταγράφει (όπως η θερμοκρασία, το επίπεδο των αποθεμάτων, κλπ) σε εφαρμογή λογισμικού που μπορεί να το χρησιμοποιήσει (για παράδειγμα, την προσαρμογή μιας βιομηχανικής διαδικασίας με βάση τη θερμοκρασία ή παραγγελίες για την ανασύσταση των αποθεμάτων). Τέτοια επικοινωνία αρχικά επιτυγχάνεται έχοντας ένα απομακρυσμένο δίκτυο μηχανημάτων (συνήθως αισθητήρων) που συγκεντρώνουν και αναμεταδίδουν πληροφορίες πίσω σε ένα κομβικό σημείο για την ανάλυση, η οποία στη συνέχεια θα μεταδώσει την πληροφορία σε ένα σύστημα ή έναν προσωπικό υπολογιστή. [5]

Οι πλέον πρόσφατες M2M επικοινωνίες έχουν μετατραπεί σε ένα σύστημα δικτύων που μεταδίδει δεδομένα σε προσωπικές συσκευές. Η επέκταση των δικτύων IP σε όλο τον κόσμο έχει κάνει την M2M και D2D (device to device) επικοινωνία ταχύτερη και ευκολότερη, ενώ χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια. [6]

Αναμένεται να χρησιμοποιηθεί πολύ στο μέλλον, καθώς δίκτυα αισθητήρων θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε διάφορα κομβικά σημεία και να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες τόσο σε παρόχους υπηρεσιών, όσο και σε μελλοντικές εφαρμογές. Έτσι, αισθητήρες κατά μήκος μιας γέφυρας ελέγχουν την καλή λειτουργία, φροντίζουν για την συντήρηση της, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Αισθητήρες τοποθετημένοι στο κεντρικό οδικό δίκτυο μιας χώρας θα ενημερώνουν τους οδηγούς για την κίνηση και την πορεία τους. Επιπλέον, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην ιατρική ή στην αγροτική παραγωγή, όπου η μέτρηση κάποιων δεικτών για το ανθρώπινο σώμα ή τον φυτικό οργανισμό θα ενεργοποιεί μια σειρά αντιδράσεων και θα ενημερώνει τον ειδικό γιατρό ή τον αγρότη. Επίσης, θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σαν αντικλεπτικός μηχανισμός. Γενικά, είναι εύκολο να βρούμε μια αρκετά μεγάλη πληθώρα εφαρμογών που θα εκμεταλλεύονται την M2M επικοινωνία. [7]

1.1.4 Απαιτήσεις δικτύου 5G

Για να υλοποιηθεί ένα δίκτυο 5G που θα ικανοποιεί τις ανάγκες ενός σύγχρονου δικτυακού κόσμου, έχουν τεθεί κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις που θα πρέπει το δίκτυο να ικανοποιεί.



Εικόνα 4: Απαιτήσεις συστήματος 5G

Έτσι, οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων θα πρέπει να είναι γύρω στα 10Gbps, για ορισμένα συγκεκριμένα πυκνά περιβάλλοντα με χαμηλή κινητικότητα όπως είναι οι ανάγκες στα γραφεία μιας επιχείρησης, οι ανάγκες ενός νοσοκομείου κ.λπ. Αλλά και σε περιβάλλοντα με μεγάλη κινητικότητα, όπως τα Μέσα μαζικής μεταφοράς ή ένα στάδιο όπου συμβαίνει ένας αγώνας ή μια συναυλία θα πρέπει να επιτυγχάνεται ρυθμός δεδομένων γύρω στο 1 Gbps για κάθε χρήστη. Για αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα ρυθμός μετάδοσης με τιμές πάνω από 100Mbps θα πρέπει να είναι επιτεύξιμος, καθώς και για απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές ή απομακρυσμένους εσωτερικούς χώρους.

Επιπροσθέτως, είναι αναγκαίο να επιτύχει 1000 φορές περισσότερη χωρητικότητα του συστήματος. Σύμφωνα με έκθεση Κινητικότητας της Ericson απαιτούνται 2,6GB ώστε να τρέξουν τα βίντεο. [7]

Οι στόχοι που τέθηκαν από την 5GPP, για την οποία θα μιλήσουμε στο κεφάλαιο 1.2.3 , είναι να έχουμε 10 με 100 φορές περισσότερα τερματικά συνδεδεμένα, 10 φορές λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση, 10 φορές τη καλύτερη φασματική απόδοση και 25 φορές τη μέση απόδοση (throughput) των κυψελών. Απαιτείται η πλήρης υποστήριξη για εφαρμογές αποστολής οι οποίες χρειάζονται εξαιρετικά αξιόπιστη συνδεσιμότητα με εγγυημένη διαθεσιμότητα πόρων και αξιοπιστία των υπηρεσιών. [7]

Το όριο της καθυστέρησης (latency) που προσφέρει το LTE μπορεί να μην είναι αρκετό για κρίσιμες εφαρμογές, όπως είναι η ασφάλεια κίνησης, η προστασία των υποδομών, ή κάποιες από τις αναδυόμενες βιομηχανικές εφαρμογές διαδικτύου. Για να μην καταρρέουν τέτοιου είδους εφαρμογές και να εξασφαλιστεί η υποστήριξη για αυτό το είδος της αποστολής, η ασύρματη πρόσβαση επόμενης γενιάς θα πρέπει να υποστηρίζει καθυστέρηση 1ms.[8]

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Τίθενται προδιαγραφές για 10 φορές μεγαλύτερη αυτονομία των

δικτυωμένων συσκευών για την D2D επικοινωνία (δηλαδή, νέες συσκευές με πολύ μεγαλύτερη αυτονομία και την ικανότητα να επικοινωνούν με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, σε αντίθεση με τις τρέχουσες τεχνολογίες σήμερα που στραγγίζουν την μπαταρία για να επικοινωνήσουν). Οι αυστηρές απαιτήσεις για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας έχουν και σαν επακόλουθο την ανάγκη δημιουργίας συσκευών που να είναι σε θέση να λειτουργούν με μπαταρία για πολλά χρόνια, χωρίς να χρειάζεται να επαναφορτιστεί. Οι συσκευές αυτές θα πρέπει να είναι προσιτές, καθώς η κοινωνία των δικτύων απαιτεί μαζική διαθεσιμότητα συσκευών χαμηλού κόστους. [7]

Φυσικό επακόλουθο της ανάγκης για υλοποίηση «έξυπνων συσκευών» είναι να έχουμε 10 έως 100 φορές μεγαλύτερο αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών, όπως αυτοκίνητα, ψυγεία, οικιακές συσκευές και ακόμη και το σύστημα παροχής νερού, που είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες που καταγράφουν την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας. [3]

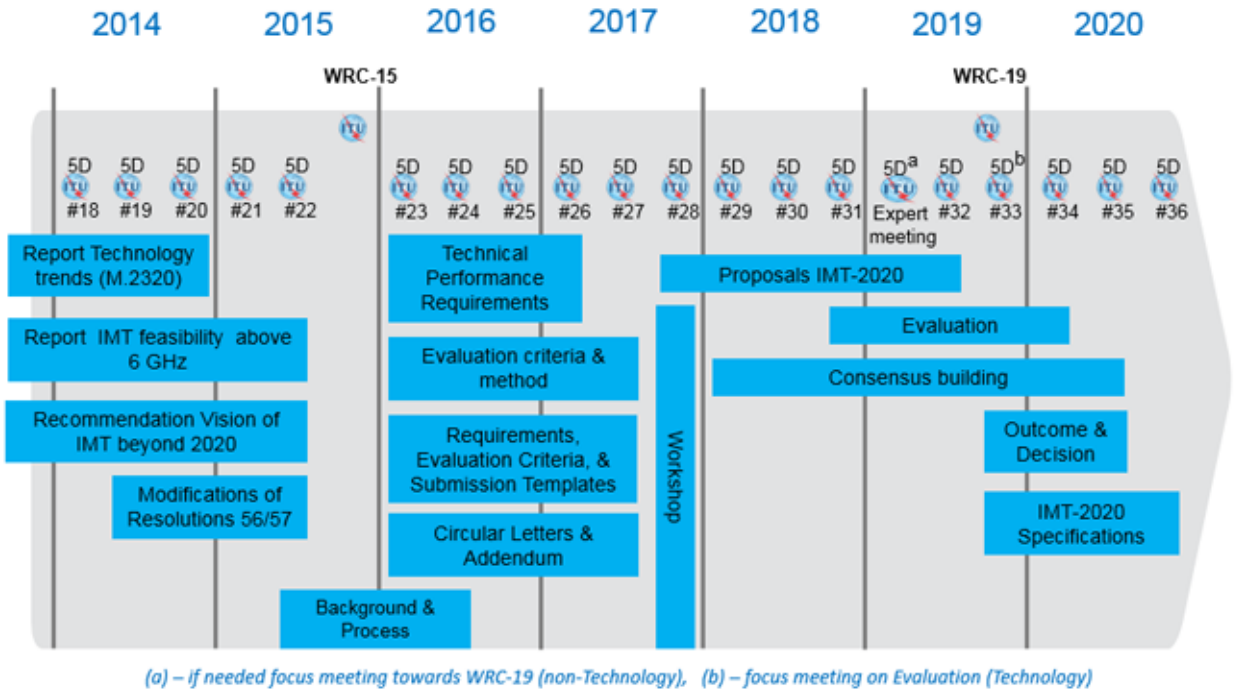
1.2 Προτυποποίηση

Υπάρχουν κάποιοι οργανισμοί οι οποίοι φροντίζουν στον σωστό και αποδοτικό σχεδιασμό της επόμενης γενιάς. Θέτουν στόχους, απαιτήσεις, τεχνικά χαρακτηριστικά, χρονοδιάγραμμα και μετά ακολουθεί η υλοποίηση. Οι οργανισμοί αυτοί αποτελούνται από διαφόρους φορείς, τόσο επιστημονικούς, ακαδημαϊκούς, ερευνητικούς, όσο και από εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Τέτοιοι οργανισμοί, λίγα λόγια για τους οποίους λέμε αμέσως μετά, είναι: ITU (International Telecommunication Union), 3GPP (3rd Generation Partnership Project), 5GPP (5th Generation Partnership Project) , IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers).

1.2.1 International Telecommunication Union – ITU

Η ITU είναι ένας διεθνής οργανισμός που εδρεύει στη Γενεύη της Ελβετίας, αποτελεί μέρος του συστήματος των Ηνωμένων Εθνών. Η ITU έχει 191 κράτη μέλη και περισσότερα από 700 Τμηματικά Μέλη και Συνεργάτες (ιδιωτικές εταιρείες, μη κυβερνητικές οργανώσεις και άλλους φορείς). Σκοπός της είναι να συντονίζει λειτουργίες και υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών σε όλο τον κόσμο. Ιδρύθηκε το 1865, ως International Telegraph Union και είναι ο παλαιότερος υπάρχων διεθνής οργανισμός. Εξειδικεύεται σε τρεις τομείς: (α) τον τομέα ραδιοεπικοινωνιών (ITU-R), (β) τον τομέα τυποποίησης (ITU-T) και (γ) τον τομέα ανάπτυξης (ITU-D).

Η ITU και οι συνεργάτες της έχουν αναγνωρίσει τη σχέση μεταξύ του συστήματος Διεθνών Τηλεπικοινωνιών (IMT) και εργάζονται προς την υλοποίηση του οράματος "5G» που αποτελεί το μέλλον των κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών. Στις αρχές του 2012, η ITU-R ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη "IMT για το 2020 και μετέπειτα», θέτοντας τις βάσεις για ερευνητικές δραστηριότητες "5G" που αναδύονται σε όλο τον κόσμο. Μέσω του ηγετικού ρόλου της ομάδας εργασίας 5D, η ITU-R έχει οριστικοποιήσει το χρονοδιάγραμμα για την IMT-2020. Η διεξοδική έρευνα από τα βασικά στοιχεία της "5G" είναι ήδη σε εξέλιξη, αξιοποιώντας επιτυχημένη συνεργασία της ITU-R με τον ευρυζωνικό κλάδο της κινητής και το ευρύ φάσμα των ενδιαφερόμενων μελών στην κοινότητα "5G". [9]



Εικόνα 5: Χρονοδιάγραμμα για IMT-2020 στην ITU-R

Τον Σεπτέμβριο του 2015, η ITU-R οριστικοποίησε το «Όραμα» της για την «5G» κοινότητα κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών. Οι απόψεις για το μέλλον της κινητής τεχνολογίας θα συμβάλουν στον καθορισμό της ατζέντας για την Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (Radio communication conference 2019), όπου οι συζητήσεις για επιπλέον φάσμα θα συμβάλλουν στην υποστήριξη της μελλοντικής ανάπτυξης του IMT. [9]

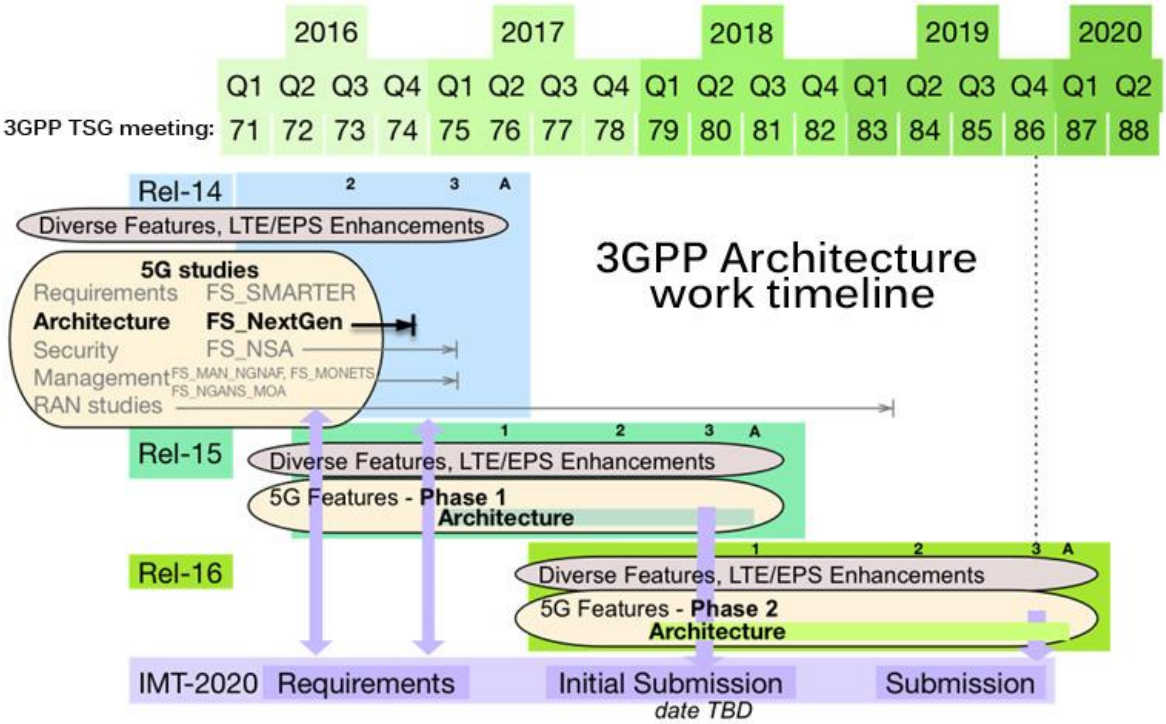
1.2.2 3rd Generation Partnership Project – 3GPP

Το 3GPP ενώνει 7 τυπικούς αναπτυξιακούς οργανισμούς τηλεπικοινωνιών (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), γνωστούς και ως «"Organizational Partners – Οργανωτικά Μέλη» και παρέχει στα μέλη τους ένα σταθερό περιβάλλον για να παράγουν τις εκθέσεις και τις προδιαγραφές που ορίζουν οι τεχνολογίες 3GPP.

Το αρχικό πεδίο εφαρμογής του 3GPP (Δεκέμβριο 1998) ήταν η παραγωγή τεχνικών προδιαγραφών και τεχνικών εκθέσεων για ένα σύστημα κινητών 3G βασισμένο στο εξελιγμένο Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM) και στις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης που υποστηρίζουν ,δηλαδή, παγκόσμια ραδιοπρόσβαση (UTRA) τόσο σε τρόπους κατανομής συχνοτήτων (FDD) όσο και σε τρόπους κατανομής χρόνου (TDD). Το πεδίο εφαρμογής αργότερα διευρύνθηκε για να συμπεριλάβει την ανάπτυξη και τη συντήρηση των προτύπων "2.5G", GSM και συναφών «2G» και συμπεριλαμβανομένων των GPRS και EDGE, UMTS. Αργότερα το πεδίο εφαρμογής ασχολήθηκε με τα πρότυπα "3G" συμπεριλαμβανομένων των HSPA, LTE και τα σχετικά πρότυπα "4G". [10]

Τόσο οι προδιαγραφές της 3GPP όσο και οι μελέτες είναι συνεισφορές, από εταιρείες-μέλη, σε ομάδες εργασίας και σε επίπεδο τεχνικών προδιαγραφών του Ομίλου. Οι τρεις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification groups-TSG), της 3GPP είναι:

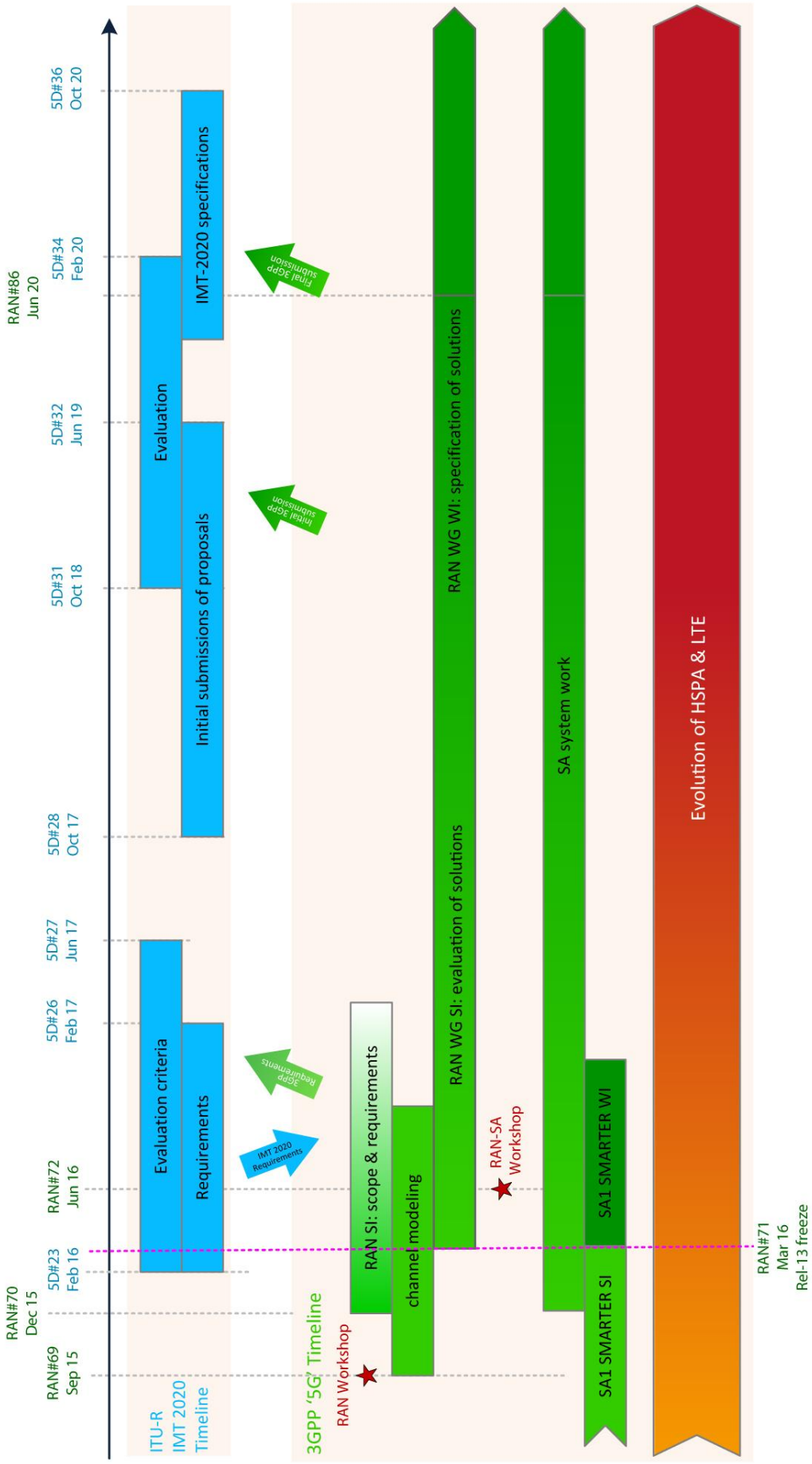
(α) τα Δίκτυα ασύρματης πρόσβασης (RAN), (β) Υπηρεσίες & Συστήματα Όψεων (C.A.), (γ) Δίκτυο Κορμού & Τερματικών (CT). [10]



Εικόνα 6: Αρχιτεκτονικές και χρονοδιάγραμμα για την 3GPP

Κάθε TSG έχει μια συγκεκριμένη περιοχή της ευθύνης για τις εκθέσεις και τις προδιαγραφές μέσα στο δικό της πλαίσιο αναφοράς. [10] Η τελευταία συνεδρίαση της ολομέλειας των τεχνικών Ομάδων Προδιαγραφών 3GPP (TSG # 72) έχει συμφωνήσει σε ένα λεπτομερές πρόγραμμα εργασιών για την Release-15, την πρώτη έκδοση των προδιαγραφών 5G. Το σχέδιο περιλαμβάνει ένα σύνολο ενδιάμεσων εργασιών και check-points για να καθοδηγήσει τις εν εξελίξει μελέτες στις Ομάδες Εργασίας.

Ήδη τους τελευταίους μήνες του 2017, έχουν γίνει αρκετές αξιόλογες προτάσεις και έχουν κατατεθεί εργασίες που αφορούν την εξέλιξη της ιδέας του IOT (διαδικτύου των πραγμάτων). Τέτοιες προτάσεις αφορούν την πολυεπίπεδη επικοινωνία, όπου θα είναι δυνατή η επικοινωνία χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες ή η επίτευξη επικοινωνίας σε υπόγειο σιδηρόδρομο. Μια άλλη αξιόλογη πρόταση αφορά κινητούς σταθμούς βάσης, όπου θα εκπέμπεται το σήμα από την κορυφή ενός μέσου μεταφοράς όπως το ποδήλατο. [11]



Εικόνα 7: Χρονοδιάγραμμα της ITU και 3GPP

1.2.3 5th Generation Public Private Partnership – 5GPP

Η 5G Υποδομή Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα, με λίγα λόγια 5GPP, έχει δημιουργηθεί από την Επιτροπή της ΕΕ και τους κατασκευαστές της βιομηχανίας, όπως φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιών, παρόχων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, των ΜΜΕ και των ερευνητών το 2012. Η 5GPP προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για τις πανταχού παρούσες υποδομές επικοινωνιών επόμενης γενιάς της επόμενης δεκαετίας. [12]

Η πρόκληση για την 5GPP είναι να εξασφαλίσει την ηγεσία της Ευρώπης στις συγκεκριμένες περιοχές όπου η Ευρώπη είναι ισχυρή ή όπου υπάρχει δυνατότητα για τη δημιουργία νέων αγορών, όπως έξυπνες πόλεις. Άλλοι κλάδοι με τους οποίους ασχολείται είναι η ηλεκτρονική υγεία, οι ευφυείς μεταφορές, η εκπαίδευση, η ψυχαγωγία & τα μέσα μαζικής ενημέρωσης. Η πρωτοβουλία 5GPP θα ενισχύσει την ευρωπαϊκή βιομηχανία να ανταγωνιστεί επιτυχώς στις παγκόσμιες αγορές και να ανοίξει νέες ευκαιρίες καινοτομίας. Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά, θα «ανοίξει μια πλατφόρμα που μας βοηθά να φθάσουμε τον κοινό μας στόχο, θα διατηρήσει και θα ενισχύσει το παγκόσμιο τεχνολογικό προβάδισμα”. [12]

Εικόνα 8: Τα μέλη της 5GPP

Η δομή της 5GPP είναι να αποτελείται από τρεις τουλάχιστον φάσεις που θα αποτελούνται από προγράμματα, τα οποία υλοποιούνται παράλληλα. Αυτό σημαίνει ότι προσπαθούν για την παροχή πλήρους κάλυψης των προκλήσεων, συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι συνεπή και αποτελεσματικά. Τα προγράμματα αυτά έχουν μοναδικούς στόχους σε μια συγκεκριμένη περιοχή, όμως από κοινού θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη του νέου δικτύου 5G. Βασικές προκλήσεις για την 5GPP είναι: (α) η παροχή 1000 φορές μεγαλύτερης χωρητικότητας ασύρματης περιοχής και δυνατότητες μεγαλύτερης ποικιλίας υπηρεσιών σε σύγκριση με το 2010, (β) η εξοικονόμηση έως και 90% της ενέργειας ανά παρεχόμενη υπηρεσία. Η κύρια έμφαση θα δοθεί στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, όπου η δεσπόζουσα κατανάλωση ενέργειας προέρχεται από το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, (γ) η μείωση του μέσου χρόνος κύκλου δημιουργίας υπηρεσίας από 90 ώρες σε 90 λεπτά, (δ) η δημιουργία ενός ασφαλούς, αξιόπιστου Διαδικτύου με «μηδενικό χρόνο κατεβάσματος» για την παροχή υπηρεσιών, (ε) η διευκόλυνση ανάπτυξης πολύ πυκνών ασύρματων ζεύξεων επικοινωνίας με στόχο την σύνδεση πάνω από 7 τρις ασύρματες συσκευές που εξυπηρετούν πάνω από 7

δισεκατομμύρια ανθρώπους, (στ) η εξασφάλιση πρόσβασης για όλους και παντού σε ένα ευρύτερο πίνακα υπηρεσιών και εφαρμογών με χαμηλότερο κόστος. [12]

1.2.4 Institute of Electrical and Electronics Engineers

Η IEEE, μια ένωση αφιερωμένη στην προώθηση της καινοτομίας και της τεχνολογικής αριστείας προς όφελος της ανθρωπότητας, είναι η μεγαλύτερη τεχνική επαγγελματική κοινωνία του κόσμου. Έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετήσει τους επαγγελματίες που εμπλέκονται σε όλες τις πτυχές των ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών, και τους τομείς της πληροφορικής και συναφείς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας που διέπουν το σύγχρονο πολιτισμό. [13]

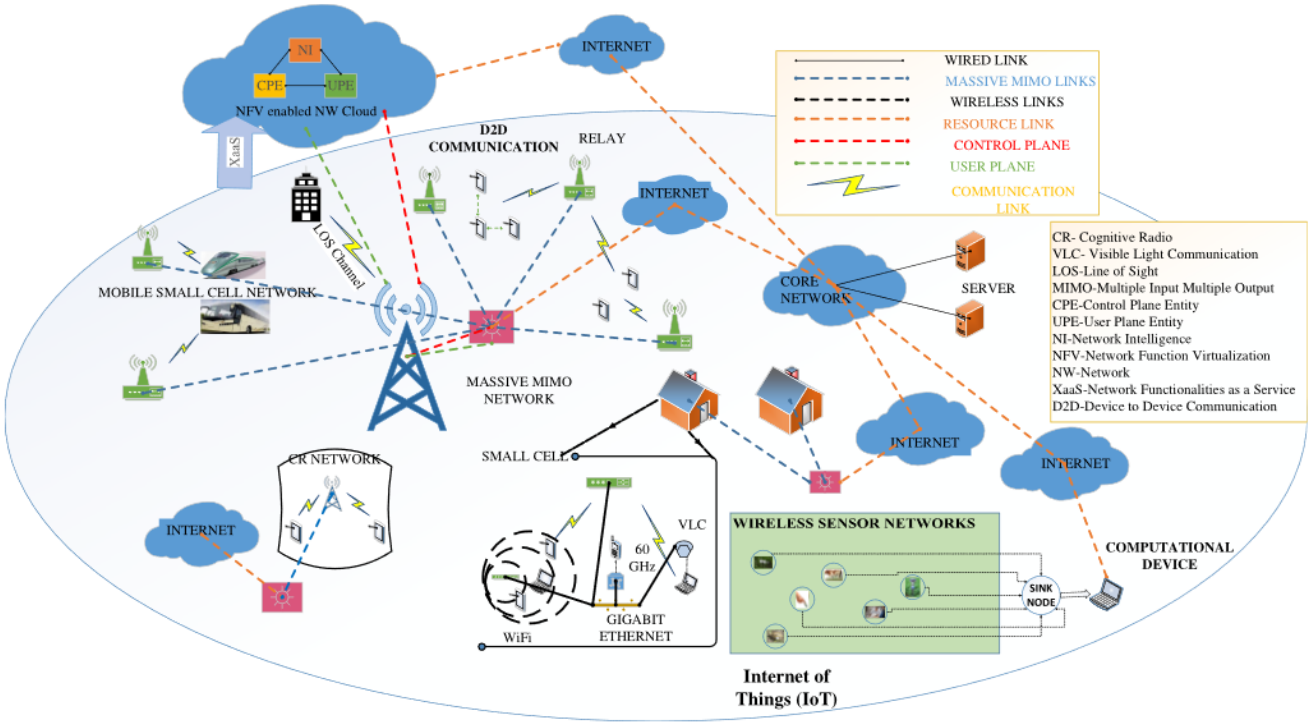
Οι απαρχές της IEEE είναι πίσω στο 1884 όταν ο ηλεκτρισμός άρχισε να γίνεται μια σημαντική επιρροή στην κοινωνία. Υπήρξε μια σημαντικά εδραιωμένη βιομηχανία ηλεκτρικών ειδών, όπως ο τηλέγραφος, ο οποίος από τη δεκαετία του 1840 είχε έρθει για να συνδέσει τον κόσμο με ένα σύστημα επικοινωνίας δεδομένων γρηγορότερο από την ταχύτητα μεταφοράς. Το τηλέφωνο, η ηλεκτρική ενέργεια και το φως μόλις είχαν εμφανιστεί.

Εικόνα 9: Μέλη της IEEE

"The world’s largest technical professional society", όπως αποκαλείται, περιλαμβάνει επιστήμονες ηλεκτρονικών υπολογιστών, προγραμματιστές, επαγγελματίες της τεχνολογίας των πληροφοριών, φυσικούς, γιατρούς, και πολλούς άλλους εκτός από τον πυρήνα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών μηχανικών της IEEE. Είναι ευρύτερα γνωστή για τον IEEE Standards Association, ένα σώμα που δημιουργεί πρότυπα που καθορίζουν τις προδιαγραφές για πολλές διαφορετικές τεχνολογίες. Το IEEE προωθεί την ανάπτυξη των προτύπων που γίνονται συχνά τα εθνικά και διεθνή πρότυπα. Η οργάνωση δημοσιεύει μια σειρά από περιοδικά, έχει πολλά τοπικά κεφάλαια, και πολλές μεγάλες εταιρείες σε ειδικούς χώρους, όπως το IEEE Computer Society. [13]

1.3 Αρχιτεκτονικές 5G

Βασικές παράμετροι που καθορίζουν την αρχιτεκτονική του νέου δικτύου είναι η ετερογένεια του δικτύου και η συνεχόμενη αύξηση της κίνησης και του φορτίου που πρέπει να μεταφερθεί. Η νέα αρχιτεκτονική δικτύου κινητής τηλεφωνίας καλείται να βρει λύσεις που θα εξυπηρετούν τις υπάρχουσες τεχνολογίες και ταυτόχρονα θα εξυπηρετούν πληθώρα χρηστών. Η μεγάλη ιδέα είναι να λειτουργήσουν όλες οι τεχνολογίες μαζί χωρίς να επηρεάζουν η μια την άλλη. Ωστόσο, το νέο δίκτυο θα πρέπει να διαμορφωθεί έτσι ώστε να επιτευχθεί (α) τεράστια χωρητικότητα, (β) έξυπνα ελεγχόμενο εικονικό δίκτυο για την παροχή επεκτασιμότητας και για την διαχείριση των πόρων, (γ) ολοκληρωμένος προγραμματισμός σε δίκτυο σύννεφο (cloud – RAN) (δ) πολλαπλές διασυνδέσεις και (ε) ομαδοποιημένη οπισθοχώρηση (backhaul). [13]



Σχήμα 2: Διάφορες αρχιτεκτονικές για το 5G δίκτυο

Κάποιες στρατηγικές προτάσεις για την αρχιτεκτονική του δικτύου 5G, οι οποίες θα αναλυθούν αμέσως μετά, είναι:

1. Τα πυκνά δίκτυα – Ultra Dense Networks
2. Η καθολική διαχείριση πόρων – Universal Resources Management
3. Cloud – Radio Access Networks
4. Αρχιτεκτονικές all IP

1.3.1 Πυκνά Δίκτυα UDN

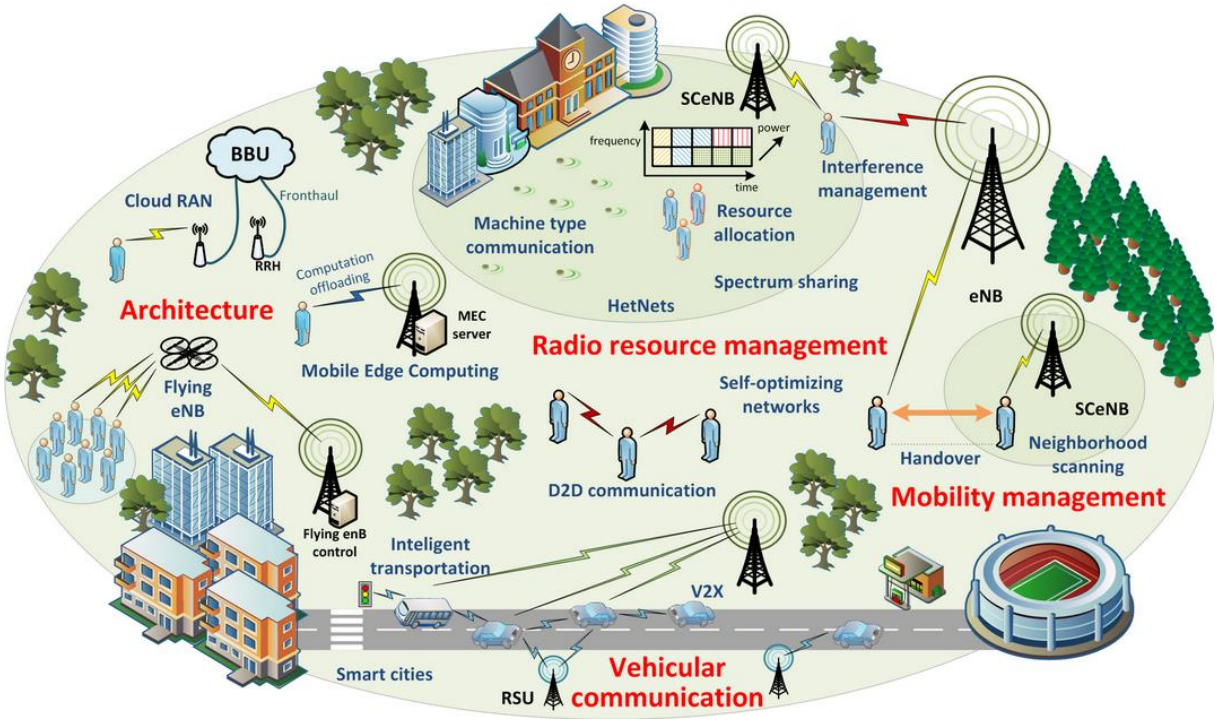
Τα σημερινά δίκτυα χρησιμοποιούν μακροκυψέλες, για να παρέχουν κάλυψη και χωρητικότητα, κατανεμημένα συστήματα κεραιών, Wi-fi για εσωτερική κάλυψη. Για να ανταποκριθούν στις ανάγκες της ζήτησης τα μελλοντικά δίκτυα θα πρέπει να είναι αρκετά πυκνά και πολυεπίπεδα. Ένα UDN (Ultra Dense Network) είναι ένα δίκτυο με μεγάλη πυκνότητα ραδιοφάσματος, είναι πιο πυκνό από τα σημερινά δίκτυα τόσο σε

κυψέλες όσο και σε σταθμούς βάσης. Υπάρχουν διαφορετικοί ορισμοί για το UDN. Επικρατέστεροι είναι ότι το UDN είναι ένα δίκτυο όπου η πυκνότητα των σταθμών βάσης είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα των χρηστών και η απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών είναι μερικά μέτρα. [15]

Σε ένα UDN τοπίο ο σταθμός βάσης της μακροκυψέλης πρέπει να χειρίζεται:

(α) τις πυκνές υποδομές του δικτύου, (β) τον μαζικό πληθυσμό των κόμβων που εξυπηρετούνται, (γ) τις πολλαπλές συχνότητες φάσματος, (δ) τον μεγάλο αριθμό ιεραρχιών και δυνατότητες επικοινωνίας καθώς και (ε) στοχευμένες επικοινωνίες όπως συστάδες M2M ή ομάδες D2D συσκευών. [15]

Ωστόσο, εκτός από τις μακροκυψέλες, στα περισσότερα δίκτυα έχουμε πληθώρα μικρότερων κυψελών, όπως μικρές κυψέλες (small cells), φεμτοκυψέλες (femtocells), πικοκυψέλες (picocells). Αυτές έχουν μια σημαντικά μικρότερη ακτίνα κάλυψης και στόχος τους είναι να αποσυμφορήσουν την κίνηση που δέχεται ο σταθμός βάσης της μακροκυψέλης. Δέχονται την κίνηση λίγων συνήθως τερματικών συσκευών οι οποίες για να μπορέσουν να συνδεθούν στην κυψέλη συνήθως θα πρέπει να γνωρίζουν την «ταυτότητα» της, δηλαδή κάποιους κωδικούς πρόσβασης σε αυτήν.



Σχήμα 3: UDN τοπίο

Η βασική «ιδέα» είναι οι χρήστες να μπορούν να μετακινούνται και να αλλάζουν από μακροκυψέλη σε μικρότερη κυψέλη, όποτε επιθυμούν και ανάλογα με τις απαιτήσεις – ανάγκες τους.[15] Οι μικρότερες κυψέλες μπορούν να επιτυγχάνουν καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, μεγαλύτερες ταχύτητες αλλά ικανοποιούν λιγότερους χρήστες.

Οι UDN πλατφόρμες δημιουργούν πολλές προκλήσεις. Σε περιβάλλοντα που έχουμε βαρύ αλλά ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κίνησης όλοι οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να είναι ενεργοί για να εξυπηρετήσουν την κυκλοφορία και να καταστείλουν τις παρεμβολές. Η ανάπτυξη των UDNs πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά και από την

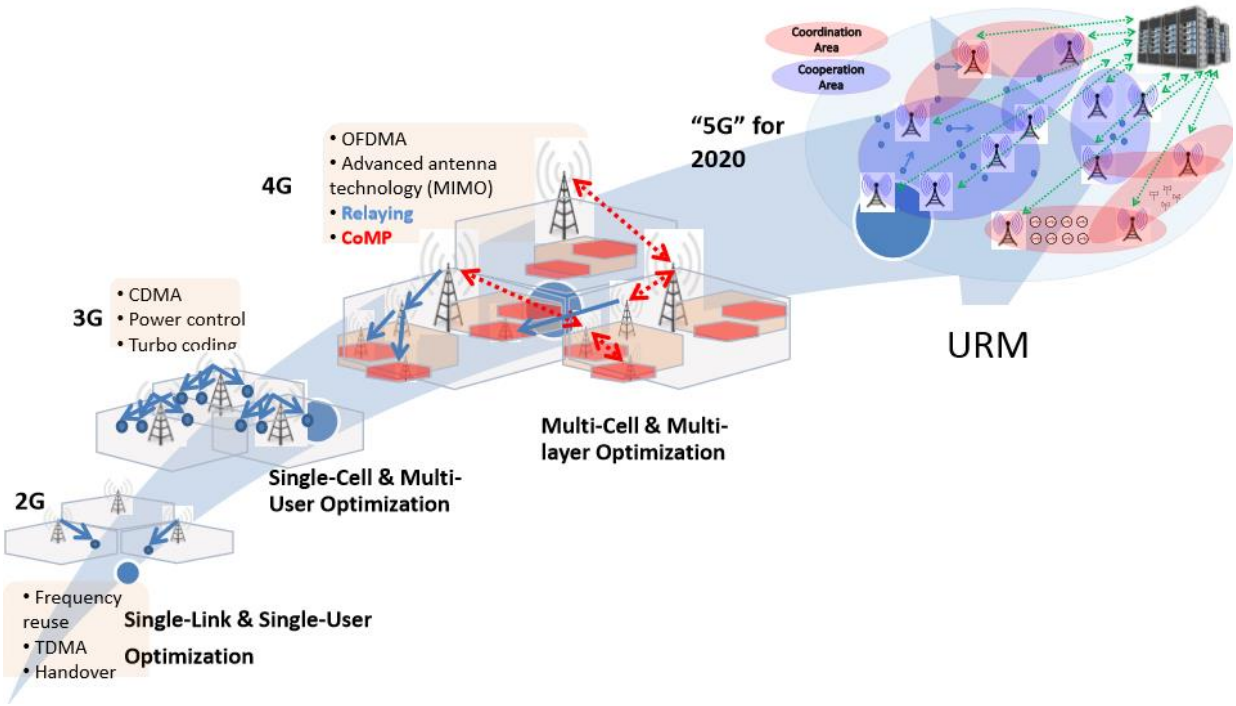
αρχή ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν μικρότερα επίπεδα παρεμβολής. Αφού η κυκλοφοριακή κίνηση μεταβάλλεται, μια καλή ιδέα είναι η δημιουργία εικονικής κυψέλης με υβριδικό έλεγχο. Στην πράξη, όταν υπάρχει μικρό φορτίο κυκλοφορίας θα απενεργοποιούνται σταθμοί βάσης ή θα μπαίνουν σε κατάσταση ύπνου – αδράνειας. Έτσι, θα επιτυγχάνεται συνεργασία μεταξύ των σταθμών βάσης και θα γίνεται ανατροφοδότηση όταν χρειάζεται να διαχειριστούμε την κινητικότητα και τις παρεμβολές στα UDN.[16] [17]

Μια δεύτερη πρόκληση αφορά την κατανομή του φάσματος στους σταθμούς βάσης. Η κατανομή των πόρων και η επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων θα πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά καθώς οι σταθμοί βάσης άλλοτε είναι ενεργοί και άλλοτε αδρανείς. Ο περίπλοκος συντονισμός παρεμβολών σε ένα UDN δίκτυο είναι ανεπιθύμητος λόγω της κλίμακας του δικτύου και του κόστους οπισθοχώρησης (backhaul). Έχει αποδειχθεί ότι η επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας εξαρτάται άμεσα από αριθμό των κεραιών του σταθμού βάσης και την αναλογία της πυκνότητας των σταθμών βάσης ανά χρήστη. [15]

Οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να λαμβάνουν γρήγορες αποφάσεις για ενεργοποίηση και απενεργοποίηση και να γίνεται γρήγορη επιλογή ή εναλλαγή φορέα ώστε οι συνδέσεις να είναι αξιόπιστες και να μην οδηγούν σε κατάρρευση της επικοινωνίας. Για να υπάρχει εξισορρόπηση και το φορτίο να μπορεί να μοιράζεται θα υπάρχουν βελτιωμένοι μετρητές του σήματος καθώς και απλοί μηχανισμοί συνδέσεις. [15]

Οι φορείς εκμετάλλευσης καλούνται να εξασφαλίσουν σταθερή ποιότητα εμπειρίας (QoE) ανεξάρτητα από το σημείο πρόσβασης, χρησιμοποιώντας δίκτυα πολλαπλών συνδέσεων. Η τεχνολογία cloud–RAN (που αναλύεται στην παράγραφο1.4.4) στηρίζεται στην αρχιτεκτονική των UDNs. Τα UDNs επωφελούνται από τις λειτουργίες ελέγχου που βελτιστοποιούν την απόδοση, τη σηματοδοσία, το λειτουργικό κόστος και μπορούν να επωφεληθούν από τον καλό προγραμματισμό. [15]

1.3.2 Καθολική Διαχείριση Πόρων URM



Εικόνα 10: Υλοποίηση της URM

Οι πολλαπλές ανάγκες του 5G δικτύου απαιτούν να επαναπροσδιοριστεί ο όρος «resource» (πόρων), ώστε να μπορεί να αναφέρεται σε κάθε δυνατό στοιχείο του δικτύου, όπως είναι οι φυσικές υποδομές κόμβων ράδιο πρόσβασης (κεραίες, σταθμοί βάσης), η οπισθοχώρηση – backhaul, το φάσμα, η υπολογιστική ισχύς. Το νέο δίκτυο καλείται να αντιμετωπίσει τη πυκνότητα των δικτύων, να αναπτύξει λογισμικό που θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες του, να εκμεταλλευτεί τις εικονικές πλατφόρμες, οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα στην παράγραφο 1.4.2. Η βελτιστοποίηση, η διαχείριση και η ιδιοκτησία των πόρων σε αυτό το νέο τοπίο συνεπάγονται ευκαιρίες και προκλήσεις τόσο τεχνικές, όσο και επιχειρηματικές – οικονομικές. Η παραδοσιακή αλυσίδα για τα κινητά μπορεί να χρειαστεί να διαταραχθεί από νέους τύπους ενδιαφερομένων και νέες προσεγγίσεις για την κατανομή των πόρων. [18] [19]

Σε μια μη κυψελωτή αρχιτεκτονική, θα έπρεπε κάθε χρήστης να έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πλήρη ταχύτητα δεδομένων του κοινού φάσματος, χωρίς να δέχεται παρεμβολές από άλλους χρήστες. Ένα σημείο κεντρικού ελέγχου θα επέτρεπε συντονισμένη καθοδήγηση του φορτίου. Για παράδειγμα, στο LTE χρησιμοποιείται η δυναμική παραχώρηση πόρων στις υπερφορτωμένες κυψέλες από άλλες γειτονικές με διαθέσιμους πόρους, προκειμένου να εξυπηρετηθεί το μεταφερόμενο φορτίο. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, όπως η κατανεμημένη είσοδος – κατανεμημένη έξοδος (DIDO) ασύρματη τεχνολογία, η δυναμική παραχώρηση πόρων [18].

Για να είναι δυνατή η υλοποίηση αυτής της αρχιτεκτονικής, τα τερματικά θα πρέπει να συνδέονται μέσω της μοναδικής IP διεύθυνσης τους, ώστε να μπορούν να αναγνωρίζονται τόσο από τους σταθμούς βάσης των κυψελών, όσο και από γειτονικά τερματικά τα οποία θα είναι σε θέση να προωθήσουν ή μεταβιβάσουν σε αυτά μέρος

της κίνησης τους. Σε περιπτώσεις που κάποιο τερματικό βρίσκεται στα όρια μιας κυψέλης ή το σήμα που φτάνει σε αυτό από τον σταθμό βάσης είναι εξασθενημένο, παρέχεται η δυνατότητα να λειτουργήσει κάποια «γειτονική» συσκευή σαν αναμεταδότης σήματος. Έτσι, είναι γεγονός ότι η επίτευξη του βέλτιστου QoS(Quality of Service) / QoE (Quality of Experience), της αποδοτικότητας, του κόστους, της ενεργειακής απόδοσης, σε περιβάλλοντα απαιτητικά και μεταβλητά, μέσω της εκμετάλλευσης των κατάλληλων δυνατοτήτων του συστήματος μπορεί να γίνει μόνο μέσα από μια συνεχώς ευέλικτη συμπεριφορά του συστήματος. Κύρια παραγωγή των μηχανισμών διαχείρισης του δικτύου θα πρέπει να είναι η βέλτιστη και εφικτή διαμόρφωση του συστήματος που μπορεί να εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση ενός συγκεκριμένου πλαισίου λειτουργίας. Η βέλτιστη έξοδος συνδέεται με το χειρισμό των πλαισίων στόχου, δηλαδή, QoS / QoE, πτυχές κόστους – ενέργειας, καθώς και με την ταχύτητα και την αξιοπιστία με την οποία μπορούν να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με το πώς να χειριστεί πλαίσια. [18]

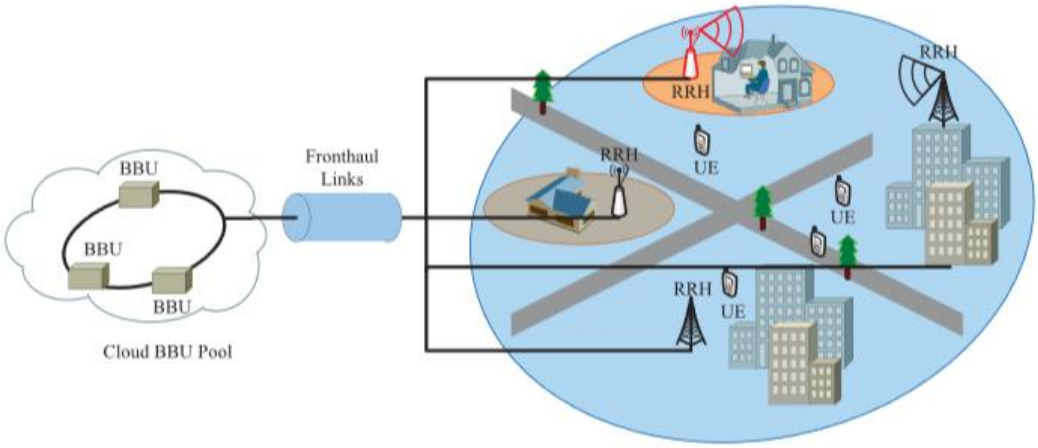
1.3.3 Cloud Radio Access Networks (C-RAN)

Το σύννεφο cloud RAN εισήχθηκε για πρώτη φορά από την China Mobile Research Institute τον Απρίλιο του 2010 στο Πεκίνο της Κίνας, ενώ 9 χρόνια νωρίτερα υπάρχουν αιτήσεις για διπλώματα ευρεσιτεχνίας που κατατέθηκαν από εταιρείες των ΗΠΑ. [19] Το C-RAN είναι ένα κεντρικό, cloud computing με βάση την αρχιτεκτονική για δίκτυα πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων που υποστηρίζει 2G, 3G, 4G και μελλοντικά πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας. Το όνομά του προέρχεται από τα τέσσερα «C» κατά τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος C-RAN «Clean, Centralized processing, Collaborative radio, and a real-time Cloud Radio Access Network». [20]

Τα περισσότερα μελλοντικά δίκτυα θα αποτελούνται από ένα συνδυασμό διανομής και συγκέντρωσης baseband υποδομών, κυρίως ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των αναγκών των ινών και των επιδόσεων. Οι φορείς εκμετάλλευσης χρειάζονται μια αρχιτεκτονική RAN που να εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα μιας κεντρικής αρχιτεκτονικής αλλά και να επιτρέπει προσιτές λύσεις μεταφοράς. Επίσης, πρέπει να μπορεί να επεκταθεί και να είναι ευέλικτη στην ανάπτυξη πολλών απομακρυσμένων κεντρικών ρδιοδιεπαφών.[19]

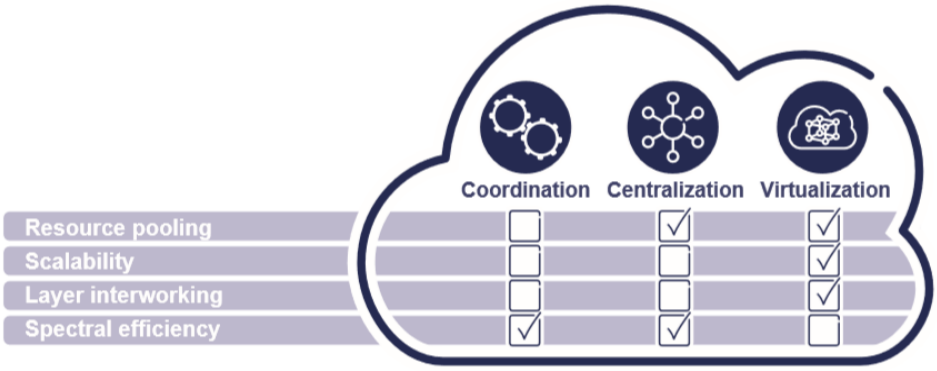
Μια ιδέα υλοποίησης της αρχιτεκτονικής cloud – RAN είναι να διαχωριστούν οι σταθμοί ραδιοσυχνοτήτων (RRH) από το σύνολο των μονάδων βάσης ζώνης (BBU). Οι RRH μεταδίδουν σήματα ραδιοσυχνοτήτων στα τερματικά στην ζεύξη καθόδου ή προωθούν σήματα από τα τερματικά στις BBU για περαιτέρω επεξεργασία στην ζεύξη ανόδου. Αφού, το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας γίνεται στις BBU, οι RRH μπορούν να κατανεμηθούν με αποδοτικό τρόπο στο δίκτυο. Μέσω προωθητικών (fronthaul) συνδέσεων οι BBU λειτουργούν ως εικονικοί σταθμοί βάσης για την επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης και για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων του δικτύου. Έτσι όλες οι μονάδες RRH μπορούν να συνδεθούν με κάποιο BBU, επιτυγχάνοντας ευέλικτη κατανομή των πόρων και αποτελεσματική ενεργειακή απόδοση με τον κοινό προγραμματισμό. Εκτός αυτού, το Cloud–RAN επιτρέπει την εφαρμογή αποτελεσματικών αλγορίθμων αποφυγής παρεμβολών σε πολλαπλές

κυψέλες. Μπορούμε επίσης να ενεργοποιήσουμε ή να απενεργοποιήσουμε επιλεκτικά τα RRHs σύμφωνα με τις μεταβολές της κυκλοφορίας σε διάφορα σενάρια, συμβάλλοντας στην λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. [19]



Σχήμα 4: Τοπολογία Cloud RAN

Γενικά, ένα Cloud RAN πρέπει να μπορεί να υποστηρίζει τον διαχωρισμό του ελέγχου και του επιπέδου χρήστη για τις διάφορες λειτουργίες του RAN. Ακόμα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει ποικίλες επιλογές ανάπτυξης για όλα τα αναμενόμενα σενάρια δικτύου, συμπεριλαμβάνοντας πολλές λύσεις για το δίκτυο μεταφορών. Είναι σημαντικό να διαμορφώνει τους σταθμούς βάσης και τις εφαρμογές του χρήστη και να ευθυγραμμίζεται με την προϋπάρχουσα τεχνολογία. Η συγκέντρωση των αποφάσεων για τη κινητικότητα και τη διαχείριση της κυκλοφορίας οδηγεί σε λιγότερες αποτυχίες στην παράδοση και λιγότερο έλεγχο σηματοδότησης δικτύου σε περίπλοκα (ετερογενή) περιβάλλοντα δίκτυα. [20][21]



Εικόνα 11: Ανάγκες χρήστη και δυνατότητες πάνω σε Cloud RAN στοιχεία

Ακόμα, μπορούμε να έχουμε κέρδος στην μνήμη των καναλιών, συγκεντρώνοντας τα πλαίσια εξοπλισμού χρήστη από τους χρήστες εξυπηρετώντας με αυτόν τον τρόπο περισσότερες από μία κυψέλες. Κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα του cloud RAN είναι η ευέλικτη τοποθέτηση των μονάδων μεταφοράς μικρού μεγέθους, η δυναμική ανάπτυξη λογισμικού, η δυναμική ενεργοποίηση του, η αλληλεπίδραση με σταθερές τεχνολογίες καθώς και το γεγονός ότι τα συστατικά στοιχεία του λογισμικού βρίσκονται σε αποθετήρια. Παρουσιάζει την έξυπνη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων δηλαδή στοιχείων λογισμικού και φυσικά στοιχεία. Το cloud RAN έχει ως κύριο στόχο τη μείωση του κεφαλαίου και των λειτουργικών δαπανών των φορέων. [20][22]

1.3.4 Αρχιτεκονική all – IP

Κάθε συσκευή που συνδέεται και μεταφέρει δεδομένα στο διαδίκτυο σχετίζεται με μια μοναδική διεύθυνση IP, ένα μοναδικό αναγνωριστικό της διασύνδεσης ανάμεσα στην συσκευή – δρομολογητή και στην φυσική ζεύξη του δικτύου. Υπεύθυνα για την διευθυνσιοδότηση είναι τα πρωτόκολλα IPv4 και μεταγενέστερα το IPv6.

Η αρχιτεκτονική all – IP είναι μια ιδέα που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα, ήδη από την γενιά των 3G. Στόχος της είναι να χρησιμοποιείται η διεύθυνση IP για «απαιτητικές» multimedia υπηρεσίες, για μεταφορά δεδομένων και για ενσωμάτωση των πρωτοκόλλων του διαδικτύου. Τέτοια πρωτόκολλα αφορούν λειτουργίες όπως είναι η υποστήριξη των φορητών συσκευών, η σηματοδοσία, η πιστοποίηση, η εξουσιοδότηση και η ασφάλεια της σύνδεσης. [23]

Η αρχιτεκτονική μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε επίπεδο μεταφοράς είτε σε φυσικό επίπεδο. Στην μέθοδο της μεταφοράς, τα πακέτα IP επικαλύπτονται και μεταφέρονται στο επικαλυπτόμενο δίκτυο. Μεριμνώντας για την ασφάλεια της μεταφοράς δεδομένων, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IPsec το οποίο κρυπτογραφεί τα δεδομένα του αποστολέα πριν αποσταλούν στο δίκτυο. Η αποκρυπτογράφηση μπορεί να γίνει μόνο από τον κόμβο παραλήπτη καθώς όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν αναγνωρίζουν ότι τα πακέτα είναι κρυπτογραφημένα και τα προωθούν σαν συνηθισμένα πακέτα. [23]

Ενώ, στην μέθοδο του φυσικού επιπέδου, τα πακέτα μπορούν να μεταφέρονται χωρίς επικάλυψη και η διεύθυνση IP χρησιμοποιείται για να δρομολογηθούν τα πακέτα σωστά. Έτσι, η επιπρόσθετη μεταφορά μειώνεται, και βελτιώνεται η αποδοτικότητα του δικτύου. Τα πακέτα μεταφέρονται «ελεύθερα» στο δίκτυο. Δεν χρειάζεται να ενθυλακώνονται οι επικεφαλίδες των IP, επιβαρύνοντας το δίκτυο με επιπλέον πληροφορία και κωδικοποίηση. Μέσω της all – IP αρχιτεκτονικής μπορεί να επιτευχθεί καθολική πρόσβαση, αυξημένη ικανοποίηση των χρηστών, μείωση του επιπέδου καθυστέρησης και χαμηλότερο κόστος για τους παρόχους των υπηρεσιών. Όμως, η ανοιχτή ροή των δεδομένων δημιουργεί προκλήσεις στην ασφάλεια του συστήματος απέναντι σε κακόβουλα προγράμματα ή άτομα. [24]

1.4 Τεχνολογίες 5G

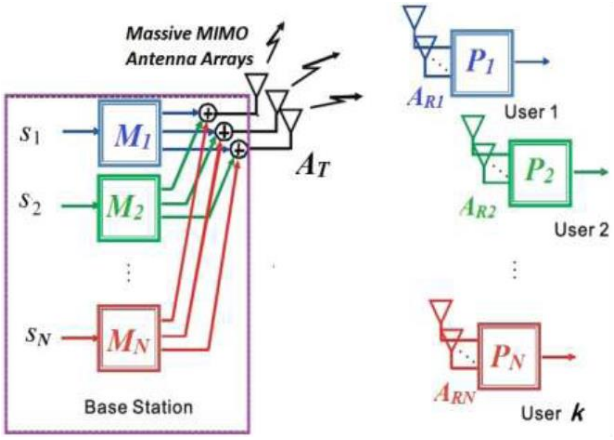
Το νέο δίκτυο 5G καλείται να αντιμετωπίσει τις ετερογένειες του δικτύου καθώς θα συνυπάρχουν πολλοί τύποι σταθμού βάσης, όπως μικρές κυψέλες, σταθμοί μακροκυψελών, και D2D. Οι διάφοροι σταθμοί βάσης θα πρέπει να συντονίζονται μεταξύ τους οριζόντια πιο συχνά από ό, τι σε δίκτυα 4G, και αυτό απαιτεί ένα δυναμικό και προσαρμόσιμο ασύρματο πλέγμα δικτύου. [22] Οι αρχιτεκτονικές του νέου δικτύου αναλύθηκαν παραπάνω και ξεχωρίσαμε κάποιες βασικές τεχνολογίες που μπορούν να τις υλοποιήσουν. Έτσι, για να υλοποιηθεί ένα UDN, ένα URM, ή ένα Cloud RAN θα πρέπει να παρθούν αποφάσεις για την διαχείριση των πολλαπλών κεραιών μέσω του μαζικού MIMO (multiple-input multiple-output), να δούμε πως λειτουργούν τα NFV (Network Function Virtualization) και τα SDN (Software Defined Networks) , να διαχειριστούμε την κίνηση στις μικρές κυψέλες (Small cells).

1.4.1 Massive MIMO

Το μαζικό MIMO (Multiple Input Multiple Output) είναι μια εξέλιξη και αναβάθμισης της τεχνολογίας MIMO. Υποστηρίζει μια συμβατική τοπολογία όπου έχουμε στην διάθεση μας πολλές κεραίες BTS (Base Transmit Stations), που φτάνουν από 4 μέχρι 128, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν ταυτόχρονα πολλές δεκάδες τερματικά. Σε αυτήν την τοπολογία η πληροφορία που απαιτείται να μεταδοθεί σε κάθε συσκευή, μεταδίδεται από πολλές διαφορετικές συστάδες κεραιών. [14]

Το μαζικό MIMO εξαρτάται από την χωρική πολυπλεξία, η οποία μεταβιβάζει πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού στον σταθμό βάσης, τόσο στην ζεύξη ανόδου όσο και στην ζεύξη καθόδου. Στην περίπτωση ανοδικής ζεύξης του απλού MIMO τα διάφορα τερματικά στέλνουν pilots, μέσω των οποίων εκτιμάται η απόδοση του καναλιού. Ο σταθμός βάσης αποφασίζει και «ανακοινώνει» τα pilots που θα εκπέμψουν. Με βάση αυτά τα τερματικά εκτιμούν το κανάλι και τα ανατροφοδοτούν προς τον σταθμό βάσης. Η υλοποίηση στο μαζικό MIMO γίνεται με διαίρεση χρόνου TDD και αμοιβαιότητα ανάμεσα στα κανάλια, ενώ δεν αποκλείεται να χρησιμοποιηθεί και FDD. Η απόκριση των RF του καναλιού γίνεται τόσο στην ζεύξη ανόδου, όσο και στην ζεύξη καθόδου. [25] [26]

Στον σταθμό βάσης φτάνουν συνεκτικές συνιστώσες του σήματος από όλες τις κεραίες και η μετάδοση γίνεται σε ζώνες υψηλής συχνότητας, έτσι ώστε να γίνεται «εύκολα» η υπολογιστική επεξεργασία. Με αυτόν τον τρόπο, οι θόρυβοι καταπολεμώνται και μπορούμε να αναπαράγουμε το εξασθενημένο σήμα που φτάνει στην συσκευή. Επομένως, υπάρχει ανθεκτικότητα σε παρεμβολές του καναλιού και εκ προθέσεως παρεμβολές (από κακόβουλους χρήστες ή κακόβουλα προγράμματα). Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιούμε εξαρτήματα χαμηλότερης ισχύος και άρα να υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, λόγω της καλύτερης απόκρισης του δικτύου και της αξιοπιστίας, έχουμε λιγότερη καθυστέρηση με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερο καλύτερος ρυθμός μετάδοσης και καλύτερος λόγος παρεμβολής προς θόρυβο – SINR. [26] [27]



Σχήμα 5: Σύστημα massive MIMO με k χρήστες και N σταθμούς βάσης.

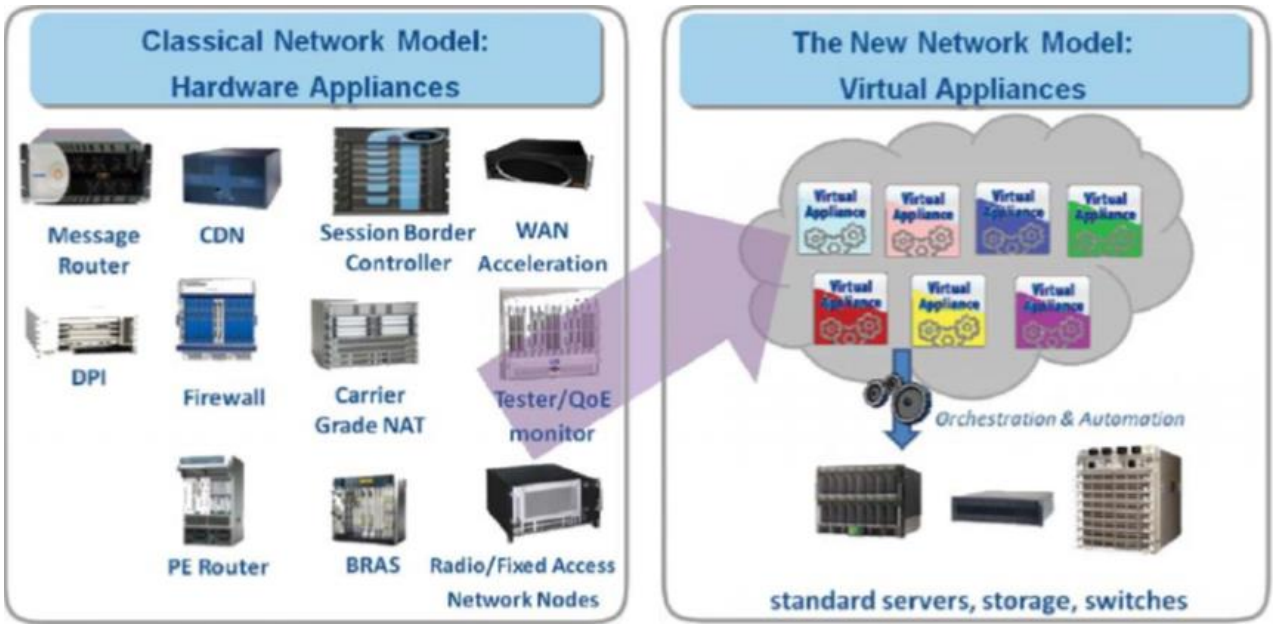
Για τα δίκτυα της επόμενης γενιάς, η τοπολογία του massive MIMO υπόσχεται σημαντικά κέρδη. Προσφέρει τη δυνατότητα να φιλοξενηθούν περισσότεροι χρήστες σε υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων με καλύτερη αξιοπιστία, μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών και καταναλώνει λιγότερη ενέργεια. Όμως, μια από τις

μεγαλύτερες προκλήσεις του μαζικού MIMO είναι αυτή του χαμηλού κόστους του υλικού. Είναι αναμενόμενο ότι οι εναέριες επικοινωνίες καταναλώνουν γρήγορα τους πόρους του ραδιοφάσματος και επιπλέον η αύξηση του αριθμού των κεραιών συνδέεται με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κόστος. Σε επίπεδο παρόχων, είναι απαραίτητη η δημιουργία πολλών εξαρτημάτων χαμηλού κόστους, χαμηλής ακρίβειας που να λειτουργούν μεταξύ τους αποτελεσματικά. Κάθε τερματικό που αποκτάται είναι απαραίτητο να συγχρονιστεί με τις κεραίες του καναλιού, να γίνεται γρήγορη επεξεργασία σήματος, αλλά και να γίνει προσπάθεια για μείωση της εσωτερικής κατανάλωσης ενέργειας ώστε να επιτευχθεί συνολική μείωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Στο επίπεδο του καναλιού, χρειάζεται να έχουμε χαμηλό κόστος της διακρίβωσης της αμοιβαιότητας, να διερευνηθούν νέα σενάρια ανάπτυξης που στόχο θα έχουν την εκμετάλλευση των επιπλέον βαθμών ελευθερίας που παρέχονται από την περίσσεια των κεραιών της υπηρεσίας. Άλλη μια πρόκληση για το μαζικό MIMO είναι η μελέτη του συστήματος σε σχέση με τις μικρές κυψέλες. [25] [26] [27]

1.4.2 Λειτουργίες Εικονικού Δικτύου NFV

Οι λειτουργίες εικονικού δικτύου, ή αλλιώς NFV, είναι εικονικές πλατφόρμες δικτύου που στόχο έχουν να καλύψουν ανάγκες τόσο προγραμματιστικές όσο και αποθήκευσης γενικού σκοπού. Το 2012 ιδρύεται από την ETSI (European Telecommunication Standards Institute) η Industry Specification Group (ISG) για NFV. Γρήγορα ενώθηκε με πάνω από 280 εταιρείες, όπως φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, προμηθευτές εξοπλισμού, πωλητές και παρόχους τεχνολογίας. [28]

Κύριο κίνητρο για την ανάπτυξη των NFV είναι οι ανάγκες της κοινωνίας για πλατφόρμες μεγάλου όγκου hardware, για μείωση του λειτουργικού κόστους, για αξιοποίηση των δυνατοτήτων της νέας τεχνολογίας.



Εικόνα 12: Από τον ειδικό εξοπλισμό στις Virtual Network Functions

Στο NFV δημιουργούνται δικτυακές λειτουργίες υλοποιημένες σε κομμάτια λογισμικού που αποκαλούνται εικονικές λειτουργίες του δικτύου (VNF). Με αυτόν τον τρόπο ο

ειδικός εξοπλισμός hardware θα αντικατασταθεί από πλατφόρμες λογισμικού που θα λειτουργούν σε κεντρικούς servers και θα υποστηρίζεται η αρχιτεκτονική του cloud – RAN. Στον ειδικό εξοπλισμό κάθε κόμβος είχε έναν συγκεκριμένο φυσικό ρόλο και υπήρχε μια φυσική εγκατάσταση για κάθε site, δημιουργώντας προβλήματα στην αναβάθμιση. Με τις VNF επιτυγχάνεται απομακρυσμένη δυναμική λειτουργία, ο αριθμός των εικονικών μηχανών είναι κλιμακούμενος και το δίκτυο μπορεί να αναβαθμιστεί εύκολα.

Οι λειτουργίες VNF μπορούν να μεταφέρονται εύκολα σε κάθε σημείο του δικτύου, μειώνοντας σημαντικά τόσο τα λειτουργικά έξοδα (OPEX), όσο και τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) καθώς δεν απαιτείται η εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού σε κάθε σημείο του δικτύου. Επίσης, έχουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς οι πλατφόρμες που δεν έχουν κίνηση, δεν χρειάζεται να καταναλώνουν ενέργεια. Μειώνοντας το κόστος, η απόδοση των επενδύσεων από νέες υπηρεσίες αυξάνεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευκαιρίες για καινοτόμες υπηρεσίες με μικρότερο κίνδυνο αποτυχίας. [28] [29]

Επιπλέον, μπορεί να συνυπάρξει με τις προϋπάρχουσες πλατφόρμες του δικτύου που βασίζονται στο υλικό (hardware), επιτρέποντας την αναβάθμιση τους. Θα χρησιμοποιούνται συστήματα BSS (Business Support Systems) και OSS (Operational Support Systems), τα οποία υποστηρίζουν λειτουργίες διαχείρισης και υποστήριξης των υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών ή του υπάρχοντος δικτύου .

Σημαντική πρόκληση αποτελεί η ασφάλεια από επίθεση και από κακή διαμόρφωση του σήματος. Καθώς οι συσκευές εικονικών δικτύων είναι ανοιχτές, η διαχείριση τους θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να αποφεύγεται η επίθεση από κακόβουλο λογισμικό. Επιπλέον, αφού δίνεται η δυνατότητα οι NFV να είναι φορητές ανάμεσα στους διαφορετικούς προμηθευτές υλικού είναι απαραίτητη η επίτευξη υψηλής απόδοσης των συσκευών εικονικού δικτύου. [29] [30]

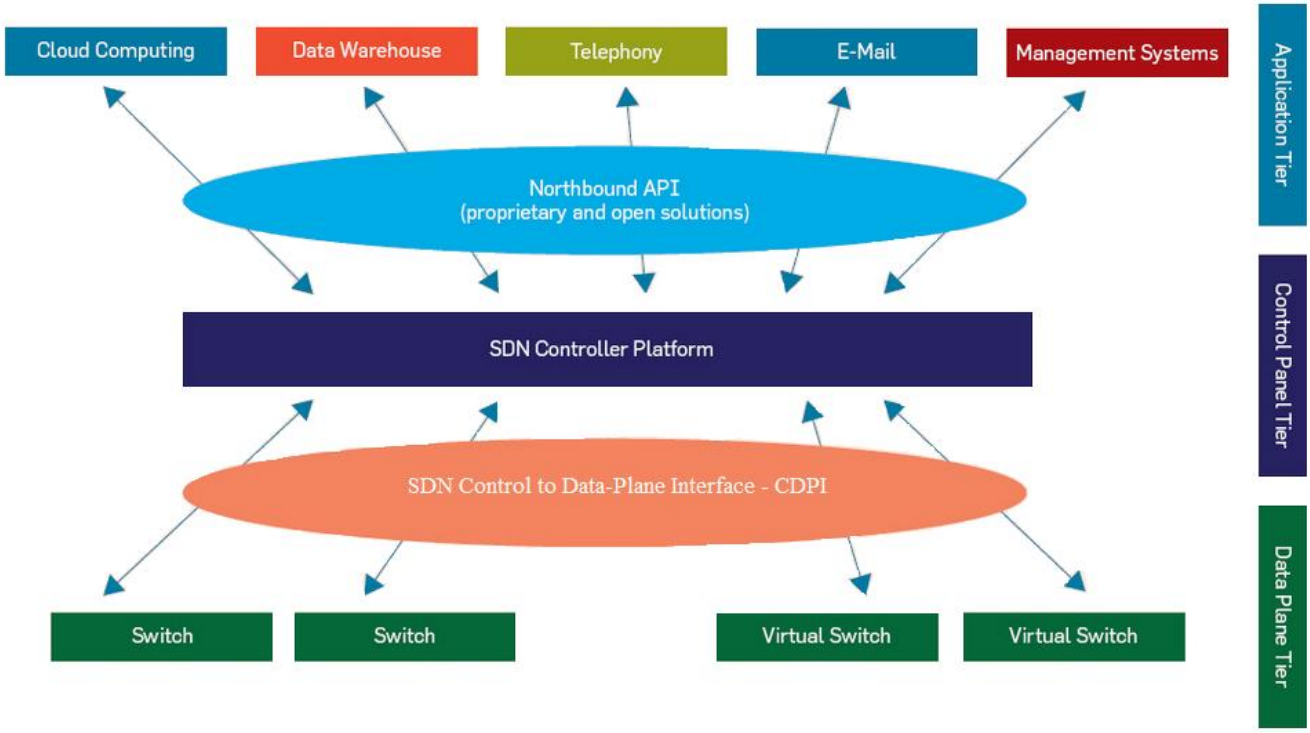
1.4.3 Καθορισμένη Δικτύωση Λογισμικού SDN

Τα Software Defined Networks (SDN) είναι μια τεχνολογία που υπόσχεται να διαχειριστεί την πολυπλοκότητα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Μια από τις προκλήσεις του 5G είναι η εκπλήρωση της τεράστιας ζήτησης της κινητής τηλεφωνίας και κατ’ επέκταση η καλύτερη και πιο ευέλικτη κατανομή του φάσματος. Η τεχνική του SDN επιτρέπει αποτελεσματικότερη διαχείριση του ραδιοφάσματος, καθώς χρησιμοποιώντας κεντρικό έλεγχο αντιλαμβάνεται την χρήση, επιτρέπει κατάλληλη κινητικότητα του φάσματος και εφαρμόζει την αρμόζουσα στρατηγική επιμερισμού του ραδιοφάσματος.[28] [31] Υλοποιείται η τεχνική να «τρέχουν» όλα τα στοιχεία as a service.

Οι απαρχές αυτής της τεχνολογίας βρίσκονται στην δεκαετία του 1990. Η πρώτη υλοποίηση ήταν με το πρωτόκολλο OpenFlow το 2006, όπου προσελκύει το παγκόσμιο ενδιαφέρον. Από το 2012, όμως, πολλές εταιρείες έχουν απομακρυνθεί από το OpenFlow, και έχουν αγκαλιάσει διαφορετικές τεχνικές. Αυτές περιλαμβάνουν Cisco Systems «Περιβάλλοντα ανοικτού δικτύου» και την πλατφόρμα εικονικού δικτύου Nicira

[28] , [31]. Οι λειτουργίες εικονικού δικτύου NFV συμπληρώνουν τα SDNs. Τα θέματα αυτά συνεργάζονται αλλά δεν εξαρτώνται το ένα από το άλλο. Οι λειτουργίες του δικτύου NFV μπορούν να αναπτυχθούν χωρίς να απαιτείται SDN και αντίστροφα. [30]

Με την τεχνολογία του SDN ανεξαρτητοποιούνται οι λειτουργίες ελέγχου και προώθησης του δικτύου από τις εφαρμογές υποδομής και τις υπηρεσίες του δικτύου. Ο έλεγχος πλέον μπορεί να προγραμματιστεί άμεσα. Ολόκληρη η γνώση του δικτύου βρίσκεται συγκεντρωμένη σε ελεγκτές SDN που βασίζονται στο λογισμικό και έχουν συνολική εικόνα του δικτύου. Επιτρέπει στους χειριστές του δικτύου να προωθήσουν δυναμικά την ροή κυκλοφορίας ώστε να ανταποκριθούν στις ανάγκες του δικτύου, να ασφαλίζουν και να βελτιστοποιούν τους πόρους του δικτύου. Απλοποιείται ο σχεδιασμός και η λειτουργία του δικτύου γιατί οι οδηγίες παρέχονται απ' ευθείας από τους ελεγκτές SDN.



Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική SDN

Σε ένα Software Defined Network, οι SDN εφαρμογές συνδέονται με τον ελεγκτή SDN μέσω μιας διεπαφής NBI (North Bound Interface) (Σχήμα 6). Γνωστοποιούν τις απαιτήσεις και την επιθυμητή συμπεριφορά του δικτύου. Οι εφαρμογές μπορούν να καταναλώσουν ένα μέρος του δικτύου για εσωτερική χρήση, π.χ. για λήψη αποφάσεων. Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για την μετάφραση των απαιτήσεων και την προώθηση προς τα SDN datapaths. Ένας ελεγκτής αποτελείται από μια ή περισσότερες διεπαφές NBI και τον οδηγό Ελέγχου δεδομένων διεπαφής (CDPI). Ο CDPI παρέχει προγραμματιστικό έλεγχο των λειτουργιών προώθησης, στατιστικές αναφορές, κοινοποίηση των γεγονότων. Συνδέει τον ελεγκτή με το SDN Datapath. Το SDN Datapath είναι μια λογική συσκευή του δικτύου που εκθέτει την ορατότητα και τον έλεγχο των δυνατοτήτων προώθησης και επεξεργασίας δεδομένων σε κάποια πύλη του δικτύου. Ένα SDN Datapath περιλαμβάνει έναν παράγοντα CDPI και ένα σύνολο από

μηχανές προώθησης της κυκλοφορίας και λειτουργίες επεξεργασίας της κυκλοφορίας. Οι μηχανές και οι λειτουργίες μπορεί να περιλαμβάνουν προώθηση μεταξύ των εξωτερικών διεπαφών του datapath ή των εσωτερικών λειτουργιών επεξεργασίας ή τερματισμό της κυκλοφορίας. Ένα ή περισσότερα SDN Datapaths μπορεί να περιέχονται σε μια φυσική πύλη του δικτύου, το οποίο διαχειρίζεται ως μονάδα. Ένα SDN Datapath μπορεί επίσης να οριστεί σε πολλαπλές πύλες του δικτύου. [30]

Ο έλεγχος του SDN μπορεί να ακολουθήσει έναν κεντρικό, ιεραρχικό ή αποκεντρωμένο σχεδιασμό. Στην αρχή προτάθηκε μια κεντρική λύση για τον έλεγχο SDN, όπου μια οντότητα ελέγχου θα έχει συνολική εικόνα του δικτύου. Ενώ αυτό απλοποιεί την εφαρμογή της λογικής ελέγχου, έχει περιορισμούς κλιμάκωσης καθώς αυξάνεται το μέγεθος και η δυναμική του δικτύου. Έτσι προτάθηκαν προσεγγίσεις ιεραρχικές και πλήρως κατανεμημένες. Στις ιεραρχικές λύσεις, οι κατανεμημένοι ελεγκτές λειτουργούν σαν ένα δέντρο, όπου οι αποφάσεις που απαιτούν γνώση για όλο το δίκτυο λαμβάνονται από έναν ελεγκτή ρίζα. Σε κατανεμημένες προσεγγίσεις, οι ελεγκτές λειτουργούν στην τοπική τους οπτική γωνία ή μπορούν να ανταλλάσσουν μηνύματα συγχρονισμού για να ενισχύσουν τις γνώσεις τους [31]. Ωστόσο, πρέπει να αποφασιστεί ο αριθμός και η θέση τοποθέτησης των οντοτήτων ελέγχου. Μια άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ των ελεγκτών και των συσκευών δικτύου, ειδικά στο πλαίσιο μεγάλων δικτύων.

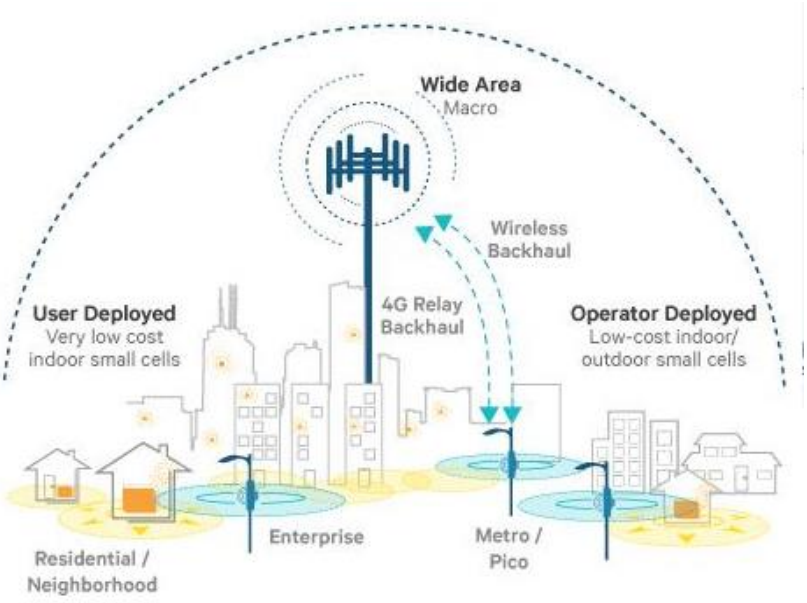
Το Software Defined Networking (SDN) επιτρέπει στους οργανισμούς να επιταχύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών και την παράδοση, μειώνοντας δραματικά τις δαπάνες μέσω της δυνατότητας αυτοματοποίησης της ροής εργασίας. Η τεχνολογία SDN επιτρέπει αρχιτεκτονικές σύννεφο (Cloud RAN) για την αυτοματοποιημένη παράδοση, εφαρμογή κατόπιν ζήτησης και την αυξανόμενη κινητικότητα. Το SDN ενισχύει τα οφέλη της κεντρικής διαχείρισης δικτύου. Μαζί με την αρχιτεκτονική NFV προσφέρει περαιτέρω ευέλικτη διαχείριση και βελτιστοποίηση κοινών λειτουργιών του δικτύου και πόρων, καθώς και μείωση του κόστους των υποδομών. [33]

1.4.4 Small cells (Μικρές Κυψέλες)

Οι μικρές κυψέλες είναι κόμβοι χαμηλής ισχύος ασύρματης πρόσβασης που λειτουργούν στην αδειοδοτημένη και μη αδειοδοτημένη περιοχή φάσματος που έχουν ακτίνα κάλυψης από 10 μέτρα μέχρι 1 ή 2 χιλιόμετρα. Στόχος τους είναι η αποσυμφόρηση της κίνησης που δέχεται ένας σταθμός βάσης μακροκυψέλης. Είναι "μικρές" σε σύγκριση με μια κινητή macrocell, που μπορεί να έχει ακτίνα κάλυψης μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Τοποθετούνται μετέπειτα μέσα στη μακροκυψέλη, και εκτός από χαμηλότερη ισχύ, λειτουργούν με διαφορετική κατανομή ραδιοσυχνοτήτων.

Καθώς αυξάνεται η κίνηση των δεδομένων, μεγαλώνει ο κίνδυνος συμφόρησης και οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας αγωνίζονται να υποστηρίξουν την ασφαλή και αποδοτική σύνδεση. Επειδή οι μικρές κυψέλες παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα τόσο για εσωτερικούς, όσο και για εξωτερικούς χώρους θεωρείται ότι είναι μια αποτελεσματική λύση για την υλοποίηση του νέου δικτύου. Η μικρή ακτίνα εκπομπής επιτρέπει καλύτερη ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και οδηγεί σε καλύτερη φασματική απόδοση.

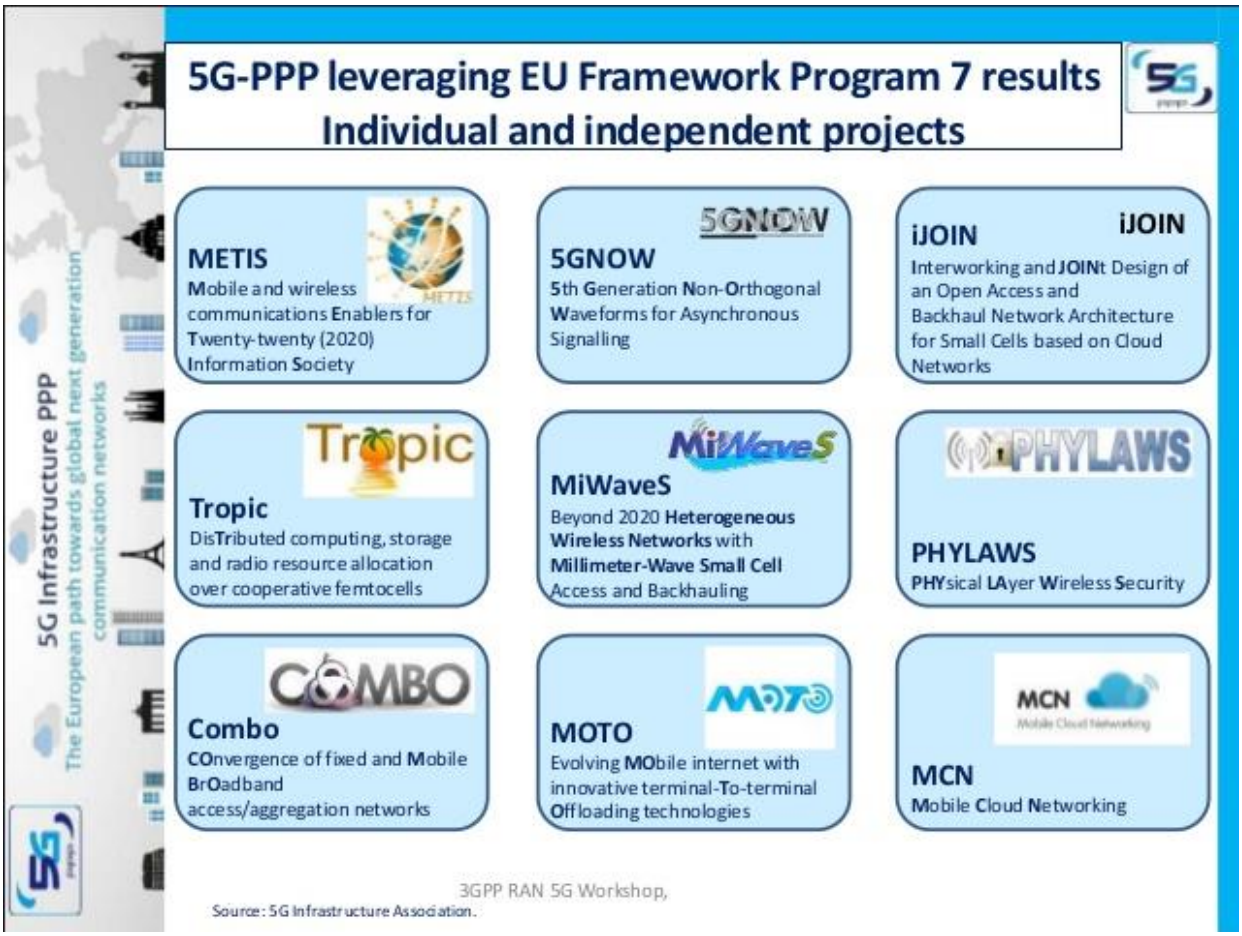
Επιτρέπει λοιπόν στο σύστημα να μεταδίδει περισσότερα bits ταυτόχρονα και αυτό έχει σαν επακόλουθο να υπάρχει χαμηλή καθυστέρηση (latency). Σε επίπεδο χρήστη, θα μπορούν να απολαμβάνουν ταχύτερο χρόνο ανόδου (upload) και καθόδου (download). Σε επίπεδο παρόχου, θα είναι σε θέση να προσφέρει καλύτερη οικοδομική – εσωτερική κάλυψη ακόμα και στα άκρα της κυψέλης, καθώς οι μικρές κυψέλες έχουν καλύτερη απόδοση στις άκρες, ειδικά στο upload. Αυτό είναι λογικό, καθώς το δίκτυο δεν επιβαρύνεται με τις παρεμβολές που προκαλεί ο σταθμός βάσης της μακροκυψέλης, δημιουργείται όπως λέμε το φαινόμενο «είναι μακριά και ακούγεται».



Εικόνα 13: Σενάριο μικρών κυψελών

Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που πρέπει να μελετηθούν στο πλαίσιο των μικρών κυψελών. Θα πρέπει να προγραμματιστεί σωστά η οπισθοχώρηση (backhaul). Δεν έχει προσδιοριστεί ακόμα αν οι σταθμοί βάσης των μικρών κυψελών θα επικοινωνούν μεταξύ τους με οπτικές ίνες, κάτι τέτοιο θα ήταν ωφέλιμο καθώς η οπτική ίνα παρέχει μεγάλη χωρητικότητα. Αν δεν υπάρχουν οπτικές ίνες μια εφικτή λύση θα ήταν η δυνατότητα να χρησιμοποιούν μικροκύματα μέχρι τον σταθμό βάσης που οι οπτικές ίνες σταματούν. Οι πάροχοι απαιτούν να μειωθεί αρκετά το λειτουργικό κόστος και για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι κυψέλες να γίνουν ασθενέστερες, να υλοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερες λειτουργίες, να εξασφαλίζουν απομακρυσμένη μετάδοση. Τέλος, καλό θα ήταν να υπάρξει ομαδοποίηση των κυψελών, να γίνει τυποποίηση των σχεδίων ιστοσελίδας με οικονομική κλίμακα και να επιτυγχάνεται γρήγορη διαμόρφωση μέσα σε λίγα λεπτά. [34]

1.5 Επισκόπηση των ερευνητικών προγραμμάτων



Εικόνα 14: 5G projects

1.5.1 ABSOLUTE project

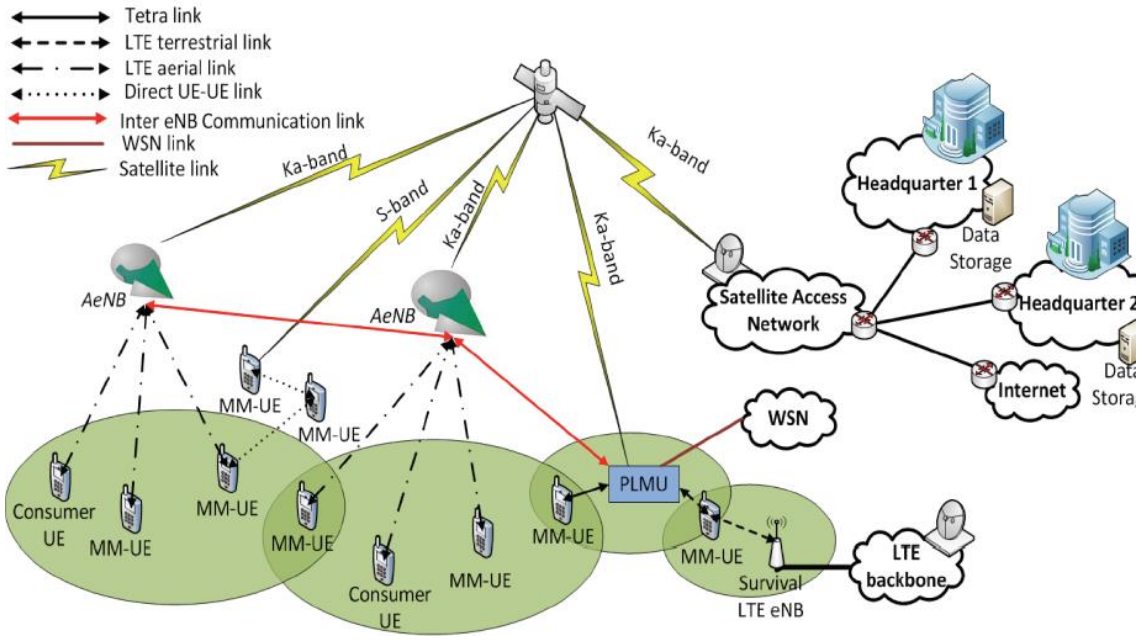
Το αρκτικόλεξο των λέξεων ABSOLUTE είναι Aerial Base Stations with Opportunistic Links for Unexpected & Temporary Events. Η EUCNC (Ευρωπαϊκή Διάσκεψη των Δικτύων και Επικοινωνιών) ενέκρινε το έργο ABSOLUTE, το οποίο συμβάλλει στην ανάπτυξη διαφόρων διαύλων.

Κύριος στόχος του πρότζεκτ ABSOLUTE ήταν να παρέχει ένα IP δίκτυο δεδομένων κινητής τηλεφωνίας υψηλής χωρητικότητας με χαμηλή καθυστέρηση (latency) και ευρεία κάλυψη, το οποίο είναι κατάλληλο για πολλές μορφές μεταφοράς πολυμέσων, συμπεριλαμβανομένων της δημόσιας ασφάλειας και των μαζικών εκδηλώσεων.

Στην περίπτωση μιας έκτακτης ανάγκης ή μιας καταστροφής, μια αξιόπιστη υποδομή επικοινωνίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παροχή κρίσιμων υπηρεσιών, περιλαμβάνοντας πρόσθετη χωρητικότητα, εργασίες αποκατάστασης έκτακτης ανάγκης, την αποκατάσταση των υποδομών, την παρακολούθηση της περιόδου μετά την καταστροφή κ.λ.π. Η κανονική υποδομή επίγειου δικτύου βρίσκεται σε σοβαρό κίνδυνο και δεν μπορεί να εγγυηθεί αξιόπιστη και μεγάλης κλίμακας κάλυψη για τις ομάδες διάσωσης και τους πολίτες.

Επειδή η αποτυχία των επίγειων υποδομών και των υποδομών των τηλεπικοινωνιών είναι δυνατόν να συμβεί σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις, η κοινοπραξία του

ABSOLUTE project έχει σχεδιάσει και αναλύσει μια ρεαλιστική αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος που βασίζεται στην συνδεσιμότητα 4G-LTE και δορυφόρων χρησιμοποιώντας Helikite πλατφόρμες και διευρύνοντας την εφαρμογή τους.



Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική ABSOLUTE

Τα κύρια θέματα με τα οποία ασχολείται το project ABSOLUTE είναι η πλατφόρμα χαμηλού υψομέτρου, φορητή μονάδα Land Mobile, multi hops δίκτυα επικοινωνιών, πολλαπλή λειτουργία του εξοπλισμού χρήστη, επικοινωνία συσκευής με συσκευή. Ακόμη είναι απαραίτητο να επιτυγχάνεται σύνδεση μέσω δορυφόρου και να είναι ευέλικτη διαχειριστική οντότητα. [35]

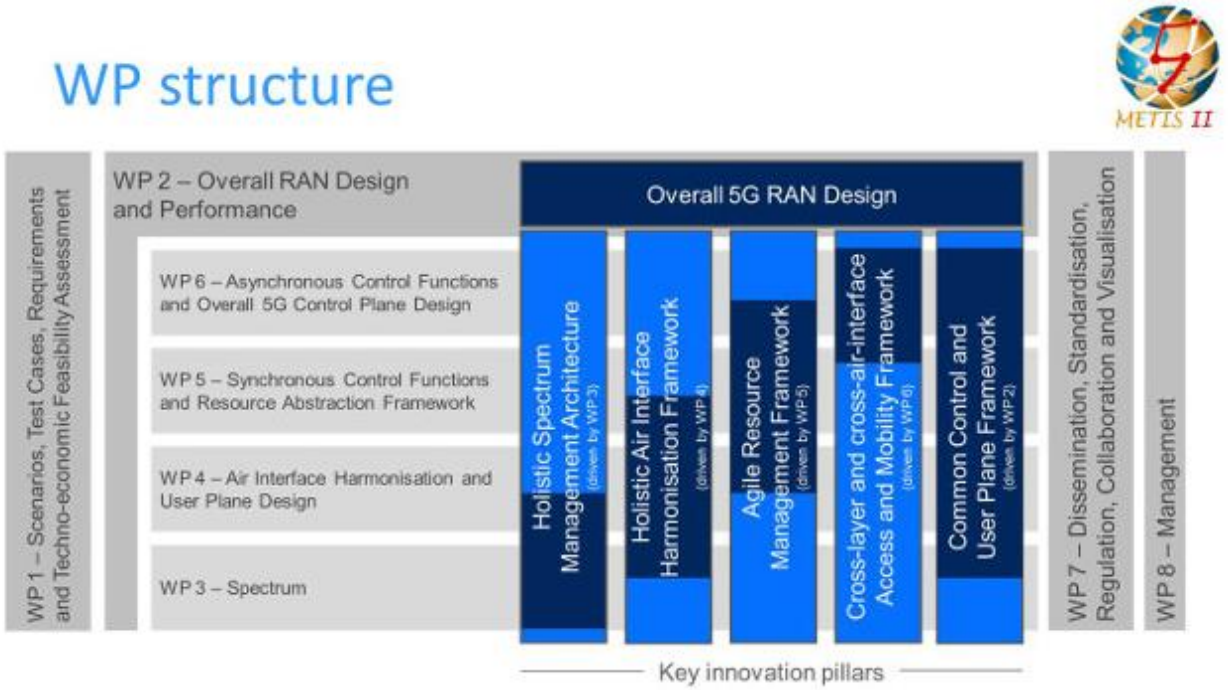
1.5.2 METIS 2020 project

Το ακρωνύμιο του METIS project προέρχεται από την φράση «Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty twenty Information Society» και αποτελεί ένα από τα βασικά έργα για την ανάπτυξη και την υλοποίηση των 5G τεχνικών. Ξεκίνησε το 2013 και ολοκληρώθηκε το 2015.

Αποδεικνύεται ότι το massive MIMO παρέχει τρόπους καλύτερης απόδοσης του φάσματος. Κάποιες συστάδες κεραιών θα μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες, ενώ άλλες θα λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες. Στόχος είναι να αξιοποιηθεί το ραδιοφάσμα, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες των πολύ πυκνών δικτύων UDN. Για να μειωθεί το επίπεδο παρεμβολής προτείνεται η χρήση των μεγάλων συχνοτήτων, της τάξης του cm, από τους σταθμούς βάσης των μικρών κυψελών. Οι συγκεκριμένες συχνότητες δεν μπορούν να μεταφέρουν μεγάλο όγκο πληροφορίας και γι' αυτόν τον λόγο δεν προτιμώνται για τους σταθμούς βάσης των μακροκυψελών. Επίσης, το έργο βλέπει το δίκτυο συνολικά, προωθώντας την συνεργασία μεταξύ των διάφορων κόμβων. [36] [37]

Έχει ως στόχο να διαδώσει την τεχνολογία σε νέους τομείς, όπως στην γεωργία. Κάποια από τα στοιχήματα είναι να επιτευχθεί χειρουργική επέμβαση από απόσταση και οδήγηση με αυτόματο οδηγό. [37]

Μετά την πρώτη επιτυχία του έργου, το METIS – II συνέχισε την ανάπτυξη του σχεδιασμού του 5G δικτύου ραδιοπρόσβασης και την παροχή τεχνικών προϋποθέσεων. Ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2015, λίγους μήνες μετά την ολοκλήρωση του METIS, και ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2017. Στα βασικά του επιτεύγματα ήταν να αναπτύξει τον συνολικό σχεδιασμό της πρόσβασης στο 5G δίκτυο, να παρέχει ένα πλαίσιο συνεργασίας για την 5GPP ώστε να αξιολογηθούν οι ιδέες για το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης και να αναπτύξει μια εικονική πλατφόρμα ώστε να γίνει επίδειξη και να φανούν οι αλληλεπιδράσεις των αποτελεσμάτων του έργου. [36] [37]



Εικόνα 15: Σύντομη επισκόπηση των στόχων και της δομής

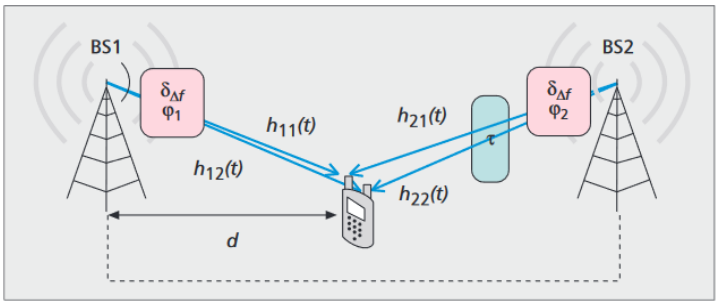
1.5.3 5G NOW project

Το ακρωνύμιο του συγκεκριμένου έργου είναι «5th Generation Non-orthogonal Waveforms for Asynchronous Signaling» και ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2012, σε μια εποχή που το LTE και το LTE-Advanced είχαν βελτιστοποιηθεί για την παροχή υψηλότερου bandwidth στους χρήστες ασύρματων δικτύων. Υποστήριξε την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (M2M). Προτείνει μια αποτελεσματική διεπαφή αέρα που παραβιάζει τις αρχές της ορθογωνιότητας και του αυστηρού συγχρονισμού.

Το 5GNOW αμφισβητεί τους στόχους του σχεδιασμού του LTE και LTE- Advanced σκεπτόμενο βασικά κενά. Το 5GNOW αναπτύσσει νέα PHY φυσικά και MAC επίπεδα που είναι καλύτερα προσαρμοσμένα για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών όσον αφορά την ποικιλία των υπηρεσιών και τις ετερογενείς ρυθμίσεις μετάδοσης.

Τα ασύρματα δίκτυα μετάδοσης μετά τα αποτελέσματα του 5GNOW ανταποκρίνονται καλύτερα στην πολλαπλότητα των υπηρεσιών, τις διαφορετικές κατηγορίες συσκευών

και τις ρυθμίσεις μετάδοσης υλοποιώντας μελλοντικά σενάρια – οράματα, όπως έξυπνες πόλεις. Η ενοποίηση των συστημάτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε M2M επικοινωνία, όπως για παράδειγμα δίκτυα αισθητήρων, μέσα στο δίκτυο επικοινωνίας. Μειώνεται σημαντικά το επίπεδο καθυστέρησης, φτάνοντας το 1 ms σε κάποιες περιπτώσεις και η εμπειρία ανά χρήστη (QoS) είναι ομοιόμορφη και ικανοποιητική. Το 5GNOW συμβάλλει στην τυποποίηση του δικτύου 5G. [39]



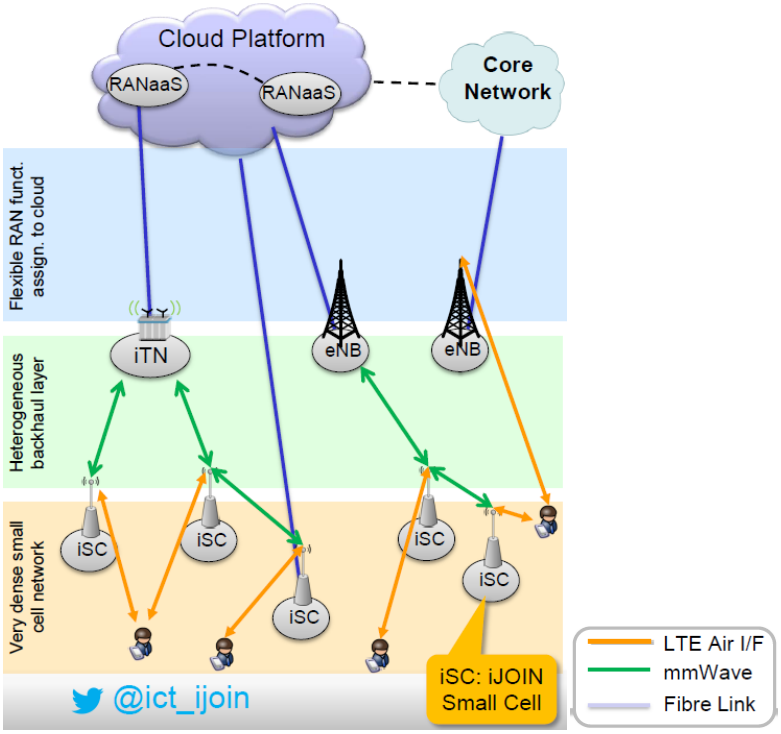
Σχήμα 8: Το πρόβλημα συγχρονισμού CoMP downlink

Αποτελείται από επιμέρους ερευνητικές ομάδες. Ήταν ιδιαίτερα χρήσιμα τα αποτελέσματα της ομάδας που ασχολήθηκε με την προσομοίωση και την σύγκριση των απαιτήσεων του συστήματος και των προδιαγραφών με το LTE- Advanced. Επίσης, ήταν απαραίτητη η ύπαρξη ομάδας που θα ασχολιόταν με την υλοποίηση και τον επανασχεδιασμό του φυσικού επιπέδου. Το τέταρτο πακέτο εργασίας προτείνει βελτιωμένες λειτουργίες του επιπέδου MAC πάνω στο νέα σχεδιασμένο φυσικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένεια του δικτύου. Στο τέλος, επικυρώνεται η αρχιτεκτονική που προτείνεται με πρακτική εφαρμογή σε βασικά σενάρια που αφενός αποδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και αφετέρου δημιουργούν νέες προκλήσεις για τον μελλοντικό σχεδιασμό. Το έργο ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 2015. [39] [41]

1.5.4 CROWD project

Το CROWD όπως δηλώνει και το ακρωνύμιο του «Connectivity management for energy optimized Wireless Dense Networks προωθεί μια στροφή στη μελλοντική αρχιτεκτονική προς την παγκόσμια συνεργασία του δικτύου, την δυναμική διαμόρφωση και λειτουργικότητα του δικτύου και την ρύθμιση χωρητικότητας. Το έργο ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2013 και ασχολήθηκε με πολύ πυκνά ετερογενή δίκτυα ασύρματης πρόσβασης και ενσωματωμένα ασύρματα-ενσύρματα δίκτυα backhaul. Σε αυτό το πλαίσιο, το CROUD επιδιώκει τέσσερις βασικούς στόχους: (α) να πετύχει πυκνότητα ανάλογη της χωρητικότητας , όπου αυτό είναι αναγκαίο, (β) να βελτιστοποιήσει τους μηχανισμούς MAC που λειτουργούν σε πολύ πυκνές υλοποιήσεις χρησιμοποιώντας την πυκνότητα ως πόρο, (γ) να επιτρέπει φορτίο ανάλογο της κατανάλωσης ενέργειας, και (δ) να διασφαλίζει την ποιότητα εμπειρίας του κινητού χρήστη από το σχεδιασμό εξυπνότερων λύσεων διαχείρισης και συνδεσιμότητας. [42]

1.5.5 i JOIN project



Εικόνα 16: Joint Optimization of RAN and Backhaul

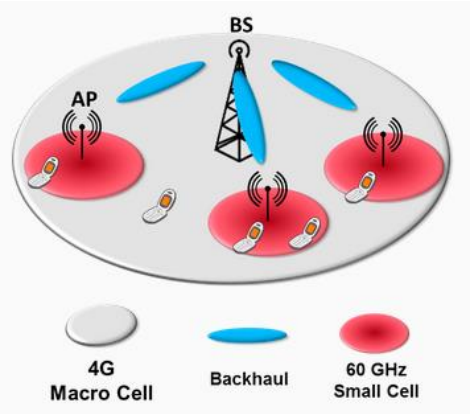
Το πρότζεκτ i–JOIN εισάγει την λογική RAN-as-a-Service (RANaaS), όπου η λειτουργία του δικτύου ασύρματης πρόσβασης ελέγχεται κεντρικά από μια ανοιχτού λογισμικού πλατφόρμα, η οποία στηρίζεται στην αρχιτεκτονική cloud. Το i–JOIN στοχεύει σε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο για βελτιστοποίηση της πρόσβασης και της οπισθοχώρησης - backhaul, για λειτουργία και διαχείριση των αλγορίθμων και των αρχιτεκτονικών στοιχείων, για ενσωμάτωση των μικρών κυψελών και κεντρική επεξεργασία. [43]

Η υλοποίηση του σχεδίου πετυχαίνει άνοιγμα της αγοράς σε νέους «παίκτες», όπως παρόχους ηλεκτρονικών πλατφόρμων που θα υποστηρίζουν cloud αρχιτεκτονική. Αλλά η ανάπτυξη της προοπτικής αυτής εξασφαλίζει και αρκετά καλά τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι, έχουμε σημαντική αύξηση του throughput του συστήματος χωρίς να απαιτηθεί αύξηση του φάσματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την μετάβαση από τον ειδικό εξοπλισμό σε λειτουργίες πάνω σε πλατφόρμες που βασίζονται σε λογισμικό cloud. Επιπλέον, αυξάνεται η αποδοτικότητας ανά δυαδικό ψηφίο χρησιμοποιώντας πολύ πυκνά περιβάλλοντα και η αποδοτικότητα χρήσης μέσω της αποτελεσματικότερης αξιοποίησης των υφιστάμενων πόρων. Έτσι, το iJOIN επιτρέπει μια σημαντική μείωση στο κόστος των λειτουργιών, επειδή ένα μέρος της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του RAN έχει πάει στην πλατφόρμα. Επίσης, έχει μειωθεί σημαντικά το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας των δικτύων των μικρών κυψελών. [43]

1.5.6 MiWaves project

Το MiWaveS είναι μια κοινοπραξία που αποτελείται από 15 μέλη συμπεριλαμβάνοντας σημαντικούς οργανισμούς για τα δίκτυα, παρόχους κινητής τηλεφωνίας, ερευνητικά κέντρα και ακαδημαϊκές ομάδες από 8 ευρωπαϊκές χώρες.

Το MiWaveS αναπτύσσει σημαντικές τεχνολογίες mmW ασύρματης πρόσβασης και backhaul για ετερογενή κυψελωτά κινητά δίκτυα 5ης γενιάς, παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο τεχνολογίες μικροκυμάτων (millimeter– Wave) μπορούν να παρέχουν πρόσβαση πολλών Gbps σε κινητούς χρήστες. Στόχος του ήταν να διερευνήσει και να επιδείξει βασικές τεχνολογίες και λειτουργίες που υποστηρίζουν την ενσωμάτωση μικροκυμάτων σε μελλοντικά ετερογενή δίκτυα μικρών κυψελών, καθώς και ένα ευρύ πρόγραμμα ενσωμάτωσης με γνώμονα τη βιομηχανία, το οποίο θα φέρει σε επαφή κορυφαίες ευρωπαϊκές βιομηχανίες και ερευνητές στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. [44]



Σχήμα 9: Αναμενόμενη επίδραση σε τοπολογία δικτύου

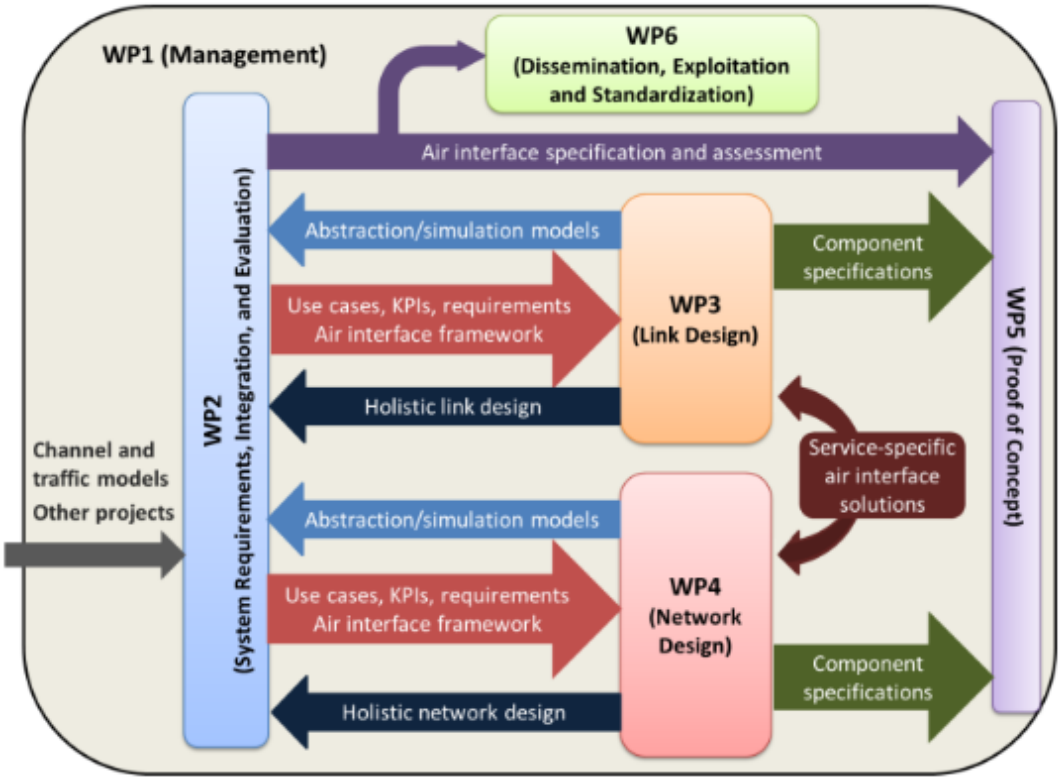
Το MiWaveS οργανώνεται σε 8 πακέτα εργασιών. Τα πιο σημαντικά από αυτά ασχολούνται με τον καθορισμό του ετερογενούς ασύρματου δικτύου και μέσα από τα σενάρια και τις περιπτώσεις χρήσης να αντλήσει τις προδιαγραφές των μικρών κυψελών mmW, τον ορισμό της στρατηγικής για την κατανομή των πόρων και τη δρομολόγηση των δεδομένων και τις πτυχές που σχετίζονται με έκθεση του ανθρώπινου σώματος σε mmW. Μια άλλη ομάδα εργασίας ασχολείται με τους μηχανισμούς δικτύου και τους αλγορίθμους που απαιτούνται για την αυτο-οργάνωση της ετερογενούς πρόσβασης και της οπίσθιας επιστροφής, της αυτόματης διεύθυνσης της δέσμης κεραιών και της έξυπνης βελτιστοποίησης δυναμικών διαδρομών και της εξισορρόπησης φορτίου στο δίκτυο. Επιπλέον, υπάρχει εργασία που ασχολείται με την τεχνολογία κεραίας και την έκθεση του ανθρωπίνου σώματος σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στα περιβάλλοντα των μικρών κυψελών. Στόχος της είναι να αναπτύξει τις μονάδες πομποδέκτη και τις λύσεις σε επίπεδο κεραίας που θα ενσωματωθούν στις κινητές συσκευές και σε σημεία πρόσβασης για πρόσβαση και backhaul. Μια σημαντική εργασία αφορά την ολοκλήρωση των αναλογικών διεπαφών, την εφαρμογή αλγορίθμων βασικής ζώνης και την προτυποποίηση. Στόχος της είναι να παρέχει λειτουργικά πρωτότυπα ασύρματου backhaul ευρείας ζώνης mmW και συνδέσεις πρόσβασης.

Υπάρχουν και πακέτα εργασίας που ασχολούνται (α) με τις βασικές επιδόσεις στην πρόσβαση σε mmW και την απόδειξη της αντίληψης για ετερογενή ασύρματα δίκτυα,

(β) τον συντονισμό της διάδοσης και της αξιοποίησης των αποτελεσμάτων του έργου, (γ) την διαχείριση της τεχνικής και στρατηγικής υλοποίησης των εργασιών. [44]

1.5.7 Fantastic 5G

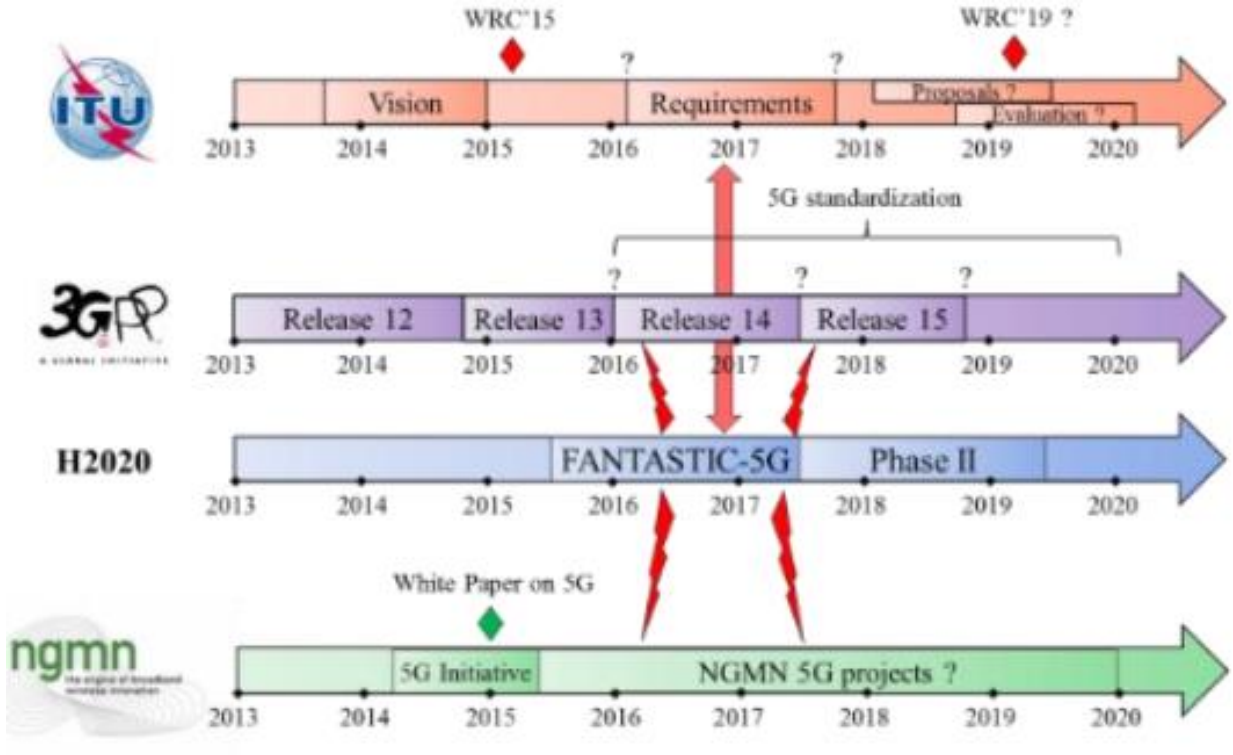
Το FANTASTIC-5G προέρχεται από τα αρχικά των «flexible air interface for scalable service delivery within wireless communication networks of the 5th Generation» και πρόκειται για ένα ευρωπαϊκό έργο το οποίο αναπτύσσει μια νέα εναέρια διεπαφή (AI) πολλαπλών υπηρεσιών κάτω των 6 GHz μέσω ενός αρθρωτού σχεδιασμού. Για να μπορέσει το σύστημα να προσαρμοστεί στην αναμενόμενη ετερογένεια, οι επιδιωκόμενες ιδιότητες είναι: ευελιξία, επεκτασιμότητα, αποδοτικότητα και αντοχή στο μέλλον. Για το σκοπό αυτό, το έργο αναπτύσσει τα τεχνικά συστατικά του AI και τα εντάσσει σε ένα γενικό πλαίσιο εναέριων διεπαφών όπου θα επιτευχθεί προσαρμογή στις παραπάνω πηγές ετερογένειας.



Σχήμα 10: Αλληλεπιδράσεις και εξαρτήσεις ανάμεσα στις ερευνητικές εργασίες

Προκειμένου να γίνει πραγματικότητα το όραμα της 5G, η FANTASTIC-5G διεξάγει εργασίες για την επίτευξη των ακόλουθων μετρήσιμων στόχων υψηλού επιπέδου: (α) να αναπτύξει μια ευέλικτη και κλιμακούμενη εναέρια διεπαφή για να επιτρέψει τη συνύπαρξη εντός ζώνης πολύ διαφορετικών υπηρεσιών, τύπων συσκευών και χαρακτηριστικά κυκλοφορίας ή μετάδοσης, (β) να σχεδιαστεί μια εναέρια διεπαφή που θα επιτρέπει την κάλυψη και την υψηλή χωρητικότητα όπου και όταν απαιτείται, (γ) να αναπτύξει μια εναέρια διεπαφή που είναι ιδιαίτερα αποδοτική όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και πόρων, (δ) να αποδοθεί «περισσότερο μέλλον» στο 5G μέσω της ευκολότερης εισαγωγής νέων χαρακτηριστικών, (ε) να αξιολογήσει και να επικυρώσει τις αναπτυγμένες έννοιες μέσω προσομοιώσεων επιπέδου συστήματος, (στ) την επίτευξη συναίνεσης σχετικά με την τυποποίηση του 5G μεταξύ των σημαντικότερων βιομηχανικών εταίρων του έργου που είναι επίσης μέλη με δικαίωμα ψήφου στο 3GPP και (ζ) να ωθήσουν τις καινοτομίες του έργου προς τυποποίηση.

Το τεχνικό έργο του FANTASTIC-5G είναι δομημένο γύρω από 6 Work Plans (Σχήμα 10: Αλληλεπιδράσεις και εξαρτήσεις ανάμεσα στις ερευνητικές εργασίες), δηλαδή την διαχείριση, τις απαιτήσεις συστήματος, την ολοκλήρωση και την αξιολόγηση, το σχεδιασμός συνδέσμων, τον σχεδιασμό του δικτύου, την απόδειξη της έννοιας, την διάδοση, εκμετάλλευση και τυποποίηση της ιδέας. [45]



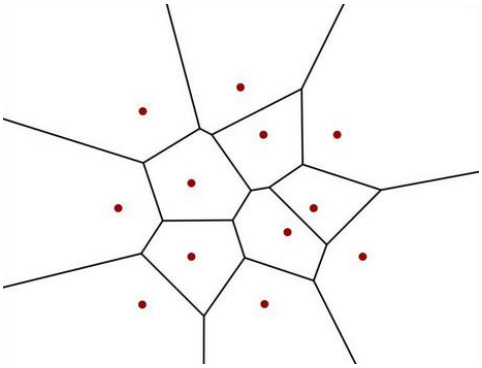
Εικόνα 17: Positioning of Fantastic 5G with respect to ITU, 3GPP and NGMN

2. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Μετρικές και βασικά μεγέθη της Στοχαστικής Γεωμετρίας

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών είναι ένα σύνολο από κόμβους που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή και μπορούν να είναι είτε πομποί είτε δέκτες. Σε δεδομένο χρόνο, συγκεκριμένοι κόμβοι εκπέμπουν στους «δέκτες». Ωστόσο, ακόμα και στα απλούστερα μοντέλα, το σήμα που φτάνει από τον «πομπό» μπορεί να είναι κατεστραμμένο λόγω διάφορων παραγόντων που έχουν να κάνουν με την συμπεριφορά του δικτύου. Για να μελετήσουμε και να αναλύσουμε ένα ασύρματο δίκτυο καθοριστικό ρόλο έχει η γεωμετρία των κόμβων. Υπάρχουν δύο υποθέσεις – κύριες τεχνικές: οι ντετερμινιστικές μέθοδοι και η ανάλυση μέσω της στοχαστικής γεωμετρίας. [46] [47]

Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι βασίζονται στην ιδέα του πλέγματος και συγκεκριμένα στην υπόθεση ότι όλες οι κυψέλες είναι εξαγωνικές. Αυτές οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές για κυψέλες με συγκεκριμένη ακτίνα κάλυψης. Μέσω «σωστού» καταμερισμού του φάσματος των συχνοτήτων γίνεται κατανομή των ραδιοδιαύλων στις κυψέλες που υπάρχουν σε μια περιοχή κάλυψης οδηγώντας σε αποφυγή ομοδιαυλικών παρεμβολών μέσα στις κυψέλες. Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως μέχρι τα κινητά 3ης γενιάς – LTE. Όμως, η αυξημένη κινητικότητα, η μεταβαλλόμενη κίνηση, τα πυκνά δίκτυα και η παρουσία ψηλών κτιρίων που «κόβουν» το σήμα ήταν παράγοντες που επηρέασαν αρνητικά την γεωμετρία των δικτύων. [47]

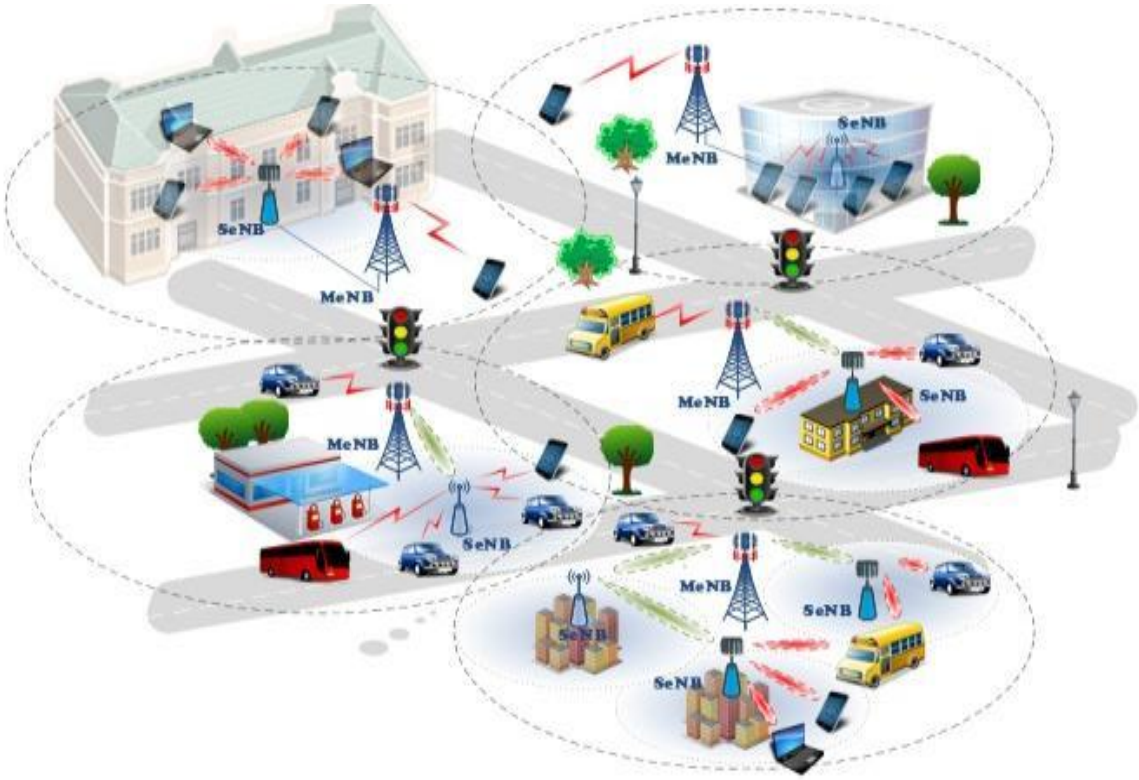


Σχήμα 11: Διάγραμμα Voronoi

Μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για να μοντελοποιήσουμε μια τυχαία περιοχή κάλυψης χωρίς κενά ή υπερκαλύψεις είναι η δημιουργία διαγράμματος Voronoi (Σχήμα 11). Τα όρια των κυψελών προκύπτουν από τον σχεδιασμό της μεσοκαθέτου για κάθε ευθύγραμμο τμήμα που έχει ως άκρα του δυο γειτονικούς σταθμούς βάσης. Είναι χρήσιμη για δίκτυα μικρών κυψελών σε πυκνά περιβάλλοντα. [46]

Η ετερογένεια των δικτύων έχει σαν αποτέλεσμα το πλήθος των διαφορετικών περιπτώσεων να είναι υπερβολικά μεγάλο. Η σχεδίαση συστημάτων που ανταποκρίνονται σε κάθε συγκεκριμένη τοπολογία καθώς και η μελέτη και αξιολόγηση των δικτύων καθίσταται αδύνατη. Μια ιδανική λύση για να ανταποκριθούν στις ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών είναι να υλοποιηθεί ένα συνδυασμός των αρχιτεκτονικών, των τεχνολογιών, του ραδιοφάσματος και των ορίων κάλυψης της κάθε κυψέλης. Υπάρχει η ανάγκη για αποτελεσματικό σχεδιασμό και μελέτη των μετρικών του

δικτύου στατιστικά ώστε να ανταποκρίνεται σε μια πληθώρα περιπτώσεων. [47] Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο διαχωρισμός της διαδικασίας uplink – ανερχόμενης ζεύξης και downlink – κατερχόμενης ζεύξης καθώς παρουσιάζονται ετερογένειες στον τρόπο λειτουργίας τους. Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατανεμημένοι οι σταθμοί βάσης στον χώρο δεν ανταποκρίνεται (υποχρεωτικά) στον τρόπο με τον οποίο είναι κατανεμημένοι οι χρήστες στον χώρο. Μάλιστα, λογικό θα ήταν να θεωρήσουμε πως πρόκειται για δυο ανεξάρτητες κατανομές που ανταποκρίνονται σε διαφορετικές περιπτώσεις και έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

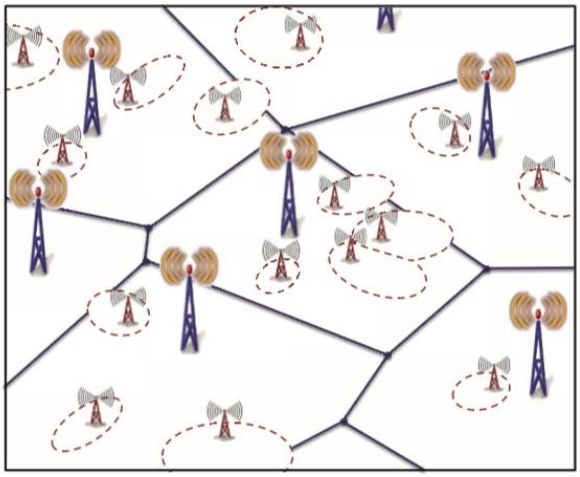


Σχήμα 12: Τυπικό περιβάλλον 5G δικτύου

Οι διαμορφώσεις στον χώρο ποικίλουν. Η ιδέα της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων οδηγεί σε συσχετίσεις ανάμεσα στους σταθμούς βάσης που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Το σύστημα είναι επιρρεπές σε ομοδιαυλικές παρεμβολές στην περίπτωση που δεν γίνει σωστός σχεδιασμός. Παρόλα αυτά, η στοχαστική γεωμετρία παρέχει εργαλεία και μπορεί να διευρυνθεί για να βρει την βέλτιστη πολιτική του δικτύου στην περίπτωση που υπάρχει αυξημένη κίνηση και την βέλτιστη πυκνότητα, το είδος σταθμών βάσης οι οποίοι μπορούν να απενεργοποιηθούν στην περίπτωση που η κινητικότητα είναι χαμηλή. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και εκπεμπόμενης ισχύος όταν υπάρχει μικρή κίνηση. [47]

Επιπλέον, τα σύγχρονα δίκτυα είναι πολυεπίπεδα και οι μικρές κυψέλες εισάγουν εκτός από περισσότερη παρεμβολή και μεγάλη τυχαιότητα στην θέση των κόμβων. Υπάρχουν περιπτώσεις, όπως στις φεμτοκυψέλες, που η θέση των πομπών είναι άγνωστη ή τυχαία. Η στοχαστική γεωμετρία παρέχει ένα στατιστικό μοντέλο για την θέση των κόμβων στον χώρο. Παρέχει, επίσης, εργαλεία για τον προσδιορισμό και τον υπολογισμό σημαντικών ποσοτήτων και ιδιοτήτων των δικτύων. Υπολογίζει τον μέσο

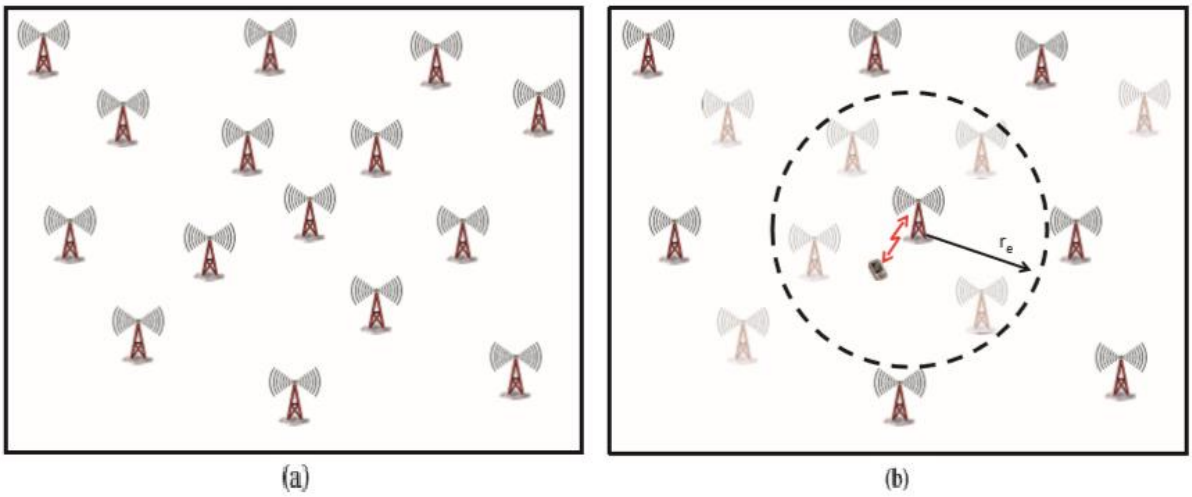
χρόνο απόκρισης, την κατανομή των παρεμβολών, την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης, τον λόγο παρεμβολής προς θόρυβο – SINR, τον συντελεστή εξασθένισης ή την συμφόρηση δίνοντας στατιστικά στοιχεία για την απόδοση του δικτύου. [47] [48]



Σχήμα 13: Ετερογενές δίκτυο με σταθμούς βάσης μάκρο και μίκρο κυψελών

Στην πορεία αυτής της εργασίας αρχικά θα αναλύσουμε βασικές μετρικές απόδοσης που χαρακτηρίζουν κάθε τοπολογία δικτύου. Έτσι στις επόμενες παραγράφους αναλύουμε την void probability, το SINR, την συνδεσιμότητα, την πιθανότητα διακοπής καθώς και την εκτίμηση της συνολικής παρεμβολής. Στην επόμενη παράγραφο 2.2 θα περιγραφούν θεμελιώδη θεωρήματα της στοχαστικής γεωμετρίας, κάποιες από τις βασικές οικογένειες στοχαστικών διεργασιών, όπως οι Poisson Point Processes 2.2.1, Binomial Point Processes 2.2.2, Thomas Poisson Cluster Processes 2.2.3, Matern Poisson Cluster Processes 2.2.4 και Determinental Point Processes 2.2.5. Θα δούμε τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται η καθεμία, τον επηρεασμό των διάφορων μετρικών σε κάθε περίπτωση και θα γίνει μια σύγκριση ως προς την απόδοση του δικτύου για τα διάφορα περιβάλλοντα.

2.1.1 Void probability



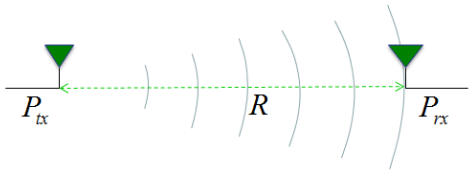
Εικόνα 18: Η πιθανή τοπολογία του δικτύου μετά την επιλογή BS

Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η απόσταση R που απέχει ο χρήστης από τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί. Μιας και κάθε χρήστης επικοινωνεί με τον

κοντινότερο σταθμό βάσης αποκλείεται να υπάρχει άλλος σταθμός βάσης σε μικρότερη απόσταση από R, άρα οι παρεμβολές προέρχονται από κόμβους που είναι σε απόσταση μεγαλύτερη από R. Έτσι, σε μια περιοχή A η οποία είναι κύκλος με ακτίνα r δεν υπάρχουν άλλοι σταθμοί βάσης. Η void probability ή αλλιώς η πιθανότητα να υπάρχει κενός χώρος εξαρτάται από την διεργασία που μοντελοποιεί τα σημεία, και δίνεται από τον τύπο: $P[R > r] = P[\text{no BS closer than r}]$. [48]

Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι: $P[R \le r] = F_R(r)$ και η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για το R είναι $f_R(r) = \frac{dF_R(r)}{dr}$. Στην περίπτωση που έχουμε διεργασία PPP η συνάρτηση κοντινότερης απόστασης περιγράφεται με μια κατανομή Rayleigh.[49]

2.1.2 Ο λόγος της παρεμβολής προς τον θόρυβο – SINR



Εικόνα 19: Απόσταση ανάμεσα σε πομπό (tx) και δέκτη (rx)

Στα ασύρματα δίκτυα, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης ανάμεσα στη θέση του πομπού $x \in \mathbb{R}^n$ και στη θέση του δέκτη $y \in \mathbb{R}^n$, όπου n : η διάσταση του χώρου στον οποίο αναφερόμαστε, συνήθως n=2 ή n=3.

Το SINR είναι ο στιγμιαίος λόγος της λαμβανόμενης επιθυμητής ενέργειας σε ένα δέκτη προς το άθροισμα των παρεμβολών και της ενέργειας που εκλαμβάνεται σαν θόρυβος. Πρόκειται για μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

i. Την ευκλείδεια <u>απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη</u>: $r = \|x - y\|$

Η λαμβανόμενη επιθυμητή ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης και μάλιστα μειώνεται εκθετικά καθώς η απόσταση αυξάνεται. [47]

ii. <u>Ο συντελεστής απώλειας της ισχύος του σήματος</u>: $\alpha \in (2,6]$

Καθώς αυξάνεται μεγαλώνει η απόσταση έχουμε περισσότερη σκέδαση και απορρόφηση της ενέργειας στο περιβάλλον. [47]

iii. <u>Το σύνολο των ενεργών πομπών</u> στο δίκτυο: Φ

Συμβολίζουμε την εκπεμπόμενη ισχύς από τον πομπό x με $P_t(x)$. Όσο περισσότεροι είναι οι πομποί που εκπέμπουν, τόσο πιο δύσκολο είναι για τον δέκτη να βρει και να αποκωδικοποιήσει το σωστό σήμα. Σε κάθε δέκτη, οι υπόλοιποι ενεργοί πομποί θεωρούνται παρεμβολές. [47]

iv. <u>Τον θερμικό θόρυβο ισχύος</u> : $\sigma^2 \in [0,1]$

Εξαρτάται τόσο από τη λαμβανόμενη ποιότητα του σήματος όσο και από την ισχύ των παρεμβολών. Όταν η εκπεμπόμενη ισχύς είναι χαμηλή, το SINR περιορίζεται από τον

θερμικό θόρυβο. Ενώ, όταν η εκπεμπόμενη ισχύς είναι υψηλή, το SINR περιορίζεται από την ισχύ των υπόλοιπων πομπών. [47]

v. Την ισχύ των παρεμβολών: $\sum_{y \in Y - y_0} P_r(y)$

Εξαρτάται από το σύνολο των παρεμβολών και τις αποστάσεις από τον επιθυμητό δέκτη. Επομένως, αν συμβολίσουμε με y_0 τον επιθυμητό δέκτη, το σύνολο της ισχύος των παρεμβολών είναι το άθροισμα της ισχύος που προορίζεται για τους υπόλοιπους δέκτες του δικτύου, όπου Y είναι το σύνολο των δεκτών στο δίκτυο. Σε πολύ πυκνά δίκτυα θεωρούμε ότι η μέση ισχύς των παρεμβολών επηρεάζει – καταστρέφει την ποιότητα του σήματος περισσότερο από τον θερμικό θόρυβο.[47]

vi. Η παράμετρος των διαλείψεων (fading): h_{xy}

Πρόκειται για μια τυχαία μεταβλητή για το κανάλι μετάδοσης και προσομοιάζει τον συντελεστή σκίασης και σκέδασης ανάμεσα στον πομπό x και στον δέκτη y. [47]

vii. Το μέσο διάδοσης στον χώρο: A είναι μια σταθερά διάδοσης. [47]

Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν λιγότερο τον λόγο SINR, όπως πολλαπλές κεραίες σε πομπούς και δέκτες, ακυρωτικές τεχνικές για την παρεμβολή και έλεγχο ισχύος. Υποθέτοντας ότι κάθε πομπός εκπέμπει σε έναν μόνο δέκτη και ότι έχουμε μοναδικότητα στην προέλευση του λαμβανόμενου σήματος, για να υπολογίσουμε την λαμβανόμενη ισχύ του σήματος $P_r(y)$, με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις, προκύπτει ο μαθηματικός τύπος: $P_r(y)=P_t(x)\ A\ h_{xy} \|x - y\|^{-\alpha}$ [47]

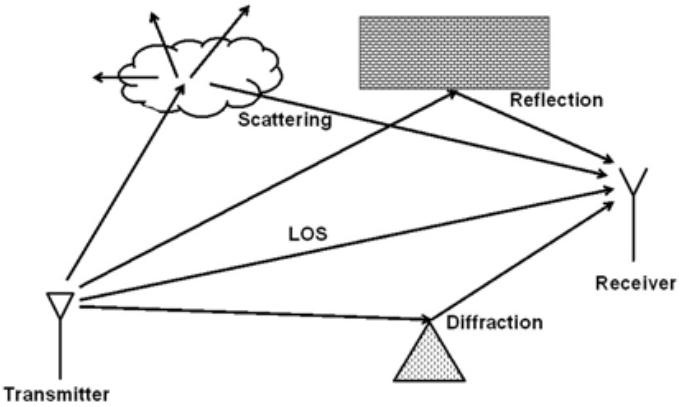
Μια παραλλαγή του παραπάνω τύπου χρησιμοποιείται προκειμένου το μοντέλο απώλειας να είναι περισσότερο πρακτικό και να λαμβάνει υπόψη την περίπτωση που δεν έχουμε μοναδικότητα στην προέλευση: $P_r(y)=\frac{P_t(x)\ A\ h_{xy}}{\varepsilon + \|x - y\|^{\alpha}}$. Όμως, ο συντελεστής $\varepsilon > 0$ προστίθεται και δυσκολεύει την ανάλυση. Έτσι, για λόγους απλότητας θα υποθέτουμε την μοναδικότητα της προέλευσης του σήματος. Επίσης, θα ακολουθήσουμε τους συμβολισμούς: $P_t = P_t(x)$, $P_r = P_r(y)$ για διευκόλυνση στους μαθηματικούς συμβολισμούς. Έτσι, το λαμβανόμενο SINR σε έναν δέκτη y_0 ορίζεται να είναι: $SINR(y_0) = \frac{P_r(y_0)}{\sigma^2 + \sum_{y \in Y - y_0} P_r(y)} = \frac{P_t(x_0)\ A\ h_{x_0 y_0} r^{-\alpha}}{\sigma^2 + \sum_{x \in \Phi - x_0} P_t(x)\ A\ h_{xy} r^{-\alpha}}$.

Ένα χαρακτηριστικό που καθορίζει την απόδοση του δικτύου είναι το επιτρεπτό – αξιοποιήσιμο όριο SINR, το οποίο συμβολίζεται στους μαθηματικούς τύπους με τ . [47]

2.1.3 Συνδεσιμότητα και κάλυψη

Η συνδεσιμότητα ενός τυχαίου δικτύου καθορίζεται από την πιθανότητα ανταλλαγής πληροφορίας ανάμεσα σε ένα τυχαίο ζεύγος κόμβων με έναν συγκεκριμένο ρυθμό. Ένας πομπός και ένας δέκτης μπορούν να επικοινωνούν όταν το SINR είναι

μεγαλύτερο από ένα επιτρεπτό αξιοποιήσιμο όριο – κατώφλι τ. Έτσι, ορίζεται σαν $P[SINR > \tau]$. [47]



Σχήμα 14: Το ασύρματο περιβάλλον που επηρεάζει την συνδεσιμότητα

Μια περιοχή γύρω από έναν πομπό όπου μπορεί να επιτευχθεί σύνδεση, ονομάζεται περιοχή κάλυψης. Για να μπορέσουμε να έχουμε ενεργή σύνδεση μέσα στην περιοχή κάλυψης είναι απαραίτητο $P[SINR > \tau] > 1-\varepsilon$, δηλαδή το αξιοποιήσιμο σήμα να είναι πάνω από ένα κατώτατο όριο 1-ε. Οι περισσότερες μέθοδοι για να περιγράψουμε και να υπολογίσουμε την συνδεσιμότητα ενός δικτύου βασίζονται στον υπολογισμό του SINR. Επειδή το SINR είναι μια τυχαία μεταβλητή, και μάλιστα με περίπλοκο τύπο υπολογισμού αν δούμε την παράγραφο 0, έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά μαθηματικά εργαλεία, όπως οι μετασχηματισμοί Laplace και Fourier προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για αυτήν την μετρική και κατ' επέκταση για όλο το δίκτυο. Οι μαθηματικές ιδιότητες των μετασχηματισμών θα αναλυθούν εκτενέστερα στην παράγραφο που μελετάται η παρεμβολή 2.1.5.

2.1.4 Throughput και πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης

Η ταχύτητα μετάδοσης συνδέεται με το SINR και μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους. Η μέση τιμή για το throughput ανά σύνδεση είναι μια σημαντική μετρική σε δίκτυα όπου ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται στο στιγμιαίο SINR και για να υπολογιστεί αρκεί να βρούμε το $E[\log(1+SINR)]$. [47]

Σε δίκτυα που δεν υποστηρίζουν την δυναμική προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης, είναι χρησιμότερος ο υπολογισμός μετρικών που στηρίζονται στην πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης. Όταν το λαμβανόμενο SINR είναι κάτω από ένα κατώφλι τ, υπάρχει η πιθανότητα να μην μπορεί να υποστηριχτεί η σύνδεση δυο κόμβων. Θεωρώντας ε ένα ανώτατο όριο στην πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης, $P[SINR \le \tau] \le \varepsilon$ μπορούμε να ορίσουμε βρούμε έναν μέγιστο ρυθμό που μπορεί να υποστηριχτεί από το σύστημα με μεγάλη πιθανότητα αξιοπιστίας. $C = \max\{\log(1+\tau)\} : P(SINR > \tau) > 1-\varepsilon$

Η πιθανότητα διακοπής εξαρτάται από την απόσταση των κόμβων και τις θέσεις των ενεργών πομπών. Όταν έχουμε λίγους πομπούς ενεργούς, η τιμή του SINR αυξάνεται, ενώ το throughput μειώνεται. Παρατηρώντας ότι είναι χαρακτηριστικά του συστήματος που έρχονται σε αντίθεση, είναι απαραίτητη μια μετρική που να τα συνδυάζει

αποδοτικά. Το transmission capacity ορίζεται ως ο μέσος αριθμός ενεργών συνδέσεων για κάθε τετραγωνικό μέτρο του δικτύου, δοθείσας μιας συγκεκριμένης πιθανότητας διακοπής ε και ενός ορίου SINR, τ. [48] Επιτρέπει στις διάφορες τεχνολογίες και στις επιλογές σχεδιασμού να συγκριθούν αναλυτικά, αντικειμενικά και εύκολα [49] Ο μαθηματικός ορισμός είναι : $\beta_\varepsilon := (1-\varepsilon)\lambda\beta$, όπου

1-ε είναι το κατώφλι για να μπορεί να υπάρξει μετάδοση

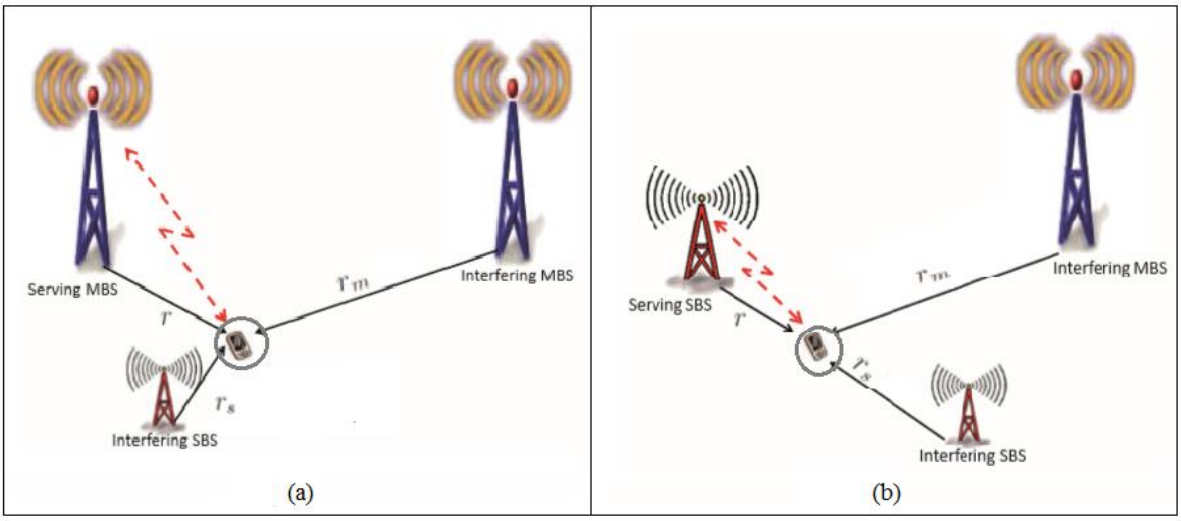
λ είναι ο μέγιστος μέσος αριθμός ενεργών πομπών που στέλνουν με ρυθμό β

β bits/ sec είναι ο ρυθμός μετάδοσης σε περιοχή ενός τετραγωνικού μέτρου.

Τόσο το throughput όσο και η πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των δικτύων καθώς συνδέονται άμεσα με την αξιοποίηση των ενεργών συνδέσεων.

2.1.5 Παρεμβολή I_{agg}

Ο πλέον καθοριστικός παράγοντας για την ανάλυση των ασύρματων δικτύων είναι η συνολική παρεμβολή που δημιουργούν οι υπόλοιπες ασύρματες συσκευές. Λόγω της τυχαιότητας των συνδέσεων, η παρεμβολή μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια τυπική M/M/∞ ουρά όπου οι χρήστες ακολουθούν Poisson κατανομή και οι συνδέσεις εκθετική κατανομή. Σαν τυχαία μεταβλητή εξαρτάται από την απόσταση από τον κοντινότερο σταθμό βάσης. Μπορεί να θεωρηθεί σαν μια στοχαστική διεργασία η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία των κόμβων, των παρεμβολών, τον συντελεστή διαλείψεων h_{xy} του καναλιού, τον χρόνο και χαρακτηρίζεται πλήρως από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της.[49] Καθώς το μέγεθος του δικτύου κλιμακώνεται ο υπολογισμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι δύσκολος, έτσι χαρακτηρίζεται χρησιμοποιώντας τον αντίστοιχο μετασχηματισμό Laplace.



Σχήμα 15: Παρεμβολή σε (α) μακροκυψέλη, (b) μικρή κυψέλη

Ο τύπος που υπολογίζει την συνολική παρεμβολή είναι : $I_{agg} = \sum_{x \in \Phi - x_0} p_t(x) A h_{xy} \|x-y\|^{-\alpha}$

και συνήθως χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Laplace: $\mathcal{L}_{I_{agg}}(s) = E\left[e^{-sI_{agg}}\right]$

προκειμένου να αναλυθεί η συμπεριφορά των ασύρματων δικτύων, όπου s είναι μια παράμετρος που είναι μιγαδικός αριθμός, γράφεται δηλαδή στην μορφή $s = \sigma + i\omega$.

Ο μετασχηματισμός Laplace είναι ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω των χρηστικών του ιδιοτήτων. Αναλύει μια συνάρτηση στις ροπές της, δηλαδή σε κάθε στιγμιότυπο, υποστηρίζοντας την αρχή της ανεξαρτησίας. Τόσο η παραγώγιση όσο και η ολοκλήρωση γίνεται πολλαπλασιασμός και διαίρεση με την παράμετρο s. Είναι κατάλληλος για γραμμικές συναρτήσεις, υποστηρίζει την αμνήμον ιδιότητα που χαρακτηρίζει την παρεμβολή και είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όταν δεν υπάρχει συγκεκριμένος κλειστός τύπος για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας . Υπάρχουν 5 τεχνικές που χρησιμοποιούν τον μετασχηματισμό Laplace και την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την ανάλυση και την μοντελοποίηση διάφορων μετρικών των δικτύων. [48]

2.1.5.1 Πρώτη Τεχνική: Στηρίζεται στην υπόθεση της εξασθένισης Rayleigh του σήματος που φτάνει στον δέκτη.

Αν υποθέσουμε ότι $r = \|x - y\|$ και ότι η παράμετρος των διαλείψεων ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, δηλαδή $h \sim \mathrm{Exp}(\mu)$ τότε $F_h(\theta) = P(h \le \theta) = 1 - e^{-\mu\cdot\theta}$. Δεν επηρεάζεται από το γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποια κλειστή μορφή για την συνάρτηση πιθανότητας της συνολικής παρεμβολής. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή κατανομή για το SINR μέσω του μετασχηματισμού Laplace οπότε έχουμε:

$$F_{SINR}(\tau) = P(SINR \le \tau) = P\left(\frac{P_t(x_0)\,A\,h_{x_0y}r^{-\alpha}}{\sigma^2 + \sum_{x\in\Phi-x_0} P_t(x)\,A\,h_{xy}r^{-\alpha}} \le \tau\right) = P\left(\frac{P_t(x_0)\,A\,h_{x_0y}r^{-\alpha}}{\sigma^2 + I_{agg}} \le \tau\right)$$

$$= P\left(h \le \frac{\tau\cdot\left(\sigma^2 + I_{agg}\right)r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}\right) = \int_u F_h\left(\frac{\tau\cdot\left(\sigma^2 + I_{agg}\right)r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}\right)\cdot f_{Iagg}(u)du = 1 - E_{Iagg}\left[\exp\left\{-\mu\cdot\frac{\tau\cdot\left(\sigma^2 + I_{agg}\right)r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}\right\}\right]$$

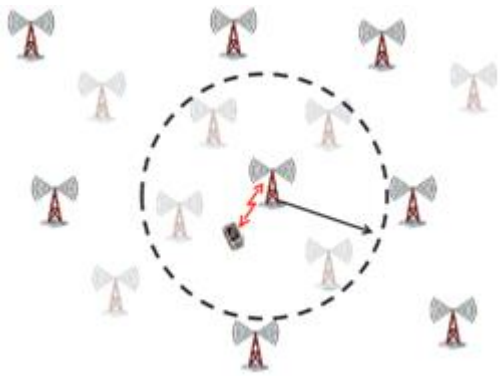
$$= 1 - \exp\left\{\mu\cdot\frac{\tau\cdot\sigma^2 r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}\right\}E_{Iagg}\left[\exp\left\{-\mu\cdot\frac{\tau\cdot I_{agg}r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}\right\}\right] = 1 - \exp\left\{\mu\cdot\frac{\tau\cdot\sigma^2 r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}\right\}\ell_{Iagg}(s)\Big|_{s=\theta\frac{\mu\cdot r^{\alpha}}{P_t(x_0)\,A}}$$

Γνωρίζοντας τον ακριβή τύπο της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του SINR μπορούμε να υπολογίσουμε διάφορες μετρικές όπως την πιθανότητα διακοπής, την δυναμικότητα μετάδοσης, τον ρυθμό μετάδοσης. Το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι πως δεν έχουμε αποτελέσματα στην περίπτωση που δεν έχουμε σκέδαση Rayleigh για την επιθυμητή σύνδεση. [48]

2.1.5.2 Δεύτερη Τεχνική : Στηρίζεται στους κυρίαρχους παρεμβολής στα όρια μιας περιοχής.

Βασίζεται στην ιδέα απόκτησης ενός χαμηλότερου ορίου για την πιθανότητα κάλυψης λαμβάνοντας υπόψη τους κυρίαρχους παρεμβολείς. Καθώς ο συντελεστής απώλειας α μειώνεται, η συνεισφορά των μακρινών παρεμβολών που οδηγεί στην διακοπή της σύνδεσης μεγαλώνει. [48]

Η κρίσιμη περιοχή για έναν τυχαίο δέκτη είναι ο κύκλος ευπάθειας. Πρόκειται για την περιοχή που περιέχει όλους τους πομπούς, οι οποίοι καταστρέφουν το σήμα που φτάνει στον δέκτη μέσα σε ακτίνα r από τον επιθυμητό δέκτη. Για την ακρίβεια ο κύκλος ευπάθειας είναι η περιοχή όπου η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται και μετριέται σε έναν δέκτη είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή ισχύ σήματος που φτάνει σε έναν δέκτη πολλαπλασιασμένη με ένα όριο τ. Για την ανάλυση της περιοχής ευπάθειας απαιτούνται μόνο οι μετρικές χώρου για την διεργασία που μελετάται, οι οποίες αναφέρονται στην ισχύ του σήματος και σε ένα όριο SINR. [48]



Σχήμα 16: Κύκλος ευπάθειας

Έτσι, για πιθανότητα διακοπής έχουμε ανισότητες από την θεωρία των πιθανοτήτων που την οριοθετούν:

<u>Ανισότητα του Markov</u>**:** $P(SINR > \tau) \le \frac{E[SINR]}{\tau}$, όπου $E[\ ]$ συμβολίζει την μέση τιμή.

Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα του συμπληρωματικού ενδεχομένου του A: $P(A') = 1 - P(A)$ από την θεωρία Πιθανοτήτων και προσαρμόζοντας την για την πιθανότητα διακοπής έχουμε: $P(SINR \le \tau) = 1 - P(SINR > \tau)$, η ανισότητα του Markov μπορεί να γραφτεί στην ακόλουθη μορφή:

$$1 - P(SINR > \tau) \ge 1 - \frac{E[SINR]}{\tau} \Leftrightarrow P(SINR \le \tau) \ge 1 - \frac{E[SINR]}{\tau}$$

<u>Ανισότητα του Chebyshev</u>**:** $P(SINR - E[SINR] \ge \tau) \le \frac{Var(SINR)}{\tau^2}$,όπου $Var(SINR)$: είναι η διασπορά – διακύμανση του SINR. Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα του συμπληρωματικού ενδεχομένου για την πιθανότητα διακοπής έχουμε:

$$P(SINR - E[SINR] < \tau) \ge 1 - \frac{Var(SINR)}{\tau^2} \Leftrightarrow P(SINR < \tau + E[SINR]) \ge 1 - \frac{Var(SINR)}{\tau^2} \Leftrightarrow$$

$$P(SINR \le \tau) \ge 1 - \frac{Var(SINR)}{\tau^2}$$

Η ανισότητα προκύπτει μέσω των πιθανοτήτων από την ανισότητα Markov και παρέχει ένα καλό κατώφλι για τη πιθανότητα διακοπής.[48]

<u>Ανισότητα του Chernoff</u>**:** $P(SINR > \tau) \le \inf_{s>0} e^{-s\tau} \ell_{lagg}(s) \Leftrightarrow$

$$P\left(SINR \le \tau\right) \ge 1 - \inf_{s>0} e^{-s\tau} \ell_{Iagg}\left(s\right) \Leftrightarrow$$

$$1 - \inf_{s>0} e^{-s\tau} \ell_{Iagg}\left(s\right) \le P\left(SINR \le \tau\right) \le 1$$

Η τελευταία ισοδυναμία προκύπτει από τον ορισμό της πιθανότητας και παρατηρούμε πως η ανισότητα παρέχει το πιο αυστηρό όριο από τις τρεις για την πιθανότητα διακοπής, αλλά ο προσδιορισμός της προϋποθέτει την γνώση του βέλτιστου μετασχηματισμού για την παρεμβολή. [48]

2.1.5.3 Τρίτη Τεχνική: Προσέγγιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της συνολικής παρεμβολής.

Μέσω προσομοιώσεων επιλέγεται μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, η οποία μειώνει «αρκετά» το προσεγγιστικό λάθος. Για παράδειγμα σε μια PPP διεργασία σημείων η επιλογή μιας κανονικής κατανομής για το SINR μειώνει αρκετά το προσεγγιστικό λάθος. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένο κριτήριο επιλογής της κατανομής.[48][48]

2.1.5.4 Τέταρτη Τεχνική: το θεώρημα Plancherel-Parseval

Χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Fourier δυο συναρτήσεων f, g. Αν θεωρήσουμε δυο ολοκληρώσιμες συναρτήσεις f(x) και g(x), F(ω), G(ω) να είναι ο μετασχηματισμός Fourier τους: $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-2\pi i\omega x} dx$, $G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cdot e^{-2\pi i\omega x} dx$ και $g^*(x)$, $G^*(\omega)$ να είναι οι συζυγείς μιγαδικές συναρτήσεις των g, G τότε ισχύει: $\int_{\mathbb{R}} f(x)\, g^*(x) dx = \int_{\mathbb{R}} F(\omega)\, G^*(\omega) d\omega$.

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι μια ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού Laplace, όπου $F(\omega)=\ell(s)|_{s=i\omega}$, ο οποίος αντιστρέφεται. Με το θεώρημα Plancherel-Parseval δεν χρειάζεται να αντιστραφεί ο μετασχηματισμός Laplace για να αποκτήσουμε μετρικές του συστήματος. Με την βοήθεια του μπορούμε να πάρουμε αποτελέσματα για το γενικό περιβάλλον εξασθένισης του σήματος και άρα αποτελέσματα για την παρεμβολή. Το βασικό μειονέκτημα του είναι ότι σε αρκετές περιπτώσεις τα ολοκληρώματα είναι δύσκολο να υπολογιστούν λόγω των πολύπλοκων συναρτήσεων. Έτσι, η ανάλυση της στοχαστικής γεωμετρίας χάνει την ευελιξία ανάλυσης που αποτελείται από απλές εξισώσεις και δεν βοηθά στην κατανόηση του συστήματος.[48]

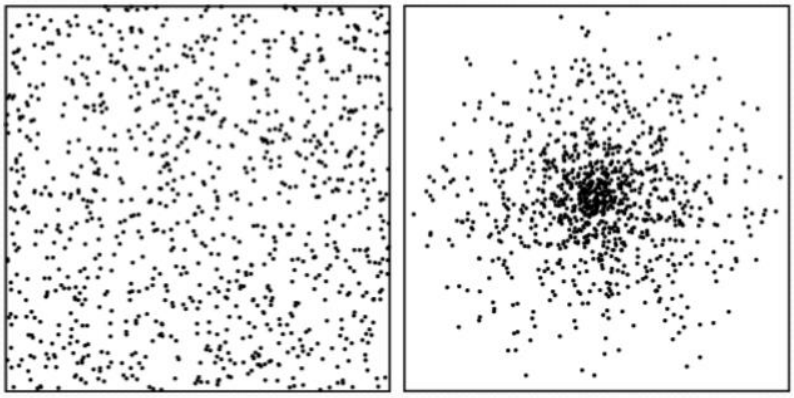
2.1.5.5 Πέμπτη Τεχνική: Στηρίζεται στην ιδιότητα της αναστροφής για να υπολογιστεί η συνάρτηση πυκνότητας της παρεμβολής.

Συνήθως δεν μπορούμε να βρούμε μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σε κλειστή μορφή λόγω της πολυπλοκότητας έκφρασης του μετασχηματισμού Laplace. Είναι χρήσιμη για κάποιες ειδικές περιπτώσεις όπου οι εκφράσεις του μετασχηματισμού Laplace και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι αντιστρέψιμες ή ταιριάζουν σε γνωστές κατανομές. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει ντετερμινιστικά κανάλια και την σκέδαση Rayleigh όπου μπορούν να βρεθούν εκφράσεις κλειστού τύπου για την παρεμβολή.[48]

2.2 Βασικά στοιχεία - θεωρήματα και οικογένειες διεργασιών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην περίπτωση των κινητών τερματικών, διαχωρίζεται η λειτουργία της ανερχόμενης ζεύξης – uplink από εκείνη της κατερχόμενης ζεύξης – downlink. Αν και είναι δυο ξεχωριστές λειτουργίες που στόχο έχουν την επικοινωνία μεταξύ τερματικού και σταθμού βάσης, στην περίπτωση της μαθηματικής μοντελοποίησης δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Τόσο η κινητή συσκευή όσο και ο σταθμός βάσης που την εξυπηρετεί λειτουργούν άλλοτε σαν «πομποί» και άλλοτε σαν «δέκτες» του συστήματος. Στην περίπτωση του uplink πομπός είναι το κινητό και δέκτης ο σταθμός βάσης, ενώ στην περίπτωση του downlink οι ρόλοι εναλλάσσονται. [49]

Επειδή στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών υπάρχει μεγάλο πλήθος κόμβων, οι οποίοι είναι τυχαία κατανεμημένοι στον χώρο μπορούμε να θεωρήσουμε κάθε κόμβο του δικτύου σαν ένα στιγμιότυπο μιας στοχαστικής διεργασίας σημείων. [50] Εφόσον γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης τα εργαλεία της στοχαστικής γεωμετρίας μας προσφέρουν υπολογίσιμα αποτελέσματα για τις διάφορες μετρικές του δικτύου. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου της εργασίας, θα επικεντρωθούμε περισσότερο στον μαθηματικό σχεδιασμό του γενικού μοντέλου επικοινωνίας «πομπός – δέκτης». Θα αναλύσουμε βασικά θεωρήματα και οικογένειες διεργασιών και θα δούμε περιβάλλοντα στα οποία αυτές εφαρμόζονται. Στο τέλος θα ακολουθήσει μια σύγκριση των διεργασιών ως προς μετρικές απόδοσης των δικτύων.



Εικόνα 20: Απεικόνιση στοχαστικών διεργασιών στον χώρο

Το κυριότερο εργαλείο της στοχαστικής γεωμετρίας είναι οι διεργασίες σημείων – point processes. Οπτικά, περιγράφεται σαν μια τυχαία συλλογή σημείων στον χώρο. Μαθηματικά, είναι ένα μετρήσιμο σύνολο κόμβων $\Phi = \{X_i, i \in \mathbb{N}\}$ που με κάποιο μέτρο πιθανότητας προκύπτει το σύνολο των σημείων στον χώρο. Υποθέτουμε ότι το σύνολο των σημείων είναι πεπερασμένο και παίρνει μόνο ακέραιες τιμές στον χώρο $\mathbb{R}^n$, όπου n: είναι η διάσταση του χώρου (συνήθως n=2 ή n=3). [49], [51]

Κάθε μέτρο Φ μπορεί να παρασταθεί σαν ένα διακριτό άθροισμα συναρτήσεων δέλτα στον χώρο, $\Phi = \sum_{i \in \mathbb{N}} \delta_{X_i}$, όπου X_i είναι οι τυχαίες μεταβλητές που παριστάνουν θέσεις των σημείων στον χώρο.[51] Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την διεργασία (probability generating functional – PGLF) ορίζεται σαν $P_\Phi(f) = E\left[\prod_{X_i \in \Phi} f(X_i)\right]$.

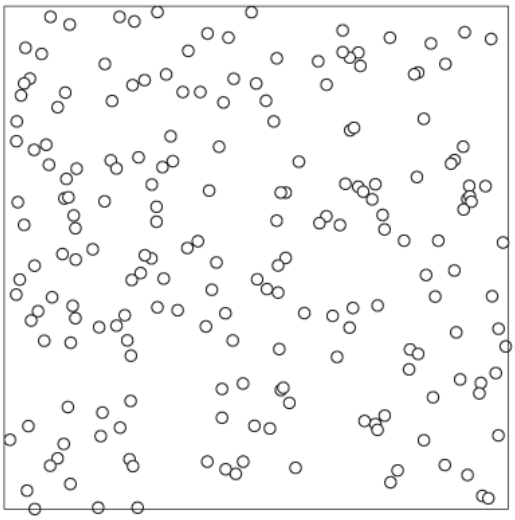
Μια στοχαστική διεργασία μπορεί να χαρακτηριστεί ανάλογα με τις ιδιότητες που διαθέτει. Έτσι, μια διεργασία σημείων μπορεί να είναι:

- Απλή ή σύνθετη: Απλή χαρακτηρίζεται όταν η τοποθεσία κάθε κόμβου είναι μοναδική. Δηλαδή δεν μπορούν δυο κόμβοι να βρίσκονται στο ίδιο σημείο του χώρου.[51]
- Στάσιμη ή μη στάσιμη: Στάσιμη χαρακτηρίζεται η διεργασία όταν δεν εξαρτάται από τον τρόπο τοποθέτησης των κόμβων και την λειτουργία τους, πομποί – δέκτες. [51]
- Ισοτροπική ή όχι: Ισοτροπική λέγεται η διεργασία όταν είναι αμετάβλητη σε περιστροφές στον χώρο. Στην περίπτωση που η διεργασία είναι στάσιμη και ισοτροπική χαρακτηρίζεται σαν motion invariant καθώς είναι ανεξάρτητη από τις κινήσεις – μεταβολές στον χώρο. [51]
- Ομογενής ή Ετερογενής: Ομογενής χαρακτηρίζεται η διεργασία όταν η παράμετρος της πυκνότητας των κόμβων παραμένει σταθερή. Ετερογενής χαρακτηρίζεται στην περίπτωση που η παράμετρος της πυκνότητας των κόμβων ακολουθεί κάποια κατανομή. Για το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας υποθέτουμε ότι όλες οι διεργασίες είναι ομογενείς.
- Να έχει ή να μην έχει ετικέτα (marked) Μαρκαρισμένες χαρακτηρίζονται οι διεργασίες όπου μια τυχαία μεταβλητή (σημάδι) Q_i συνδέεται με την θέση X_i. Το σημάδι μπορεί να είναι μια τυχαία μεταβλητή ή μια συνάρτηση της στοχαστικής διεργασίας. [49], [51]
- Poisson ή όχι Poisson Ανάλογα με την κατανομή που ακολουθούν οι διεργασίες σημείων χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, αυτές που είναι Poisson και αυτές που δεν είναι. Οι διεργασίες Poisson υποστηρίζουν την ανεξαρτησία και την τυχαιότητα των θέσεων των κόμβων. Οι Poisson διεργασίες διακρίνονται επίσης σε ομογενείς, αν οι κόμβοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στον χώρο, και ετερογενείς. Προσφέρουν καλά υπολογιστικά αποτελέσματα για διάφορες μετρικές του συστήματος και θα αναλυθούν εκτενέστερα στην παράγραφο 2.2.1. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί καλά αποτελέσματα και για διεργασίες που δεν είναι Poisson.

Η ανάλυση των διεργασιών που δεν είναι Poisson στηρίζεται κυρίως στην ανάλυση Palm. Η κατανομή Palm δείχνει την εικόνα της στοχαστικής διεργασίας από ένα σημείο. Το «μαρκάρισμα» ενός σημείου είναι μια ποσότητα η οποία ακολουθεί το σημείο ακόμα και όταν μετακινείται. Η πιθανότητα Palm μιας στάσιμης διεργασίας ακολουθεί τον νόμο της καθολικότητας, όπου το σημάδι μπορεί να είναι το ίδιο για όλα τα σημεία. Η κατανομή Palm από ένα σημάδι Q για την στάσιμη στοχαστική διεργασία δίνεται από τον μαθηματικό τύπο: $V_Q(L) = P^o(Q_0 \in L) = \dfrac{E\left[\sum_{X_i \in \Phi} 1(X_i \in A) 1(Q_i \in L)\right]}{E\left[\sum_{X_i \in \Phi} 1(X_i \in A)\right]}$

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποιες βασικές διεργασίες σημείων από τον χώρο της στοχαστικής γεωμετρίας και οι ιδιότητες που τις διέπουν.

2.2.1 Poisson Point Process – PPP



Εικόνα 21: Σταθμοί βάσης κατανεμημένοι με Poisson Point Process

Πίνακας 2: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των PPP δικτύων

$x = (x_i, y_i)$	Συντεταγμένες σημείου x στο επίπεδο.
A_i	Περιοχές – σύνολα που περιλαμβάνουν κόμβους.
$\Lambda(A_i)$	Παράμετρος της κατανομής Poisson.
$\lambda(x_i, y_i)$	Η πυκνότητα των κόμβων
$b(x,r)$	Σφαίρα με κέντρο το σημείο $x \in \mathbb{R}^n$ και ακτίνα ίση με r.
τ	Το επιτρεπόμενο όριο SINR για τον σταθμό βάσης
I_{agg}	Επίπεδο συνολικής παρεμβολής
p_c	Όριο πιθανότητας διακοπής για την δυναμικότητα μετάδοσης
α	Συντελεστής απώλειας ισχύος

Η διεργασία Poisson αναπτύχθηκε σαν θεωρία στις αρχές του 20ου αιώνα και από τότε έχει βρει μια πληθώρα εφαρμογών για την περιγραφή φυσικών και άλλων φαινομένων. Μια Poisson διεργασία σημείων είναι μια διαδικασία μέτρησης των σημείων σε έναν συγκεκριμένο χώρο. Για κάθε σημείο ισχύει η αρχή της πλήρους ανεξαρτησίας ή τυχαιότητας, δηλαδή η θέση του στον χώρο είναι ανεξάρτητη από την θέση των

υπόλοιπων. Κάθε κόμβος καταλαμβάνει μια ανεξάρτητη θέση που χαρακτηρίζεται από συντεταγμένες $x = (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$. [51] [52]

Για το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας υποθέτουμε ότι η PPP διεργασία είναι ομογενής ώστε να έχουμε απλούστερη μαθηματική μοντελοποίηση.

Μια διεργασία Φ που είναι PPP έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: [51][52]

2.2.1.1 Στάσιμες ανεξάρτητες ισόνομες κατανομές

Για όλα τα αμοιβαίως αποκλειόμενα σύνολα $A_1, A_2, ..., A_n$, οι $\Phi(A_1), \Phi(A_2), ..., \Phi(A_n)$ είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές (identically distributed) που ακολουθούν την κατανομή Poisson με παράμετρο $\Lambda(A_i)$, οι οποίες δεν επηρεάζονται από την περιοχή πραγματοποίησης του στιγμιότυπου.

2.2.1.2 Δεν έχει μνήμη

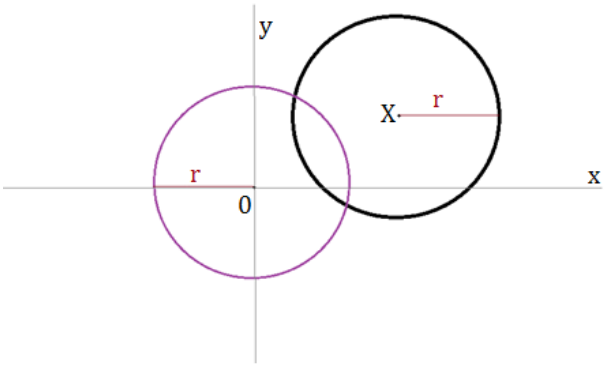
Όταν η ύπαρξη ενός κόμβου σε μια περιοχή δεν επηρεάζει την κατανομή πιθανότητας για τους υπόλοιπους κόμβους λέμε ότι έχει την αμνήμονη ιδιότητα. Μιας και δεν διατηρεί μνήμη για προηγούμενες μεταβολές, η διεργασία PPP μπορεί να θεωρηθεί σαν μια μαρκοβιανή αλυσίδα γεννήσεων – θανάτων.

2.2.1.3 Πλήθος σημείων

Αν συμβολίσουμε την πυκνότητα των κόμβων με $\lambda(x_i, y_i)$ και το μέτρο πυκνότητας ή αλλιώς τον μέσο αριθμό κόμβων σε μια περιοχή A να είναι $\Lambda(A) = \int_A \lambda(x_i, y_i) d(x_i, y_i) = E[N(A)]$, η πιθανότητα να υπάρχουν n κόμβοι στην περιοχή A δίνεται από τον τύπο: $P(N(x) = n) = \Lambda(A)^n \cdot e^{-\Lambda(A)} / n!$ Συνήθως επειδή η περιοχή A είναι κυκλική και ο χώρος που καταλαμβάνει είναι κύκλος με ακτίνα r, ο μαθηματικός τύπος γίνεται: $P(N(x) = n) = \exp(-\lambda \cdot \pi r^2) \cdot \frac{(\lambda \cdot \pi r^2)^n}{n!}$ και ο μέσος αριθμός των κόμβων στην περιοχή είναι $\lambda \cdot \pi r^2$.[47] Η πιθανότητα να μην υπάρχουν κόμβοι σε μια περιοχή A ισούται με: $\upsilon(A) = P(N(A) = 0) = e^{-\Lambda(A)}$.

Η συνάρτηση του κοντινότερου γειτονικού κόμβου του x που δίνει την πιθανότητα σύνδεσης μέσα σε απόσταση r είναι: $D_x(r) = 1 - e^{-\Lambda(b(x,r))}$, όπου $b(x, r)$ ο κύκλος με κέντρο το σημείο x και ακτίνα r. Η απόσταση από το ο είναι $D_o(r) = 1 - e^{-\lambda \pi r^2}$ και συνδέεται με τις συντεταγμένες (x, y) του σημείου μέσω του τύπου της αναλυτικής γεωμετρίας $r^2 = x^2 + y^2$.

Όταν η περιοχή A είναι ο μοναδιαίος κύκλος η πιθανότητα σύνδεσης είναι: $D_A(r) = 1 - e^{-\lambda \pi r^2}$. Έτσι, προκύπτει ότι η πυκνότητα της κατανομής είναι: $f_R(r) = 2\pi\lambda r \cdot \exp\{-\pi\lambda r^2\}$. Επομένως, η απόσταση από τον κοντινότερο σταθμό βάσης ακολουθεί την εκθετική κατανομή. [51]



Σχήμα 17: Κύκλοι b(X,r) και b(0,r)

2.2.1.4 Η αραίωση – αφαίρεση κόμβων (thinning)

Πρόκειται για την δημιουργία δυο ανεξάρτητων PPP από μια αρχική Poisson διεργασία σημείων. Αν q(x) είναι η πιθανότητα να αφαιρεθεί ο x κόμβος, τότε για μια περιοχή A η πυκνότητα των κόμβων που αφαιρούνται είναι: $\Lambda_q(A) = \int_A q(x)\Lambda(dx)$ και η πυκνότητα των κόμβων που παραμένουν στο δίκτυο είναι: $\Lambda_q(A) = \int_A (1-q(x))\Lambda(dx)$. Συνήθως για να αφαιρέσουμε σημεία τα «σημαδεύουμε» ώστε $P(Q_i = 1) = q$ και θεωρούμε τα σημεία εκείνα που είναι μαρκαρισμένα με 1 για να αποκτήσουμε την νέα PPP. [51]

2.2.1.5 Η προσθήκη νέων κόμβων (superposition)

Με παρόμοιο τρόπο με την αραίωση μπορεί να γίνει και η προσθήκη νέων κόμβων σε μια PPP. Δημιουργείται μια νέα PPP, η οποία προκύπτει από την υπέρθεση των ανεξάρτητων κόμβων της παλιάς PPP και των νέων κόμβων. Έτσι, η νέα διεργασία σημείων έχει κόμβους $N = \bigcup_{i=1}^{\infty} N_i$ και πυκνότητα κόμβων είναι $\Lambda = \sum_{i=1}^{\infty} \Lambda_i$. Η πιθανότητα το σημείο x να άνηκε στην j PPP ισούται με $P\left(x \in N_j\right) = \frac{\Lambda_j}{\sum_{i=1}^{n} \Lambda_i}$. [48]

2.2.1.6 Θεώρημα Αντικατάστασης

Αντικαθιστώντας ένα σημείο με κάποιο άλλο έχουμε μετάθεση της θέσεως ενός ή περισσότερων κόμβων μιας PPP και οδηγούμαστε σε μια νέα PPP. [49]

Θεώρημα 1: Το θεώρημα Slivnyak – Mecke

Σύμφωνα με το θεώρημα του Slivnyak για μια Poisson διεργασία σημείων – PPP Φ, η μεταβολή ενός σημείου x δεν αλλάζει την κατανομή της υπόλοιπης διεργασίας καθώς οι κόμβοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και δεν αλληλεπικαλύπτονται. Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιότητες από ένα σημείο x είναι ίδιες είτε υποθέτουμε ότι το σημείο ανήκει στην στοχαστική διεργασία Φ, είτε όχι. Δηλαδή, αν αφαιρέσουμε μια μικρή περιοχή γύρω από το σημείο x, $B(x, \varepsilon)$ με $\varepsilon \to 0$, δεν επηρεάζεται η διεργασία.

Αυτό το θεώρημα επιτρέπει τόσο την είσοδο νέων κόμβων στην PPP όσο και την έξοδο από την PPP σε όποια θέση επιθυμούμε χωρίς να επηρεάζονται οι ιδιότητες της

διεργασίας. Επίσης, χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε την συνάρτηση απόστασης από τον κοντινότερο κόμβο στην περίπτωση της στάσιμης διεργασίας PPP.

Θεώρημα 2: το θεώρημα του Campbell

Αν μια τυχαία μεταβλητή F μπορεί να γραφτεί σαν άθροισμα συναρτήσεων μεταβλητών από μια διεργασία: $F = \sum_{X_i \in \Phi} g(x_i)$ τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τον μετασχηματισμό Laplace της μεταβλητής F και έχουμε ότι: $E[F] = E\left[\sum_{X_i \in \Phi} g(x_i)\right] = \int_{\mathbb{R}^d} \lambda f(x)dx$, όπου

λ: η πυκνότητα της διεργασίας Φ,

$f(x)$: η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής X_i [49].

Το θεώρημα ισχύει για διεργασίες που είναι PPP, παρέχει ένα σημαντικό εργαλείο για να βρούμε την μέση τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής και συνήθως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παρεμβολής, μετατρέποντας ένα άθροισμα σε ένα (εύκολα υπολογίσιμο) ολοκλήρωμα.

Έτσι, για την παρεμβολή I, μέσω του μετασχηματισμού Laplace, έχουμε:

$$\ell_I(s) = E_I\left[e^{-s\cdot I}\right] = E_I\left[\exp\left(-\sum_{x_i \in \Phi} s \cdot p_i A h_{x_i y} r_i^{-\alpha}\right)\right] = E_I\left[\prod_{x_i \in \Phi} \exp\left(-s \cdot p_i A h_{x_i y} r_i^{-\alpha}\right)\right]$$

$$= E_{\Phi_I}\left[\prod_{x_i \in \Phi} E_{Ah_{xy}}\left\{\exp\left(-s \cdot p_i A h_{x_i y} r_i^{-\alpha}\right)\right\}\right] = \exp\left\{-2\pi\lambda \int_0^\infty \left(1 - E_{Ahxy}\left[\exp\left(-s \cdot p_i A h_{x_i y} u^{-\alpha}\right)\right] u du\right)\right\} =$$

$$= \exp\left\{-2\pi\lambda \int_0^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + s \cdot p_i A h_{x_i y} u^{-\alpha}} u du\right)\right\}$$, όπου $h_{xy} \sim \exp(1)$ μοντελοποιεί την σκίαση Rayleigh και $r_i = \|x_i - y\|$ συμβολίζει την απόσταση ανάμεσα στον πομπό x_i και τον δέκτη y.

Οπότε, $\ell_I(s) = E_{\Phi_I}\left[\prod_{x_i \in \Phi} E_A\left\{\frac{1}{1 + s \cdot p_i \cdot A r_i^{-\alpha}}\right\}\right]$.

Η πιθανότητα κάλυψης δίνεται από την μαθηματική σχέση:

$$p_c = \int_0^\infty P\left(SINR > \tau\right) f_R(r)dr = \int_0^\infty P\left(\frac{P_t\ A\ h_{x_0 y} r^{-\alpha}}{\sigma^2 + I} > \tau\right) f_R(r)dr$$

$$= \int_0^\infty P\left(h_{x_0 y} > \frac{\tau\left(\sigma^2 + I\right)}{P_t\ A\ r}\right) 2\pi\lambda r \cdot \exp\left\{-2\pi\lambda r^2\right\} dr \qquad \text{(αφού } h_{xy} \sim \exp(1)\text{)}$$

$$= \int_0^\infty 2\pi\lambda r \cdot \exp\left\{-2\pi\lambda r^2\right\} \cdot \exp\left\{-\tau p^{-1} r^{\alpha(1-\varepsilon)} \sigma^2\right\} E_I\left[e^{-\tau p^{-1} r^{\alpha(1-\varepsilon)} I}\right] dr$$

$$= 2\pi\lambda\int_0^\infty r\cdot\exp\left\{-2\pi\lambda r^2\right\}\cdot\exp\left\{-\tau p^{-1}r^{\alpha(1-\varepsilon)}\sigma^2\right\}\ell_l\left[\tau p^{-1}r^{\alpha(1-\varepsilon)}\right]dr$$

Η PPP διεργασία σημείων χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσουμε τις θέσεις των σταθμών βάσης τόσο σε επίπεδο μακροκυψελών, όσο και σε k – πολυεπίπεδα δίκτυα. Τα αποτελέσματα στα πολυεπίπεδα δίκτυα είναι εντελώς παρόμοια. Κάθε επίπεδο μοντελοποιείται με μια ανεξάρτητη PPP με παραμέτρους που ενδεχομένως να διαφοροποιούνται. Έτσι, αν συμβολίσουμε με λ_i την πυκνότητα των σταθμών βάσης σε μια περιοχή, p_i την ισχύ μετάδοσης του επιπέδου i, τ_i το όριο για το SINR, για την πιθανότητα κάλυψης έχουμε: $p_c\left(\lambda_i,\tau_i,p_i\right)=\bigcup_{\substack{i\in k\\ x_i\in\Phi}}P\left(SINR>\tau_i\right)=\frac{\pi}{C(\alpha)}\frac{\sum_{i\in k}\lambda_i p_i^{2/\alpha}\tau_i^{-2/\alpha}}{\sum_{i\in k}\lambda_i p_i^{2/\alpha}}$, όπου $\tau_i>1$ ώστε να μπορεί ο χρήστης να συνδεθεί με έναν τουλάχιστον σταθμό βάσης και

$$C(\alpha)=\frac{2\pi^2\csc(2\pi/\alpha)}{\alpha}$$

Διεργασία PPP χρησιμοποιούμε, επίσης, για να μοντελοποιήσουμε την θέση των κινητών χρηστών. Γενικά, είναι μια απλή διεργασία, λαμβάνει υπόψη την τυχαιότητα των θέσεων των κόμβων και ανταποκρίνεται καλά σε ετερογενή δίκτυα με άπειρο αριθμό κόμβων και απεριόριστη περιοχή κάλυψης. Τέτοια δίκτυα είναι τα δίκτυα με φεμτοκυψέλες.[46]

2.2.2 Binomial Point Process – BPP

Πίνακας 3: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των BPP δικτύων

N	Το πλήθος των κόμβων
B	Σύνολο στον χώρο που μας ενδιαφέρει με πεπερασμένο μέτρο
b(x,r)	Σφάιρα με κέντρο το σημείο $x\in\mathbb{R}^n$ και ακτίνα ίση με r.
λ(x)	Η πυκνότητα των σημείων κοντά στο σημείο x
p	Πιθανότητα να υπάρχει σημείο σε απόσταση μικρότερη από r από το σημείο x.
R_n	Έχουμε ακριβώς n κόμβους σε απόσταση R
R_{min}	Απόσταση χρήστη από τον κοντινότερο κόμβο σε απόσταση R
R_{max}	Απόσταση χρήστη από τον πιο μακρινό κόμβο σε απόσταση R
α	Συντελεστής απώλειας ισχύος

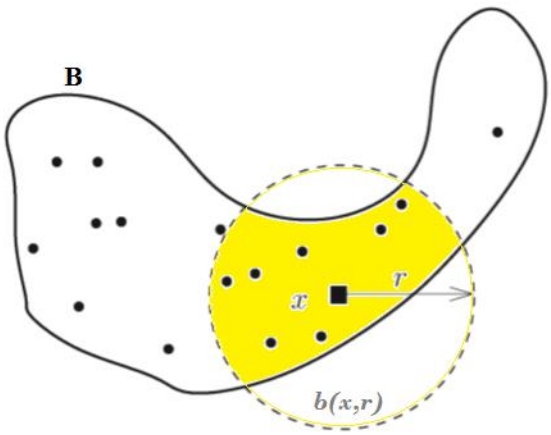
Οι θέσεις των κόμβων αντιμετωπίζονται σαν ανεξάρτητες ισόνομες τυχαίες μεταβλητές (i.i.d.). Η διαφορά με την προηγούμενη κατανομή (2.2.1) είναι ότι ο αριθμός των κόμβων είναι σταθερός, και συνήθως μικρός, σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Όταν γνωρίζουμε τον αριθμό των επιτρεπόμενων αναμεταδόσεων ή τον αριθμό των κινητών τερματικών που «αναπτύσσονται» τυχαία σε μια κυψέλη συγκεκριμένου μεγέθους η μοντελοποίηση Poisson δεν είναι ακριβής και προτιμάται η BPP. [47]

Η διεργασία BPP μοντελοποιεί τα τυχαία πρότυπα που παράγονται από έναν σταθερό – πεπερασμένο αριθμό σημείων N σε ένα σύνολο $B \subset R^d$, με πεπερασμένο μέτρο Lebesgue. Έχουμε διεργασία BPB, αν ο αριθμός των σημείων μέσα σε ένα συμπαγές υποσύνολο $b(x,r) \subset B$ είναι μια δυαδική τυχαία μεταβλητή και η πυκνότητα των σημείων σε μια θέση x ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή. [48] [53]

Υποθέτοντας ότι η διεργασία είναι ομογενής, έχουμε την πυκνότητα των σημείων να δίνεται από τον τύπο: $\lambda(x) = \frac{b(x,r)}{|B|} 1(x)$ καθώς μας ενδιαφέρει να πάρουμε τυχαία και ομοιόμορφα N σημεία στο σύνολο B, και θεωρώντας R_n την απόσταση ανάμεσα στο σημείο x και τον n – κοντινότερο κόμβο στην BPP, η πιθανότητα να υπάρχουν λιγότεροι από n κόμβοι σε μια *r* – περιοχή κοντά στο σημείο *x*, δίνεται από τον μαθηματικό τύπο: $P(|x| \le n) = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k}$,όπου $p = \frac{|b(x,r) \cap B|}{|B|}$ η πιθανότητα να πάρουμε σημείο σε απόσταση μικρότερη από r από το σημείο x. [53] [53]

Ο παραπάνω τύπος προκύπτει λογικά αν σκεφτούμε πως για να πετύχουμε ακριβώς n κόμβους από τους N θα πρέπει να έχουμε το πολύ n επιτυχίες και οι υπόλοιπες προσπάθειες να είναι αποτυχία εύρεσης κόμβου. Στο τέλος αθροίζουμε για όλες τις δυνατές επιλογές.

Για το παράδειγμα της Εικόνα 22 έχουμε: $p = \frac{7}{16}$ και $P(|X| \le n) = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{N}{k} \frac{7}{16}^{k} \frac{9}{16}^{N-k}$.



Εικόνα 22: BPP διεργασία με N=16 κόμβους σε ένα συμπαγές σύνολο B

Στην περίπτωση που η διεργασία δεν είναι ομογενής και χαρακτηρίζεται από πυκνότητα κόμβων $\lambda(x)$, τότε η πιθανότητα να έχουμε σημείο σε μια περιοχή ακτίνας r από το σημείο x είναι: $p = \int_{b(x,r)\cap B} \lambda(x)dx$ και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την τυχαία μεταβλητή της απόστασης R_n είναι :

$$f_{R_n}(r) = \frac{\int_0^{1-p} t^{N-n}(1-t)^{n-1}dt}{B(N-n+1,n)} = (1-p)^{N-n}p^{n-1}\frac{\Gamma(N+1)}{\Gamma(N-n+1)\Gamma(n)},$$ όπου $$B(\alpha,\beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)}$$ η συνάρτηση Βήτα και $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1}e^{t}dt$ η συνάρτηση Γάμμα. [53]

Επειδή η κατανομή των σημείων εξαρτάται τόσο από την θέση στον χώρο όσο και από τον αριθμό των ήδη επιλεγμένων σημείων, προκύπτει ότι η BPP δεν είναι στάσιμη διεργασία ούτε χαρακτηρίζεται από την αμνήμονη ιδιότητα.[53]

Αν συμβολίσουμε με R_{min} την απόσταση από τον κοντινότερο κόμβο και με R_{max} την απόσταση από τον πιο μακρινό κόμβο του σημείου x, η κατανομή τους είναι αντίστοιχα:

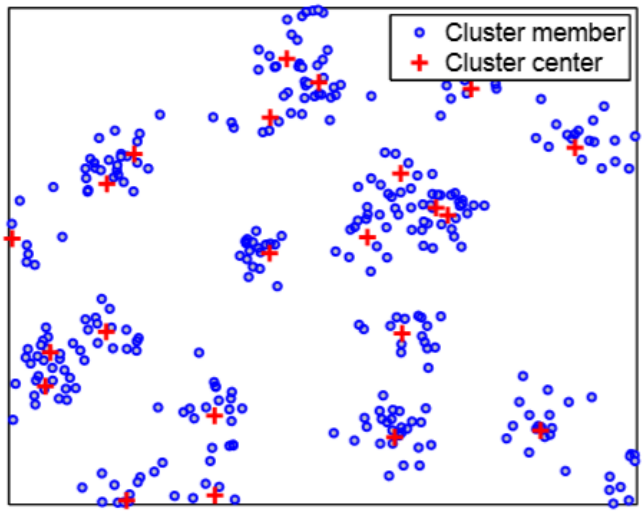
$F_{R\min}(r) = 1-\left[1-F_R(r)\right]^{N-1}$ και $F_{R\max}(r) = F_R(r)^{N-1}$ και οι πυκνότητες της κατανομής τους είναι: $f_{R\min}(r) = (N-1)\left[1-F_R(r)\right]^{N-2} f_R(r)$ και $f_{R\max}(r) = (N-1)F_R(r)^{N-2} f_R(r)$ [53]

Θεωρώντας $h \sim \exp(1)$ τον συντελεστή σκίασης, όταν το SIR που φτάνει στον σταθμό βάσης ο είναι μικρότερο από ένα όριο τ, τότε έχουμε διακοπή της σύνδεσης και για την πιθανότητα διακοπής έχουμε:

$$\Pr(o) = E_I\left[\Pr\left(\frac{h}{I} < \tau \mid \tau\right)\right] = E_I\left[\Pr(h < I\tau)\right] = E_I\left[1-e^{-I\tau}\right] = 1-M_I(\tau)$$ [53]

Η διεργασία BPP είναι η πλέον κατάλληλη για να μοντελοποιήσουμε δίκτυα με μικρό αριθμό κόμβων. Δεν μπορεί να μοντελοποιήσει περιβάλλοντα με μεγάλο ή άγνωστο αριθμό κόμβων. Χρησιμοποιείται για να μελετήσουμε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που υπάρχουν τοπικά σε μια περιοχή, καθώς σε αυτήν την περίπτωση γνωρίζουμε τον ακριβή αριθμό των αισθητήρων που έχουμε στην διάθεση μας.

2.2.3 Thomas Poisson Cluster Process – Thomas PCP



Εικόνα 23: Μοντελοποίηση PCP με συσκευές κανονικά κατανεμημένες γύρω από τα κέντρα

Πίνακας 4: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των PCP δικτύων

Φ_c , λ_c	Μια ομογενής στάσιμη Poisson διεργασία σημείων, η πυκνότητα των σημείων.
x	Η τοποθεσία, συντεταγμένες του κέντρου της συστάδας.
N_x	Το σύνολο των ενεργών συσκευών μέσα σε μια συστάδα κέντρου x.
N_t^x	Το σύνολο των συσκευών που είναι πομποί μέσα σε μια συστάδα.
N_r^x	Το σύνολο των συσκευών που είναι δέκτες μέσα σε μια συστάδα.
A_x , m_α	Το σύνολο των ενεργών συσκευών σε μια συστάδα με μέση τιμή m_α.
σ_α^2	Η διασπορά των θέσεων των ενεργών συσκευών μιας συστάδας γύρω από το κέντρο x.
α	Συντελεστής απώλειας ισχύος.
p_t	Η ισχύς μετάδοσης των συσκευών.
p_c	Η πιθανότητα κάλυψης.
τ	Το επιτρεπόμενο όριο για το SINR.

Στην PCP διεργασία σημείων οι θέσεις των κόμβων οργανώνονται σε ομάδες, συστάδες – clusters. Ο στόχος τους είναι να βελτιωθεί η φασματική απόδοση και η πιθανότητα κάλυψης για όλο το δίκτυο. Ωστόσο, οι τοποθεσίες των συστάδων στον χώρο αντιμετωπίζονται σαν ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Οι μικρές κυψέλες υποτίθεται ότι

βρίσκονται στο κέντρο ενός συμπλέγματος γύρω από το οποίο συγκεντρώνονται κινητοί χρήστες στον χώρο. Η μελέτη γίνεται δυνατή μέσω κατανομών που αφορούν την απόσταση και αναλυτικών εργαλείων. [49][54]

Μια διεργασία PCP υλοποιείται από μια αρχική PPP Φ_c, με πυκνότητα λ_c, αν αντικαταστήσουμε κάθε σημείο x με μια ομάδα – συστάδα σημείων M, τα οποία (συνήθως) υλοποιούν μια διαφορετική διεργασία σημείων. Στην Thomas PCP τα σημεία x αναφέρονται σαν κέντρα της κάθε ομάδας και οι τοποθεσίες των συσκευών γύρω τους ακολουθούν ανεξάρτητες, ισόνομες, κανονικές κατανομές με διασπορά σ_α^2. Δηλαδή, $\alpha \sim N(m_\alpha, \sigma_\alpha^2)$. Έτσι, η συνάρτηση πυκνότητας για την τοποθεσία κάθε συσκευής σε σχέση με το κέντρο της ομάδας, όταν τα σημεία της ομάδας είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στον χώρο δίνεται από τον τύπο:

$$f_A(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma_\alpha^2} \exp\left(-\frac{\|\alpha\|^2}{2\sigma_\alpha^2}\right) \text{ . [54]}$$

Μπορούμε να διαχωρίσουμε τους κόμβους που βρίσκονται σε μια ομάδα σε δυο μεγάλα υποσύνολα, τις συσκευές – πομπούς N_t^x και τις συσκευές – δέκτες N_r^x. Ο αριθμός των πομπών και των δεκτών δεν είναι απαραίτητα ο ίδιος σε κάθε ομάδα. Υπάρχουν τρεις γενικές περιπτώσεις που μοντελοποιούν την σύνδεση των συσκευών στον χώρο, λαμβάνοντας υπόψη την τοποθεσία τους:

(α) ***k*–Tx**: Για την σύνδεση D2D που μας ενδιαφέρει, η συσκευή επιλέγεται ομοιόμορφα, τυχαία από το σύνολο N_t^x μιας δοσμένης συστάδας και το περιεχόμενο που ενδιαφέρει τον δέκτη είναι διαθέσιμο στην *k* – οστό κοντινότερο πομπό στο κέντρο της συστάδας, που βρίσκεται στο σύνολο N_t^x.

(β) ***l*–Rx**: Η σύνδεση D2D που μας ενδιαφέρει γίνεται από την l «κοντινότερη» συσκευή στο κέντρο της συστάδας, που επιλέγεται από το σύνολο N_r^x και το περιεχόμενο είναι διαθέσιμο σε μια συσκευή που επιλέγεται ομοιόμορφα τυχαία από το σύνολο N_r^x.

(γ) **Baseline**: Για την σύνδεση D2D που μας ενδιαφέρει, η συσκευή επιλέγεται ομοιόμορφα, τυχαία από το σύνολο N_r^x μιας δοσμένης συστάδας και το περιεχόμενο είναι διαθέσιμο σε μια συσκευή που επιλέγεται ομοιόμορφα τυχαία από το σύνολο N_t^x.

Προκύπτει ότι στις δυο πρώτες περιπτώσεις η απόδοση του δικτύου είναι καλύτερη όταν η συσκευή που γίνεται cashed βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο της συστάδας, οπότε έχουμε και μεγαλύτερη πιθανότητα κάλυψης. Όμως, όλες οι συσκευές σε μια δεδομένη συστάδα προσπαθούν να συνδεθούν με την συσκευή που βρίσκεται κατά μέσο όρο πιο κοντά στο κέντρο της ομάδας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπερφορτώνονται τα κινητά τερματικά που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο ή ακόμα και να είναι αδύνατη αυτή η πρακτική λόγω του περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου. [54]

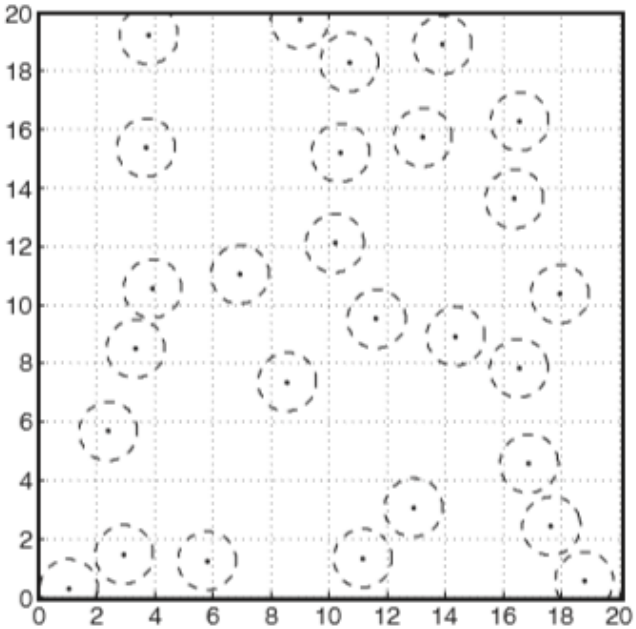
Σε μια PCP διεργασία σημείων, θεωρώντας $h \sim \exp(1)$ τον συντελεστή σκίασης και υποθέτοντας ότι η ισχύς εκπομπής είναι p_t για να υπολογίσουμε την ισχύ που λαμβάνει

μια συσκευή που βρίσκεται στην θέση $x_0 + \alpha_0$, όπου x_0 είναι η θέση του κέντρου της συστάδας και α_0 η απόσταση από το x_0 έχουμε τον τύπο $p = p_t h_{\alpha_0} \|x_0 + \alpha_0\|^{-\alpha}$.Η συνολική παρεμβολή σε έναν δέκτη είναι το άθροισμα δυο επιμέρους παρεμβολών, της παρεμβολής που δημιουργείται από την συστάδα στην οποία βρίσκεται ο δέκτης και της παρεμβολής που δημιουργείται από τις ξένες συστάδες. Έτσι, συμβολίζοντας με I_{intra} την παρεμβολή που έχουμε από συσκευές που βρίσκονται στην ίδια συστάδα με τον πομπό και τον δέκτη (συστάδα εκπρόσωπος) υπολογίζεται σαν $I_{intra} = \sum_{a \in A^{xo} - \alpha_0} p_t h_{\alpha_{xo}} \|x_0 + a\|^{-\alpha}$, όπου a είναι οι συσκευές μέσα στην ίδια συστάδα A^{x_0}, κέντρου x_0 εκτός από την α_0. Συμβολίζοντας με I_{inter} την παρεμβολή που προέρχεται από συσκευές εκτός της συστάδας έχουμε $I_{inter} = \sum_{x \in \Phi_c - x_0} \sum_{a \in A^x} p_t h_{\alpha_x} \|x + a\|^{-\alpha}$. Οπότε για τον υπολογισμό του SIR χρησιμοποιείται το άθροισμα των δυο επιμέρους παρεμβολών και ισούται με το ακόλουθο πηλίκο: $SIR = \frac{P_t h_{\alpha_0} \|x_0 - \alpha_0\|^{-\alpha}}{I_{intra} + I_{inter}}$. [54]

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Laplace για το SIR μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα κάλυψης σε καθεμία από τις τρεις περιπτώσεις μοντελοποίησης με παρόμοιο τρόπο. Η πιθανότητα κάλυψης εξαρτάται τόσο από την παρεμβολή inter και την παρεμβολή intra, όσο και από την απόσταση που απέχει το σημείο που μας ενδιαφέρει από τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί.[51]

Η διεργασία αυτή βρίσκει εφαρμογή και ανταποκρίνεται καλά σε δίκτυα αισθητήρων, σε στρατιωτικές μονάδες, σε αστικό δίκτυο με σημεία μεγάλης πυκνότητας και γενικά σε δίκτυα όπου γύρω από μια συσκευή συγκεντρώνονται άλλες συσκευές. [47]

2.2.4 Matern διεργασία σημείων



Εικόνα 24: Μοντελοποίηση δικτύου με Matern Poisson Process

Η Matern διεργασία σημείων είναι μια PCP διεργασία σημείων, η οποία διαχωρίζεται στην Matern Poisson Process και στην Matern hard Core Poisson Process ανάλογα με την θέση των συσκευών στον χώρο. Τα κέντρα της συστάδας προκύπτουν από μια αρχική ομογενή διεργασία PPP Φ, με πυκνότητα λ και έστω f μια μετρήσιμη συνάρτηση. Η Matern διεργασία στηρίζεται στην αρχή της ομοιόμορφης κατανομής συσκευών σε απόσταση r_h γύρω από ένα κεντρικό σημείο x, ενώ στην Matern Hard core η βασική αρχή είναι να μην υπάρχει κανένα άλλο σημείο σε απόσταση r_h από το σημείο x.

Για την διεργασία Matern PCP κάθε συσκευή – κόμβος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος μέσα σε μία σφαίρα προκαθορισμένης ακτίνας r_h γύρω από το σημείο – εκπρόσωπο της συστάδας. Έτσι, για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f(r) έχουμε: $f(r) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r_h^2}, r \le r_h \\ 0, r > r_h \end{cases}$ [55]

Πίνακας 5: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των Matern δικτύων

Φ, λ	Μια ομογενής στάσιμη Poisson διεργασία σημείων, η πυκνότητα των σημείων.
x	Η τοποθεσία, συντεταγμένες του κέντρου της συστάδας.
p(x,Φ)	Η πιθανότητα το σημείο x να παραμείνει στη διεργασία Φ.
$1-p_0$	Η πιθανότητα διαγραφής ενός σημείου.
r_h	Προκαθορισμένη παράμετρος απόστασης από το σημείο x.
r	Η απόσταση της συσκευής από το κέντρο της συστάδας.
f(r)	Η πιθανότητα διαγραφής δύο σημείων τα οποία έχουν μεταξύ τους απόσταση r.
α	Συντελεστής απώλειας ισχύος.
p_t	Η ισχύς μετάδοσης των συσκευών.
p_c	Η πιθανότητα κάλυψης.
τ	Το επιτρεπόμενο όριο για το SINR.

Η Matern Hard Core είναι μια PCP διεργασία η οποία δεν επιτρέπει σε δυο σημεία – κέντρα της συστάδας να συνυπάρχουν σε απόσταση μικρότερη από μια αυστηρά προκαθορισμένη παράμετρο r_h. Έτσι, ξεκινώντας από μια διεργασία PPP γίνεται αραίωση των σημείων καθώς δεν θέλουμε να συνυπάρχουν σημεία σε απόσταση μικρότερη από r_h [48]. Υπάρχουν δυο τεχνικές αραίωσης της PPP στοχαστικής

διεργασίας. Η πρώτη ιδέα είναι να γίνει τόσο ανεξάρτητη όσο και εξαρτημένη αραίωση, όπου οι συσκευές που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από την προκαθορισμένη διαγράφονται. Η δεύτερη ιδέα είναι να υπάρχει μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που βασίζεται στην απόσταση για την διαγραφή των κόμβων. Έτσι, ένα σημείο της διεργασίας ανάλογα με την απόσταση από τους γειτονικούς κόμβους διαγράφεται με κάποια πιθανότητα, και όχι σίγουρα. Σε αυτήν την περίπτωση αν θεωρήσουμε ένα τυχών σημείο $x \in \Phi$, αυτό παραμένει στην διεργασία με πιθανότητα:

$p(x,\Phi) = p_0 \prod_{\substack{y\in\Phi \\ y\neq x}} \left[1 - f\left(\|x-y\|\right)\right]$, όπου $\|x-y\| = r$ και $p_0 \in [0,1]$. [56]

Στην περίπτωση που $p_0 = 1$ και $f(r) = \begin{cases} 1, r \le r_h \\ 0, r > r_h \end{cases}$ τότε έχουμε την Matern Hard Core διεργασία, επομένως διαγράφονται όλα τα σημεία τα οποία βρίσκονται μέσα σε ακτίνα r_h από το κέντρο x. Η πυκνότητα της αραιωμένης διεργασίας Poisson είναι: $\Lambda_{\alpha\rho} = \Lambda p_0 \exp\left(-\Lambda d b \int_0^\infty f(r) r^{d-1} dr\right)$, όπου d η διάσταση του χώρου (συνήθως d=2) και b η σφαίρα μοναδιαίας ακτίνας. [56]

Στην δεύτερη τεχνική ξεκινώντας από μια Φ marked Poisson διεργασία σημείων με πυκνότητα λ, πραγματικές τιμές για τα σημάδια που ακολουθούν κατανομή μ και f μια μετρήσιμη συνάρτηση γίνεται αραίωση των σημείων. Το σημαδεμένο σημείο $(x,m) \in \Phi$ παραμένει στην διεργασία με πιθανότητα: $p(x,m,\Phi) = p_0 \prod_{\substack{(y,n)\in\Phi \\ y\neq x}} \left[1 - f\left(\|x-y\|, m, n\right)\right]$

Αντίστοιχα, η πυκνότητα των σημείων δίνεται από τον τύπο:

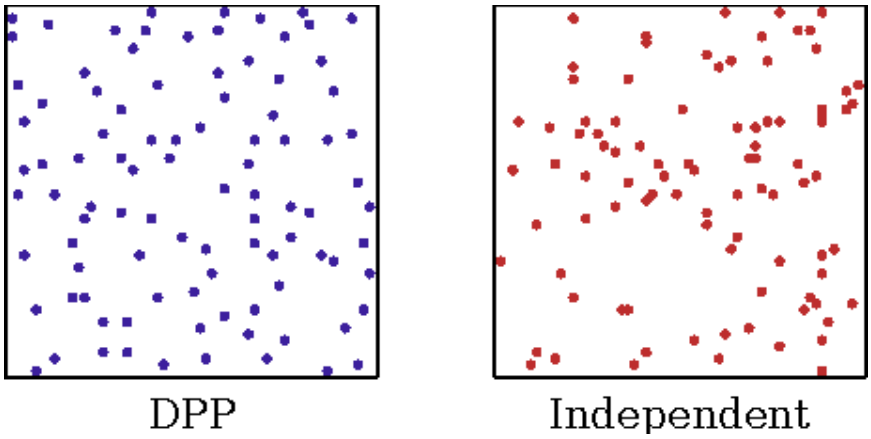
$\lambda_{\alpha\rho} = \lambda p_0 \int_{\mathbb{R}} \exp\left(-\lambda d b \int_{\mathbb{R}} \int_0^\infty f(r,m,l) r^{d-1} dr \mu(dl)\right) \mu dm$ [56]

Η διεργασία αυτή δεν είναι αρκετά ευέλικτη και παρουσιάζει ανακρίβειες στις προσομοιώσεις εξαιτίας της παρέμβασης στα χαρακτηριστικά του δικτύου. Είναι μια προσέγγιση που συνδυάζει ντετερμινιστικά και στοχαστικά στοιχεία αλλά δεν είναι κατάλληλη για πυκνά περιβάλλοντα. Αυτή η διεργασία είναι κατάλληλη για τον σχεδιασμό μονοεπίπεδων μικρών κυψελών παρέχοντας την καλύτερη απόσταση ανάμεσα στους πομπούς που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Λειτουργεί καλά σε δίκτυα αισθητήρων με αποφυγή σύγκρουσης, όπως το περιβάλλον του WiFi. [46] [56]

2.2.5 Determinental Point process

Η Determinental διεργασία σημείων μοντελοποιεί με μεγάλη ακρίβεια τις θέσεις των σταθμών βάσης των μακροκυψελών. Με την χρήση της DPP η απόκριση του δικτύου είναι εύκολα προσαρμόσιμη. Βασίζεται στην ιδέα ότι οι θέσεις των σταθμών βάσης των μακροκυψελών είναι γνωστές και υπάρχουν ικανοποιητικές αποστάσεις ανάμεσα τους. Υπάρχουν αποτελεσματικά στατιστικά εργαλεία για την διαχείριση της παρεμβολής σε

μια DPP, καθώς και ελκυστικές μαθηματικές ιδιότητες για την ανάλυση κυψελωτών δικτύων. Η DPP υπερέχει της PPP στις προβλέψεις βασικών μετρικών απόδοσης στα δίκτυα, όπως της συνάρτησης κοντινότερου γείτονα, της μέσης παρεμβολής, της πιθανότητας διακοπής. Επιπλέον, πολλές στάσιμες διεργασίες είναι εύκολο να προσομοιωθούν. [56] Ορίζοντας την διεργασία, πρόκειται για μια στοχαστική διεργασία σημείων της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση ορίζουσας (determinant). [57]



Εικόνα 25: Μοντελοποίηση δικτύου με Determinental PP και με ανεξάρτητη PPP.

Πίνακας 6: Διάφορες μετρικές για την μαθηματική μοντελοποίηση των Determinental δικτύων

Φ	Μια στάσιμη DPP διεργασία σημείων.
$K: \Lambda \times \Lambda \rightarrow \mathbb{C}$	Ο πυρήνας της DPP διεργασίας. Συνήθως $\Lambda = \mathbb{R}^2$
$p^{(n)}(x_1, x_2, \ldots, x_n)$	Η n-οστής τάξης συνάρτηση πυκνότητας.
G[u]	Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την διεργασία DPP.
A	Συντελεστής απώλειας ισχύος.
p_t	Η ισχύς μετάδοσης των σταθμών βάσης.
$\mathbf{h_x} \sim \mathbf{exp(1)}$	Συντελεστής σκίασης και σκέδασης Rayleigh.
$\ell(x): \ \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$	Η συνάρτηση εξασθένισης του σήματος.
$x^*(0) = x_0$	Ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί τον χρήστη στην τοποθεσία ο.
τ	Το επιτρεπόμενο όριο για το SINR.

Μια στοχαστική διεργασία σημείων Φ ορισμένη σε τοπικά συμπαγή χώρο Λ=$\mathbb{R}^2$, με $x_1, \ldots, x_n \in \mathbb{R}^2$ να είναι διακριτά σημεία της διεργασίας Φ, έχει n–οστής τάξεως

πυκνότητα $p^n(x_1, \dots, x_n)$ η οποία εκφράζει την πιθανότητα να βρεθεί σημείο σε μια περιοχή γύρω από το σημείο x_i με ένταση dx_i .

Η διεργασία Φ χαρακτηρίζεται ως determinental με πυρήνα $K: \Lambda \times \Lambda \to \mathbb{C}$, και n-οστής τάξεως πυκνότητα είναι: $p^n(x_1, \dots, x_n) = \det\big(K(x_i, x_j)\big)_{1 \le i,j \le n}$ με $(x_1, \dots, x_n) \in \Lambda^n$. Ο πυρήνας K θεωρείται ως πίνακας συνεχής, ερμητιανός, με μη αρνητικά στοιχεία και τοπικά ολοκληρώσιμος. Αντιπροσωπεύει την επίδραση που υπάρχει ανάμεσα στις διαφορετικές θέσεις των κόμβων της στοχαστικής διεργασίας. [57]

Υποθέτουμε ότι η διεργασία Φ είναι στάσιμη για δυο κύριους λόγους. Αφενός γιατί όταν είναι αμετάβλητη στις περιστροφές ο πυρήνας εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων και αφετέρου γιατί η πυκνότητα του φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση μιας DPP με συγκεκριμένο πυρήνα. Για να είναι μια διεργασία Φ στάσιμη θα πρέπει η συνάρτηση του πυρήνα να έχει την ακόλουθη μορφή $K(x,y) = K_o(x-y)$, όπου $x,y \in \mathbb{R}^2$. Η συνάρτηση $K_o(x)$ονομάζεται συνάρτηση διακύμανσης για τη στάσιμη DPP.

Οι διεργασίες DPP έχουν καλές μαθηματικές ιδιότητες:

- Η πυκνότητα δίνεται από κλειστό μαθηματικό τύπο για όλες τις τάξεις του n
- Υπάρχει κλειστός τύπος για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Laplace για κάθε μη αρνητική συνάρτηση f με συμπαγές στήριγμα.
- Στην περιορισμένη κατανομή Palm η DPP ταυτίζεται με μια άλλη της οποίας ο πυρήνας δίνεται σε κλειστό τύπο.[56]

Ακόμα και η PPP μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διεργασία DPP όπου $K(x,y) = 0$ και $p^n(x_1, \dots, x_n) = \lambda^n$.

Έτσι, για μια διεργασία Φ ~ DPP(K) που ορίζεται στον $\mathbb{R}^2$ ισχύει το ακόλουθο θεώρημα:

Θεώρημα 2.2.5.1[57]:

Αν θεωρήσουμε f μια μη αρνητική μετρήσιμη συνάρτηση τότε ο μετασχηματισμός Laplace για την Φ υπάρχει, αν η f ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες:

a. $\lim_{|x|\to\infty} f(x) = 0$ (μηδενικό όριο όταν $B(x,r) = \mathbb{R}^2$)

b. $\lim_{r\to\infty} \int_{R^2 - B(o,r)} K(x,x) f(x) dx = 0$ (είναι ολοκληρώσιμη όταν $x \notin B(o,r)$, όπου $o \in \mathbb{R}^2$ και το ολοκλήρωμα είναι μηδέν)

c. $\int_{R^2} K(x,x)\big(1 - \exp(-f(x))\big) dx < \infty$ (έχει πεπερασμένο ολοκλήρωμα στον $\mathbb{R}^2$)

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι:

$$G[u] \triangleq E[\textstyle\prod_{x\in\Phi} u(x)] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \int_{(R^2)^n} \rho^{(n)}(xi, xj) \prod_{i=1}^{n} \big(1 - u(x_i)\big) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

όπου η συνάρτηση $-\log u$ ικανοποιεί τις συνθήκες του παραπάνω θεωρήματος.

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε βασικές μετρικές για την ανάλυση των DPP δικτύων όπως είναι η πυκνότητα φάσματος, η συνάρτηση empty space, η συνάρτηση κοντινότερου κόμβου, η κατανομή της παρεμβολής και η κατανομή του SIR.

2.2.5.1 Η πυκνότητα φάσματος

Η πυκνότητα φάσματος μιας στάσιμης διεργασίας φ με συνάρτηση διακύμανσης $K_o(x)$ ορίζεται να είναι ο μετασχηματισμός Fourier , δηλαδή $\varphi(x) = \int K_o(t) e^{-2\pi i x \cdot t} dt$, για $x \in \mathbb{R}^2$.

Η πυκνότητα φάσματος χρησιμοποιείται συνήθως για να προσεγγιστεί η διεργασία DPP με συγκεκριμένη συνάρτηση πυρήνα.

2.2.5.2 Συνάρτηση κενού χώρου

Έστω $d(o,\Phi) = \inf\{\|x\|, x \in \Phi\}$ η μικρότερη απόσταση του σημείου $o \in \mathbb{R}^2$ από το κοντινότερο σημείο x της διεργασίας. Όταν οι χρήστες συνδέονται με τον κοντινότερο σταθμό βάσης η συνάρτηση κενού χώρου παρέχει την κατανομή της απόστασης του χρήστη από τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί. Η συνάρτηση κενού χώρου δίνεται από τον τύπο: [57]

$$F(r) = P\left[d(o,\Phi) \le r\right] = 1 - E\left[\exp\left(-\int f(x)\Phi(dx)\right)\right]$$

$$= 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \int_{(R^2)^n} \rho^{(n)}(x_i, x_j) \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \exp\left(\log 1\{|xi| > r\}\right)\right] dx_1 dx_2 ... dx_n$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n!} \int_{(B(o,r))^n} \rho^{(n)}(x_i, x_j) dx_1 dx_2 ... dx_n \text{ , όπου } f(x) = \log 1\{|x_i| > r\}$$

2.2.5.3 Η συνάρτηση κοντινότερου κόμβου

Η συνάρτηση κοντινότερου κόμβου δίνει την κατανομή της απόστασης ενός σημείου της διεργασίας από το κοντινότερο γειτονικό σημείο της διεργασίας. Όταν στο δίκτυο επιλέγεται ο σταθμός βάσης x_0 για να εξυπηρετήσει τον χρήστη, οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης (παρεμβολείς) μοντελοποιούν μια DPP διεργασία με πυρήνα $K^!_{xo}(x,y)$.[57]

Η συνάρτηση κοντινότερου κόμβου προσδιορίζεται μέσω της περιορισμένης κατανομής Palm στο σημείο x_0 :

$$D(r) = P^!_o\left(d(o,\Phi) \le r\right) = P\left[d(o,\tilde{\Phi}) \le r\right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n!} \int_{(B(o,r))^n} \det\left(K^!_0(x_i, x_j)\right)_{1<i,j<n} dx_1 dx_2 ... dx_n$$

όπου στην περιορισμένη κατανομή Palm σε σημείο ο πυρήνας $K^!_{xo}(x,y)$ δίνεται από τον κλειστό τύπο: $K^!_{xo}(x,y) = \frac{1}{K(x_o,x_o)} \det\begin{pmatrix} K(x,y) & K(x,x_o) \\ K(x_o,y) & K(x_o,x_o) \end{pmatrix}$

2.2.5.4 Κατανομή της παρεμβολής

Ενώ οι σταθμοί βάσης ακολουθούν την διεργασία Φ, οι θέσεις των κινητών χρηστών είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στον χώρο και ανεξάρτητα κατανεμημένες από τους σταθμούς βάσης. Κάθε σταθμός βάσης $x \in \Phi$ χαρακτηρίζεται από μια ισχύ μετάδοσης p_t και από έναν συντελεστή σκίασης $h_x \sim \exp(1)\ \forall x \in \Phi$. Ο θερμικός θόρυβος υποτίθεται μηδενικός και η συνάρτηση απώλειας (path loss) μη αυξανόμενη $\ell(x)$. [57]

Η παρεμβολή μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δυο σκηνικά – περιπτώσεις. Πρώτον, όταν ο σταθμός βάσης με τον οποίο συνδέεται ο χρήστης βρίσκεται σε αυθαίρετη συγκεκριμένη τοποθεσία, όπου μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση παρεμβολή

καθώς οι σταθμοί βάσης έχουν διαμορφωθεί σύμφωνα με την DPP διεργασία. Στην δεύτερη περίπτωση, ο χρήστης συνδέεται με τον κοντινότερο σταθμό βάσης και έχουμε αποτελέσματα μέσω του μετασχηματισμού Laplace της παρεμβολής.[57]

- Για την πρώτη περίπτωση η μέση παρεμβολή υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$E\left[I \mid x_0 = (r_0, 0)\right] = E\left[\sum_{xi \in \Phi - xo} p_t h_{xi} \ell(x_i) \mid x_0 = (r_0, 0)\right] = E\left[\sum_{xi \in \Phi} p_t h_{xi} \ell(x_i)\right]$$

$$= p_t \int_{R^2} \int_R h \cdot \ell(x) \cdot K^!_{x_0}(x, x) \cdot \exp(-h) dh dx = p_t \int_{R^2} K^!_{x_0}(x, x) \cdot \ell(x) dx$$

- Για την δεύτερη περίπτωση υποθέτουμε ότι ο χρήστης βρίσκεται στην θέση $y \in \mathbb{R}^2$ και τον εξυπηρετεί ο σταθμός βάσης $x^*(y) = \arg\min_{x \in \Phi} \|x - y\|$ που βρίσκεται πι ο κοντά. Για τον μετασχηματισμό Laplace της παρεμβολής έχουμε:

$$E\left[e^{-sI} \mid x^*(0) = x_0\right] = E\left[e^{-sI} \mid x_0 \in \Phi, \Phi\left(B^o(0, r_o)\right) = 0\right] =$$

$$= E\left[\exp\left(-s \sum_{xi \in \Phi \cap B^o(0, r_o)} p_t h_{xi} \ell(xi)\right) \middle| \Phi\left(B^o(0, r_o)\right) = 0\right] =$$

$$= E\left[\exp\left(-s \sum_{xi \in \tilde{\Phi} \cap B^o(0, r_o)} p_t h_{xi} \ell(xi) 1_{\tilde{\Phi}\left(B^o(0, r_o)\right) = 0}\right)\right] / P\left[\tilde{\Phi}\left(B^o(0, r_o)\right) = 0\right]$$

$$E\left[e^{-sI} \mid x^*(0) = x_0\right] = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \int_{(R^2)^n} \det\left(K^!_{x_0}(x_i, x_j)\right)_{1 \le i, j \le n} \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \frac{1_{\{|xi| > r\}}}{1 + sP\ell(x_i)}\right] dx_1 dx_2 \ldots dx_n}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \int_{(B(o,r))^n} \det\left(K^!_{x_0}(x_i, x_j)\right)_{1 \le i, j \le n} dx_1 dx_2 \ldots dx_n}$$

2.2.5.5 Κατανομή του SIR

Στο σενάριο που ο χρήστης συνδέεται με τον κοντινότερο σταθμό βάσης $x^*(0) = x_0$, και υποθέτοντας ότι στο κανάλι έχουμε σκέδαση Rayleigh, υπολογίζουμε την κατανομή του λαμβανόμενου SIR σε έναν χρήστη: [57]

$$P\left(SIR(0, \Phi) > \tau \middle| x^*(0) = x_0\right) = P\left(\frac{h_0 \ell(x_0)}{I} > \tau \middle| x^*(0) = x_0\right) = E\left[\exp\left(-\frac{\tau}{\ell(x_0)} I\right) \middle| x^*(0) = x_0\right]$$

$$= \int_0^{\infty} \lambda 2\pi \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \int_{(R^2)^n} \det\left(K^!_{x_0}(xi, xj)\right)_{1 \le i, j \le n} \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \frac{1_{\{|xi| > r\}}}{1 + \tau \cdot \ell(x_i) / \ell(x_0)}\right]\right|_{x_0 = (r_0, 0)} dx_1 dx_2 \ldots dx_n \Bigg] r_0 dr_0$$

2.2.6 Ginibre Point Process

Η Ginibre διεργασία σημείων είναι μια ειδική κατηγορία των determinental διεργασιών, η οποία χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τυχαία φαινόμενα που παρατηρείται ανάδραση - ανατροφοδότηση (relulsion). Σε πολλά δίκτυα οι θέσεις των κόμβων συσχετίζονται μεταξύ τους και υλοποιούν ένα γενικό ή clustered μοντέλο. [58]

Η διεργασία Ginibre εξαρτάται από την παράμετρο $0<\beta\leq 1$, όπου κάθε κόμβος προστίθεται ή αφαιρείται από την διεργασία με πιθανότητα β. Όσο πιο μικρή είναι η παράμετρος β, τόσο πιο μικρή είναι η συσχέτιση μεταξύ των σημείων. Όταν β →0 , οι θέσεις των σημείων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μοντελοποιούν διεργασία PPP.[58]

Πίνακας 7: Μετρικές για την μοντελοποίηση των Ginibre διεργασιών

Φ	Η διεργασία σημείων.
$K:\Lambda\times\Lambda\rightarrow\mathbb{C}$	Ο πυρήνας της DPP διεργασίας. Συνήθως $\Lambda=\mathbb{R}^2$
$p^{(n)}(x_1,x_2,\ldots,x_n)$	Η n-οστής τάξης συνάρτηση πυκνότητας.
β	Η παράμετρος της διεργασίας Ginibre $0<\beta\leq 1$
$g(r)$	Η συνάρτηση συσχέτισης για δύο σημεία της διεργασίας.
$F(r)=P(\lVert u-\Phi\rVert\leq r)$	Η συνάρτηση εγγύτητας – κενού χώρου.
$\tilde{\gamma}(k,x)$	Η κανονικοποιημένη Γάμμα κατανομή με παραμέτρους k, x.
$h_x\sim\exp(1)$	Συντελεστής σκίασης και σκέδασης Rayleigh.
$\ell(x):\ \mathbb{R}^2\rightarrow\mathbb{R}$	Η συνάρτηση εξασθένισης του σήματος.
$G(r)$	Η συνάρτηση κοντινότερου γειτονικού κόμβου.
$J(r)$	Η συνάρτηση J.

Η συνάρτηση πυρήνας δίνεται από τον τύπο: $K(x,y)=\frac{c}{\pi}e^{-\frac{c}{2\beta}\left(|x|^2+|y|^2\right)}e^{\frac{c}{\beta}xy}$, ο οποίος στην περίπτωση που β=1 απλοποιείται σε $K(x,y)=\pi^{-1}e^{-\frac{1}{2}\left(|x|^2+|y|^2\right)}e^{xy}$, όπου $x,y\in\mathbb{R}^2$ και $c>0$.

Η πυκνότητα 2ης τάξεως εξαρτάται από την απόσταση των σημείων:

$\rho^2(x,y)=\rho^2(r)=\pi^{-2}\left(1-e^{-r^2}\right)$. [58]

Η συνάρτηση συσχέτισης είναι: $g(x,y)=\frac{\rho^2(x,y)}{\rho^2(x)\rho^2(y)}=\frac{\pi^{-2}\left(1-e^{-r^2}\right)}{\pi^{-2}}=1-e^{-r^2}$.[58]

Αφού $g(r)<1$ για κάθε r , η GPP υποστηρίζει την ανάδραση για όλες τις αποστάσεις.

Βασικές κατανομές για τις αποστάσεις της β – Ginibre διεργασίας σημείων παρουσιάζονται παρακάτω:

2.2.6.1 Η συνάρτηση εγγύτητας και κενού χώρου

Η απόσταση εγγύτητας ανάμεσα σε μια θέση u και στην διεργασία Φ είναι:

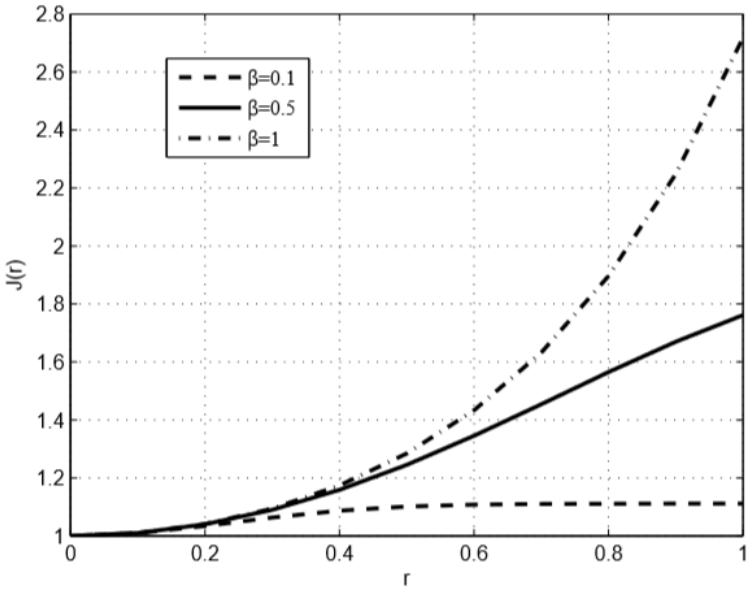
$F(r) = P(\|u-\Phi\| \le r) = 1 - P(\|u-\Phi\| > r) = 1 - \prod_{\kappa=1}^{\infty}\left(1-\beta\cdot\tilde{\gamma}\left(k,\frac{c}{\beta}r^2\right)\right)$, όπου $\tilde{\gamma}$ είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση Γάμμα $\tilde{\gamma}(k,x) = \frac{\int_0^x e^{-u}u^{k-1}du}{\Gamma(k)}$.[58]

2.2.6.2 Η συνάρτηση απόστασης κοντινότερου γειτονικού κόμβου

Η απόσταση κοντινότερου γειτονικού κόμβου είναι η απόσταση ενός κόμβου $x \in \Phi$ από τον κοντινότερο κόμβο και δίνεται από τον τύπο: $G(r) = 1 - \prod_{k=2}^{\infty}\left(1-\beta\cdot\tilde{\gamma}\left(k,\frac{c}{\beta}r^2\right)\right)$[58]

2.2.6.3 Η συνάρτηση J απόστασης

Η συνάρτηση J είναι μια μετρική που υπολογίζει πόσο κοντά είναι η διεργασία στην PPP και ορίζεται σαν το πηλίκο της απόστασης κοντινότερου γειτονικού κόμβου προς την απόσταση εγγύτητας και δίνεται από τον τύπο: $J(r) = \frac{1-G(r)}{1-F(r)}$.[58]



Εικόνα 26: Η συνάρτηση J σε σχέση με την παράμετρο β.

Για την ομοιόμορφη PPP ισχύει $J(r) = 1$, τιμές $J(r) > 1$ δείχνουν ανάδραση καθώς η πιθανότητα ύπαρξης κοντινού γειτονικού κόμβου είναι μικρή. Αντίθετα, για διεργασίες clustered η συνάρτηση J παίρνει τιμές $J(r) < 1$ καθώς συγκεντρώνονται αρκετοί κόμβοι γύρω από την συσκευή – κόμβο x. [58]

2.3 Σύγκριση τεχνικών για τα διάφορα δικτυακά περιβάλλοντα

Συνοψίζοντας, για να μοντελοποιήσουμε κάθε διεργασία χρειάζεται να προσδιορίσουμε τις βασικές παραμέτρους του συστήματος ώστε αξιοποιώντας τις ιδιότητες που προσφέρει, να ανταποκρίνεται στο δικτυακό περιβάλλον που μας ενδιαφέρει. Ανάλογα με την διεργασία που χρησιμοποιούμε μπορούμε να υπολογίσουμε διάφορες μετρικές απαραίτητες για την αξιοπιστία του δικτύου, όπως είναι η πιθανότητα κάλυψης, το SINR, ο ρυθμός μετάδοσης. Κάθε διεργασία βρίσκει εφαρμογές σε διαφορετικά περιβάλλοντα, οπότε για να επιλέξουμε την σωστή χρειάζεται να τις συγκρίνουμε και να γνωρίζουμε τα διαφορετικά τους χαρακτηριστικά.

Η διεργασία PPP (Poisson Point Process) για να μοντελοποιηθεί στην γενική της μορφή χρειάζεται να προσδιορίσουμε την πυκνότητα των σημείων $\lambda(x_i, y_i)$, το πλήθος n των σημείων σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η διεργασία PPP διακρίνεται σε ομεγενή και ετερογενή ανάλογα με τον αν η παράμετρος της πυκνότητας των σημείων $\lambda(x_i, y_i)$ παραμένει σταθερή ή αλλάζει για κάθε χώρο – επίπεδο κάλυψης. Συνήθως προτιμάται η ομογενής στάσιμη διεργασία Poisson καθώς η σταθερή παράμετρος $\lambda(x_i, y_i) = \lambda$ απλοποιεί τους μαθηματικούς υπολογισμούς. Η υπόθεση της στάσιμης κατανομής – διεργασίας προσφέρει εύκολα μαθηματικά εργαλεία για την προσομοίωση κινητών δικτύων, καθώς μοντελοποιεί περιβάλλοντα όπου οι πομποί και οι δέκτες βρίσκονται τυχαία κατανεμημένοι στον χώρο και δεν εξαρτάται από την «κινητικότητα» και το πλήθος των συσκευών. [47] Η διεργασία PPP ανταποκρίνεται σε πυκνά αστικά δίκτυα όπου υπάρχουν φεμτοκυψέλες, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές παρεμβολές ή καταστροφές του λαμβανόμενου σήματος και προσφέροντας υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας για τις διάφορες μετρικές του συστήματος.Προσφέρει «καλά» αποτελέσματα σε πολυεπίπεδα δίκτυα παρέχοντας κλειστούς τύπους για τον υπολογισμό διάφορων μετρικών του συστήματος όπως της παρεμβολής I_{aggr} μέσω του μετασχηματισμού Laplace, του SINR, της πιθανότητας διακοπής με συγκεκριμένο όριο ε και της πιθανότητας κάλυψης p_c. Βρίσκει εφαρμογή σε ετερογενή δίκτυα όπου έχουμε μεγάλο πλήθος συσκευών και απεριόριστη ακτίνα κάλυψης όπως είναι τα δίκτυα μακροκυψελών. Χρησιμοποιείται τόσο στην περίπτωση του uplink όσο και στην περίπτωση του downlink. Επίσης, στα δίκτυα φεμτοκυψελών οι θέσεις των συσκευών είναι άγνωστες και τυχαίες δημιουργώντας πρόβλημα στην σωστή διαχείριση του ραδιοφάσματος καθώς και στην διαχείριση των παρεμβολών.

Σε μια BPP (Binomial Point Process) είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε το πλήθος των κόμβων N που υπάρχουν σε μια περιοχή B και την πυκνότητα των κόμβων λ για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε το δίκτυο. Οι κόμβοι βρίσκονται τυχαία ομοιόμορφα κατανεμημένοι στον χώρο B, ο αριθμός τους είναι γνωστός και δεν μπορεί να γίνει προσθήκη ή αφαίρεση κόμβων, καθώς επηρεάζει την μοντελοποίηση. Η BPP διεργασία υπολογίζει την πιθανότητα p να υπάρχει γειτονικός κόμβος σε απόσταση r από το σημείο x και την χρησιμοποιεί για να προσομοιώσει μετρικές του δικτύου όπως την πιθανότητα κάλυψης p_c του δικτύου. Χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσουμε δίκτυα με μικρό, γνωστό αριθμό συσκευών που βρίσκονται τυχαία κατανεμημένες σε μια

περιοχή, όπως είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Δεν είναι κατάλληλη για δίκτυα με μεγάλο πλήθος κόμβων.

Η διεργασία PCP (Poisson Cluster Process) στηρίζεται στην ιδέα συγκέντρωσης συσκευών γύρω από ορισμένα σημεία δημιουργώντας ομάδες – συστάδες σημείων. Υλοποιείται με την βοήθεια μιας αρχικής PPP διεργασίας με πυκνότητα λ, όπου κάθε σημείο της αρχικής PPP (κέντρο της συστάδας) συγκεντρώνει γύρω του μια ομάδα συσκευών, οι οποίες λειτουργούν είτε σαν πομποί είτε σαν δέκτες. Οι θέσεις των ενεργών συσκευών προσδιορίζονται από μια κατανομή στον χώρο. Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε δυο διεργασίες PCP, την Thomas Cluster Process και την Matern Point Process.

Για να μοντελοποιήσουμε την διεργασία Thomas χρειάζεται να προσδιορίσουμε τις θέσεις των κέντρων των συστάδων x και το σύνολο των ενεργών συσκευών N_x σε κάθε συστάδα. Οι θέσεις των ενεργών συσκευών μοντελοποιούνται μέσω μιας κανονικής κατανομής με μέση τιμή m_α και διασπορά σ_α^2 και είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Έτσι, υπάρχουν κατά μέσο όρο m_α συσκευές σε κάθε συστάδα οι οποίες βρίσκονται με διασπορά σ_α^2 στον χώρο. Μπορούμε να διακρίνουμε τις παρεμβολές του σήματος σε δυο κύριες αιτίες, την παρεμβολή που προέρχεται από συσκευές της ίδιας συστάδας με αυτήν που βρίσκεται ο δέκτης I_{intra}, και την παρεμβολή που προέρχεται από συσκευές που βρίσκονται σε διαφορετικές συστάδες I_{inter}. [54] Η διεργασία παρέχει κλειστούς τύπους για τον υπολογισμό της πιθανότητας κάλυψης p_c, του μέσου ρυθμού μετάδοσης καθώς και του SIR μέσω του αντίστοιχου μετασχηματισμού Laplace. Προσφέρει καλά αποτελέσματα υποστηρίζοντας την D2D επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Όταν κοντινές συσκευές θέλουν να «κατεβάσουν» δεδομένα, όπως ένα τραγούδι ή ένα δημοφιλές βίντεο μέσω της D2D επικοινωνίας επιτυγχάνουν καλύτερη απόκριση. [59][59] Έτσι, η Thomas διεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα οδηγώντας σε αποσυμφόρηση του κεντρικού δικτύου. Βρίσκει ακόμα εφαρμογή σε πυκνά δίκτυα αισθητήρων, όπου η πληροφορία συγκεντρώνεται τοπικά στο κέντρο της συστάδας και έπειτα τροφοδοτείται στο δίκτυο, καθώς και στην επικοινωνία σε στρατιωτικές μονάδες.[54]

Η Matern διεργασία σημείων για να μοντελοποιηθεί χρειάζεται να γνωρίζουμε την ελάχιστη απόσταση r_h που επιτρέπεται να συνυπάρχουν δυο σημεία της διεργασίας. Ξεκινώντας από μια αρχική PPP διεργασία γίνεται αραίωση – διαγραφή των σημείων με πιθανότητα διαγραφής p_o, ώστε να μην υπάρχουν σημεία της διεργασίας σε απόσταση μικρότερη από r_h. [56] Στην ειδική περίπτωση που η πιθανότητα διαγραφής ενός κόμβου είναι $p_o = 1$, έχουμε την διεργασία Matern Hard Core. Μπορούμε να υπολογίσουμε με την βοήθεια κλειστού τύπου την πιθανότητα διαγραφής f(r) σημείων της διεργασίας τα οποία βρίσκονται σε απόσταση r μεταξύ τους. Η Matern διεργασία σημείων χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό μονοεπίπεδων μικρών κυψελών με αποφυγή σύγκρουσης όπως είναι το περιβάλλον του Wi –fi . Ακόμα βρίσκει εφαρμογή

σε δίκτυα αισθητήρων όπου εφαρμόζεται η αποφυγή σύγκρουσης. Τέτοια δίκτυα μπορεί να είναι μια φεμτοκυψέλη για την εξυπηρέτηση των πελατών μιας καφετέριας, μια πικοκυψέλη για την εξυπηρέτηση ενός shopping mall ή ενός αεροδρομίου. [56] Η Matern Hard Core διεργασία προσφέρει την καλύτερη δυνατή απόσταση r που μπορούν να βρίσκονται πομποί οι οποίοι χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι μετάδοσης. Χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των θέσεων – σταθμών βάσης που επιλέγονται να λειτουργούν από τον διαχειριστή του δικτύου σε πραγματικά δίκτυα μακροκυψελών. [56] Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλη για πυκνά περιβάλλοντα καθώς οδηγούμαστε στην διαγραφή πολλών κόμβων.

Για να μοντελοποιήσουμε μια DPP διεργασία χρειάζεται να γνωρίζουμε τον πυρήνα $K: \mathbb{R}^2 \to \mathbb{C}$ της διεργασίας των σημείων. Με την υπόθεση της στάσιμης διεργασίας έχουμε καλές μετρικές για να μοντελοποιήσουμε τις τοποθεσίες των σταθμών βάσης σε δικτυακά περιβάλλοντα. [57] Σε μια DPP η απόσταση του χρήστη από τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί είναι στοχαστικά μικρότερη από την περίπτωση μιας προσαρμοσμένης PPP διεργασίας. Επομένως, οι DPP διεργασίες σημείων προσφέρουν ένα γενικό μοντέλο κατανομής που ανταποκρίνεται στις πραγματικές τοπολογίες δικτύων. Συνήθως οι σταθμοί βάσης των μακροκυψελών βρίσκονται «αρκετά» μακριά μεταξύ τους και οι θέσεις τους δεν είναι τόσο «τυχαίες», οπότε όταν μοντελοποιούνται μέσω μιας DPP διεργασίας σημείων έχουν μεγάλη συνάρτηση κενού χώρου. Έτσι, κάθε συσκευή – χρήστης συνδέεται με τον κοντινότερο σταθμό βάσης και πετυχαίνει μεγαλύτερη ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Δεύτερον, η συνάρτηση γειτονικού κόμβου είναι μικρότερη, καθώς οι PPP διεργασίες σημείων όταν η απόσταση ανάμεσα στον σταθμό βάσης και τους παρεμβολείς είναι μικρή, την υπερεκτιμούν. Επιπλέον, αφού οι παρεμβολείς επηρεάζουν λιγότερο το λαμβανόμενο σήμα στην συσκευή, το λαμβανόμενο SIR θα είναι καλύτερο. Ακόμα, η αναμενόμενη πιθανότητα κάλυψης p_c θα είναι μεγαλύτερη και ο υπολογισμός της παρεμβολής ή της μέσης τιμής της παρεμβολής θα είναι ακριβέστερος. Τέλος, τα απλά μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των DPP δικτύων καθιστούν ιδανική την μοντελοποίηση των σταθμών βάσης των μακροκυψελών με κατάλληλη DPP διεργασία σημείων.[57]

Η Ginibre διεργασία σημείων είναι η γενικότερη μορφή διεργασίας. Προσδιορίζεται μέσα από μια παράμετρο β ($0 < \beta \leq 1$) που εκφράζει την πιθανότητα εισαγωγής ή διαγραφής σημείων από την διεργασία. Ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου β μπορεί να οδηγούμαστε είτε σε PPP διεργασία (όταν $\beta \to 0$), είτε σε PCP διεργασία (όταν $\beta \to 1$). Χρησιμοποιείται για να προσεγγίσουμε την συνάρτηση πυρήνα και να αναγνωρίσουμε την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των κόμβων. Παρέχει συναρτήσεις υπολογισμού των αποστάσεων μεταξύ των συσκευών μέσα από τα ιδιαίτερα μαθηματικά εργαλεία της. Βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα που υποστηρίζουν ανάδραση – ανατροφοδότηση, εκμεταλλευόμενη την τοπολογία του δικτύου.

Ολοκληρώνοντας, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου που θέλουμε να μοντελοποιήσουμε επιλέγουμε την κατάλληλη διεργασία σημείων. Συχνά βλέπουμε και

συνδυασμό κάποιων διεργασιών όπως στην περίπτωση των PCP διεργασιών. Οι βασικές διαφορές ανάμεσα στις διάφορες διεργασίες φαίνονται στον Πίνακας 8.

Πίνακας 8: Σύγκριση των διάφορων στοχαστικών διεργασιών

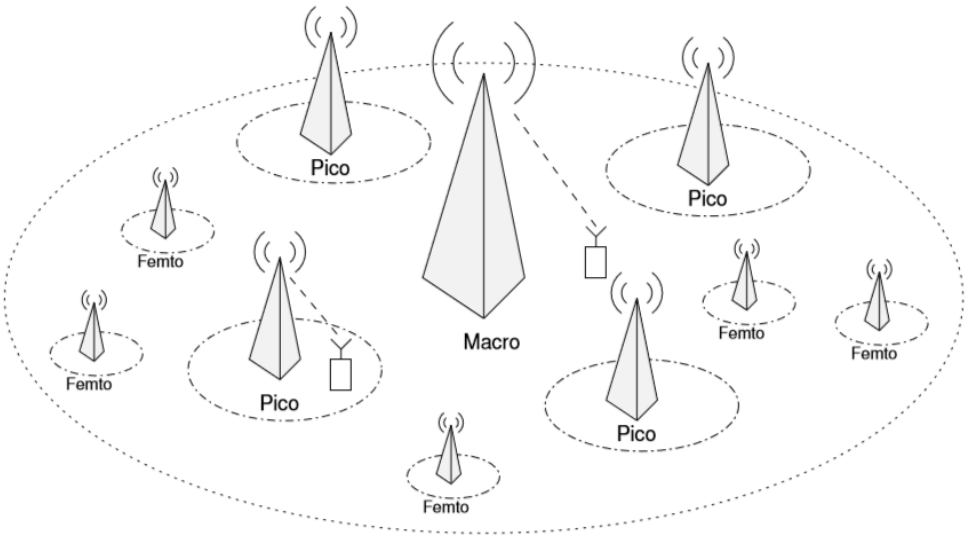
	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	**ΕΦΑΡΜΟΓΗ**	**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ**	**ΩΦΕΛΗ**
Poisson Point Process	Μακροκυψέλες Πολυεπίπεδα δίκτυα	Φεμτοκυψέλες Μακροκυψέλες	Τυχαιότητα στοχαστικότητα στην τοποθεσία των κόμβων	Γενική χρήση
Binomial Point Process	Μικρός-γνωστός αριθμός κόμβων	Ασύρματα τοπικά δίκτυα αισθητήρων	Ομοιόμορφη τοποθέτηση μικρού αριθμού κόμβων	Εύκολοι υπολογισμοί
Thomas PCP Poisson Cluster Process	Ομαδοποίηση κόμβων Πολυεπίπεδα δίκτυα	Δίκτυα αισθητήρων Στρατός Πυκνό αστικό δίκτυο	Συγκέντρωση συσκευών γύρω από μια περιοχή.	Αντιμετώπιση πυκνών δικτύων
Matern Hard Core Process	Καλύτερη αξιοποίηση καναλιού	Μικρές κυψέλες Φεμτοκυψέλες πικοκυψέλες Wi-Fi	Απαγορεύει ύπαρξη γειτονικής συσκευής σε απόσταση $r < r_h$	Αποφυγή συγκρούσεων Καταμερισμός ραδιοφάσματος.
Determinental Point Process	Γνωστή τοποθεσία σταθμών βάσης	Σταθμοί βάσης Μακροκυψελών	Προσαρμόσιμη στο δίκτυο. Μαθηματικά εργαλεία	Εύκολη προσομοίωση άρα πιο ακριβή αποτελέσματα
Ginibre Point Process	Αναγνώριση συσχέτισης μεταξύ κόμβων.	Δίκτυα που υποστηρίζουν ανατροφοδότηση.	Δύσκολα μαθηματικά εργαλεία Γενικότερη μορφή	Σε συνδυασμό με κάποια άλλη

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3.1 Μοντελοποίηση και Ανάλυση k–πολυεπίπεδου ετερογενούς δικτύου.

3.1.1 Περιοχή – πρόβλημα

Όπως έχουμε αναφέρει και στην ενότητα 1.1.1 τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα παρουσιάζουν ετερογένεια και συνδυάζουν όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Έτσι, σε ένα «παραδοσιακό» δίκτυο μακροκυψελών με σταθμούς βάσης, το οποίο προσφέρει καθολική κάλυψη, συχνά συναντάμε μια πληθώρα από μικρές κυψέλες. Βρίσκουμε πικοκυψέλες , οι οποίες έχουν μικρότερη ακτίνα κάλυψης και χρησιμοποιούνται για να βελτιωθεί η χωρητικότητα του συστήματος. Επιπλέον διάφοροι χρήστες για να ικανοποιήσουν τις δικές τους, ιδιωτικές ανάγκες κάλυψης τοποθετούν σε τυχαίες θέσεις στο δίκτυο φεμτοκυψέλες, οι οποίες έχουν πολύ μικρή ακτίνα κάλυψης. Σύμφωνα με την εργασία των Ganti, Dhillon, Baccelli και Andrews, η οποία δημοσιεύτηκε τον Δεκέμβριο του 2012, στο περιοδικό της IEEE [60], μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ετερογενές δίκτυο μπορεί να αποτελείται από k συνυπάρχοντα επίπεδα. Κάθε επίπεδο χαρακτηρίζεται από μια ισχύ μετάδοσης p_t, πυκνότητα δικτύου λ και έναν ρυθμό μετάδοσης. Ο στόχος της εργασίας τους είναι η ύπαρξη ενός βασικού μοντέλου για τα ετερογενή δίκτυα , το οποίο θα παρέχει καλές μετρικές για το SINR, την πιθανότητα κάλυψης, τον ρυθμό μετάδοσης.

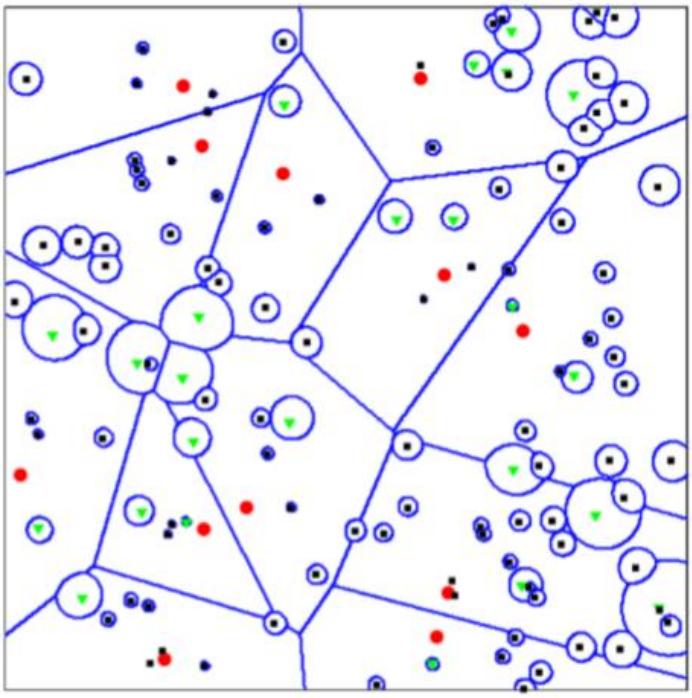


Σχήμα 18: Ετερογενές δίκτυο με 3 επίπεδα

3.1.2 Μοντελοποίηση

Η προσομοίωση του ετερογενούς δικτύου με k επίπεδα, υλοποιείται με την χρήση k ανεξάρτητων διεργασιών PPP για τους σταθμούς βάσης. Κάθε επίπεδο έχει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Γενικά για το i-επίπεδο οι σταθμοί βάσης είναι κατανεμημένοι σύμφωνα με την διεργασία Φ_i , έχουν πυκνότητα λ_i , ισχύ μετάδοσης p_{ti} και όριο για το SINR τ_i. Έτσι, κάθε επίπεδο χαρακτηρίζεται από την ακολουθία $\{p_{ti}, \tau_i, \lambda_i\}$. Αφού κάθε επίπεδο έχει διαφορετική ισχύ μετάδοσης, ένα διάγραμμα Voronoi με βάρη, όπως στο Σχήμα 19: Περιοχή κάλυψης σε δίκτυο με 3 επίπεδα, και με μεταβλητή ακτίνα δίνει μια

μέση εικόνα για την περιοχή κάλυψης. Η περιοχή κάλυψης των φεμτοκυψελών θα είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα άλλα δύο επίπεδα, ειδικά όταν είναι κοντά ένας σταθμός βάσης μεγάλης ισχύος. Έτσι, η χρήση μικρών κυψελών είναι σημαντική σε περιπτώσεις που το σήμα από τις μακροκυψέλες είναι ασθενές. [60]



Σχήμα 19: Περιοχή κάλυψης σε δίκτυο με 3 επίπεδα

Επίπεδο1 (κόκκινες τελείες): μάκρο σταθμοί βάσης, Επίπεδο2 (πράσινα τρίγωνα): πίκο σταθμοί βάσης και Επίπεδο3 (μαύρα τετραγωνάκια): φέμτο σταθμοί βάσης

Σύμφωνα με τους συγγραφείς της εργασίας, οι χρήστες υποθέτουμε ότι μοντελοποιούν μια ανεξάρτητη PPP Φ_m διεργασία σημείων με πυκνότητα λ_m και συνδέονται στον σταθμό βάσης που τους προσφέρει το καλύτερο SINR. Για τον υπολογισμό του SINR λαμβάνονται υπόψη οι παρεμβολές σταθμών βάσης που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο i, αλλά και σε διαφορετικό επίπεδο από τον i: $\mathrm{SINR}(x_i) = \dfrac{P_{ti}(x_i)\, A\, h_{x_i} r^{-\alpha}}{\sigma^2 + \sum_{j=1}^{k} \sum_{x \in \Phi_j - x_i} P_{tj}(x)\, A\, h_x r^{-\alpha}}$.

Θεωρούμε ότι η σκέδαση – σκίαση ανάμεσα στον σταθμό βάσης που βρίσκεται στην θέση x_i και τον χρήστη ακολουθεί εκθετική κατανομή Rayleigh. Οπότε $h_{xi} \sim \exp(1)$.

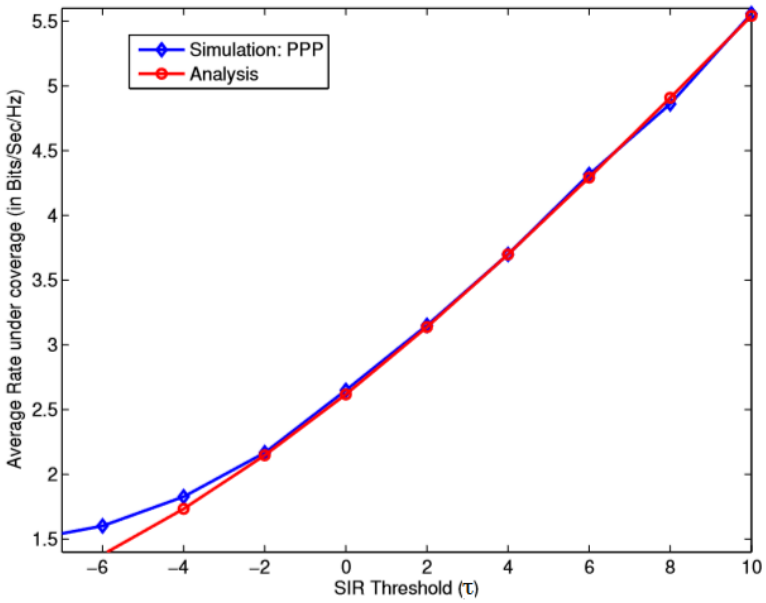
Για έναν κινητό χρήστη που βρίσκεται τυχαία τοποθετημένος στον χώρο, έχουμε δυο επιλογές δικτύου. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι έχει την δυνατότητα να συνδεθεί σε οποιοδήποτε επίπεδο επιθυμεί χωρίς περιορισμό (ανοιχτή πρόσβαση). Εναλλακτικά υποθέτουμε ότι ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε ένα υποσύνολο των επιπέδων και οι σταθμοί βάσης που δεν μπορεί να συνδεθεί μαζί τους λειτουργούν σαν παρεμβολείς (κλειστή πρόσβαση). Συμβολίζουμε με B το σύνολο των επιπέδων στους οποίους μπορεί να συνδεθεί ο χρήστης. Στην περίπτωση της ανοιχτής πρόσβασης το σύνολο $B = \{1, 2, \dots, k\}$, ενώ στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης έχουμε $B \subset \{1, 2, \dots, k\}$

3.1.3 Βασικά αποτελέσματα

Οι συγγραφείς προτείνουν ένα μοντέλο k – επιπέδων για το downlink.[60] Υποθέτοντας ότι κάθε χρήστης συνδέεται με τον σταθμό βάσης που του προσφέρει την καλύτερη ποιότητα σήματος, ότι ο λόγος του SINR είναι μεγαλύτερος από 1 όταν η συσκευή είναι εντός κάλυψης και ότι έχουμε εξασθένιση Rayleigh προκύπτει κλειστός τύπος για τον υπολογισμό της πιθανότητας κάλυψης p_c και για τον υπολογισμό του SINR σε όλο το δίκτυο, είτε έχουμε ανοιχτή πρόσβαση, είτε έχουμε κλειστή πρόσβαση. Θεωρώντας στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης το σύνολο των επιπέδων που μπορεί να συνδεθεί ο χρήστης $B \subset \{1, 2, \dots, k\}$, ενώ στην περίπτωση της ανοιχτής πρόσβασης το σύνολο $B = \{1, 2, \dots, k\}$ μπορούμε να υπολογίσουμε τόσο την πιθανότητα κάλυψης, όσο και τον μέσο αριθμό χρηστών με τον ίδιο κλειστό τύπο.

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Laplace για την συνάρτηση της παρεμβολής για την πιθανότητα κάλυψης στην περίπτωση που δεν υπάρχει θόρυβος ($\sigma^2 = 0$) προκύπτει ο κλειστός τύπος: $p_c(\{\lambda_i\}, \{\tau_i\}, \{p_{ti}\}) = \frac{\pi}{C(\alpha)} \frac{\sum_{i \in B} \lambda_i \, {p_{ti}}^{2/\alpha} \, {\tau_i}^{-2/\alpha}}{\sum_{i=1}^{k} \lambda_i \, {p_{ti}}^{2/\alpha}}$, όπου $C(\alpha) = 2\pi^2 \alpha^{-1} \csc \frac{2\pi}{\alpha}$

Παρατηρούν ότι αν σε ένα πυκνό δίκτυο το όριο για το SINR είναι ίδιο σε όλα τα επίπεδα, στην περίπτωση της ανοιχτής πρόσβασης η πιθανότητα κάλυψης δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των επιπέδων και την πυκνότητα των σταθμών βάσης, ενώ στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης η πιθανότητα κάλυψης μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων και η πυκνότητα των σταθμών βάσης.



Εικόνα 27: Μέσος ρυθμός και όριο SINR

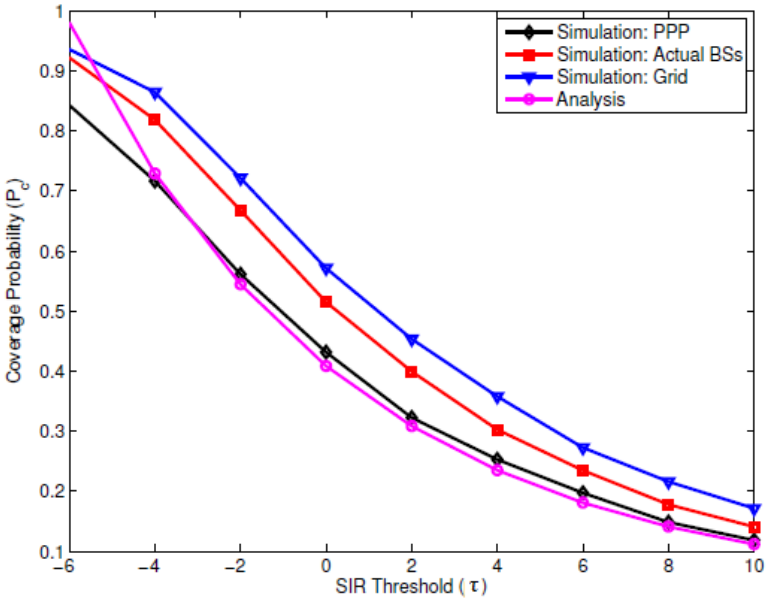
Η ανάλυση που προτείνεται στην εργασία προσομοιάζει πολύ καλά τα θεωρητικά αποτελέσματα για τα δίκτυα PPP. Ο μέσος αριθμός χρηστών ανά επίπεδο είναι: $\overline{N_j} = \frac{\lambda_j \, {p_{tj}}^{2/\alpha} {\tau_j}^{-2/\alpha}}{\sum_{i \in B} \lambda_i \, {p_{ti}}^{2/\alpha} \, {\tau_i}^{-2/\alpha}}$, όταν $j \in B$. Στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης αν $j \notin B$ τότε $\overline{N_j} = 0$. Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι ένα επίπεδο i εξυπηρετεί

περισσότερους χρήστες όταν έχει μεγαλύτερη πυκνότητα σταθμών βάσης λ_i, εκπέμπει σε μεγαλύτερη ισχύ p_{ti} ή το όριο τ_i για το SINR είναι χαμηλότερο.

Από τα πιο σημαντικά αποτελέσματα του paper [60] είναι το λήμμα 1 σύμφωνα με το οποίο αν γνωρίζουμε την λαμβανόμενη ισχύ $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ από κάθε σταθμό βάσης και ορίζοντας $c_i = \frac{\tau_i}{\sum_{j \neq i} \tau_j + \sigma^2}$, το πολύ m c_i είναι μεγαλύτερα από 1/m. Προσφέρει βέλτιστη επιλογή κυψέλης σε ετερογενή πυκνά δικτυακά περιβάλλοντα αν υποθέσουμε ότι όλα τα επίπεδα εκπέμπουν με την ίδια ισχύ p_t και έχουν το ίδιο όριο τ για το SINR.

3.1.4 Συμπεράσματα

Για την ανάλυση τους οι Ganti, Dhillon, Baccelli και Andrews χρησιμοποιούν τρεις διαφορετικές διεργασίες σημείων. Μοντελοποιούν τις θέσεις των σταθμών βάσης των μακροκυψελών μέσω μιας PPP (μαύρη καμπύλη), μέσω πραγματικού περιβάλλοντος μακροκυψελών (κόκκινη καμπύλη) και μέσω εξαγωνικών κυψελών (μπλε καμπύλη). Σύμφωνα και με το Σχήμα 20 παρατηρούμε ότι η πιθανότητα κάλυψης της ανάλυσης που προτείνουν σε σχέση με το όριο του SINR είναι πολύ κοντά στην προσομοίωση μέσω PPP.



Σχήμα 20: Πιθανότητα κάλυψης

3.2 Κακόβουλες επιθέσεις σε ασύρματα κινητά δίκτυα.

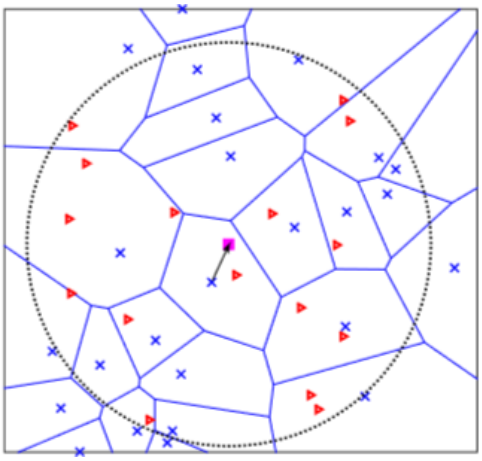
3.2.1 Περιοχή – πρόβλημα

Το ανοιχτό ασύρματο δίκτυο είναι επιρρεπές σε επιθέσεις – παρεμβολές. Εκτός από το είδος της παρεμβολής που οφείλεται σε γειτονικούς κόμβους που εκπέμπουν, μπορεί να έχουμε και κακόβουλες επιθέσεις. Για παράδειγμα μελετώνται οργανωμένες επιθέσεις στο εχθρικό στρατιωτικό δίκτυο, όπου ο στόχος είναι να καταστραφεί το σήμα και να μην επιτραπεί η επικοινωνία. Επιπροσθέτως, η ανάλυση των κακόβουλων παρεμβολών μας βοηθά να μελετήσουμε την συμπεριφορά συσκευών που

αποτυγχάνουν να συνδεθούν σε ένα περιβάλλον Wi–fi . Στο paper των Amuru, Dhillon, Buehrer [61] που θα αναλύσουμε στην συνέχεια, βασικός στόχος είναι λύσουν το πρόβλημα σε φυσικό επίπεδο, όταν ο αριθμός των εισβολέων είναι γνωστός και τυχαία κατανεμημένος σε μια περιοχή. Για να το πετύχουν, χρησιμοποιούν μια BPP διεργασία σημείων, η οποία μοντελοποιεί τους εισβολείς και εξάγουν συμπεράσματα για την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης καθώς και την πιθανότητα λάθους σε έναν δέκτη – θύμα. Η συμπεριφορά του δέκτη επηρεάζεται από την μεταδιδόμενη ισχύ p_t των σταθμών βάσης, από την πυκνότητα των σταθμών βάσης $\lambda(x)$, από την διακύμανση του συντελεστή σκίασης – σκέδασης h_{x_i} και από το φορτίο του δικτύου. Σύμφωνα με τους συγγραφείς για να διατηρηθεί μια σταθερή πιθανότητα διακοπής ο αριθμός των επιθέσεων αυξάνεται όταν αυξάνουμε την ισχύ μετάδοσης του θύματος, ενώ μειώνεται όταν το φορτίο του δικτύου αυξάνεται ή όταν η σκέδαση του δικτύου αυξάνεται.[61]

3.2.2 Μοντελοποίηση

Στην εργασία προτείνεται η χρησιμοποίηση μια BPP Φ_j διεργασίας σημείων για την μοντελοποίηση των επιτιθέμενων κόμβων - jammers, ενώ οι σταθμοί βάσης – θύματα μοντελοποιούν μια PPP Φ διεργασία σημείων με πυκνότητα λ_T. Οι jammers τοποθετούνται σε έναν κύκλο ακτίνας R_j . Έστω $N_{jc} = \frac{N_j}{\pi R_j^2 \lambda_T}$ δείχνει τον αριθμό των jammers για κάθε σταθμό βάσης [61]. Στο παρακάτω Σχήμα 21, οι σταθμοί βάσης που είναι κατανεμημένοι σύμφωνα με PPP διεργασία παριστάνονται με σταυρούς, το ροζ τετραγωνάκι δείχνει τον δέκτη – θύμα, το μαύρο βέλος την σύνδεση ανάμεσα στον δέκτη και στον κοντινότερο σταθμό βάσης και τα κόκκινα τρίγωνα τις συσκευές των jammers που είναι κατανεμημένες σύμφωνα με μια BPP διεργασία σημείων.



Σχήμα 21: Μοντελοποίηση δικτύου με σταθμούς βάσης και παρεμβολείς

Οι συγγραφείς υποθέτουν ότι ο συντελεστής σκίασης είναι σταθερός, οπότε ο χρήστης επιλέγει τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί βασιζόμενος στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Ο jammer προκειμένου να επιτεθεί στο ασύρματο δίκτυο προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την πιθανότητα διακοπής $p_c = P[SINR < \tau]$ στον δέκτη – θύμα. Η πιθανότητα διακοπής εξαρτάται από το όριο τ , το πλήθος N_j και την ισχύ μετάδοσης p_j των jammers, την ισχύ μετάδοσης p_t των σταθμών βάσης, την πυκνότητα

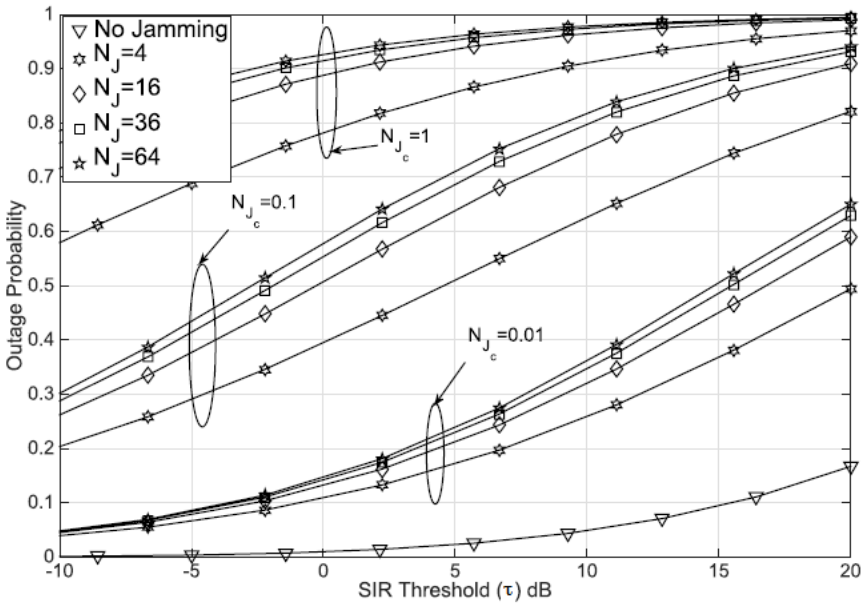
λ_T, την διασπορά της σκίασης σ^2. Υποθέτουν ότι ο δέκτης – θύμα γνωρίζει πλήρως τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί και η πιθανότητα λάθους εξαρτάται από: την διεργασία BPP των jammers, τις επιδράσεις της σκέδασης, της σκίασης και της απώλειας στο κανάλι μετάδοσης. [61]

Στην εργασία αποδεικνύεται ότι η μέση παρεμβολή I_{agg} είναι κυκλικά συμμετρική τυχαία μεταβλητή, καθώς τα σύμβολα s_i και j_i που μεταδίδονται είναι ανεξάρτητα, ισοπίθανα και συμμετρικά. Η πιθανότητα λάθους συμβόλου (PEP) να έχει αλλοιωθεί το σύμβολο που στάλθηκε εκφράζεται σαν συνάρτηση της παρεμβολής. [61]

Έπειτα, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Gil – Pelaez [62] υπολογίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την μέση παρεμβολή, την οποία οι συγγραφείς χρησιμοποιούν για να εξάγουν την μέση πιθανότητα δυαδικού σφάλματος (APEP). Χρησιμοποιώντας την τεχνική εκτίμησης κοντινότερου γειτονικού κόμβου επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της μέσης πιθανότητας λάθος συμβόλου (ASEP) [61]. Η συνάρτηση κοντινότερου γειτονικού κόμβου δεν δίνει ακριβή έκφραση της πιθανότητας λάθος συμβόλου σε σενάριο περιορισμένης παρεμβολής μη δυαδικής διαμόρφωσης σήματος.

3.2.3 Βασικά αποτελέσματα

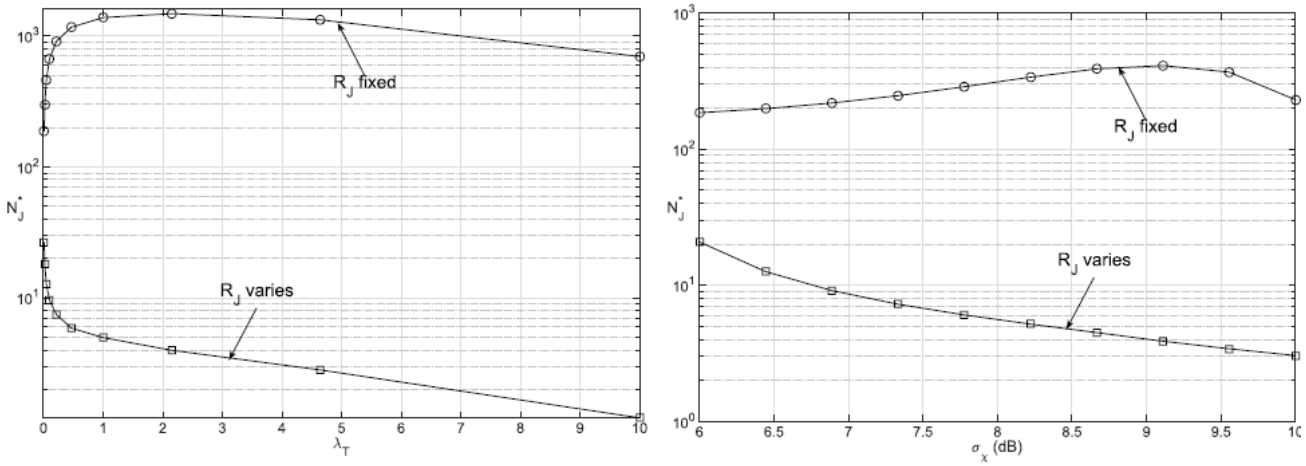
Για να μελετηθεί η πιθανότητα διακοπής καθοριστικό ρόλο έχει ο λόγος $\frac{p_T}{p_J}$ και όχι οι πραγματικές τιμές. Η πιθανότητα διακοπής στον δέκτη – θύμα αυξάνεται όταν ο αριθμός των jammers N_j αυξάνεται και όταν ο αριθμός των jammers ανά κυψέλη N_{Jc} αυξάνεται αφού μεγαλώνει η παρεμβολή από τις επιθέσεις των «κακόβουλων» κόμβων. Επομένως, το πλήθος των jammers που απαιτείται για μια συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής αυξάνεται ανάλογα με την ισχύ που λαμβάνει ο δέκτης – θύμα.[61]



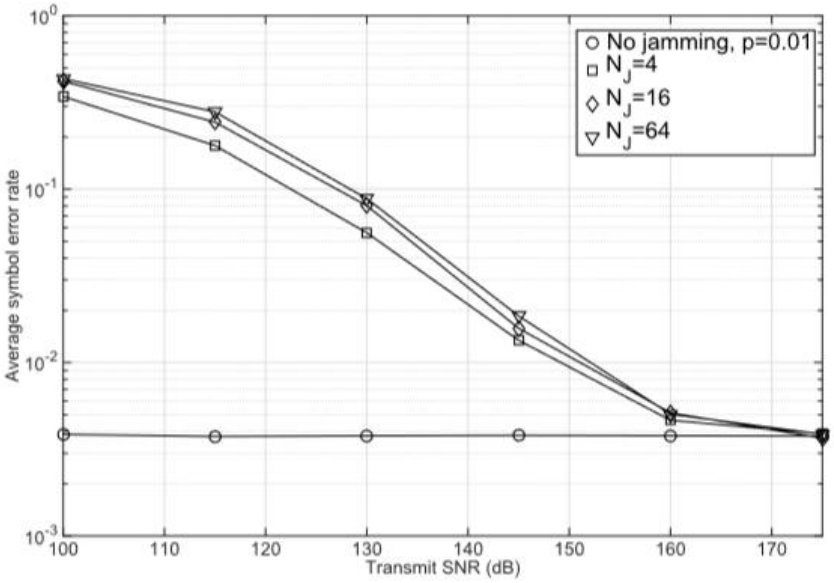
Εικόνα 28: Επίδραση του αριθμού των jammers στην πιθανότητα διακοπής

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 28 η επιλογή με την μικρότερη πιθανότητα διακοπής είναι όταν στο δίκτυο δεν υπάρχουν jammers. Το πλήθος των ενεργών κόμβων στο

δίκτυο δεν επηρεάζει καθοριστικά την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης. Ο μικρότερος αριθμός των jammers N_j^* που υπάρχουν σε ένα δίκτυο μεταβάλλεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Έτσι, παρατηρώντας την Εικόνα 29, όταν η ακτίνα R_j μεταβάλλεται το πλήθος N_j^* προσαρμόζεται στην παράμετρο των ενεργών κόμβων, υπάρχει μεγάλη πτώση της πυκνότητας όταν $0 < \lambda_T < 1$ και σταθερή πτώση μετά. Επιπλέον, οι jammers είναι κατανεμημένοι σε μικρότερη περιοχή γύρω από το θύμα, οπότε η παρεμβολή αυξάνεται και το δίκτυο χρειάζεται μικρότερο N_j^* για να πετύχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής μειώνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής σκέδασης. Όταν η ακτίνα R_j παραμένει σταθερή το πλήθος N_j^* είναι ανεξάρτητο των ενεργών συσκευών και υπάρχει αύξηση όταν $0 < \lambda_T < 1$ και έχει σταθερή πτώση μετά. Επίσης, οι jammers είναι κατανεμημένοι ομοιόμορφα σε μια περιοχή γύρω από το θύμα και καθώς η πυκνότητα των σταθμών βάσης μικραίνει, μειώνεται το επίπεδο της παρεμβολής και το N_j^* πρέπει να μεγαλώσει για να υπάρχει η καθορισμένη πιθανότητα διακοπής και αυξάνεται ανάλογα με τον συντελεστή σκέδασης.[61]



Εικόνα 29: Επίδραση της σκίασης και της πυκνότητας του δικτύου στον αριθμό N_j^*



Εικόνα 30: Η επίδραση του φορτίου, του αριθμού των jammers και της σκίασης στον ASEP

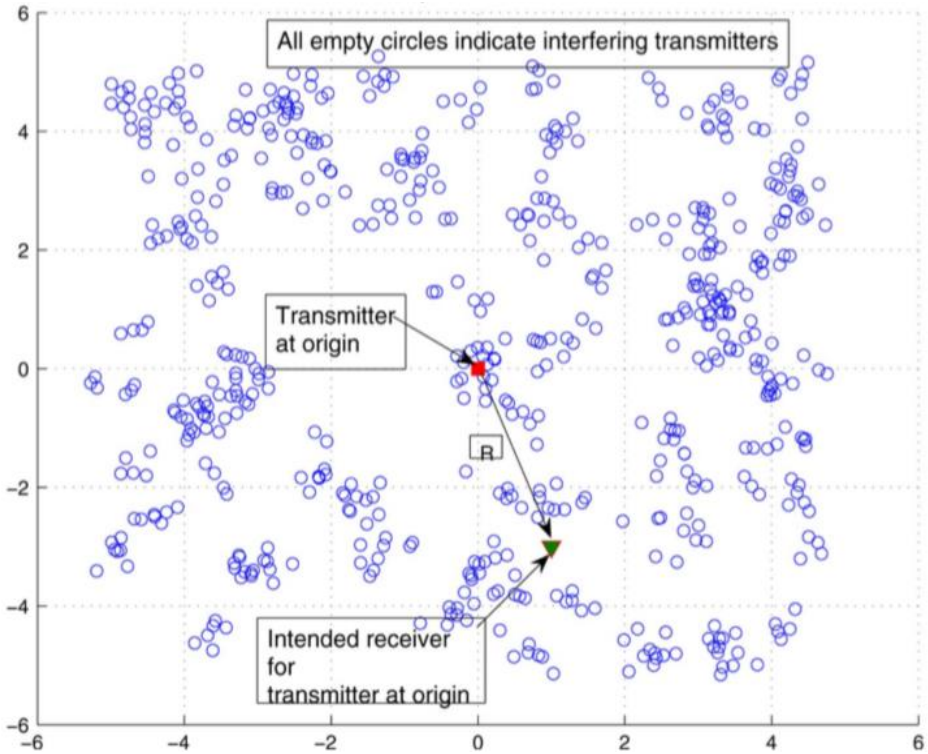
Ωστόσο, η συμπεριφορά του δικτύου ανάλογα με την πυκνότητα λ_T δεν εξάγει βασικά αποτελέσματα. Η πιθανότητα λάθος συμβόλου ανά ζεύγος APEP και ο παράγοντας ASEP (μέση πιθανότητα λάθος συμβόλου) εξαρτάται από το φορτίο του δικτύου, από τον συνολικό αριθμό των jammers N_j, όσο και από τον αριθμό των jammers για κάθε κυψέλη N_{jc} που οδηγούν σε διαφορετικά επίπεδα παρεμβολής [61] , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 30. Όσο μεγαλύτερη είναι η σκέδαση στο δίκτυο, τόσο μεγαλώνει και ο παράγοντας ASEP.

3.3 Παρεμβολή και πιθανότητα διακοπής σε ασύρματα Clustered Ad Hoc δίκτυα

3.3.1 Περιοχή – πρόβλημα

Η κατανομή των κόμβων δεν είναι «πάντοτε» τελείως τυχαία, κάποιοι κόμβοι οργανώνονται σε ομάδες (clusters) ενώ κάποιοι είναι γενικά κατανεμημένοι. Επίσης, οι ενεργοί κόμβοι είναι πιθανό να μην ανήκουν σε ομογενή διεργασία Poisson. Έχουν προταθεί διάφορα πρωτόκολλα που αναφέρονται σε ομαδοποιημένες διεργασίες. Οι Ganti και Haenggi στην εργασία τους, προσπαθώντας να διευρύνουν τα καλά αποτελέσματα για την περίπτωση της PPP διεργασίας σε άλλες κατανομές κόμβων, προσπαθούν να εξάγουν αποτελέσματα για την παρεμβολή στην περίπτωση που οι συσκευές είναι οργανωμένες σε συστάδες – clusters. Οι συστάδες μπορεί να είναι οργανωμένες γεωγραφικά, ανάλογα με την κατανομή των κόμβων στον χώρο, ή οργανωμένες λογικά, από συσκευές που χρησιμοποιούν ίδια πρωτόκολλα επικοινωνίας.

3.3.2 Προτεινόμενη μοντελοποίηση



Σχήμα 22: Συσκευές οργανωμένες σε clusters. Σε κάθε cluster η πυκνότητα των πομπών είναι 3.

Οι πομποί υλοποιούν μια στάσιμη Poisson cluster διεργασία Φ, η οποία έχει προκύψει από μια αρχική PPP όπως έχουμε περιγράψει στην παράγραφο 2.2.3. Γίνεται η υπόθεση ότι οι δέκτες δεν ανήκουν στην ίδια συστάδα με τους πομπούς. Ο δέκτης βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον R από τον πομπό. Οι συγγραφείς εκτιμούν τον μετασχηματισμό Laplace της παρεμβολής. Ορίζουν σαν μετρική το κέρδος της συστάδας (channel gain) G(R) σαν τον λόγο των πιθανοτήτων επιτυχίας της cluster διεργασίας και της αντίστοιχης PPP διεργασίας με την ίδια πυκνότητα.

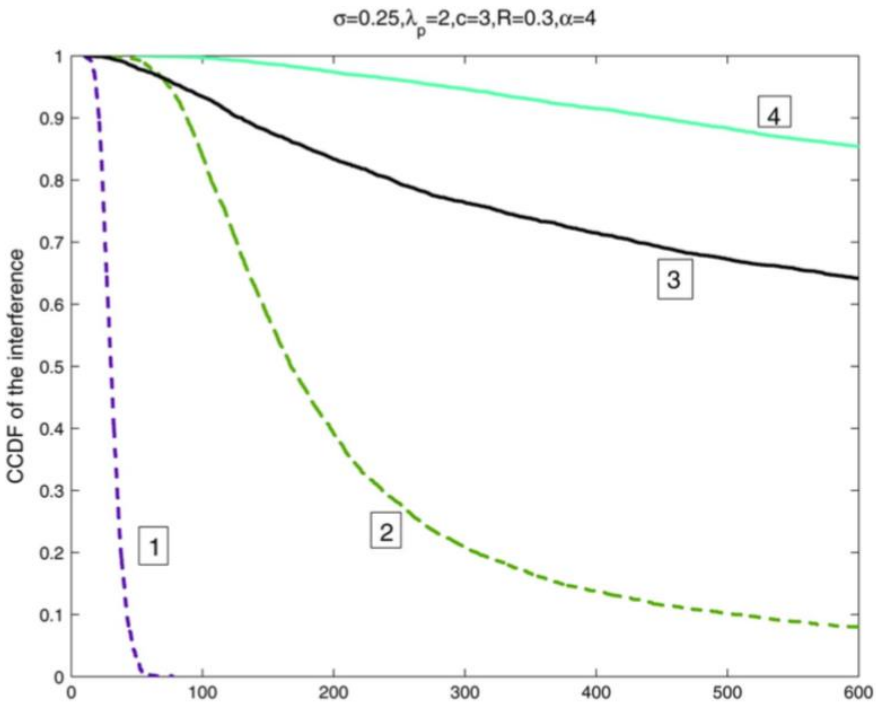
Η συνάρτηση απώλειας path loss $g(x): R^2 - \{o\} \to R^+$ ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες: (α) είναι συνεχής, θετική, μη αυξανόμενη συνάρτηση του x και έχει

Πεπερασμένο ολοκλήρωμα $\int_{R^2 - B(o,\varepsilon)} g(x)\,dx < \quad \forall \varepsilon > 0$

(β) $\lim_{x\to\infty} \frac{g(x)}{g(x-y)} = 1 \;\; \forall\, y \in \mathbb{R}^2.$ [63]

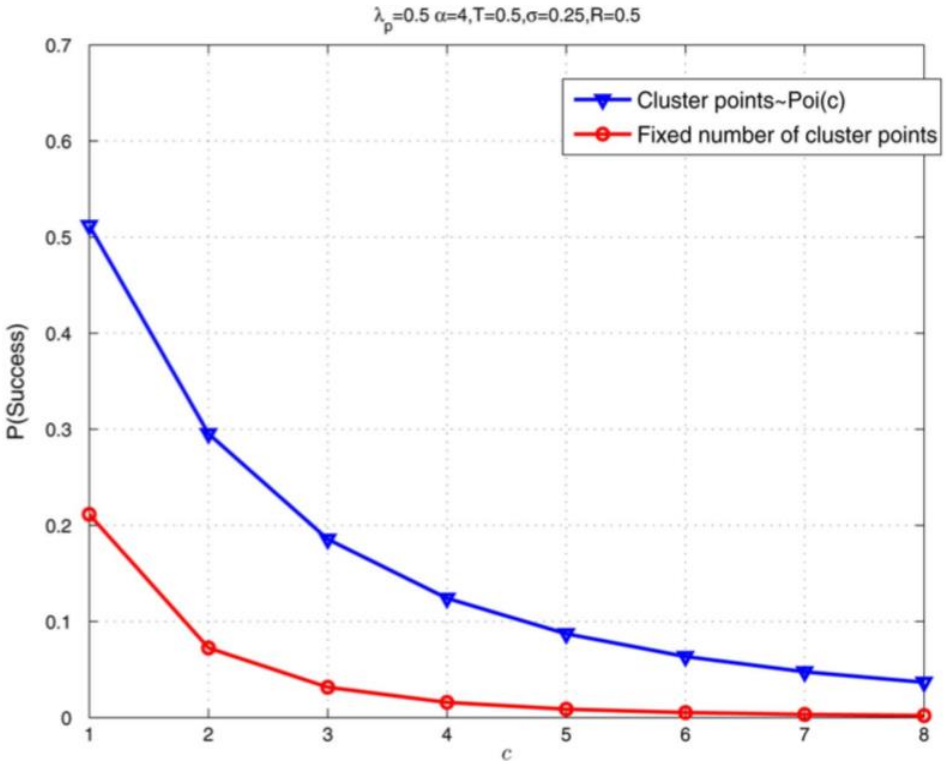
3.3.3 Βασικά αποτελέσματα

Μέσω της στοχαστικής γεωμετρίας και της κατανομής Palm υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Laplace για την παρεμβολή. Οι συγγραφείς μέσα από την ανάλυση τους υπολογίζουν όρια για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της παρεμβολής και τα αποτελέσματά τους εφαρμόζονται για κάθε στάσιμη κατανομή κόμβων. Το κάτω όριο της παρεμβολής εξαρτάται από την πυκνότητα λ της διεργασίας των σημείων. Το ανώτερο όριο της παρεμβολής εξαρτάται από τον συντελεστή απώλειας α. Για μεγάλες τιμές της απόστασης πομπού – δέκτη αποδεικνύεται ότι η παρεμβολή της συστάδας θεωρείται αμελητέα όσο απομακρυνόμαστε από τον πομπό. Όταν η συνάρτηση path loss είναι $\ell(x) = \left(1 + \|x\|^{\alpha}\right)^{-1}$ η κατανομή της παρεμβολής εξαρτάται από την σκίαση.[63]



Εικόνα 31: Σύγκριση της παρεμβολής για διαφορετικά μοντέλα path loss και συντελεστές σκίασης

Η καμπύλες (1) και (2) ανταποκρίνονται σε path loss συνάρτηση $\ell(x)=\left(1+\|x\|^{\alpha}\right)^{-1}$ και ενώ η καμπύλη (1) αναφέρεται σε σκέδαση Rayleigh, η καμπύλη (2) αναφέρεται σε γενική Pareto κατανομή. Αντίστοιχα, οι καμπύλες (3) και (4) αναφέρονται σε μοντέλο path loss $\ell(x)=\|x\|^{-\alpha}$, όπου πάλι η καμπύλη (3) έχει υπόθεση σκέδασης Rayleigh, ενώ η καμπύλη (4) κατανομής Pareto.



Εικόνα 32: Σύγκριση της πιθανότητας επιτυχίας με τον αριθμό των κόμβων σε κάθε cluster.

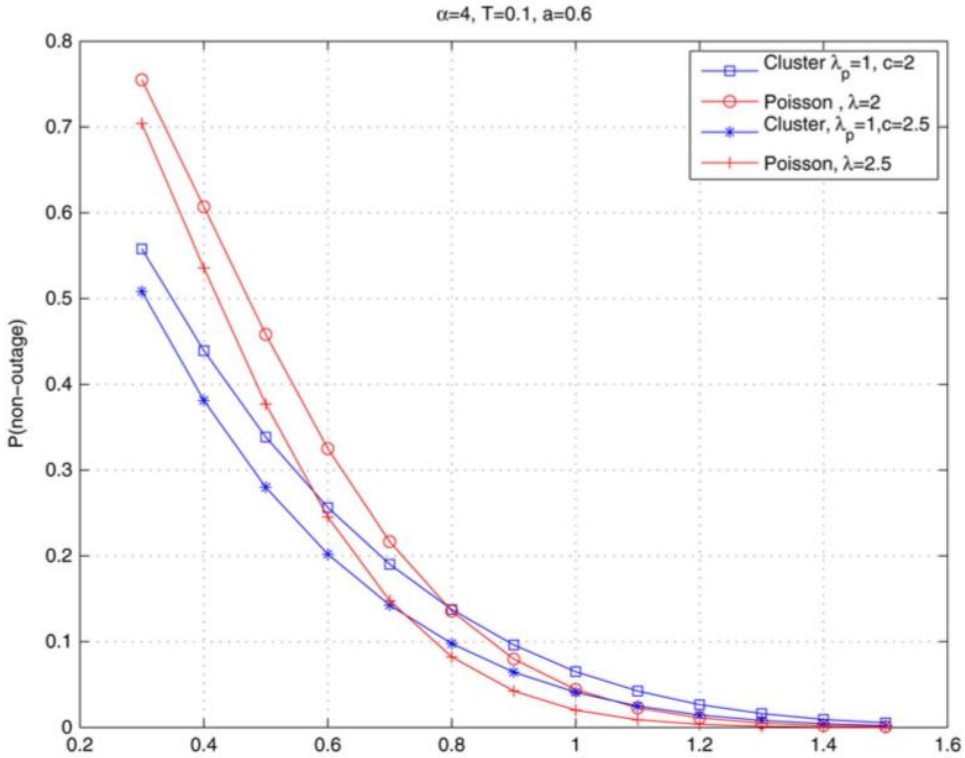
Οι συγγραφείς παρέχουν κλειστό τύπο για την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης στην περίπτωση που δεν υπάρχει θόρυβος στο κανάλι.

Λήμμα: Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης από τον πομπό στον δέκτη που βρίσκεται στην θέση $z \in \mathbb{R}^2$, δίνεται από τον τύπο:

$$P[\text{success}]=\underbrace{\exp\left(-\lambda\int_{R^2}\left[1-\exp\left(-\bar{c}\beta(z,y)\right)\right]dy\right)}_{T_1}\times\underbrace{\int_{R^2}\exp\left(-\bar{c}\beta(z,y)\right)f(y)dy}_{T_2}$$

όπου $\beta(z,y)=\int_{R^2}\frac{g(x-y-z)}{\frac{g(z)}{T}+g(x-y-z)}f(x)dx$, ο όρος T_1 περιέχει την παρεμβολή έξω από την συστάδα του πομπού και ο όρος T_2 περιέχει την παρεμβολή της συστάδας του πομπού.

Προκύπτει ότι η πιθανότητα επιτυχίας εξαρτάται μόνο από την απόσταση R. Όταν η απόσταση είναι μεγάλη, η πιθανότητα επιτυχίας είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη PPP με την ίδια πυκνότητα λ, ενώ όταν η απόσταση είναι μικρή προτιμάται η διεργασία PPP. Επίσης, οι συγγραφείς παρέχουν όρια για την πιθανότητα επιτυχίας.



Εικόνα 33: Σύγκριση της πιθανότητας επιτυχίας για την PCP και την PPP διεργασία

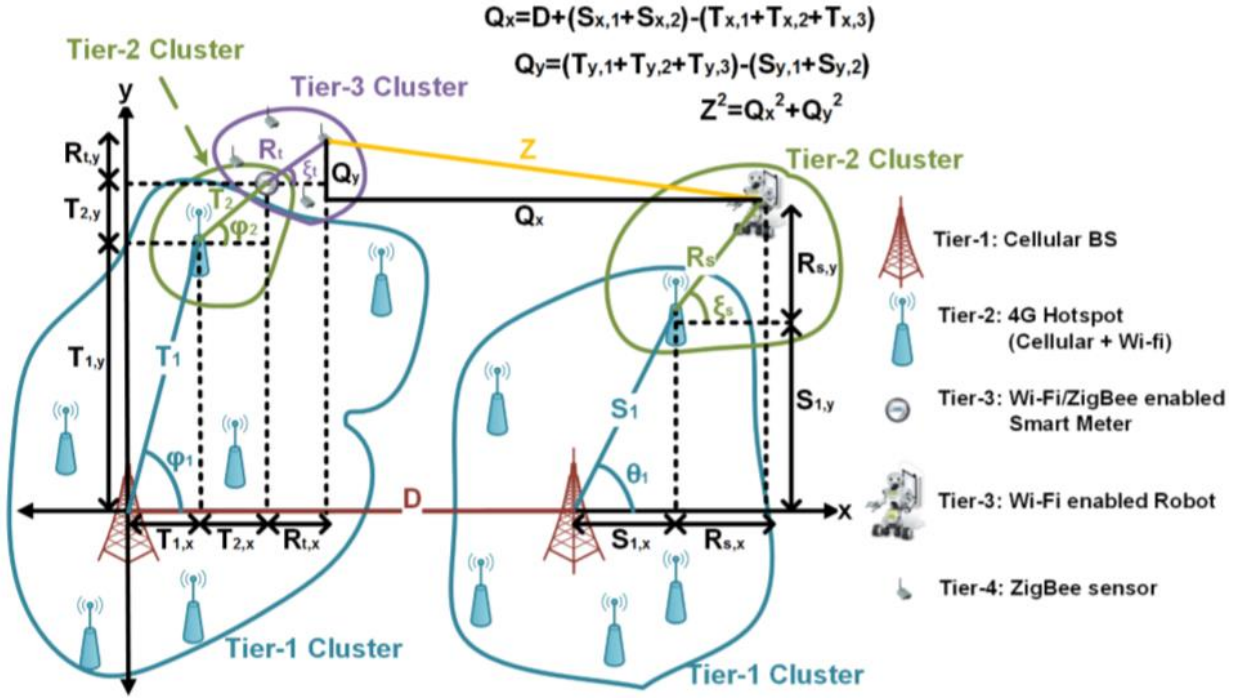
Μέσω του channel gain αποδεικνύεται ότι υπάρχει μια οριακή τιμή για την απόσταση R^*, ώστε πάνω από αυτήν την τιμή λειτουργεί καλύτερα η PCP διεργασία ($G(R) > 1$), και κάτω από αυτήν την τιμή λειτουργεί καλύτερα η PPP διεργασία σημείων. Αυτή η παρατήρηση είναι άμεσα αντιληπτή στην Εικόνα 33, καθώς για $R^* = 0.75$ και $R^* = 0.8$ αλλάζει η προτίμηση της PPP και PCP διεργασίας. Η παρεμβολή της συστάδας του πομπού επηρεάζει το gain. Έτσι, προκύπτει ότι η ομαδοποίηση των πομπών είναι χρήσιμη για μεγάλες αποστάσεις, ενώ στην περίπτωση που η απόσταση είναι μικρή, το channel gain εξαρτάται από τον συντελεστή απώλειας path loss.

3.4 Κατανομή της απόστασης και της εκτίμησης της εγγύτητας της θέσης σε ετερογενές ασύρματο δίκτυο.

3.4.1 Περιοχή – πρόβλημα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι θέσεις των συσκευών στον χώρο δεν είναι ούτε τυχαίες, ούτε σαφώς προκαθορισμένες. Συνήθως παρατηρείται το φαινόμενο της συγκέντρωσης συσκευών γύρω από συγκεκριμένα σημεία, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο συστάδες – clusters. Για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε ένα ετερογενές δίκτυο και να εξάγουμε συμπεράσματα για τις διάφορες μετρικές του, καθοριστικό ρόλο έχει η κατανομή της απόστασης ανάμεσα σε δυο τυχαίες θέσεις στον χώρο. Σύμφωνα με την εργασία των Ξενάκη, Μεράκου, Κουντούρη, Πασσά και Βερικούκη [64] κάθε συσκευή αρχικά εκτιμά την θέση της στον χώρο και στην συνέχεια υπολογίζει την απόστασης της από γειτονικές συσκευές ίδιας τεχνολογίας καθώς και την γωνία με την οποία τις «βλέπει». Μιας και η PPP διεργασία σημείων παρέχει κλειστό τύπο για την κατανομή της απόστασης, προτιμάται έναντι των υπολοίπων διεργασιών.

3.4.2 Μοντελοποίηση



Σχήμα 23: Επικοινωνία συσκευής Tier-2 με συσκευή Tier-3

Το παραπάνω σχήμα χρησιμοποιεί τον ακόλουθο συμβολισμό:

Z : η απόσταση ανάμεσα σε πομπό και δέκτη.

$\mathrm{R_s}$: η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και στο κέντρο της συστάδας του k επιπέδου.

$\mathrm{R_t}$: η απόσταση ανάμεσα στον δέκτη και στο κέντρο της συστάδας του k επιπέδου.

$\mathrm{S_k}$: η απόσταση ανάμεσα στα επίπεδα k και $\mathrm{k}-1$ για τον πομπό.

$\mathrm{T_k}$: η απόσταση ανάμεσα στα επίπεδα k και $\mathrm{k}-1$ για τον δέκτη.

ξ_k : η γωνία ανάμεσα στην συσκευή και στο κέντρο της συστάδας.

θ_k : η γωνία ανάμεσα στα επίπεδα k και $\mathrm{k}-1$ για τον πομπό.

φ_k : η γωνία ανάμεσα στα επίπεδα k και $\mathrm{k}-1$ για τον δέκτη.

Υποθέτουμε ότι το ετερογενές δίκτυο έχει k επίπεδα, όπου κάθε επίπεδο αποτελείται από συσκευές με παρόμοιες λειτουργίες επικοινωνίας. Θεωρούμε ότι το πρώτο επίπεδο (των μακροκυψελών) μοντελοποιείται μέσω μιας PPP διεργασίας σημείων Φ_1 με πυκνότητα λ [61]. Γίνεται η παραδοχή πως σε κάθε επίπεδο k οι συσκευές είναι ομαδοποιημένες γύρω από κόμβους του προηγούμενου επιπέδου $(\mathrm{k}-1)$. Όλα τα επίπεδα μοντελοποιούνται μέσω της διεργασίας Thomas PCP, όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 2.2.3. Ο αριθμός των κόμβων σε κάθε επίπεδο ακολουθεί κατανομή Poisson με μέση τιμή c_k και οι θέσεις των συσκευών ακολουθούν ανεξάρτητες, ισόνομες, κανονικές κατανομές με διασπορά σ_k^2. Οι συγγραφείς επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους σε δύο συσκευές, τον πομπό (source), ο οποίος βρίσκεται στο επίπεδο $\mathrm{k_s}$, και τον δέκτη (target), ο οποίος ανήκει στο επίπεδο $\mathrm{k_t}$. Εκφράζουν με $\mathrm{x_k}$ και $\mathrm{y_k}$ τις αποστάσεις των συντεταγμένων (x,y) της συσκευής του επιπέδου k με το κέντρο της

συστάδας. Υποθέτουν ότι υπάρχει ένας κεντρικός server ο οποίος γνωρίζει τις συσχετίσεις των συστάδων και αναγνωρίζει τους κεντρικούς κόμβους κάθε επιπέδου μέσω της σηματοδοσίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών κάθε ομάδας. [64]

3.4.3 Βασικά αποτελέσματα

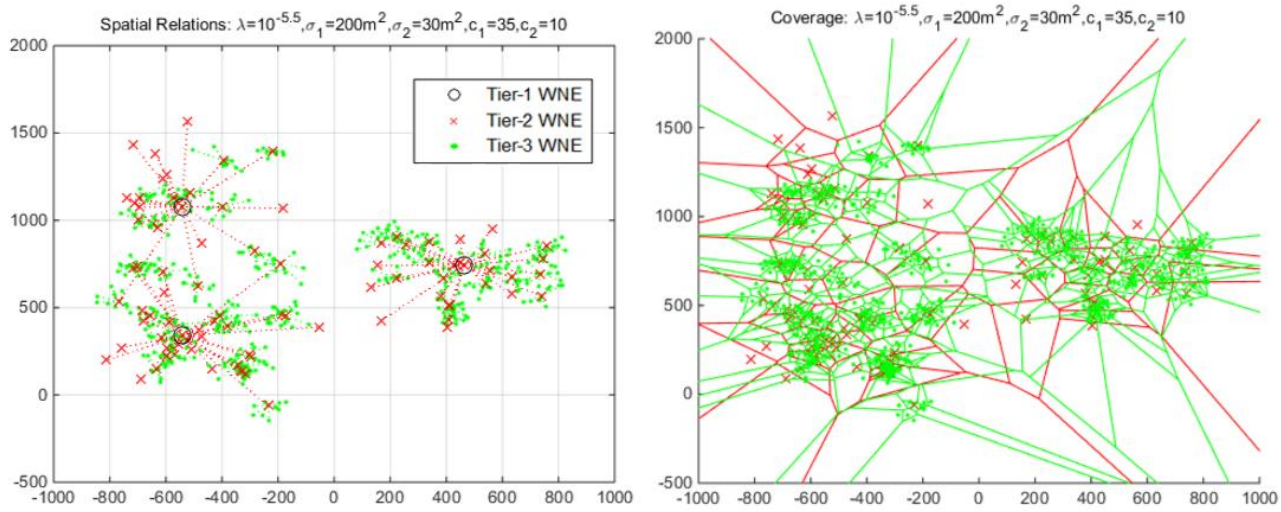
Στην εργασία που μελετάται, παρέχονται αναλυτικοί τύποι για τον υπολογισμό της κατανομής της απόστασης, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρικές του δικτύου. Έτσι, όταν είναι γνωστή η απόσταση ανάμεσα στις συσκευές και στο κέντρο της συστάδας του ίδιου επιπέδου και οι πολικές συντεταγμένες πομπού και δέκτη υπάρχει ακριβής τύπος για τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης πομπού και δέκτη. Η απόδειξη στηρίζεται στην γνώση των πολικών συντεταγμένων και χρησιμοποιείται η modified Bessel συνάρτηση [65] .

Όταν είναι γνωστές η απόσταση ανάμεσα στους σταθμούς βάσης του πρώτου επιπέδου, όλες οι πολικές συντεταγμένες που σχετίζονται με τον πομπό, καθώς και αυτές που σχετίζονται με τον δέκτη, μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη με γεωμετρικό τρόπο:

$$Z_x = \sum_{j=1}^{k_s} S_j \cos\varphi_j + R_s \cos\xi_s - R_t \cos\xi_t - \sum_{i=1}^{k_t} T_i \cos\theta_i$$

$$Z_y = \sum_{i=1}^{k_t} T_i \sin\theta_i + R_t \sin\xi_t - R_s \sin\xi_s - \sum_{j=1}^{k_s} S_j \cos\varphi_j \qquad Z = \sqrt{(D + Z_x)^2 + Z_y^{\,2}}$$

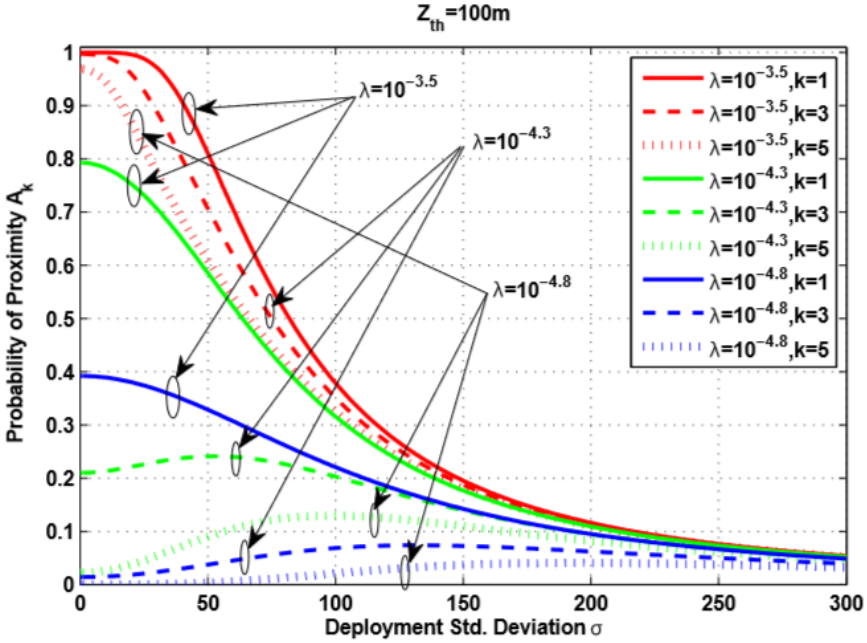
Θεώρημα 4.1: Η δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης Z ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη όταν είναι γνωστές οι πολικές συντεταγμένες των ασύρματων συσκευών δικτύου – WNE του προηγούμενου επιπέδου και η απόσταση των WNE του επιπέδου 1.



Εικόνα 34: Σχετικές θέσεις και κάλυψη κοντινότερου γειτονικού κόμβου

Επιπλέον, οι συγγραφείς προσπαθώντας να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του δικτύου, αναζητούν το βέλτιστο αριθμό κόμβων ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του δικτύου και να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα χαμηλό λειτουργικό κόστος. Υπολογίζουν ένα όριο πιθανότητας κάτω από το οποίο έχει μεγαλύτερη σημασία η χρήση

ακριβέστερων μετρήσεων εντοπισμού θέσης. Ενώ, πάνω από αυτό το όριο η ανάπτυξη πρόσθετων χαμηλών επιπέδων θα πρέπει να χειρίζεται προσεκτικά.[64]



Εικόνα 35: Η πιθανότητα προσέγγισης σε συνάρτηση με την διασπορά σ.

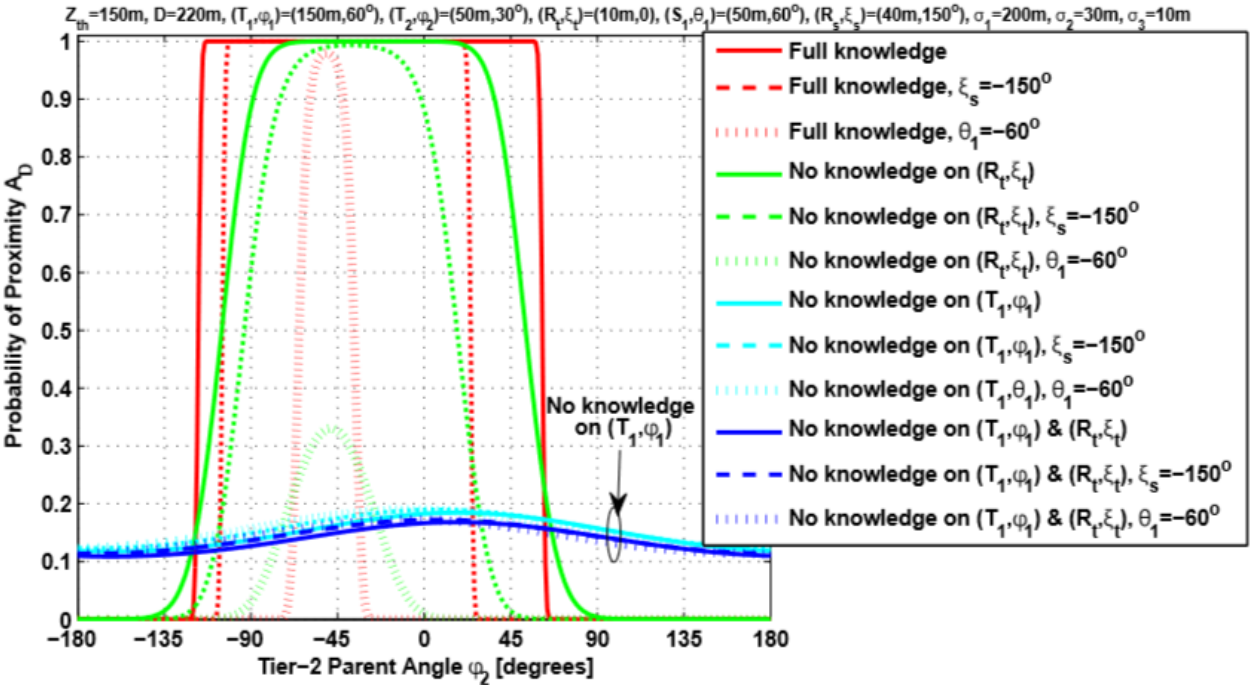
Πρόκληση αποτελεί και η προσαρμογή της πυκνότητας ανάμεσα στα επίπεδα προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα ο δέκτης να είναι κοντά στον πομπό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35. Αποδεικνύεται ότι καθώς η διασπορά των επιπέδων μειώνεται, η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη τείνει να γίνει πιθανοθεωρητικά η απόσταση ανάμεσα στους σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν τις συσκευές. [64]

3.4.4 Συμπεράσματα

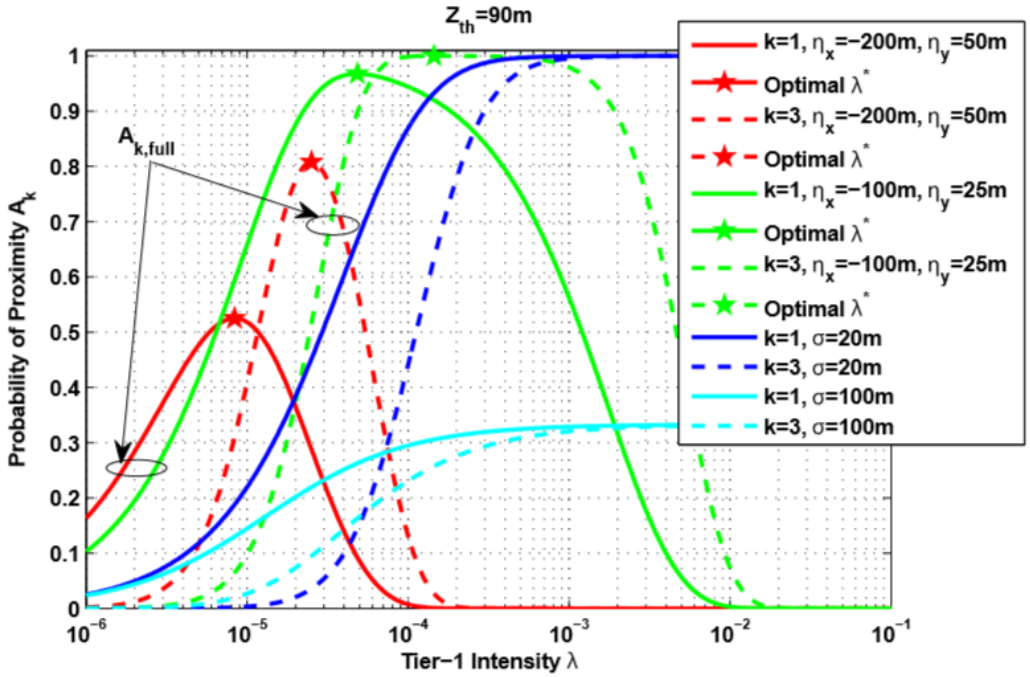
Οι συγγραφείς μέσα από την εργασία τους κατέληξαν σε ορισμένα αποτελέσματα για την πιθανότητα προσέγγισης της θέσης του πομπού ή του δέκτη ανάλογα με την πληροφορία για την συμπεριφορά του δικτύου. Όσο πιο μικρή είναι η διασπορά σ τόσο καλύτερη είναι η πιθανότητα προσέγγισης του σημείου για κάθε δικτυακό περιβάλλον που φαίνεται στην Εικόνα 35. Όσο περισσότερη πληροφορία για τις θέσεις των WNE έχουμε, τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση των θέσεων του πομπού και του δέκτη. Η συμπεριφορά της εκτίμησης παραμένει περίπου η ίδια όταν η διεργασία εκτίμησης περιλαμβάνει έναν παράγοντα λάθους μέχρι κάποια μέτρα (m).[64]

Επίσης, όταν είναι γνωστή η γωνία του πομπού του προηγούμενου επιπέδου μπορούμε να εξάγουμε καλύτερα και ακριβέστερα αποτελέσματα για την πιθανότητα προσέγγισης. Υπάρχει μια περιοχή που η πιθανότητα προσέγγισης PoP παραμένει αμετάβλητη – ανεπηρέαστη. Η ακριβής εκτίμηση της γωνίας ανάμεσα στις συσκευές WNE του πρώτου επιπέδου και στις συσκευές WNE του προηγούμενου επιπέδου των πομπών –

δέκτη είναι απαραίτητη όταν απαιτείται ακριβής εκτίμηση. Γνωρίζοντας την πληροφορία για τον χώρο υπάρχει ένα όριο «ανοχής» στην ακρίβεια των εκτιμήσεων χωρίς να επηρεάζεται η συμπεριφορά του δικτύου.[64]



Εικόνα 36: Η πιθανότητα προσέγγισης σε σχέση με την γωνία.



Εικόνα 37: Η πιθανότητα προσέγγισης σε συνάρτηση με την πυκνότητα του δικτύου

Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 37, όταν ο σέρβερ που έχει την πληροφορία για τις θέσεις των κόμβων έχει πλήρη γνώση για τις πολικές συντεταγμένες των συσκευών WNE και των γονέων τους, υπάρχει βέλτιστη πυκνότητα λ* για το δίκτυο, η οποία μεγιστοποιεί την πιθανότητα προσέγγισης του σημείου. [64]

3.5 Μοντελοποίηση και Ανάλυση Ασύρματων δικτύων μακροκυψελών με Determinental διεργασία σημείων.

3.5.1 Περιοχή – πρόβλημα

Όταν χρειάζεται να μοντελοποιήσουμε τους σταθμούς βάσης των μακροκυψελών, η επιλογή της κατάλληλης στοχαστικής διεργασίας είναι ένα ζήτημα προβληματισμού. Επειδή οι σταθμοί βάσης των μακροκυψελών βρίσκονται «ικανοποιητικά» μακριά ο ένας από τον άλλον, η PPP διεργασία σημείων δεν λαμβάνει υπόψη την συνεργασία και την απόκριση ανάμεσα στους σταθμούς βάσης. Έτσι, είναι αναγκαία η μοντελοποίηση με μια διεργασία που υποστηρίζει τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους σταθμούς βάσης, όπως είναι η Determinental διεργασία σημείων. [66]

3.5.2 Μοντελοποίηση

Οι συγγραφείς της εργασίας μελετούν τρεις στάσιμες DPP διεργασίες, οι οποίες ορίζονται από την συνάρτηση διακύμανσης $K_o(x)$ [66]

<u>Το μοντέλο Gauss DPP:</u> $K_o(x) = \lambda \exp\left(-\frac{\|x\|^2}{\alpha^2}\right)$, όπου λ είναι η φασματική πυκνότητα , α είναι το μέτρο της απόκρισης και πρέπει να ισχύει $\lambda \le \left(\sqrt{\pi}\alpha\right)^{-2}$

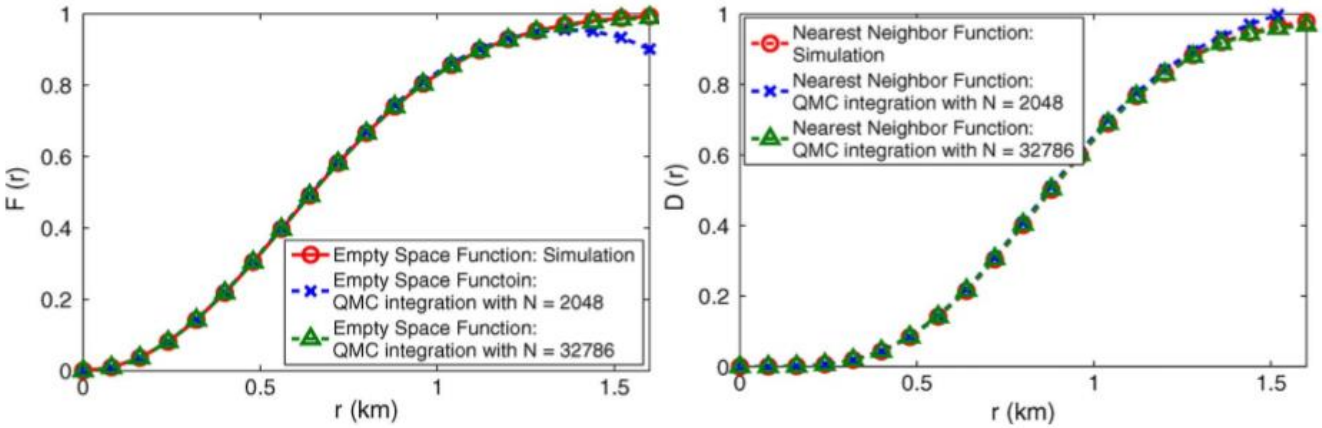
<u>Το μοντέλο Cauchy DPP:</u> $K_o(x) = \frac{\lambda}{\left(1+\|x\|^2/\alpha^2\right)^{v+1}}$, όπου λ είναι η πυκνότητα, α είναι η παράμετρος κλιμάκωσης και v είναι η παράμετρος μορφοποίησης που επηρεάζουν την απόκριση της DPP. Πρέπει να ισχύει: $\lambda \le \frac{v}{\left(\sqrt{\pi}\alpha\right)^2}$

<u>Το μοντέλο γενικής Gamma DPP:</u> $\varphi(x) = \lambda \frac{v\alpha^2}{2\pi\Gamma(2/v)} \exp\left(-\|\alpha x\|^v\right)$, όπου Γ(x) είναι η συνάρτηση Γάμμα και πρέπει να ισχύει $\lambda \le \frac{2\pi\Gamma(2/v)}{v\alpha^2}$.

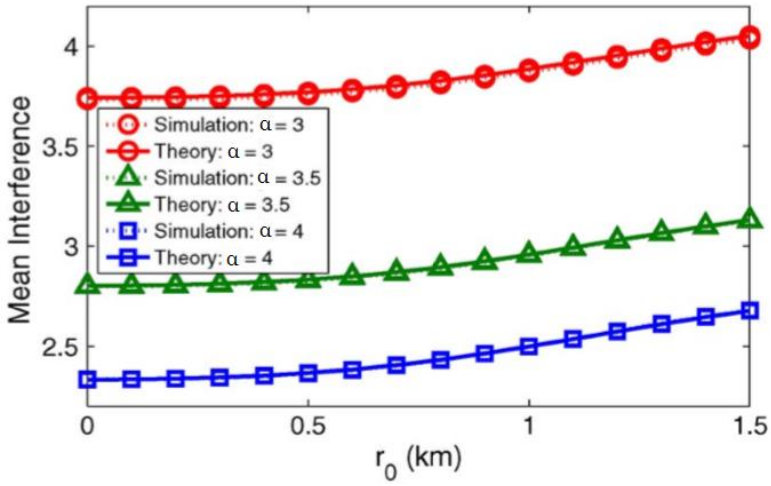
3.5.3 Βασικά αποτελέσματα

Μελετώντας το κινητό ασύρματο δίκτυο στην περιοχή του Houston οι συγγραφείς υπολόγισαν την συνάρτηση κενού χώρου και την απόσταση κοντινότερου κόμβου για την Gauss DPP που ανταποκρίνεται στο δίκτυο και έδειξαν ότι η προσομοίωση με την

μέθοδο Quasi – Monte Carlo με $2^{11} = 2048$ και $2^{15} = 32786$ ανταποκρίνεται στην θεωρητική προσέγγιση όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 38. [66] Τόσο η συνάρτηση κενού χώρου όσο και η απόσταση κοντινότερου κόμβου αυξάνονται όσο αυξάνεται η απόσταση r που απέχουν οι σταθμοί βάσης των μακροκυψελών.

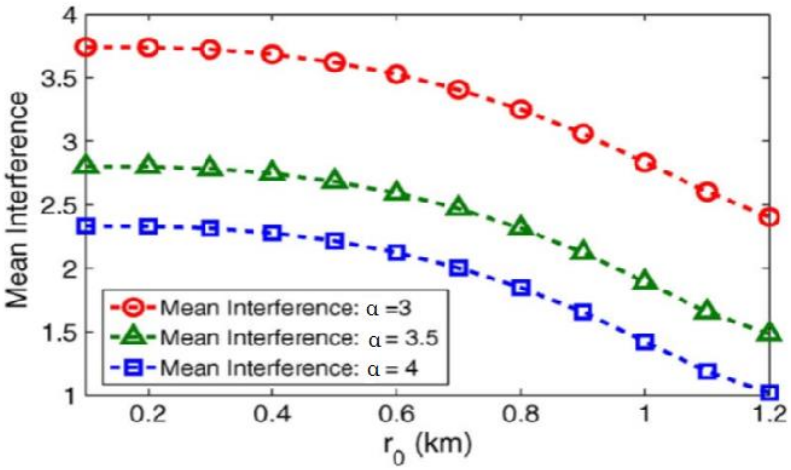


Εικόνα 38: Η συνάρτηση κενού χώρου και κοντινότερου κόμβου σε σχέση με την απόσταση.



Εικόνα 39: Η μέση παρεμβολή στην περίπτωση που συνδέεται σε συγκεκριμένο σταθμό βάσης.

Στην εργασία των Bacceli, Dhillon, Andrews υπολογίζεται για διαφορετικές τιμές του συντελεστή απώλειας α η μέση παρεμβολή για την προσαρμοσμένη Gauss DPP σε δύο σενάρια, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.2.5.4 στην περίπτωση του δικτύου Houston και στην περίπτωση του αστικού περιβάλλοντος του L.A. Παρατηρώντας την Εικόνα 39 βλέπουμε ότι στην περίπτωση που ο χρήστης συνδέεται σε συγκεκριμένο σταθμό βάσης η μέση παρεμβολή αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση. Αντίθετα στην περίπτωση που ο χρήστης συνδέεται με τον κοντινότερο σταθμό βάσης η μέση παρεμβολή για τις διάφορες τιμές του συντελεστή απώλειας μειώνεται καθώς η απόσταση μεγαλώνει, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Η μέση παρεμβολή στην περίπτωση που συνδέεται στον κοντινότερο σταθμό βάσης.

3.5.4 Συμπεράσματα

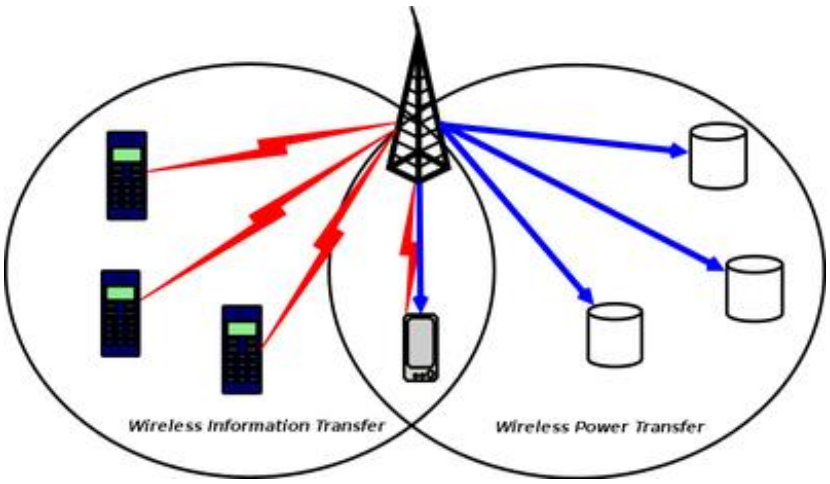
Οι συγγραφείς προκειμένου να ελέγξουν και να αποφασίσουν ποιο μοντέλο είναι κατάλληλο χρησιμοποίησαν την πιθανότητα κάλυψης και την συνάρτηση του Ripley $K(r)$. Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει τον μέσο αριθμό κόμβων που υπάρχουν μέσα σε απόσταση r από κάποιο δοσμένο σημείο. [66]

Απέδειξαν ότι η γενική συνάρτηση Gamma DPP προσφέρει καλύτερη πιθανότητα κάλυψης λόγω της μεγαλύτερης απόκρισης του δικτύου αλλά επειδή βασίζεται στην πυκνότητα φάσματος δεν προτιμάται. Η Gauss DPP προσφέρει καλή εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα μακροκυψελών με ελκυστικές μαθηματικές ιδιότητες λόγω του απλού ορισμού της συνάρτησης διακύμανσης. Τέλος, η Cauchy DPP αν και προσφέρει την μικρότερη απόκριση για το δίκτυο δεν έχει ακριβή στατιστικά αποτελέσματα. Έτσι, προτιμάται συνήθως η Gauss DPP λόγω της απλότητας και της ακρίβειας της.

3.6 Ginibre Point process

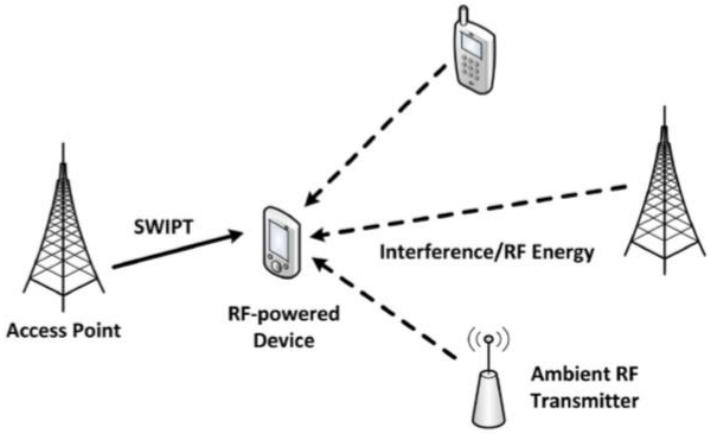
3.6.1 Περιοχή – πρόβλημα

Η ασύρματη τεχνολογία έχει πλέον την δυνατότητα αυτόνομης λειτουργιάς χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Οι συσκευές του δικτύου είναι σε θέση να «συλλέγουν», «απορροφούν» ενέργεια από το φυσικό τους περιβάλλον, είτε ηλιακή, αιολική ενέργεια και παλίρροιες, είτε μέσω ασύρματων πηγών ενέργειας. Οι αυτόνομες ασύρματες επικοινωνίες οι οποίες ενσωματώνουν διάφορες τεχνολογίες, όπως την επεξεργασία σήματος, τον σχεδιασμό κυκλωμάτων, την σάρωση και τη διαχείριση ενέργειας και θεωρείται πως ανοίγουν τον δρόμο για τις έξυπνες συσκευές, το Διαδίκτυο IoT, την επικοινωνία συσκευών (M2M) και την αυτόνομη δικτύωση αισθητήρων.



Εικόνα 41: Υλοποίηση μοντέλου SWIPT

Κάθε συσκευή χρησιμοποιεί την ενέργεια που «απορροφά» στιγμιαία για να υποστηρίξει τις λειτουργίες της μέσω του μοντέλου SWIPT. Η ενεργειακή αποδοτικότητα και η διαρκής συντήρηση αποτελούν δύο κρίσιμα ζητήματα στις αυτοτροφοδοτούμενες επικοινωνίες. Καθώς η ασύρματη ενέργεια μεταφέρεται από τα ίδια σήματα που παρέχουν ασύρματες πληροφορίες, η συλλογή ενέργειας RF γίνεται μια ιδιαίτερα κατάλληλη εναλλακτική τεχνική για την ανανέωση των συσκευών ασύρματης επικοινωνίας. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται τεχνικές ασύρματης πληροφόρησης και μεταφοράς ισχύος καθώς και τεχνικές συγκομιδής ενέργειας RF. Με αυτόν τον τρόπο, η ενεργειακή απόδοση βελτιώνεται σημαντικά με την ανακύκλωση των σημάτων που δεν προσλαμβάνονται από τους επιθυμητούς δέκτες. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση της ενέργειας από σήματα ραδιοσυχνοτήτων καθιστά αδύνατη την συντήρηση και την εφαρμογή χωρίς μπαταρίες για ηλεκτρικούς εξοπλισμούς χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, όπως είναι οι αισθητήρες IoT. [67]



Εικόνα 42: Συσκευή που τροφοδοτείται με RF σηματοδοσία

Για την μοντελοποίηση δικτύων μεγάλης κλίμακας «εξοικονόμησης» RF ενέργειας η στοχαστική γεωμετρία αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο καθώς μοντελοποιεί τυχαίες

θέσεις μέσω διεργασιών σημείων. Αν και οι διεργασίες PPP έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, στην εργασία που μελετάται χρησιμοποιείται η διεργασία Ginibre για την επικοινωνία ενός αυτορυθμιζόμενου δικτύου με γενικό μοντέλο σκίασης. [67]

3.6.2 Μοντελοποίηση

Για να μοντελοποιηθεί η θέση των RF πομπών χρησιμοποιείται η Ginibre διεργασία σημείων Φ, η οποία είναι β–determinental διεργασία σημείων. Ο παράγοντας β προσδιορίζει τους διαφορετικούς βαθμούς απόκρισης που υπάρχει ανάμεσα στους κόμβους. Υποθέτοντας β=0 η διεργασία απλοποιείται σε PPP. [67]

Σύμφωνα με την εργασία των Lu, Flint, Niyato και Wang η διεργασία μελετάται σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο παρατήρησης $O \subset \mathbb{R}^2$ τέτοιο ώστε $0 < |O| \leq +\infty$. Ο πυρήνας της διεργασίας δίνεται από τον τύπο: $K(x,y) = \pi^{-1} e^{-\frac{1}{2}\left(|x|^2+|y|^2\right)} e^{xy}$, όπου $x,y \in O = B(0,R)$. Η συνάρτηση πυκνότητας $\rho^{(1)}(x) = K(x,x) = \pi^{-1}$. Υποθέτουν ότι η Ginibre διεργασία σημείων είναι στάσιμη και ισοτροπική δηλαδή είναι αμετάβλητη στις περιστροφές. Από μια DPP Ginibre διεργασία σημείων διαγράφονται κάποιοι κόμβοι με πιθανότητα $1-\beta$.

Υπάρχουν δυο αρχιτεκτονικές οι οποίες βρίσκονται εγκατεστημένες στον δέκτη και αυτές είναι η εναλλαγή χρόνου και ο διαχωρισμός ισχύος. Οι αρχιτεκτονικές δίνουν την δυνατότητα στον δέκτη αφενός να αποθηκεύει – συσσωρεύει ενέργεια και αφετέρου να αποκωδικοποιεί την μεταδιδόμενη πληροφορία. Οι δύο αρχιτεκτονικές μοιράζονται τις κεραίες και ελέγχουν την κατάσταση του καναλιού. Ο ρυθμός «απορρόφησης» RF ενέργειας υπολογίζεται με $P_H^k = \frac{\tau\theta P_S h_k}{(dy)^\alpha}$, όπου

θ : η ισχύς μετατροπής RF σε ψηφιακό σήμα της συσκευής,

P_S: η ισχύς μετάδοσης του πομπού RF k, $\alpha > 0$: ο συντελεστής απώλειας διαδρομής και $h_k \sim \text{Gamma}(\mu,\sigma)$, με $\mu,\sigma > 0$: αντιπροσωπεύει το κέρδος ισχύος καναλιού από τον RF πομπό k προς την συσκευή. [67]

Με την τεχνική της εναλλαγής χρόνου είτε ο δέκτης πληροφοριών είτε ο συσσωρευτής ενέργειας είναι συνδεδεμένος στην κεραία και «ακούει» το κανάλι μια δεδομένη χρονική στιγμή. Οι χρόνοι μοιράζονται και χρησιμοποιείται τ χρόνος για την συγκομιδή ενέργειας και $1-\tau$ χρόνος για την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας. Ο ρυθμός «απορρόφησης» RF ενέργειας από την συσκευή υπολογίζεται ως:

$$P_H^{TS} = \frac{\bar{F}\tau\theta}{1+F}\left(\sum_{k\in\Phi}\frac{P_S h_k}{(d_k)^{\alpha}} + \frac{P_A h_A}{(d_A)^{\alpha_A}}\right)$$, όπου

P_A : η μεταδιδόμενη ισχύς, d_A : η απόσταση μεταξύ της κεραίας μετάδοσης του σημείου πρόσβασης και της κεραίας λήψης της συσκευής ,

$h_A \sim \mathrm{Exp}(\lambda_A), \lambda_A > 0$ παριστάνει το κέρδος του καναλιού μεταξύ της κεραίας μετάδοσης του σημείου πρόσβασης και της κεραίας λήψης της συσκευής που τροφοδοτείται με RF, F : είναι μια τυχαία ανεξάρτητη μεταβλητή της διεργασίας Φ με $F \sim \mathrm{Exp}(\mu), \mu > 0$ και

$\bar{F}$: είναι επιλεγμένο έτσι ώστε να έχει μέση αναμενόμενη τιμή 1, δηλαδή $\bar{F} \sim \mathrm{Exp}(1)$. [67]

Με την τεχνική του διαχωρισμού ισχύος ο δέκτης πληροφοριών και ο συσσωρευτής ενέργειας μπορούν την ίδια χρονική στιγμή να αξιοποιούν το λαμβανόμενο σήμα. Το σήμα διαχωρίζεται σε δυο ροές – διαφορετικά επίπεδα ισχύος, όπου ένα τμήμα ρ των ραδιοσυχνοτήτων φτάνει στον συσσωρευτή ενέργειας και ένα τμήμα $1-\rho$ φτάνει στον αποκωδικοποιητή. Ο ρυθμός «απορρόφησης» RF ενέργειας από την συσκευή υπολογίζεται ως: $P_H^{PS} = \frac{\bar{F}\rho\theta}{1+F}\left(\sum_{k\in\Phi}\frac{P_S h_k}{(d_k)^{\alpha}} + \frac{P_A h_A}{(d_A)^{\alpha_A}}\right)$. [67]

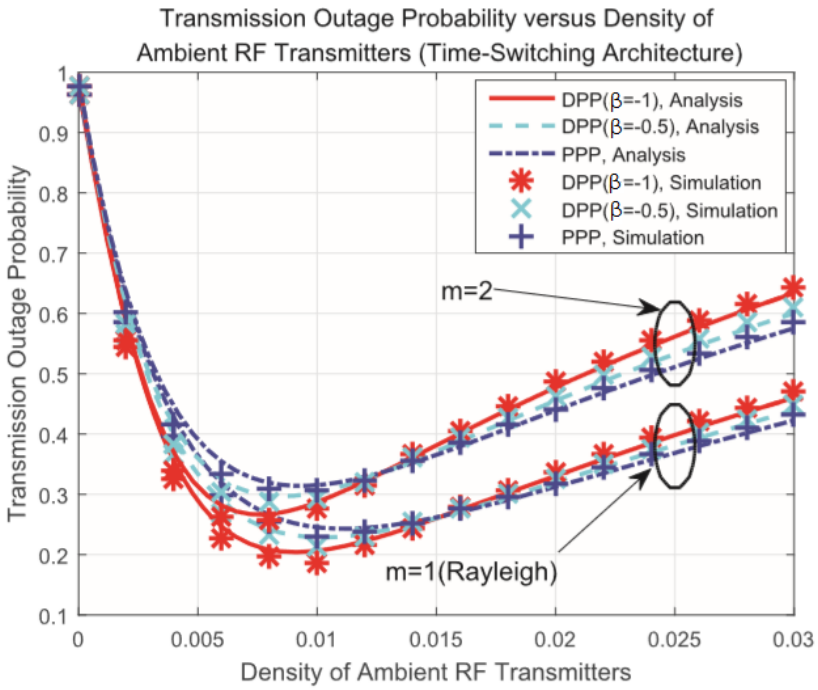
3.6.3 Βασικά αποτελέσματα

Οι συγγραφείς εξάγουν κλειστό τύπο για την μέση τιμή του ρυθμού «συγκομιδής» RF ενέργειας τόσο στην περίπτωση της εναλλαγής χρόνου, όσο και στην περίπτωση του διαχωρισμού ισχύος. Επίσης, υπολογίζουν την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της συσκευής λόγω ανεπαρκούς ενέργειας $P_{eo} = P(P_H < P_C)$, καθώς και την πιθανότητα διακοπής της μετάδοσης. Πρόκειται για μια μετρική της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), η οποία ορίζεται σαν η πιθανότητα του ενδεχομένου η συσκευή που τροφοδοτείται με RF ενέργεια να μην είναι σε θέση να μεταδώσει είτε λόγω ανεπάρκειας ισχύος είτε λόγω παρεμβολών. Δηλαδή, $P_{to} = P(P_H < P_C) + P(C < k, P_H \geq P_C)$. [67]

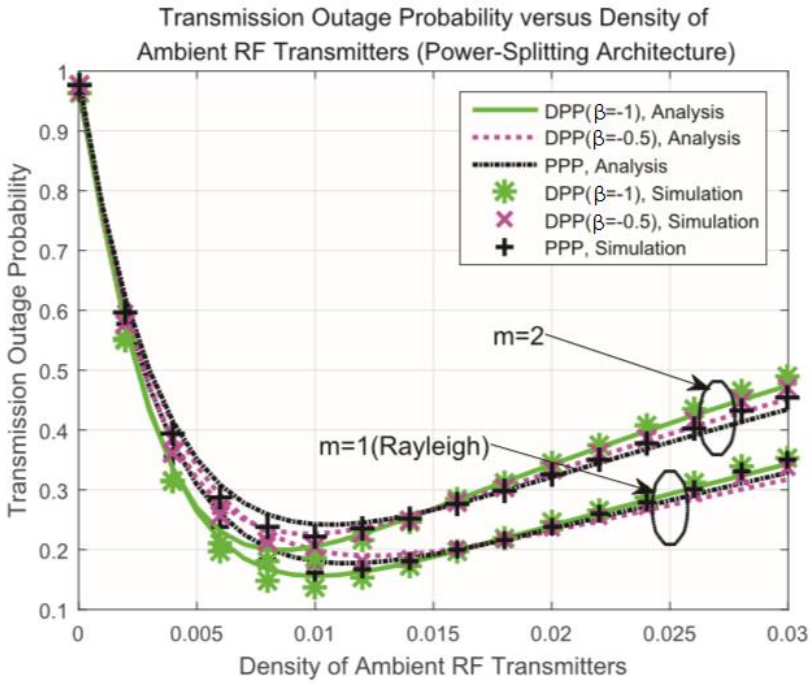
3.6.4 Συμπεράσματα

Όταν η πυκνότητα των RF πομπών είναι μικρή, μια μεγαλύτερη απώλεια μεταξύ των RF πομπών οδηγεί σε καλύτερη τιμή για την πιθανότητα διακοπής μετάδοσης. Όταν η πυκνότητα είναι μεγάλη, υπάρχει ισχυρή έλξη μεταξύ των RF πομπών, η οποία οδηγεί σε χαμηλότερη πιθανότητα διακοπής μετάδοσης. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του

διαχωρισμού ισχύος υπερέχει της αρχιτεκτονικής εναλλαγής χρόνου από την άποψη της πιθανότητας διακοπής μετάδοσης, καθώς συγκρίνοντας τις Εικόνα 43 και Εικόνα 44 παρατηρούμε ότι η μικρότερη πιθανότητα διακοπής για DPP με παράμετρο $\beta = -1$ είναι 0,2 για την περίπτωση εναλλαγής χρόνου ενώ για την περίπτωση διαχωρισμού ισχύος είναι 0,15 αντίστοιχα. [67]



Εικόνα 43: Η πιθανότητα διακοπής της μετάδοσης σε αρχιτεκτονική εναλλαγής χρόνου.



Εικόνα 44: Η πιθανότητα διακοπής της μετάδοσης σε αρχιτεκτονική διαχωρισμού ισχύος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια μαθηματικής μοντελοποίησης και ανάλυσης των δικτύων 5ης γενιάς. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι προδιαγραφές για τα δίκτυα 5G, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι προκλήσεις που καλείται η νέα γενιά να αντιμετωπίσει. Περιγράφηκαν οι αρχιτεκτονικές και οι τεχνολογίες των υπαρχόντων δικτύων προκειμένου να συνδυαστούν και να συνυπάρξουν με την επόμενη γενιά. Παρουσιάστηκαν επιγραμματικά τα βασικά ερευνητικά προγράμματα που συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων για την 5G ασύρματη επικοινωνία.

Η προσομοίωση της τοπολογίας των θέσεων των συσκευών στον χώρο επιτυγχάνεται μέσω της στοχαστικής γεωμετρίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε μια προσέγγιση του δικτυακού μοντέλου με την βοήθεια μαθηματικών διεργασιών σημείων. Περιγράφηκαν οι μαθηματικές ιδιότητες, υπολογίστηκαν βασικές μετρικές του συστήματος για κάθε διεργασία ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία στην σύνδεση. Ανάλογα με το δίκτυο που χρειάζεται να μοντελοποιήσουμε επιλέγουμε την διεργασία που ανταποκρίνεται καλύτερα. Η αναγκαιότητα της μαθηματικής μοντελοποίησης μέσω της στοχαστικής γεωμετρίας γίνεται εμφανής στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, όπου οι διεργασίες σημείων βρίσκουν εφαρμογή σε πραγματικά δικτυακά περιβάλλοντα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	**Ελληνικός Όρος**
Reliability	Αξιοπιστία
Global System Communication	Παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών
Advanced Mobile Phone System	Προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας
internet of things	Διαδίκτυο των πραγμάτων
Macrocells	Μακροκυψέλες
Small cells	Μικρές κυψέλες
Microcells	Μικροκυψέλες
Femtocells	Φεμτοκυψέλες
cloud storage	σύννεφο αποθήκευσης
Throughput	μέση απόδοση
Latency	λανθάνουσα πρόσβαση-εγρήγορση
International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
International Mobile Telecommunication	σύστημα Διεθνών Τηλεπικοινωνιών
Radio Access	Ραδιοπρόσβαση
smart antennas	Έξυπνες κεραίες
flexible configuration	Ευέλικτη διαμόρφωση
Ultra-Dense Networks	Πυκνά δίκτυα
Remote Radio Heads	Σταθμοί ραδιοσυχνοτήτων
Base Band Units	Μονάδες βάσης ζώνης
Operational Expense	Λειτουργικό κόστος
Capital Expenditure	Κεφαλαιουχικές Δαπάνες
Total cost Of Ownership	Συνολικό κόστος ιδιοκτησίας
Universal Resources Management	Καθολική διαχείριση πόρων
Distributed-Input-Distributed-Output	Κατανεμημένη είσοδος- Κατανεμημένη έξοδος
Quality of Service	Ποιότητα υπηρεσίας
Quality of Experience	Ποιότητα Εμπειρίας
Network Function Virtualization	Λειτουργίες εικονικού δικτύου
Software Defined Networking	Καθορισμένη Δικτύωση Λογισμικού
European Conference on Networks and Communications	Ευρωπαϊκή Διάσκεψη των Δικτύων και Επικοινωνιών
milli-meter Wave	Μικροκύματα
Air Interface	Εναέρια διεπαφή
Independent and identically distributed	Ανεξάρτητες και Ισόνομες τυχαίες μεταβλητές
Fading	Διαλείψεις
Clusters	Ομάδες, συστάδες
Determinant	Ορίζουσα
Repulsion	Ανάδραση – ανατροφοδότηση – απόκριση
Wireless Network Elements	Ασύρματες συσκευές δικτύου

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΕΚΠΑ	Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
AMPS	Advanced Mobile Phone System
SMS	Messaging Service
MMS	Multimedia Messaging Service
GSM	Global System Communication
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
UMTS	Universal Mobile Terrestrial System
LTE	Long Term Evolution
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
IOT	Internet Of Things
Wi-Fi	Wireless frequency internet
D2D	Device to Device
M2M	Mobile to Mobile
Pc	Personal Computer
WRC	Worldwide Radio Communication
MMW	Milli-meter Wireless
RF	Radio Frequency
ITU	International Telecommunication Union
IMT	International Mobile Telecommunication
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ATIS	The Alliance of Telecommunications Industry Solutions
CCSA	China Communications Standards Association
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
TSDSI	Telecommunications Standards Development Society, India
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee
ULTRA	Universal Terrestrial Radio Access
FDD	Frequency Division Duplex
TDD	Time Division Duplex
GPRS	General Packet Radio Service
HSPA	High Speed Packet Access
RAN	Radio Access Network

CT	Core Network and Terminals
TSG	Technical Specification groups
NR	New Radio
Emb	enhanced Mobile Broadband
URLCC	Ultra-Reliable Low Latency Communication Conference
5GPP	5th Generation Partnership Project
EE	Ευρωπαϊκή Ένωση
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RAT	Radio Access Technologies
UDN	Ultra – Dense Networks
OPEX	Operational Expense
CAPEX	Capital Expenditure
TCO	Total Cost Of Ownership
URM	Universal Resources Management
DIDO	Distributed-Input-Distributed-Output
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
RRH	Remote Radio Heads
BBU	Base Band Units
MIMO	Multiple Input Multiple Output
BTS	Base Transmit Stations
UEs	Unity Entities
SINR	signal to interference plus noise ratio
NFV	Network Function Virtualization
OSS	Operational Support Systems
BSS	Business Support Systems
SDN	Software Defined Networking
NBI	North Bound Interface
ABSOLUTE	Aerial Base Stations with Opportunistic Links for Unexpected & Temporary Events
EUCNC	European Conference on Networks and Communications
MmW	Milli-meter Wave
NGMN	Next Generation Mobile Networks
EMF	Electromagnetic Field
AI	Air Interface

i.i.d.	Independent and identically distributed
PEP	Pairwise Error Probability
APEP	Average Pairwise Error Probability
ASEP	Average Symbol Error Probability
WNE	Wireless Network Elements
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] P. Sule, A. Joshi, «Architectural Shift from 4G to 5G Wireless Mobile Networks», International Journal of Computer Science and Mobile Computing, , Vol.3 Issue.9, September- 2014, pg. 715-721

[2] CISCO, «Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019», February 2015.

[3] Nokia Solutions and Networks, «White Paper : 5G use cases and requirements», July 2014.

[4] Ericsson Review, «5G Radio Access», The communications technology journal since 1924, June 2014.

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_to_machine

[6] M. A. Javaid, «5G Technologies: Fundamental Shift in Mobile Networking Philosophy», Institute of Electrical and Electronics Engineers, 13 pages, November 2013

[7] Yu, Rong, Wang et al, «Visions and research directions for the Wireless World, No7, Requirements and vision for NG Wireless», Wireless World Research Forum (WWRF), October 2011,

[8] P. Mogensen et al., «Looking ahead to 5G», Nokia Solutions and Networks, White paper, May 2014.

[9] International Telecommunications Union, «ITU towards "IMT for 2020 and beyond» http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx

[10] http://www.3gpp.org/about-3gpp

[11] http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news

[12] https://5g-ppp.eu/

[13] https://www.ieee.org/about/today/at_a_glance.html

[14] A.Gupta, R.K.Jha, «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies», IEEE Access, Special section on recent advances in Software Defined Networking for 5G networks, July 2015

[15] Yang, Xiao et al, «Ultra Dense Networks (UDNs) for 5G», IEEE 5G Tech Focus: Volume 1, Number 1, March 2017: http://5g.ieee.org/tech-focus/march-2017/ultra-dense-networks-udns-for-5g

[16] X. Ge, S. Tu, G. Mao, Cheng-Xiang Wang, T. Han, «5G Ultra-Dense Cellular Networks», IEEE Wireless Communication, December 2015: https://arxiv.org/pdf/1512.03143.pdf

[17] NOKIA, «Ultra Dense Network (UDN) White Paper», Nokia white paper (pg. 27), https://resources.ext.nokia.com/asset/200295

[18] A. Alexiou et al., «5G : On the count of three paradigm shifts», Wireless World Research Forum (WWRF), March 2015.

[19] Rost, Bernardos, Domenico, Girolamo, Lalam, Maeder, Sabella, Wübben, «Cloud Technologies for Flexible 5G Radio Access Networks», IEEE Communications Magazine (pg. 68-76), May 2014

[20] https://en.wikipedia.org/wiki/C-RAN

[21] «Potentials and Challenges of C-RAN Supporting Multi-RATs Toward 5G Mobile Networks», IEEE Access, Volume: 2 (pg. 1187-1195), October 2014.

[22] ERICSON, «Cloud RAN: The benefits of virtualization, centralization and coordination», Ericson White paper, September 2015

[23] James F. Kurose, Keith W. Ross «Computer Networking».

[24] P. Sule, A. Joshi, «Architectural Shift from 4G to 5G Wireless Mobile Networks», International Journal of Computer Science and Mobile Computing, September 2014.

[25] C. Wang et al., «Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks», IEEE Communications Magazine, February 2014.

[26] E. Luther, «5G Massive MIMO Testbed : From Theory to Reality», National Instruments, June 2016

[27] R. Choudhury, «A Network Overview of Massive MIMO for 5G Wireless Cellular: System : Model and Potentials» , International Journal of Engineering Research and General Science (Volume 2, Issue 4), June-July 2014.

[28] S. Abdelwahab, Be. Hamdaoui, M. Guizani, T. Znati, «Network Function Virtualization in 5G», IEEE Communication Magazine (pg. 84-91), April 2016.

[29] N. Ilyadis, «5 NFV Benefits & The Trends Driving Them», Information Week Network Computing, May 2014, http://www.networkcomputing.com/networking/5-nfv-benefits-and-the-trends-driving-them/a/d-id/1269263.

[30] T. Chen et al, «Software defined mobile networks: concept, survey, and research directions», IEEE Communication Magazine (pg126-133), November 2015.

[31] https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking

[32] Y. Li, M. Chen, «Software-Defined Network Function Virtualization: A Survey», IEEE Access, Volume 3 (pg. 12), Special section on ultra – dense cellular networks, December 2015

[33] R.Wang, H.Hu, X.Yang, «Potentials and Challenges of C-RAN Supporting Multi-RATs Toward 5G Mobile Networks», IEEE Access, Volume 2 (pg. 9), Special section on recent advances in cloud radio access network, October 2014

[34] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell

[35] http://www.absolute-project.eu/images/ABSOLUTE_white_paper_2015.pdf
[36] European Commission, «Mobile and Wireless Communications Enablers for the 2020 Information Society», METIS February 2013.
[37] https://www.metis2020.com/documents/deliverables/index.html
[38] Aziz, Kusume, Queseth, Fallgren et al, «METIS final project report», Seventh Framework Programme, Deliverable D8.4, April 2015
[39] Ericson, Huawei Technologies, Samsung, Telecom Italia et al, «METIS || final project report», 5GPP, Deliverable D8.3, June 2017
[40] http://www.5gnow.eu/?page_id=266
[41] Gerhard Wunder, Stephan ten Brink, «5GNOW: 5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signaling», European commission, February 2013, http://cordis.europa.eu/fp7/ict/future-networks/documents/call8-projects/5gnowfactsheet.pdf
[42] http://www.ict-crowd.eu/downloads/leaflet-2012.pdf
[43] http://www.ict-ijoin.eu/
[44] http://www.miwaves.eu
[45] http://fantastic5g.eu/
[46] Maksymyuk, Brych, Pelishok «Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks»
[47] J.G. Andrews, R. K. Ganti, M. Haenggi , N. Jindal, S. Weber, «A Primer on Spatial Modeling and Analysis in Wireless Networks», IEEE Communications Magazine, pg. 156-163, November 2010.
[48] H. ElSawy, E. Hossain, M. Haenggi , «Stochastic Geometry for Modeling, Analysis, and Design of Multi-Tier and Cognitive Cellular Wireless Networks: A Survey», IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol.15 (pg. 996-1019), Third quarter 2013.
[49] Jeffrey G. Andrews, Abhishek K. Gupta, Harpreet S. Dhillon, «A Primer on Cellular Network Analysis Using Stochastic Geometry», IEEE Trans. Communication , October 2016
[50] M. Kountouris, "Stochastic Geometry for Wireless Networks", Third GreeNet Seminar, Barcelona September 2012
[51] Haenggi, Andrews, Bacceli et al, "Stochastic Geometry and Random Graphs for the Analysis and Design of Wireless Networks", IEEE Journal , vol. 27, pg. 1029-1046, September 2009
[52] Paul Keeler, «Notes on the Poisson point process», "CC BY-SA 3.0" license, March 2016
[53] S. Srinivasa and M. Haenggi, "Distance Distributions in Finite Uniformly Random Networks: Theory and Applications," IEEETrans. Veh. Technol., vol. 59, pp. 940–949, February 2010
[54] M. Afshang, H. S. Dhillon, P. H. Joo Chong, «Fundamentals of Cluster-Centric Content Placement in Cache-Enabled Device-to-Device Networks», February 2016
[55] C.Saha, M.Afshang, H. Dhillon, «Enriched K-Tier HetNet Model to Enable the Analysis of User-Centric Small Cell Deployments», May 2017
[56] Teichman, Ballani, Boogaart, «Generalizations of Matern's hard core point processes», Sept 2012
[57] Y. Li, F. Baccelli, H. Dhillon, J. Andrews, «Statistical Modeling and Probabilistic Analysis of Cellular Networks with Determinantal Point Processes », IEEE Globecom workshops, San Diego, CA, 2015
[58] N. Deng, W. Zhou, M. Haenggi, «The Ginibre Point Process as a Model for Wireless Networks with Repulsion», IEEE Transactions on Wireless Communications (Volume 14, Issue 1), January 2014
[59] M.Afshang, H. Dhillon, P.Chong, «Modeling and Performance Analysis of Clustered Device-to-Device Networks», IEEE Globecom, San Diego, CA, August 2015
[60] H. Dhillon et al., «Modeling and Analysis of K-Tier Heterogeneous Cellular Networks», Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (Volume 30, Issue 3), April 2012
[61] Amuru, H. Dhillon, M. Buehrer, «On Jamming Against Wireless Networks», IEEE Transactions on Wireless Communications (Volume 16) , January 2017
[62] https://en.wikipedia.org/wiki/Characteristic_function_(probability_theory)
[63] R. Ganti, M. Haenggi, «Interference and Outage in Clustered Wireless Ad Hoc Networks», IEEE Transactions on Information Theory, (Volume 55, No. 9) , September 2009
[64] D. Xenakis, L. Merakos, M. Kountouris, N. Passas, C. Verikoukis, «Distance Distributions and Proximity Estimation given Knowledge of the Heterogeneous Network Layout», IEEE Transactions on Wireless Communications (Volume 14, Issue 10), October 2015
[65] http://mathworld.wolfram.com/ModifiedBesselFunctionoftheFirstKind.html
[66] Y. Li, F. Baccelli, H.S. Dhillon, J.G. Andrews, «Statistical Modeling and Probabilistic Analysis of Cellular Networks With Determinantal Point Processes», IEEE Transactions on Wireless Communications (Volume 63, No 9), September 2015.
[67] X. Lu, I. Flint, D. Niyato, N. Privault, P. Wang, « Self-Sustainable Communications With RF Energy Harvesting: Ginibre Point Process Modeling and Analysis», IEEE Journal on selected areas in Communications (Volume 34, No 5), May 2016.