



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τηλεπικοινωνιακή κάλυψη πολυπληθών ad hoc γεγονότων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Σ. ΠΙΤΕΡΟΣ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τηλεπικοινωνιακή κάλυψη πολυπληθών ad hoc γεγονότων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Σ. ΠΙΤΕΡΟΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γ. Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Κωνσταντίνος Σ. Πιτερός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Κωνσταντίνος Σ. Πιτερός, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή για τη συνεργασία που είχαμε, καθώς χωρίς τις γνώσεις, τη μεταδοτικότητα και τις συμβουλές του δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία. Είναι αυτός που μου εμφύσησε το ενδιαφέρον για το αντικείμενο του τηλεπικοινωνιακού μηχανικού μέσα από τις διαρκείς επικοινωνητικές μεταξύ μας συζητήσεις που συχνά, μάλιστα, ξέφευγαν από τα στενά πλαίσια της διπλωματικής εργασίας συμβάλλοντας καθοριστικά στη διαμόρφωση ενός πολύπλευρου υποβάθρου μηχανικού.

Επίσης, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο συνάδελφο, Μιχάλη Μυλωνάκη, για την εισαγωγική βοήθεια που μου παρείχε κατά τα πρώιμα στάδια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς η κεντρική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου είχε αρχικά διατυπωθεί στη διπλωματική του εργασία τον Απρίλιο του 2014.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη, υλική αλλά κυρίως ηθική και ψυχολογική, που μου παρείχε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Στην οικογένεια μου,

Περιεχόμενα

Περίληψη	12
Abstract.....	14
Κατάλογος Σχημάτων.....	15
Κατάλογος Πινάκων	18
Κατάλογος Συμπτώσεων.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
1.1 Υπόβαθρο.....	22
1.2 Τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τα σημερινά δίκτυα ραδιοπρόσβασης	24
1.2.1 Αύξηση πλήθους των σταθμών βάσης και επακόλουθη αύξηση της κατανάλωσης ισχύος	24
1.2.2 Ραγδαία αύξηση του ολικού κόστους ιδιοκτησίας του δικτύου ραδιοπρόσβασης.....	25
1.3 Άνιση κατανομή τηλεπικοινωνιακού φορτίου	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ POISSON	30
2.1 Χρονικές σημειακές διαδικασίες-Ορισμός και ειδικές Κατηγορίες	30
2.1.1 Ορισμός σημειακών χρονικών σημειακών διαδικασιών.....	30
2.1.2 Ειδικές κατηγορίες κανονικών σημειακών διαδικασιών	31
2.2 Η ομογενής και μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson.....	32
2.3 Η χωρική σημειακή διαδικασία Poisson.....	37
2.4 Επιλογή χωροχρονικού μοντέλου άφιξης χρηστών.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΟΥ....	42
3.1 Διατύπωση του προβλήματος	42
3.2 Κατανομή των M ισχυρών κόμβων στο χώρο S	44
3.3 Κατανομή πόρων στους M ισχυρούς κόμβους.....	46
3.3.1 Η καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson	46
3.3.2 Η κατανομή των N πόρων στους M κόμβους.....	50
3.4 Κατάστρωση της συγκεντρωτικής εκδοχής(Centralised Version) του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων.....	51
3.4.1 Οι ζητούμενοι πόροι εξευρίσκονται σε ένα βήμα.....	51
3.4.2 Οι ζητούμενοι πόροι εξευρίσκονται σε περισσότερα του ενός βήματα	54
3.5 Πλεονέκτημα Συγκεντρωτικής Εκδοχής Προτεινόμενου Αλγορίθμου	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3.1: Απόδειξη σχέσης (3.2.2)	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	60
4.1 Περιπτώσεις εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων	60
4.1.1 Προφίλ Κίνησης σε μεγάλα γεγονότα(Traffic Profiles in Mass Events)	60
4.1.2 Τεχνική Αμφιδρόμησης(Duplex Method)	61
4.1.3 Πολλαπλή Πρόσβαση(Multiple Access).....	62
4.2 Το πλαίσιο χρονοπρογραμματισμού στα δίκτυα 4 ^{ης} γενιάς (LTE) (The LTE scheduling framework)64	
4.2.1 Υπολογισμός πλήθους διαθέσιμων πόρων στο πλαίσιο του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων	67
4.3 Εφαρμογή προτεινόμενου αλγορίθμου σε περιπτώσεις κάλυψης εσωτερικών χώρων	69
4.3.1 Εμπορική λύση για κάλυψη εσωτερικών χώρων με παράλληλη χρήση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων	70
4.4 Εφαρμογή προτεινόμενου αλγορίθμου σε περιπτώσεις κάλυψης εξωτερικών χώρων.....	75
4.5 Εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου για την αντιμετώπιση του παλιρροϊκού φαινομένου 76	
4.5.1 Το παλιρροϊκό φαινόμενο στα κυψελωτά δίκτυα.....	76
4.6 Συνοπτική παρουσίαση της αρχιτεκτονικής C-RAN.....	79
4.6.1 Πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής C-RAN	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	87
5.1 Επιλογή περιβάλλοντος προσομοίωσης.....	87
5.2 Προσομοίωση της εμφάνισης χρηστών στο προς μελέτη τηλεπικοινωνιακό δίκτυο	88
5.2.1 Προσομοίωση της χρονικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson.....	89
5.2.1.1 Προσομοίωση ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson.....	89
5.2.1.2 Προσομοίωση μη ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson	91
5.2.2 Προσομοίωση χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson.....	91
5.3 Υλοποίηση της βελτιστοποίησης (3.16) στο υπολογιστικό περιβάλλον της Matlab	95
5.4 Διαστασιολόγηση και κριτήρια αξιολόγησης της επίδοσης του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου	97
5.5 Σενάρια προσομοίωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων.....	99
5.5.1 Προσομοίωση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε ολόκληρο το χώρο S 101	
5.5.2 Προσομοίωση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε περίπτωση κάλυψης σταδίου	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	117
Βιβλιογραφία	119

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση αποδοτικού αλγορίθμου κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα σχεδιασμένων για την κάλυψη ad-hoc γεγονότων, όπως αθλητικών αγώνων, συναυλιών ή συνεδρίων, όπου αναμένεται αθρόα προσέλευση χρηστών. Συγκεκριμένα, θεωρείται ορθογωνικός χώρος, στον οποίο εμφανίζονται χρήστες ακολουθώντας χωροχρονική κατανομή Poisson δεδεμένης έντασης. Σε πρώτη φάση, σημεία πρόσβασης τοποθετούνται στο χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε το πλήθος τους να θεωρείται το ελάχιστο δυνατό και η εμβέλειά τους να καλύπτει ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, σταθμός βάσης, με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες λαμβάνοντας υπόψη την ένταση της κατανομής Poisson, κατανέμει τους συνολικά διαθέσιμους πόρους του δικτύου στα σημεία πρόσβασης προκειμένου αυτά, με τη σειρά τους, να εξυπηρετήσουν τους νεοεισερχόμενους χρήστες. Ακολουθεί το κύριο μέρος της διαδικασίας, κατά το οποίο χρήστες εμφανίζονται στο χώρο σύμφωνα με την κατανομή Poisson και εξυπηρετούνται από το σημείο πρόσβασης στην περιοχή ευθύνης του οποίου εμφανίστηκε έκαστος εξ αυτών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποσκοπεί στο εξής: Οι διαθέσιμοι πόροι να κατανέμονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις περιοχές που αναμένεται να ζητηθούν στο μέλλον.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στις προκλήσεις των σημερινών δικτύων ραδιοπρόσβασης εστιάζοντας στο πρόβλημα της άνισης κατανομής τηλεπικοινωνιακού φορτίου σε περιπτώσεις ad-hoc γεγονότων. Στο Κεφάλαιο 2 εισάγεται η χωρική σημειακή διαδικασία Poisson ως άμεση γενίκευση της αντίστοιχης χρονικής σημειακής διαδικασίας και αναλύεται το επιλεγμένο χωροχρονικό μοντέλο για την μοντελοποίηση της άφιξης των χρηστών στο προς μέλετη δίκτυο. Στο Κεφάλαιο 3 διατυπώνεται, αρχικά, το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί και, στη συνέχεια, καταστρώνεται η συγκεντρωτική εκδοχή του προτεινόμενου αλγορίθμου. Στο Κεφάλαιο 4 αποσαφηνίζεται η έννοια «πόρος» και γίνεται εκτενής αναφορά σε πιθανές εμπορικές εφαρμογές του προτεινόμενου αλγορίθμου, όπως η καταπολέμηση του «παλιρροϊκού φαινομένου» και η αρχιτεκτονική C-RAN. Το Κεφάλαιο 5 περιγράφει τα βήματα της προσομοίωσης ακολουθούμενα από τα διαγράμματα των κριτηρίων αξιολόγησης της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου μέσω ενδεικτικών παρουσιαζόμενων σεναρίων. Τέλος, το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα συμπεράσματα της εργασίας και επεκτάσεις αυτής.

Λέξεις Κλειδιά

Κατανομή Πόρων, ad-hoc γεγονός, Χωροχρονική διαδικασία Poisson, «παλιρροϊκό φαινόμενο», αρχιτεκτονική C-RAN

Abstract

This diploma thesis deals with efficient resource allocation in wireless networks aiming at covering of ad-hoc events, like sports-events, concerts or conferences, where massive attendance is anticipated. A finite rectangular space is assumed in which users appear following to a spatio-temporal Poisson distribution of known intensity. Firstly, Access Points (APs) are placed so that their number will be approximately minimum to cover the ad hoc area. Taking into account the Poisson intensity assumed, a Base Station (sBS) with enhanced computational capabilities distributes the available resources to the APs so that they serve the expected users which appear following the spatio-temporal Poisson distribution in their range. The target of the proposed algorithm is to allocate the available resources to APs according to the expected demand.

The first chapter provides an introduction to current challenges of Radio Access Networks focusing on the problem of uneven load distribution with regard to large ad-hoc events. The second chapter treats the spatial Poisson Process as a generalization of the temporal one and presents selected spatio-temporal model that describes mathematically how the users are expected to appear in the ad hoc space. In the third chapter, the problem under consideration is formulated and the centralised version of the proposed resource allocation algorithm is analyzed. In the fourth chapter, potential commercial applications of the proposed algorithm are elaborated, such as the mitigation of the «Tidal effect» and its intergration into the C-RAN architecture. The fifth chapter presents simulation of characteristic ad hoc events in order to assess the performance of the proposed scheme with respect to characteristic performance metrics. Finally, the sixth chapter concludes the thesis and proposes further application of the proposed scheme.

Key Words

Resource Allocation, Large Mass Ad-Hoc Events, Spatio-temporal Poisson Process, «Tidal Effect»,C-RAN architecture

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Στιγμιότυπο από τις εκλογές για την ανάδειξη πάπα το 2005 και το 2013	22
Σχήμα 1.2 Διαχρονική αύξηση του όγκου αναπτυσσόμενης κίνησης στα κινητά δίκτυα ανά κατηγορία υπηρεσίας	24
Σχήμα 1.3 Ανάλυση κόστους CAPEX/OPEX σε επίπεδο κυψέλης (cell site)	26
Σχήμα 1.4 Άνιση κατανομή χρηστών μεταξύ γειτονικών κυψελών (Uneven user distribution)	27
Σχήμα 2.1 Η συνάρτηση $f(x)=x^n$ τείνει προς το μηδέν καθώς αυξάνεται	33
Σχήμα 2.2 Τυχαία στιγμιότυπα για 4 χρονικές διαδικασίες διαφορετικής έντασης	34
Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου	44
Σχήμα 3.2 Δόμηση του χώρου S με M_{min} -το πλήθος- σημεία πρόσβασης (APs)	46
Σχήμα 3.3 Τοπολογία παραδείγματος καλά υποστηριζόμενης κατανομής Poisson	49
Σχήμα 4.1 Αναλογία μεταξύ κίνησης καθοδικής και ανοδικής ζεύξης (downlink/uplink traffic) στην επικράτεια του δικτύου(Network wide) και σε περιπτώσεις πολυπληθών γεγονότων (Mass events)	61
Σχήμα 4.2 Διάταξη χρονοσχισμών για τη δυναμική αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου(Flexible TDD)	61
Σχήμα 4.3 OFDM vs. OFDMA: Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει μία έκρηξη στα δεδομένα χρηστών. Η τεχνική OFDMA επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης.	62
Σχήμα 4.4 Χρονοπρογραμματισμός μετάδοσης (scheduling) προς ελαχιστοποίηση της επίδρασης των διαλείψεων	63
Σχήμα 4.5 Δομή πλαισίου στο LTE (frame structure)	65
Σχήμα 4.6 Πλέγμα ραδιοπόρων στο LTE (LTE resource grid)	66
Σχήμα 4.7 Υπολογισμός διαθέσιμων πόρων (PRBs) για εύρος ζώνης $BW=1.4MHz$	68
Σχήμα 4.8(α) Θέσεις τοποθέτησης των M ισχυρών κόμβων για την κάλυψη των θεατών	69
Σχήμα 4.8(β) Σύνδεση των APs με το δίκτυο κορμού του LTE με σκοπό τη μεταφορά στις αναπτυσσόμενες κινήσεις	69
Σχήμα 4.9 Το ραδιοστοιχείο- κεραία (Radio Dot) του Radio Dot System	71
Σχήμα 4.10 Σχηματική περιγραφή του Ericsson Radio Dot System (RDS)	72
Σχήμα 4.11 Ευκολία εγκατάστασης του συστήματος . Σύνδεση κάθε στοιχείου με τυποποιημένο καλώδιο Internet τοπικής δικτύωσης LAN	73

Σχήμα 4.12 Παράδειγμα υλοποίησης τους προτεινόμενου αλγορίθμου με χρήση της τεχνολογίας	73
Σχήμα 4.13 Παραδείγματα δυναμικής εκχώρησης χωρητικότητας(Dynamic Capacity Provisioning)	74
Σχήμα 4.14 Χρήση διαδραστικής υπηρεσίας θέασης σε ποδοσφαιρικό	75
Σχήμα 4.15 Ημερήσια κατανομή τηλεπικοινωνιακού φορτίου σε δίκτυο κινητών επικοινωνιών σε περιοχές εργασίας (Urban Areas) και περιοχές κατοικιών (Suburban Areas)	77
Σχήμα 4.16 Στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας(Statistical Multiplexing Gain) στην αρχιτεκτονική C- RAN για τα κυψελωτά δίκτυα	79
Σχήμα 4.17 Λειτουργικό διάγραμμα ενός σταθμού Βάσης (BS functionalities diagram)	79
Σχήμα 4.18 Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής των σταθμών βάσης	81
α) Παραδοσιακή αρχιτεκτονική Σταθμού βάσης (macro BS)	81
β) Σταθμός βάσης με διαχωρισμένες μονάδες RRH και BBU	81
γ) Αρχιτεκτονική C-RAN με RRH	81
Σχήμα 4.19 Επισκόπηση δικτύου LTE αρχιτεκτονικής C-RAN	82
Σχήμα 4.20 Ημερήσιο φορτίο σταθμών βάσης σε εργασιακούς χώρους (Office BS) και κατοικήσιμες περιοχές (Residential BS)	82
Σχήμα 4.21 Αναλογία ρόλων διαφόρων οντοτήτων (RRHs-APs, BBU pool-sBS) μεταξύ C-RAN αρχιτεκτονικής και προτεινόμενου Αλγορίθμου	83
Σχήμα 5.1 Χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων (interarrival times) νέων χρηστών για το ενδεικτικό σενάριο προσομοίωσης	90
Σχήμα 5.2 Προσομοίωση θέσεων των $N_{users}=104$ χρηστών σύμφωνα με τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\lambda\bar{x}(x,y)=100*(x+y)$	93
Σχήμα 5.3 Προσομοίωση θέσεων των $N_{users}=104$ χρηστών σύμφωνα με τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\lambda\bar{x}(x,y)=100*e^{(1+2y)}$	94
Σχήμα 5.4 Κάλυψη με APs των 2 εκδοχών του χώρου S (αριστερά-τετραγωνικός χώρος διαστάσεων $a \times b$, δεξιά-περιοχή κερκίδων σταδίου)	100
Σχήμα 5.5 Αρχική κατανομή των N πόρων στα M APs για χωρική ένταση $\lambda\bar{x}(x,y)=1000 \cdot (x+y)$	103
Σχήμα 5.6 Προσομοίωση άφιξης χρηστών στο χώρο S, $\lambda\bar{x}(x,y)=1000 \cdot (x+y)$, $T=10$ χρον.μον., $N_{users}=1010$ χρήστες	104
Σχήμα 5.7 Ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων και αντίστοιχο ποσοστό εξυπηρέτησης των $N_{users}=1010$ χρηστών	105

Σχήμα 5.8 Μέσο απαιτούμενο βάθος εξεύρεσης πόρων για την εξυπηρέτηση χρηστών για τις δύο εκδοχές κατανομής πόρων του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης	105
Σχήμα 5.9 Αρχική κατανομή των N πόρων στα M APs για χωρική ένταση $\lambda\bar{x}(x,y)=1000 \cdot y/(x+1)$	107
Σχήμα 5.10 Προσομοίωση άφιξης χρηστών στο χώρο S, $\lambda\bar{x}(x,y)=1000 \cdot y/(x+1), T=10$ χρον. μον., $N_users=1018$ χρήστες	108
Σχήμα 5.11 Ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων και αντίστοιχο ποσοστό εξυπηρέτησης των $N_users=1018$ χρηστών	109
Σχήμα 5.12 Μέσο απαιτούμενο βάθος εξεύρεσης πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών για τις δύο εκδοχές κατανομής πόρων του δευτέρου σεναρίου προσομοίωσης	109
Σχήμα 5.13 Διαίρεση του προς κάλυψη χώρου σε ζώνες αναμενόμενης κίνησης (1^{η} ζώνη-υψηλή / 2^{η} ζώνη -χαμηλότερη προσέλευση χρηστών)	111
Σχήμα 5.14 Αρχική κατανομή των N πόρων στα M_Stadium APs	113
Σχήμα 5.15 Προσομοίωση άφιξης χρηστών στο στάδιο σύμφωνα με τις αντίστοιχες εντάσεις κάθε ζώνης ($\lambda\bar{x}(t)_1$ κόκκινο χρώμα/ $\lambda\bar{x}(t)_2$ μπλε χρώμα)	114
Σχήμα 5.16 Ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων και αντίστοιχο ποσοστό εξυπηρέτησης των $N_users=2047$ εμφανισθέντων χρηστών στο στάδιο	115
Σχήμα 5.17 Μέσο απαιτούμενο βάθος εξεύρεσης πόρων για την εξυπηρέτηση των εμφανισθέντων στο στάδιο χρηστών για τις δύο εκδοχές	115

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Συνάρτηση εύρεσης του l_0 από τον i -οστό χρήστη/ function find l_0 for i th user	52
Πίνακας 3.2 Συγκεντρωτική εκδοχή του Αλγορίθμου Εξυπηρέτησης Χρηστών-Ένα Βήμα)/ Centralised Version of Service Algorithm(One_Step)	53
Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτική εκδοχή του Αλγορίθμου Κατανομής Πόρων/(Centralised Version of Resource Allocation Algorith)	53
Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτική εκδοχή του Αλγορίθμου Εξυπηρέτησης Χρηστών-Επαναληπτική)/Centralised Version of Service Algorithm(Iterative)	56
Πίνακας4.1 Διαθέσιμο πλήθος RBs ανά διαθέσιμο εύρος ζώνης στο LTE	66
Πίνακας5.1 Αλγόριθμος Προσομοίωσης Αφίξεων Poisson ομογενούς έντασης, λ , στο διάστημα $(0,T)$	90
Πίνακας5.2 Αλγόριθμος Προσομοίωσης Αφίξεων Poisson μη ομογενούς έντασης, $\lambda(t)$, στο διάστημα $(0,T)$	91
Πίνακας5.3 Αλγόριθμος Προσομοίωσης δισδιάστατων Αφίξεων (θέσεων χρηστών) Poisson μη ομογενούς έντασης, $\lambda\bar{\tau}(x,y)$, στο διάστημα $x \in (0,a), y \in (0,b)$	92
Πίνακας5.4 Υλοποίηση βελτιστοποίησης (3.16) στο περιβάλλον Matlab για την κατανομή των N διαθέσιμων πόρων στα M σημεία πρόσβασης	96
Πίνακας 5.5 RA_Algorithm_metrics function/Συνάρτηση Υπολογισμού δεικτών επίδοσης Αλγορίθμου Κατανομής Πόρων	99

Κατάλογος Συμνήσεων

AP Access Point

ARPU Average Revenue Per User

BBU BaseBand Unit

CA Carrier Aggregation

CAPEX CAPital Expenditure

CBP Call Blocking Probability

C-RAN Centralised Radio Access Network

CQI Channel Quality Information

GSM Global System for Mobile Communications

IoT Internet of Thing

LTE Long Term Evolution

M2M Machine to Machine

MNO Mobile Network Operator

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OPEX Operating Expenditure

RAT Radio Access Technologies

RRH Remote Radio Head

RB Resource Block

RE Resource Element

RS Relay Station

RAN Radio Access Network

sBS super Base Station

TDD Time Division Duplex

TCO Total Cost of Ownership

TVWS TeleVision White Spaces

UMTS Universal Mobile Telecommunications

QoS Quality of Service

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Υπόβαθρο

Οι σημερινοί πάροχοι δικτύων κινητών επικοινωνιών (Mobile Network Operators-MNO) λειτουργούν μέσα σε ένα ισχυρό περιβάλλον ανταγωνισμού. Πράγματι, το κόστος για την ανάπτυξη, τη λειτουργία και την αναβάθμιση του δικτύου ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network-RAN) γίνεται ολοένα και μεγαλύτερο, ενώ, παράλληλα, τα έσοδα από τη λειτουργία και εκμετάλλευση του δικτύου δεν αυξάνονται με το ίδιο ρυθμό. Καίτοι η τηλεπικοινωνιακή κίνηση για πρόσβαση στο Internet αυξάνεται διαρκώς, το μέσο έσοδο ανά χρήστη (Average Revenue Per User-ARPU) παραμένει σταθερό ή ακόμη και μειώνεται με αργούς ρυθμούς. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στην δυνατότητα των MNO να εισαγάγουν συνεχώς νέες υπηρεσίες πάνω από το δίκτυό τους. Για να διατηρήσουν, λοιπόν, την κερδοφορία και την ανάπτυξή τους, οι MNO είναι εκ των πραγμάτων αναγκασμένοι να εξεύρουν λύσεις προκειμένου να μειώσουν τα αναπόφευκτα κόστη λειτουργίας και συντήρησης των δικτύων τους παρέχοντας, παράλληλα, καλύτερες υπηρεσίες στους πελάτες τους.

Από την άλλη πλευρά, η καθολική πρόσβαση σε ευρυζωνικές συνδέσεις Internet (mobile broadband Internet) αποτελεί μοναδική ευκαιρία για την ανάπτυξη μιας εξελιγμένης αρχιτεκτονικής δικτύου, που θα υποστηρίζει τις πλέον σύγχρονες εφαρμογές και υπηρεσίες. Για παράδειγμα, οι τελευταίες εξελίξεις στη συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο (Internet) οδηγούν σε σημαντικές κοινωνικο-οικονομικές αλλαγές που εμπλέκουν εξατομικευμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες, όπως η τηλεόραση on demand, και ανοίγοντας το δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές, όπως η ηλεκτρονική υγεία (e-health), τα αυτόνομα αυτοκίνητα (self driving cars), η εικονική πραγματικότητα (augment reality), τα έξυπνα σπίτια/πόλεις (smart home/cities). Το Σχ.1.1 αναδεικνύει πώς η χρήση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων έχει πλέον αλλάξει ριζικά τις συνήθειες των ανθρώπων, οι οποίοι σπάνια τα αποχωρίζονται από τα χέρια τους.

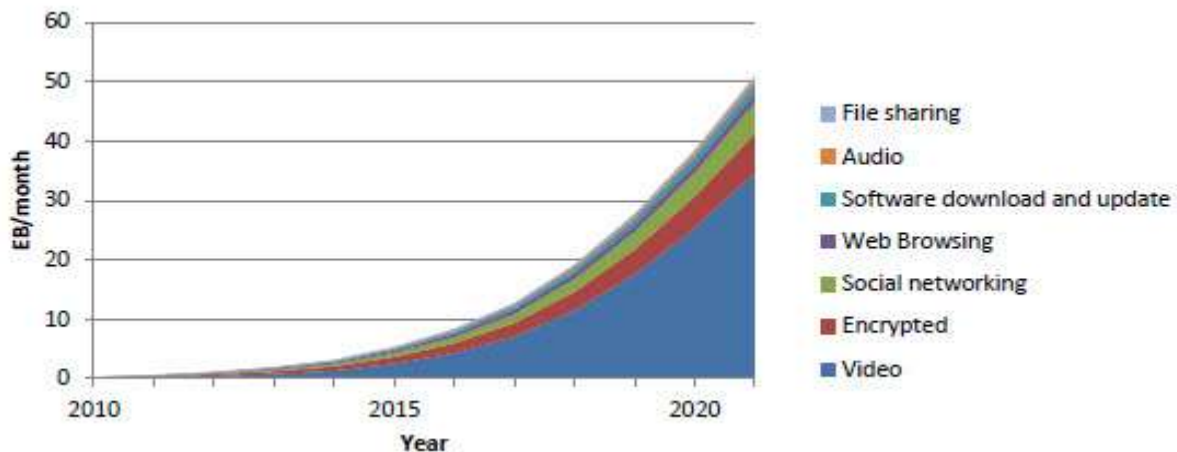


Σχήμα 1.1 Στιγμιότυπο από τις εκλογές για την ανάδειξη πάπα το 2005 και το 2013

Ολοένα και περισσότερο, λοιπόν, οι επικοινωνίες γίνονται κινητές. Το 1991, πραγματοποιήθηκε από το φιλιανδό πρωθυπουργό η πρώτη ψηφιακή κλήση μέσω δικτύου κινητών επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications (GSM)). Γύρω στο 2001, ο αριθμός των συνδρομητών κινητών δικτύων υπερέβη τα πεντακόσια εκατομμύρια. Την ίδια χρονιά, βέβαια, το πρώτο δίκτυο 3^{ης} γενιάς, το Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), έκανε την εμπορική του εμφάνιση αυξάνοντας την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Η συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο πλέον θεωρείται κοινό αγαθό και πραγματοποιείται μέσω των κινητών δικτύων 4ης γενιάς, Long Term Evolution (LTE), η εμπορική διάθεση των οποίων ξεκίνησε το 2011. Στο τέλος του 2012, ο αριθμός των συνδρομητών δικτύων LTE υπερέβη τα 60 εκατομμύρια, ενώ οι συνολικά συνδεδεμένες κινητές συσκευές αριθμούν επτά δισεκατομμύρια, υπερβαίνοντας σε πλήθος ακόμη και τον παγκόσμιο πληθυσμό. Το πλήθος των συνδρομητών προβλέπεται με ασφάλεια να φθάσει τα πενήντα δισεκατομμύρια μέχρι το 2021 λόγω της αναμενόμενης έξαρσης της τεχνολογίας επικοινωνιών μεταξύ μηχανών (Machine-to-Machine - M2M communication).

Μέχρι το 2021, λοιπόν, θα έχει ολοκληρωθεί και η προτυποποίηση της νέας γενιάς κινητών επικοινωνιών, 5G, στοχεύοντας να ικανοποιήσει την ολοένα και αυξανόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση μέσω ιδιαίτερα υψηλών για τα σημερινά δεδομένα ρυθμών μετάδοσης και ελάχιστης έως μηδαμινής καθυστέρησης. Επίσης, η νέα γενιά δικτύων θα παρέχει υψηλή αξιοπιστία καθιστώντας εφικτή την σύνδεση στο Διαδίκτυο ενός τεράστιου αριθμού συσκευών, όπως αυτοκινήτων και αισθητήρων, σχηματίζοντας το επονομαζόμενο «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» (Internet of Thing-IoT).

Ιστορικά δεδομένα όπως επίσης και προβλέψεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης καταδεικνύουν ότι η αναμενόμενη αύξηση του πλήθους των συνδρομητών θα συνοδεύεται και από εκθετική αύξηση της αναπτυσσόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Μάλιστα, η θέαση βίντεο απαιτεί το μεγαλύτερο ποσοστό του διαθέσιμου εύρους ζώνης, όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχ.1.2. Προκειμένου να υποστηριχθεί ο μεγάλος αυτός όγκος κίνησης, απαιτούνται είτε περισσότερες κυψέλες είτε μεγαλύτερη χωρητικότητα στις ήδη υπάρχουσες κυψέλες, αλλαγές που, σε κάθε περίπτωση συνεπάγονται αυξημένο κόστος για τους παρόχους των δικτύων. Εντούτοις, την ίδια στιγμή, οι χρήστες δεν είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν περισσότερα αν και θα διακινούν περισσότερα δεδομένα, δεσμεύοντας μεγαλύτερο μέρος πόρων. Γίνεται, επομένως, φανερό ότι η συνεπαγόμενη αύξηση του κόστους δεν μπορεί να ακολουθήσει την εκθετική αύξηση του όγκου της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η ίδια λογική βρίσκει εφαρμογή και στην κατανάλωση ενέργειας και τις επακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εξεύρεση, λοιπόν, νέων καινοτόμων και οικονομικών λύσεων που θα εξασφαλίζουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και αξιοπιστία αναδεικνύεται ως επιτακτική ανάγκη για την επιβίωση των παρόχων κινητών δικτύων στο συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον της αγοράς τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.



Σχήμα 1.2 Διαχρονική αύξηση του όγκου αναπτυσσόμενης κίνησης στα κινητά δίκτυα ανά κατηγορία υπηρεσίας

Στην επόμενη υποενότητα, θα παρουσιαστούν ορισμένες από τις τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι πάροχοι κινητών δικτύων και αφορούν το δίκτυο ραδιοπρόσβασης.

1.2 Τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τα σημερινά δίκτυα ραδιοπρόσβασης

1.2.1 Αύξηση πλήθους των σταθμών βάσης και επακόλουθη αύξηση της κατανάλωσης ισχύος

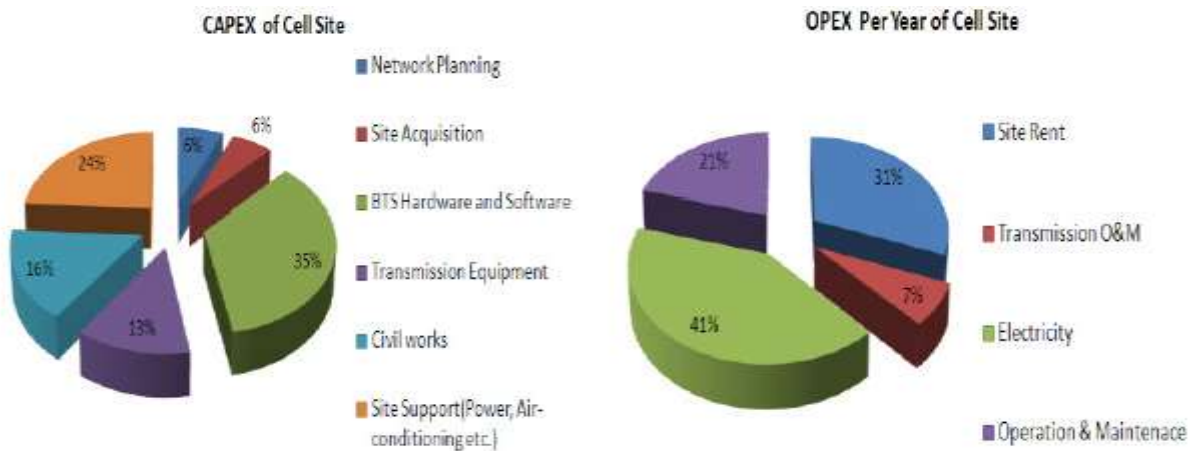
Επειδή οι πάροχοι κινητών δικτύων προτίθενται να προσφέρουν συνεχώς νέες υπηρεσίες, ιδιαίτερα απαιτητικές σε δικτυακούς πόρους τις περισσότερες φορές, αναπόφευκτα, αναμένεται να αυξηθεί ο αριθμός των απαιτούμενων σταθμών βάσης προκειμένου να παράσχουν επαρκή κάλυψη και χωρητικότητα. Κατά συνέπεια αναμένεται δραματική αύξηση στην κατανάλωση ισχύος. Για παράδειγμα, ένας από τους μεγαλύτερους παρόχους στην Κίνα, η China Mobile, τα τελευταία χρόνια σχεδόν διπλασίασε τον αριθμό των σταθμών βάσης στο δίκτυό της προκειμένου να ανταποκριθεί στις ανάγκες των πελατών της, με άμεσο επακόλουθο το διπλασιασμό και της καταναλισκόμενης ισχύος από το δίκτυο ραδιοπρόσβασης δίκτυο. Η υψηλή κατανάλωση ισχύος μεταφράζεται άμεσα σε υψηλότερο λειτουργικό κόστος για τον πάροχο αλλά, ταυτόχρονα, και σε σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Επομένως, προς εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των ρυπογόνων εκπομπών, είναι αναγκαία η μείωση του αριθμού των ενεργών σταθμών βάσης. Αυτή η λύση, όμως, θα χειροτερεύει δραματικά την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου εφόσον δεν αλλάξει η παραδοσιακή αρχιτεκτονική του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Επομένως, οι πάροχοι αναζητούν συνεχώς νέες μεθόδους και τεχνολογίες με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη

διατήρηση των αποδεκτών επιπέδων κάλυψης και χωρητικότητας του δικτύου. Πράγματι, υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που συμβάλλουν στην επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου, όπως κυρίως λύσεις λογισμικού που εξοικονομούν ενέργεια απενεργοποιώντας ορισμένους σταθμούς βάσης ή περιορίζοντας την εκπομπή των ενεργών σταθμών κατά τις ώρες με ιδιαίτερα χαμηλό φορτίο. Ως λύσεις για την παροχή ισχύος στους σταθμούς βάσης, μπορεί να αναφερθεί και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες όμως είναι άρρηκτα εξαρτώμενες από τα κλιματικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής του δικτύου. Συνοψίζοντας, λοιπόν, αν και οι προαναφερθείσες λύσεις μπορούν να θεωρηθούν συμπληρωματικές, στην ουσία δεν μπορούν να διευθετήσουν σε μεγάλο βαθμό το θεμελιώδες πρόβλημα της αυξημένης κατανάλωσης ισχύος.

Σε μακροπρόθεσμη βάση, επομένως, οι πάροχοι των κινητών δικτύων οφείλουν να ανασχεδιάσουν την αρχιτεκτονική του δικτύου ραδιοπρόσβασης με κύριο ζητούμενο την ενεργειακή αποδοτικότητα. Μία αλλαγή στη δικτυακή υποδομή θα μπορούσε να έχει καταλυτική επίδραση για την επίλυση του προβλήματος. Ειδικότερα, μια περισσότερο συγκεντρωτική αρχιτεκτονική του δικτύου όπου οι περισσότερες λειτουργίες, συμπεριλαμβανόμενης και της κατανομής των ραδιοπύργων, θα συντονίζονται από μία κεντρική οντότητα, ένα σταθμό βάσης με αναβαθμισμένες υπολογιστικές δυνατότητες, συνιστά μία πολλά υποσχόμενη λύση. Για την ακρίβεια, πολλαπλά οφέλη ανακύπτουν από τη μείωση του απαιτούμενου εξοπλισμού σε κάθε σταθμό βάσης, όπως η μείωση των αναγκών κλιματισμού και, κατα συνέπεια, η μείωση της κατανάλωσης ισχύος. Ταυτόχρονα, η χρήση προσαρμοστικών μηχανισμών κατανομής των πόρων υπό τον έλεγχο της συγκεντρωτικής οντότητας μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των σταθμών βάσης, ιδιαίτερα σε συνθήκες μεταβλητού τηλεπικοινωνιακού φορτίου.

1.2.2 Ραγδαία αύξηση του ολικού κόστους ιδιοκτησίας του δικτύου ραδιοπρόσβασης

Το ολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost Of Ownership-TCO) των δικτύων κινητών επικοινωνιών περιλαμβάνει το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPital EXpenditure-CAPEX) και το λειτουργικό κόστος (Operating EXpenditure-OPEX). Το κεφαλαιουχικό κόστος σχετίζεται συνήθως με κόστη που αφορούν την κατασκευή της υποδομής του δικτύου, τα οποία ενδέχεται να εκτείνονται από τη σχεδίαση του δικτύου μέχρι την απόκτηση θέσεων εγκατάστασης των σταθμών βάσης, τον εξοπλισμό ραδιοσυχνότητας, τις άδειες του λογισμικού, τις μισθωμένες γραμμές, όπως επίσης και τους χώρους εγκατάστασης ολόκληρου του εξοπλισμού και τα μηχανήματα ψύξης αυτού. Το λειτουργικό κόστος καλύπτει το κόστος που απαιτεί η λειτουργία του δικτύου σε εικοσιτετράωρη κλίμακα, όπως η ενοικίαση των θέσεων των σταθμών βάσης, ο ηλεκτρισμός για την παροχή ισχύος στον εξοπλισμό, καθώς επίσης και ενέργειες συντήρησης ή αναβάθμισης που ενδέχεται να ανακύψουν κατά τη λειτουργία του δικτύου. Στο Σχ.1.3 παρουσιάζονται με κατανοητό τρόπο οι προαναφερθείσες συνιστώσες των δύο ειδών κόστους λειτουργίας του δικτύου ραδιοπρόσβασης.



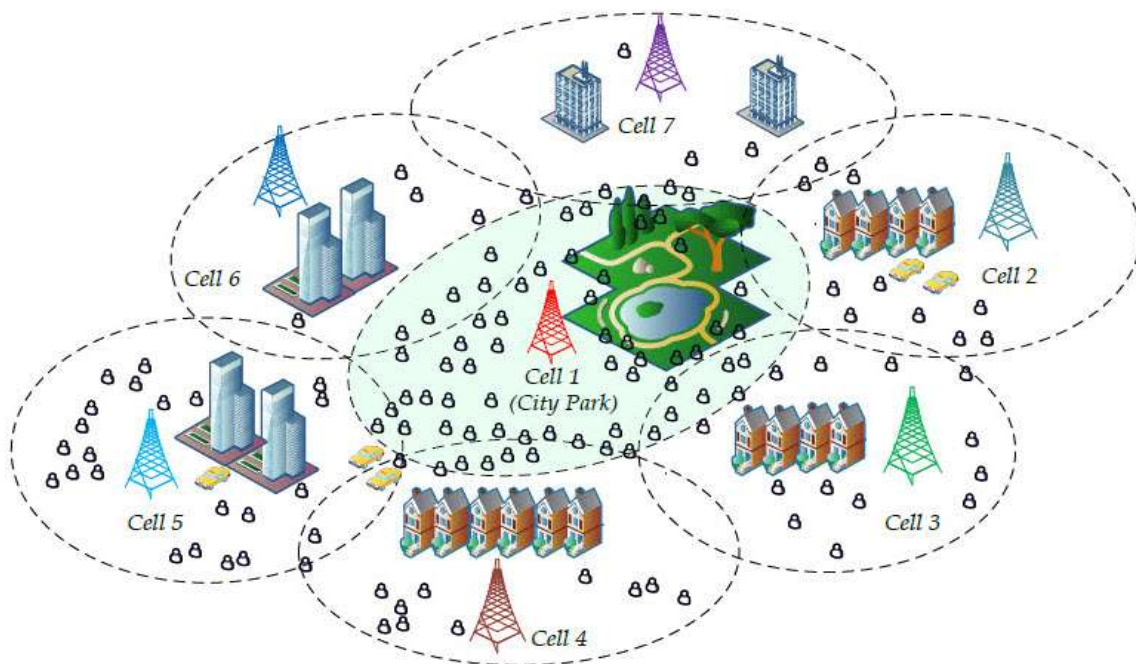
Σχήμα 1.3 Ανάλυση κόστους CAPEX/OPEX σε επίπεδο κυψέλης (cell site)

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι και τα δύο τμήματα του ολικού κόστους λειτουργίας των δικτύων αυξάνονται αισθητά, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ενεργών σταθμών βάσης προκειμένου οι πάροχοι να ανταποκριθούν στις αναδυόμενες νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX) αυξάνεται, αφού οι σταθμοί βάσης αποτελούν το ακριβότερο στοιχείο του δικτύου, ενώ η άνοδος του λειτουργικού κόστους (OPEX) οφείλεται στην αύξηση της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των επιπλέον σταθμών βάσης και στο αυξημένο κόστος μίσθωσης.

Η προφανής λύση για μείωση του συνολικού κόστους θα ήταν η μείωση του αριθμού των υφιστάμενων σταθμών βάσης, γεγονός που, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, ενδέχεται να υποβαθμίσει σημαντικά τα επίπεδα κάλυψης και χωρητικότητας του δικτύου. Άμεσο επακόλουθο της μείωσης του αριθμού των σταθμών βάσης για τους παρόχους μπορεί να θεωρηθεί η δραματική μείωση των εσόδων λόγω μείωσης του αριθμού των ενεργών πελατών εξαιτίας της αισθητά μειωμένης επίδοσης του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Ανακύπτει, επομένως, η ανάγκη αναζήτησης εκ μέρους των παρόχων κινητών δικτύων νέων αρχιτεκτονικών που θα εξασφαλίζουν τα αποδεκτά επίπεδα απόδοσης του δικτύου με όσο το δυνατό μικρότερο συνολικό κόστος λειτουργίας. Ενδεχομένως, η συγκεντρωτική αρχιτεκτονική του δικτύου ραδιοπρόσβασης θα μπορούσε να δώσει λύση στις προαναφερθείσες προκλήσεις, μειώνοντας δραστικά τον απαιτούμενο ενεργό εξοπλισμό στην πλευρά κάθε κυψέλης πραγματοποιώντας παράλληλα αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

1.3 Άνιση κατανομή τηλεπικοινωνιακού φορτίου

Οι ραγδαία αναδυόμενες ασύρματες υπηρεσίες και η έντονη κινητικότητα των χρηστών ενδέχεται να οδηγήσουν σε συγκέντρωση πολυάριθμων χρηστών σε μία κυψέλη ή γενικότερα εντός της εμβέλειας ενός σταθμού βάσης. Σε μία κυψέλη, λοιπόν, ενδέχεται να εμφανιστεί υψηλή κίνηση ή ισοδύναμα ζήτηση πόρων. Από την άλλη πλευρά, είναι ενδεχόμενο γειτονικές κυψέλες να εξυπηρετούν λίγους χρήστες με αρκετά μικρότερη ένταση αναπτυσσόμενης κίνησης. Επομένως, τα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της άνισης κατανομής φορτίου (*uneven load distribution*), όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχ.1.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.4 Άνιση κατανομή χρηστών μεταξύ γειτονικών κυψελών (Uneven user distribution)

Η άνιση κατανομή φορτίου είναι δυνατό να επηρεάσει την επίδοση του δικτύου κατά τον ακόλουθο τρόπο. Από τη μία πλευρά, λόγω των περιορισμένων φασματικών πόρων, που έχουν αποδοθεί σε κάθε κυψέλη, υπερφορτωμένες κυψέλες ενδέχεται να απορρίπτουν τις αιτήσεις σύνδεσης νέων χρηστών. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας αποκλεισμού χρηστών (*Call Blocking Probability-CBP*), την οποία ο πάροχος της υπηρεσίας(λειτουργός δικτύου-*Network Operator*) πρέπει να ελαχιστοποιήσει. Επιπλέον, εξαιτίας της υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης, η κυψέλη αυτή ενδέχεται να αδυνατεί να παράσχει τη συμφωνημένη ποιότητα υπηρεσίας (*Quality of Service-QoS*) στους ήδη συνδεδεμένους χρήστες. Από την άλλη πλευρά, γειτονικές κυψέλες ενδέχεται να υποχρησιμοποιούν τους δικούς τους πόρους όταν υπάρχει χαμηλή κίνηση σε αυτές, καιτοι διαθέτουν τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγαλύτερου αριθμού χρηστών.

Λύση στο προαναφερθέν πρόβλημα της άνισης κατανομής φορτίου σε σχέση με τους αποδοθέντες σε κάθε σταθμό βάσης πόρους, αποτελεί η κατανομή των διαθέσιμων πόρων σύμφωνα με την αναμενόμενη κατανομή χρηστών και άρα τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Δηλαδή, οι πόροι του δικτύου να κατανέμονται όσο το δυνατό πλησιέστερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν από τους εκάστοτε εμφανιζόμενους χρήστες του δικτύου. Αυτή είναι και η βασική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων που προτείνεται και θα περιγραφεί στη συνέχεια και συνιστά το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ουσιαστικά, πρόκειται για μία συγκεντρωτική αρχιτεκτονική του δικτύου, καθώς οι κύριες λειτουργίες και η ανάθεση των πόρων συντονίζονται από ένα αναβαθμισμένο σταθμό βάσης, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Η εκδοχή αυτή, λοιπόν, μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα ευεργετική στους παρόχους κινητών δικτύων μέσω της απλοποίησης του δικτύου ραδιοπρόσβασης και της μετακίνησης της ευφυΐας του συστήματος και του μεγαλύτερου μέρους του ενεργοβόρου εξοπλισμού στην κεντρική οντότητα. Αυτή, λοιπόν η κεντρική οντότητα, ο ενισχυμένος σταθμός βάσης (*superBS, sBS*) σε συνδυασμό με τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομής πόρων αποτελούν τον πυρήνα του προς μελέτη δικτύου, καθώς η λειτουργικότητα και κατά συνέπεια η υψηλή απόδοση του δικτύου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αυτά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ POISSON

2.1 Χρονικές σημειακές διαδικασίες-Ορισμός και ειδικές Κατηγορίες

2.1.1 Ορισμός σημειακών χρονικών σημειακών διαδικασιών

Αποφεύγοντας τον αυστηρά μαθηματικό ορισμό ο οποίος είναι αρκετά τεχνικός, μια σημειακή διαδικασία μπορεί να οριστεί ως μια τυχαία συλλογή από σημεία τα οποία περιλαμβάνονται σε ένα χώρο S . Στις περισσότερες εφαρμογές, κάθε σημείο μιας τέτοιας διαδικασίας αντιπροσωπεύει τη χρονική στιγμή ή/και τη θέση ενός γεγονότος. Στην παρούσα ενότητα, μελετώνται οι χρονικές σημειακές διαδικασίες, οι οποίες αποτελούν τη συνηθέστερη περίπτωση μονοδιάστατων σημειακών διαδικασιών. Στόχος είναι να αναδειχθεί η διαφορετικότητα αλλά και η απλότητα της χρονικής διαδικασίας Poisson σε σχέση με τις άλλες συνήθεις χρονικές σημειακές διαδικασίες. Σε επόμενη ενότητα, το χρονικό αυτό μοντέλο της διαδικασίας Poisson θα γενικευθεί, προκειμένου να συμπεριληφθούν σε αυτό και άλλες διαστάσεις που θα προσφέρουν τη δυνατότητα να διατυπωθούν μαθηματικά μοντέλα για χωροχρονικά γεγονότα.

Ορισμός 2.1: Μία κανονική χρονική σημειακή διαδικασία ορίζεται κατά τρόπο ώστε η πιθανότητα ώστε ένα γεγονός να πραγματοποιηθεί μέσα στο χρονικό παράθυρο $[t, t + \Delta t)$ να περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Pr(\text{να συμβεί ένα γεγονός στο διάστημα } [t, t + \Delta t) \mid N_t, \mathbf{w}_t) = \mu(t; N_t, \mathbf{w}_t)\Delta t + o(t, \Delta t) \quad (2.1)$$

$$\Pr(\text{να συμβούν δύο ή περισσότερα γεγονότα στο διάστημα } [t, t + \Delta t) \mid N_t, \mathbf{w}_t) = o(t, \Delta t) \quad (2.2)$$

όπου

N_t : το πλήθος των γεγονότων που συνέβησαν πριν από τη χρονική στιγμή t (θεωρείται ότι η παρατήρηση των γεγονότων εκκίνησε την χρονική στιγμή $t = 0$)

\mathbf{w}_t : το διάνυσμα των χρονικών στιγμών παρατήρησης των N_t αυτών γεγονότων, δηλαδή το διάνυσμα $[w_1, \dots, w_{N_t}]$

$o(t, \Delta t)$: μία συνάρτηση για την οποία ισχύει $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(t, \Delta t)}{\Delta t} = 0$

Οι ανωτέρω εξισώσεις εκφράζουν τα εξής:

- Μόνο ένα γεγονός μπορεί να συμβεί σε ένα επαρκώς μικρό χρονικό διάστημα
- Η πιθανότητα ένα γεγονός να συμβεί σε ένα αρκετά μικρό διάστημα είναι ανάλογη της διάρκειας του διαστήματος αυτού

Από τον προηγούμενο ορισμό είναι φανερό ότι η υπό συνθήκη πιθανότητα ενός γεγονότος να πραγματοποιηθεί σε ένα αρκετά μικρό χρονικό διάστημα ισούται με το γινόμενο της διάρκειας

του διαστήματος και της μη αρνητικής συνάρτησης $\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t)$ που ονομάζεται ένταση της σημειακής διαδικασίας και μετρείται σε γεγονότα/sec .

Επισημαίνεται ότι με βάση τον Ορισμό 2.1, η ένταση μιας σημειακής διαδικασίας εξαρτάται:

- Από το χρόνο
- Το ιστορικό της σημειακής διαδικασίας

2.1.2 Ειδικές κατηγορίες κανονικών σημειακών διαδικασιών

i. Διαδικασία Poisson:

Αποτελεί την απλούστερη σημειακή διαδικασία. Η έντασή της δεν εξαρτάται από το ιστορικό της διαδικασίας, δηλαδή ισχύει $\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t) = \lambda(t)$. Η ποσότητα $\lambda(t)$ μπορεί να είναι χρονικά σταθερή (ομογενής διαδικασία Poisson), μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο (μη ομογενής διαδικασία Poisson) ή μπορεί να αποτελεί και η ίδια στοχαστική διαδικασία (διπλά στοχαστική διαδικασία Poisson). Ανεξάρτητα από το ποια από τις ανωτέρω περιπτώσεις εξετάζεται, η πραγματοποίηση ενός γεγονότος δεν εξαρτάται στατιστικά από τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες συνέβησαν προηγούμενα γεγονότα, δηλαδή η διαδικασία Poisson δεν έχει μνήμη.

ii. Διαδικασίες μηδενικής μνήμης:

Μια σημειακή διαδικασία είναι μηδενικής μνήμης αν για κάθε $N_t \geq 1$, η ένταση $\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t)$ είναι ανεξάρτητη του διανύσματος \mathbf{w}_t . Είναι φανερό ότι η διαδικασία Poisson αποτελεί ειδική περίπτωση διαδικασίας μηδενικής μνήμης.

iii. Διαδικασίες m-μνήμης:

Μια σημειακή διαδικασία είναι m-μνήμης ($m \geq 1$) αν για κάθε $N_t \geq m$, η ένταση $\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t)$ εξαρτάται αποκλειστικά από τα t, N_t και τα m πλέον πρόσφατα γεγονότα $w_{N_t-m+1}, \dots, w_{N_t-1}, w_{N_t}$ και είναι ανεξάρτητη από τα $N_t - m$ προγενέστερα γεγονότα.

Ειδική υποκατηγορία των διαδικασιών m-μνήμης αποτελούν οι διαδικασίες με μνήμη 1. Για τις διαδικασίες αυτές, με βάση τα προηγούμενα, ισχύει ότι $\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t) = \mu(t; N_t, \mathbf{w}_t)$. Συχνά, γίνεται η υπόθεση ότι η ένταση της διαδικασίας δεν εξαρτάται από τα t, N_t αλλά μόνο από τη διαφορά αυτών $t - w_t$, δηλαδή $\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t) = \mu(t; N_t, t - w_t)$. Οι διαδικασίες αυτές ονομάζονται ομογενείς σημειακές διαδικασίες μνήμης 1. Το ακόλουθο θεώρημα καθιστά τις συγκεκριμένες διαδικασίες ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες και χρήσιμες .

Θεώρημα 2.1: Μία σημειακή διαδικασία είναι ομογενής σημειακή διαδικασία μνήμης 1 μόνο εφόσον τα διαστήματα μεταξύ διαδοχικών γεγονότων αποτελούν στατιστικά ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Μία ειδική αλλά ευρέως χρησιμοποιούμενη υποκατηγορία των ομογενών σημειακών διαδικασιών μνήμης 1 συγκροτούν οι

ανανεωτικές διαδικασίες. Συγκεκριμένα, μία σημειακή κατανομή ονομάζεται τροποποιημένη ανανεωτική αν έχει ένταση της μορφής

$$\mu(t; N_t, \mathbf{w}_t) = h(t - w_t) \quad (2.3)$$

Ονομάζεται συνήθης ανανεωτική μόνο εφόσον ισχύει επιπλέον ότι

$$\mu(t; N_t = 0) = h(t) . \quad (2.4)$$

2.2 Η ομογενής και μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson

Με βάση την προηγούμενη ενότητα, η χρονική διαδικασία Poisson αποτελεί τη μοναδική κανονική χρονική σημειακή διαδικασία στην οποία το παρόν δεν σχετίζεται κατά κανένα τρόπο με το παρελθόν. Η ιδιότητα της αυτή, γνωστή και ως έλλειψη μνήμης, αποτελεί το λόγο επιλογής της για τους σκοπούς της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αφού η άφιξη νέων χρηστών στο προς σχεδίαση δίκτυο είναι εύλογο να μην εξαρτάται από τις αφίξεις προηγούμενων χρηστών. Με την επιλογή αυτή, λοιπόν, εξασφαλίζεται τόσο η τυχαιότητα όσο και η ανεξαρτησία στην εμφάνιση χρηστών κατά το διάστημα παρατήρησης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

Στην παρούσα ενότητα, ορίζεται με αυστηρό μαθηματικό τρόπο η χρονική διαδικασία Poisson και διατυπώνονται ορισμένες από τις βασικές ιδιότητές της. Με στόχο την καλύτερη κατανόηση της ανάλυσης αναπτύσσεται πρώτα το ομογενές μοντέλο της και, στη συνέχεια, το μη ομογενές. Αρχικά, ορίζεται η έννοια της διαδικασίας καταμέτρησης, η οποία αποτελεί ένα εναλλακτικό τρόπο να προσεγγισθούν οι σημειακές διαδικασίες.

Ορισμός 2.2: Μία χρονική διαδικασία καταμέτρησης είναι μία στοχαστική διαδικασία $\{N(t), t \geq 0\}$ με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $N(t) \geq 0$
2. Η $N(t)$ είναι μη φθίνουσα και λαμβάνει ακέραιες τιμές

Για $a < b$ η διαφορά $N(b) - N(a)$ δηλώνει το πλήθος των γεγονότων που έχουν συμβεί στο διάστημα $(a, b]$.

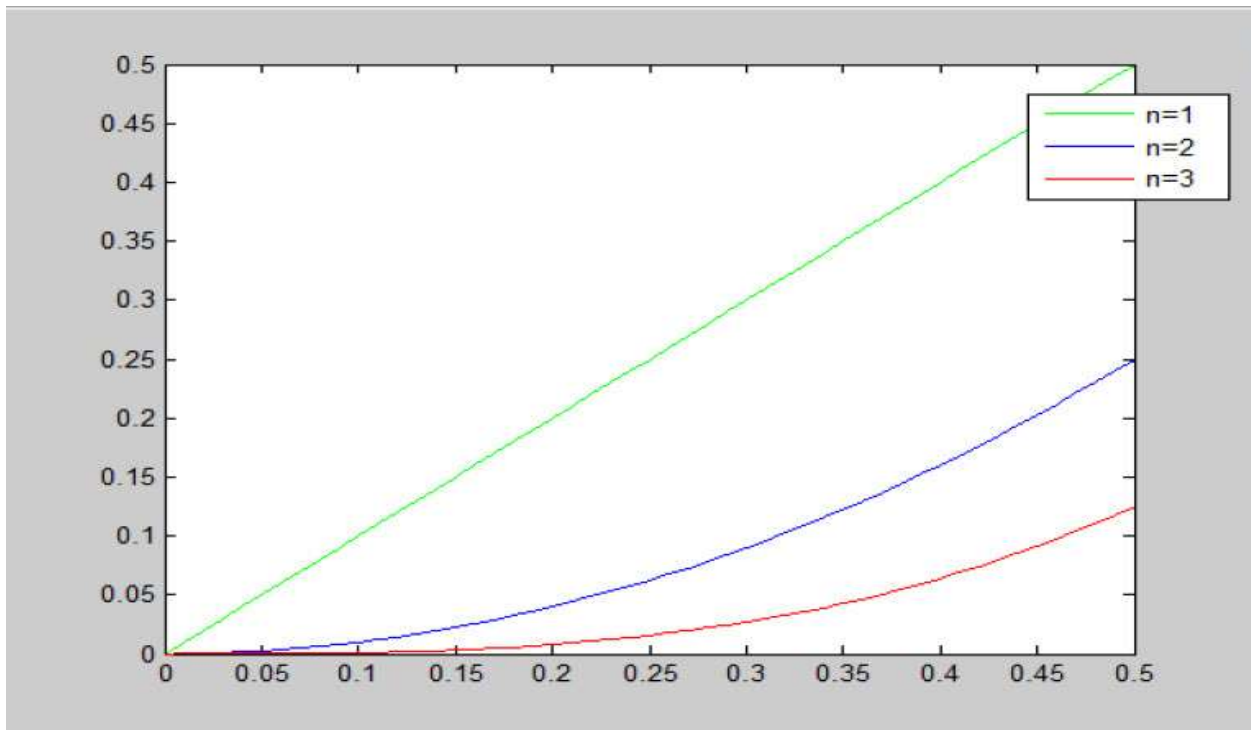
Αν και ήδη έγινε αναφορά στον Ορισμό 2.1, ακολούθως ορίζεται τότε μια συνάρτηση είναι $o(h)$ και ορισμένες σχετικές ιδιότητες.

Ορισμός 2.3: Μια συνάρτηση $f(x)$ είναι $o(h)$ αν $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h)}{h} = 0$.

Σύμφωνα με τον Ορισμό 2.3, για να είναι μια συνάρτηση $o(h)$ πρέπει να τείνει προς το μηδέν ταχύτερα από τη γραμμική συνάρτηση $g(h) = h$. Δηλαδή, η συνάρτηση $f(h)$ πρέπει να είναι μικρότερη από το h για μικρές τιμές του h .

Τα ανωτέρω καθίστανται κατανοητά μέσω του απλού παραδείγματος καθώς και του Σχ. 2.1 που το συνοδεύει.

Η συνάρτηση $f(x) = x^n, n > 1$, είναι $o(h)$ καθώς $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^n}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} h^{n-1} = 0$. Αντιθέτως, όταν $n = 1$ η $f(x)$ δεν είναι $o(h)$.



Σχήμα 2.1 Η συνάρτηση $f(x) = x^n$ τείνει προς το μηδέν καθώς αυξάνεται το n

Θεώρημα 2.2: Για συναρτήσεις που είναι $o(h)$, ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

1. Αν οι συναρτήσεις $f(x)$ και $g(x)$ είναι $o(h)$, τότε και η συνάρτηση $f(x) + g(x)$ είναι $o(h)$.
2. Αν η συνάρτηση $f(x)$ είναι $o(h)$ και c σταθερά, τότε και η συνάρτηση $cf(x)$ είναι $o(h)$.

Ορισμός 2.4¹: Η ομογενής χρονική διαδικασία Poisson $\{X(t), t \geq 0\}$ με ένταση τη θετική ποσότητα λ αποτελεί μια χρονική διαδικασία καταμέτρησης με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $X(0) = 0$
2. Η διαδικασία έχει ανεξάρτητες αυξήσεις.
3. $\Pr[X(t+h) - X(t) = 1] = \lambda h + o(h)$ (2.5)
4. $\Pr[X(t+h) - X(t) \geq 2] = o(h)$ (2.6)

όπου $h > 0$ ένα αυθαίρετα μικρό χρονικό διάστημα

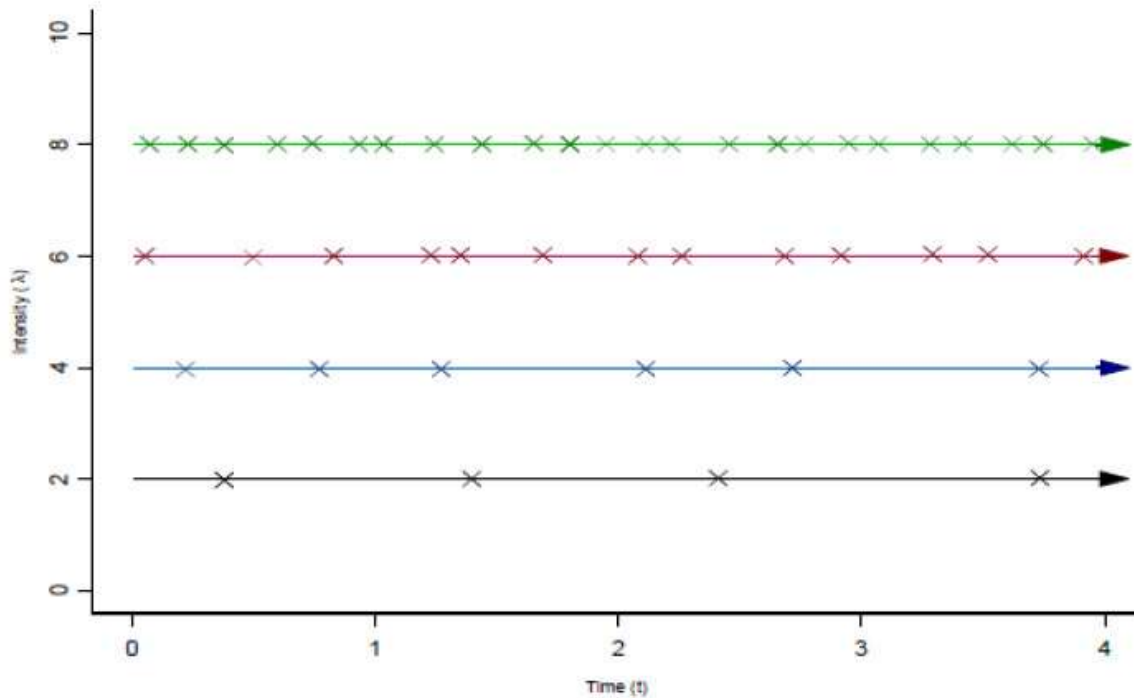
Ορισμός 2.5: Η ομογενής χρονική διαδικασία Poisson $\{X(t), t \geq 0\}$ με ένταση τη θετική ποσότητα λ είναι μια χρονική διαδικασία καταμέτρησης με τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες:

1. $X(0) = 0$
2. Η διαδικασία έχει ανεξάρτητες αυξήσεις.
3. Το πλήθος των γεγονότων σε ένα διάστημα $(a, b]$ ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή $\lambda(b - a)$ δηλαδή:

$$\Pr[X(b) - X(a) = n] = \frac{[\lambda(b - a)]^n e^{-\lambda(b-a)}}{n!} \quad (2.7)$$

για $n = 0, 1, 2, \dots$, όπου $0 < a \leq b$ και $\lambda > 0$

Στο Σχ. 2.2 φαίνονται τυχαία στιγμιότυπα για 4 ομογενείς χρονικές διαδικασίες Poisson με $\lambda = 2, 4, 6, 8$.



Σχήμα 2.2 Τυχαία στιγμιότυπα για 4 χρονικές διαδικασίες διαφορετικής έντασης

Θεώρημα 2.3: Οι ορισμοί 2.4 και 2.5 είναι ισοδύναμοι.

Ορισμός 2.6: Έστω $T_0 = 0$ και ότι T_n είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ του $(n - 1)^{ου}$ και του $n^{ου}$ γεγονότος, όπου $n \geq 1$ ακέραιος. Τότε, το T_n ονομάζεται $n^{ος}$ χρόνος μεταξύ διαδοχικών γεγονότων.

Θεώρημα 2.4: Ας υποθεθεί ότι $\{T_n, n = 1, 2, \dots\}$ είναι οι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών γεγονότων μιας ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson. Τότε, οι $\{T_n, n = 1, 2, \dots\}$ αποτελούν ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέση τιμή $1/\lambda$.

Θεώρημα 2.5: Ας υποθεθεί ότι μια χρονική διαδικασία καταμέτρησης $N(t)$ έχει χρόνους μεταξύ διαδοχικών γεγονότων $\{T_n, n = 1, 2, \dots\}$ που αποτελούν ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέση τιμή $1/\lambda$ και $N(0) = 0$. Τότε, η $N(t)$ είναι ομογενής χρονική διαδικασία Poisson.

Θεώρημα 2.6: Με δεδομένο ότι n γεγονότα μιας ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson συνέβησαν στο διάστημα $(0, t]$, η υπό συνθήκη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των χρονικών στιγμών των γεγονότων W_1, W_2, \dots, W_n δίδεται από τη σχέση:

$$f_{W_1, W_2, \dots, W_n}(w_1, w_2, \dots, w_n | X(t) = n) = \frac{n!}{t^n} \quad (2.8)$$

για $0 < w_1 < w_2 < \dots < w_n < t$

Κατά τον ορισμό της ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson θεωρήθηκε ότι η ένταση $\lambda(t)$ της διαδικασίας είναι σταθερή. Η υπόθεση αυτή, όμως, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι πολύ περιοριστική. Για παράδειγμα, ας υποθεθεί ότι διατυπώνονται μαθηματικά οι αφίξεις θεατών σε ένα αθλητικό αγώνα με μία ομογενή χρονική κατανομή Poisson έντασης $\lambda(t)$. Οι θεατές αυτοί εύλογα μπορούν να θεωρηθούν και χρήστες του κυψελωτού τηλεπικοινωνιακού δικτύου που καλύπτει το γεγονός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θεωρείται ότι η άφιξη θεατών μία ώρα πριν την έναρξη του να είναι το ίδιο πιθανή με την άφιξη χρηστών κατά την τελευταία ώρα πριν την λήξη του αθλητικού γεγονότος. Είναι φανερό ότι μια τέτοια θεώρηση μπορεί να είναι τελείως λανθασμένη. Πράγματι, ο κύριος όγκος των θεατών τείνει να εμφανίζεται πριν την έναρξη του αγώνα, ενώ κατά τη διάρκεια του μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό "αργοπορημένων" νέων θεατών ενδέχεται να παρουσιαστεί. Αυτό μεταφράζεται σε διαφορετική τιμή της έντασης της χρονικής διαδικασίας Poisson πριν και κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια θα παρουσιασθεί η μη ομογενής εκδοχή της χρονικής διαδικασίας Poisson.

Ορισμός 2.7: Η μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson $\{X(t), t \geq 0\}$ με μη αρνητική ένταση $\lambda(t)$ είναι μια χρονική διαδικασία καταμέτρησης με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $X(0) = 0$
2. Η διαδικασία έχει ανεξάρτητες αυξήσεις.
3. $\Pr[X(t+h) - X(t) = 1] = \lambda(t)h + o(h)$ (2.9)

4. $\Pr[X(t+h) - X(t) \geq 2] = o(h)$ (2.10)

όπου $h > 0$ ένα αυθαίρετα μικρό χρονικό διάστημα

Ορισμός 2.8: Η μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson $\{X(t), t \geq 0\}$ με μη αρνητική ένταση $\lambda(t)$ είναι μια χρονική διαδικασία καταμέτρησης με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $X(0) = 0$
2. Η διαδικασία έχει ανεξάρτητες αυξήσεις.

3. Το πλήθος των γεγονότων σε ένα διάστημα $(a, b]$ ακολουθεί ως τυχαία μεταβολή την κατανομή Poisson με μέση τιμή $\int_a^b \lambda(t) dt$ δηλαδή:

$$\Pr[X(b) - X(a) = n] = \frac{\left(\int_a^b \lambda(t) dt\right)^n e^{-\int_a^b \lambda(t) dt}}{n!} \quad (2.11)$$

για $0 < a \leq b, n = 0, 1, 2, \dots$

Θεώρημα 2.7: Οι ορισμοί 2.7 και 2.8 είναι ισοδύναμοι.

Θεώρημα 2.8: Έστω ότι $X_1(t), X_2(t)$ είναι ανεξάρτητες μη ομογενείς χρονικές διαδικασίες Poisson με εντάσεις $\lambda_1(t), \lambda_2(t)$, αντίστοιχα. Τότε, η $X_1(t) + X_2(t)$ είναι επίσης μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson με ένταση $\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t)$.

Το ακόλουθο θεώρημα είναι γενίκευση του θεωρήματος 2.8 .

Θεώρημα 2.9: Έστω ότι $X_1(t), X_2(t), \dots, X_m(t)$ είναι ανεξάρτητες μη ομογενείς χρονικές διαδικασίες Poisson με εντάσεις $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_m(t)$, αντίστοιχα. Τότε, η

$$X(t) = \sum_{j=1}^m X_j(t)$$

είναι επίσης μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson με ένταση

$$\lambda(t) = \sum_{j=1}^m \lambda_j(t)$$

Θεώρημα 2.10: Έστω ότι $X(t)$ είναι μια μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson με ένταση $\lambda(t)$ η οποία παράγει δύο διαφορετικούς τύπους γεγονότων. Ας υποθεθεί ότι τα γεγονότα του πρώτου τύπου συνθέτουν τη διαδικασία καταμέτρησης $N_1(t)$ ενώ τα γεγονότα του δεύτερου τύπου συνθέτουν τη διαδικασία καταμέτρησης $N_2(t)$. Έστω, επίσης, ότι ένα γεγονός συμβαίνει με πιθανότητα p να είναι του πρώτου τύπου και με πιθανότητα $1 - p$ να είναι του δεύτερου τύπου. Τότε:

1. Η $N_1(t)$ είναι μια μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson με ένταση $p\lambda(t)$.
2. Η $N_2(t)$ είναι μια μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson με ένταση $(1 - p)\lambda(t)$.
3. Οι $N_1(t)$ και $N_2(t)$ είναι ανεξάρτητες.

Θεώρημα 2.11: Με δεδομένο ότι n γεγονότα μιας μη ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson συνέβησαν στο διάστημα $(a, b]$ η υπό συνθήκη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των χρονικών στιγμών των γεγονότων W_1, W_2, \dots, W_n δίδεται από τη σχέση:

$$f_{W_1, W_2, \dots, W_n}(w_1, w_2, \dots, w_n | X(a) - X(b) = n) = \frac{n! \prod_{i=1}^n \lambda(w_i)}{\left(\int_a^b \lambda(t) dt\right)^n} \quad (2.12)$$

για $a < w_1 < w_2 < \dots < w_n < b$.

2.3 Η χωρική σημειακή διαδικασία Poisson

Στην ενότητα αυτή, η χρονική διαδικασία Poisson, στην οποία έγινε εκτενής αναφορά προηγουμένως, γενικεύεται σε χώρους περισσότερων διαστάσεων. Καίτοι η ανάλυση που θα ακολουθήσει για την επονομαζόμενη χωρική διαδικασία Poisson είναι γενική, η θεμελίωση των χωροχρονικών διαδικασιών Poisson είναι άμεση αφού μπορεί να δοθεί χρονική υπόσταση σε μία από τις διαστάσεις της χωρικής διαδικασίας Poisson χωρίς απόκλιση από τη γενικότητα των ορισμών. Σε αντίθεση με την προηγούμενη ενότητα, στην παρούσα ενότητα εισάγεται απευθείας το μη ομογενές μοντέλο της χωρικής διαδικασίας Poisson. Γίνεται κατανοητό ότι το ομογενές μοντέλο αποτελεί άμεση επέκταση του μη ομογενούς μοντέλου.

Ορισμός 2.9: Μία χωρική διαδικασία καταμέτρησης στο χώρο $D \subseteq R^d$ αποτελεί στοχαστική διαδικασία $N(S)$ με S οποιοδήποτε φραγμένο υποσύνολο του D με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $N(S) \geq 0$
2. Η $N(S)$ λαμβάνει ακέραιες τιμές και ισχύει $N(A) \leq N(B)$ όταν $A \subseteq B$,
Για $A \subseteq B$, η διαφορά $N(B) - N(A)$ δηλώνει το πλήθος των γεγονότων στο σύνολο $B - A$.

Ορισμός 2.10: Η χωρική μη ομογενής διαδικασία Poisson $\{N(S)$ με S οποιοδήποτε υποσύνολο του $D\}$ με μη αρνητική ένταση $\lambda(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in D$, αποτελεί χωρική διαδικασία καταμέτρησης στο χώρο $D \subseteq R^d$ με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $X(\emptyset) = 0$
2. Το πλήθος των γεγονότων σε οποιαδήποτε περιοχή είναι ανεξάρτητο από το πλήθος των γεγονότων σε κάθε άλλη ξένη προς αυτήν περιοχή.
3. Για κάθε $\mathbf{x} \in D$ ισχύουν τα εξής:
 - $\Pr(X(N(d\mathbf{x})) = 1) = \int_{d\mathbf{x}} \lambda(\mathbf{y}) d\mathbf{y} + o(\int_{d\mathbf{x}} \lambda(\mathbf{y}) d\mathbf{y})$ (2.13)
 - $\Pr(X(N(d\mathbf{x})) \geq 2) = o(\int_{d\mathbf{x}} \lambda(\mathbf{y}) d\mathbf{y})$ (2.14)

Ορισμός 2.11: Η χωρική μη ομογενής διαδικασία Poisson $\{N(S)$ με $S \subseteq D$ οποιοδήποτε φραγμένο σύνολο} με μη αρνητική ένταση $\lambda(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in D$, αποτελεί χωρική διαδικασία καταμέτρησης στο χώρο $D \subseteq R^d$ με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $X(\emptyset) = 0$
2. Το πλήθος των γεγονότων σε οποιαδήποτε περιοχή είναι ανεξάρτητο από το πλήθος των γεγονότων σε κάθε άλλη ξένη προς αυτήν περιοχή.
1. Το πλήθος των γεγονότων σε οποιοδήποτε σύνολο S ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή $\int_S \lambda(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$ δηλαδή:

$$\Pr[X(S) = n] = \frac{(\int_S \lambda(\mathbf{x}) d\mathbf{x})^n e^{-\int_S \lambda(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.15)$$

Θεώρημα 2.12: Οι ορισμοί 2.10 και 2.11 είναι ισοδύναμοι.

Θεώρημα 2.13: Έστω $X_1(S)$ και $X_2(S)$ ανεξάρτητες χωρικές μη ομογενείς διαδικασίες Poisson στο χώρο $D \subseteq R^d$ με εντάσεις $\lambda_1(x)$ και $\lambda_2(x)$, αντίστοιχα. Τότε, η $X(S) = X_1(S) + X_2(S)$ είναι επίσης μη ομογενής χωρική διαδικασία Poisson στο χώρο $D \subseteq R^d$ με ένταση $\lambda(x) = \lambda_1(x) + \lambda_2(x)$.

Το ακόλουθο θεώρημα είναι γενίκευση του θεωρήματος 2.13.

Θεώρημα 2.14: Έστω ότι $X_1(S), X_2(S), \dots, X_m(S)$ είναι ανεξάρτητες μη ομογενείς χωρικές διαδικασίες Poisson στο χώρο $D \subseteq R^d$ με εντάσεις $\lambda_1(x), \lambda_2(x), \dots, \lambda_m(x)$, αντίστοιχα. Τότε, η

$$X(S) = \sum_{j=1}^m X_j(S)$$

είναι επίσης μη ομογενής χωρική διαδικασία Poisson με ένταση

$$\lambda(x) = \sum_{j=1}^m \lambda_j(x)$$

Θεώρημα 2.15: Έστω $X(S)$ μια χωρική μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson στο χώρο $D \subseteq R^d$ με ένταση $\lambda(x)$ η οποία παράγει δύο τύπους γεγονότων. Ας υποθεθεί ότι τα γεγονότα του πρώτου τύπου συνθέτουν τη διαδικασία καταμέτρησης $N_1(S)$ ενώ τα γεγονότα του δεύτερου τύπου συνθέτουν τη διαδικασία καταμέτρησης $N_2(S)$. Έστω, επίσης, ότι ένα γεγονός συμβαίνει με πιθανότητα p να είναι του πρώτου τύπου και με πιθανότητα $1 - p$ να είναι του δεύτερου τύπου. Τότε:

1. Η $N_1(S)$ είναι μια χωρική μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson στο χώρο $D \subseteq R^d$ με ένταση $\lambda(x)$.
2. Η $N_2(S)$ είναι μια χωρική μη ομογενής χρονική διαδικασία Poisson στο χώρο $D \subseteq R^d$ με ένταση $(1 - p)\lambda(x)$.
3. Οι $N_1(S)$ και $N_2(S)$ είναι ανεξάρτητες.

Θεώρημα 2.16: Με δεδομένο ότι n γεγονότα μιας μη ομογενούς χωρικής διαδικασίας Poisson ορισμένης στο χώρο $D \subseteq R^d$ συνέβησαν στη φραγμένη περιοχή $S \subseteq D$ η υπό συνθήκη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των χρονικών στιγμών των γεγονότων $W_1, W_2, \dots, W_n \in S$ δίνεται από τη σχέση

$$f_{W_1, W_2, \dots, W_n}(w_1, w_2, \dots, w_n | N(S) = n) = \frac{n! \prod_{i=1}^n \lambda(w_i)}{(\int_S \lambda(x) dx)^n} \quad (2.16)$$

2.4 Επιλογή χωροχρονικού μοντέλου άφιξης χρηστών

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τη μαθηματική περιγραφή της άφιξης χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, κρίνεται σκόπιμο να υιοθετηθεί ένα πολυδιάστατο μοντέλο. Συγκεκριμένα, η εμφάνιση κάποιου χρήστη είναι επιθυμητό να συνοδεύεται από τη γνώση τόσο του χρόνου άφιξης όσο και της θέσης του. Προσδίδοντας, λοιπόν, χρονική υπόσταση σε μία από τις διαστάσεις της χωρικής διαδικασίας Poisson, προκύπτει το χρησιμοποιούμενο χωροχρονικό μοντέλο άφιξης χρηστών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η επιλογή της διαδικασίας Poisson εξασφαλίζει την ανεξαρτησία μεταξύ των καταμετρούμενων γεγονότων. Πράγματι, για κάθε χρήστη αγνοείται η ύπαρξη ήδη εμφανισθέντων χρηστών στο δίκτυο, οπότε η εμφάνισή του δεν εξαρτάται από προηγούμενες αφίξεις. Επομένως, η άφιξη χρηστών θα ακολουθεί μια χωροχρονική διαδικασία Poisson με διαστάσεις το χρόνο t και τις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y με ένταση $\lambda(t, x, y)$ ή ισοδύναμα $\lambda(x)$, $x = [t \ x \ y]$, όπου x είναι το διάνυσμα των διαστάσεων του χώρου S .

Η ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson επιλέγεται να αποτελείται από δύο συνιστώσες, μία χρονική $\lambda_t(t)$ και μία χωρική $\lambda_{xy}(x, y)$. Έτσι, απεμπλέκεται η χρονική από τη χωρική συμπεριφορά των χρηστών. Δηλαδή ο χρόνος εμφάνισης ενός χρήστη δεν σχετίζεται με τη θέση του, η οποία κατά κύριο λόγο προσδιορίζεται από τα τοπολογικά χαρακτηριστικά του καλυπτόμενου από το προς μελέτη δίκτυο χώρου. Ενδεχομένως, οι θέσεις των χρηστών να είναι προκαθορισμένες, όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις αθλητικών γεγονότων. Ακόμη, ενδέχεται σε κάποιες περιοχές του χώρου να εμποδίζεται η εμφάνιση χρηστών από φυσικά αίτια (ύπαρξη λίμνης σε ένα πάρκο) ή τεχνητά αίτια (αποκλεισμός μιας χωρικής ζώνης εξαιτίας έργων). Επομένως, η ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson που περιγράφει την άφιξη χρηστών σε κάποιο ad hoc τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μπορεί να γραφεί ως εξής

$$\lambda(t, x, y) = \lambda_t(t) \cdot \lambda_{xy}(x, y) \quad (2.17)$$

Ουσιαστικά πρόκειται για συνάρτηση χωριζόμενων μεταβλητών της μορφής $Z = X \cdot Y$, ώστε να διαχωριστεί η χρονική από τη χωρική συμπεριφορά των χρηστών.

Από την άλλη πλευρά, ο χρόνος άφιξης είναι πιθανό να εξαρτάται από το είδος της εκδήλωσης που πρόκειται να λάβει χώρα και για την οποία σχεδιάζεται το ad hoc τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Για παράδειγμα, σε ένα αθλητικό αγώνα, συνέδριο ή συναυλία, το κοινό, στο οποίο περιλαμβάνονται οι δυνητικοί χρήστες του δικτύου, τείνει να εμφανίζεται συσσωρευμένα πριν την έναρξη του γεγονότος, με ένα μικρό ποσοστό να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του. Αυτή η τάση εμφάνισης μεταφράζεται σε διαφορετική τιμή της έντασης της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson πριν και κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης. Ειδικότερα, κατά την αθρόα προσέλευση χρηστών πριν την έναρξη του γεγονότος, η ένταση λαμβάνει μεγάλες τιμές οδηγώντας σε πολύ μικρά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών αφίξεων (*Interarrival Times*). Αντίθετα, κατά τη διάρκεια ενός αγώνα, για παράδειγμα, όπου εμφανίζονται λίγοι νέοι θεατές, η διαδικασία Poisson χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερος χαμηλή ένταση και μεγάλα διαστήματα μεταξύ διαδοχικών αφίξεων.

Συνοψίζοντας, τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά της εμφάνισης χρηστών στο εκάστοτε προς σχεδίαση δίκτυο περιγράφονται πλήρως από τις δύο ανεξάρτητες συνιστώσες της έντασης της διαδικασίας Poisson, τη χωρική και τη χρονική. Στην ουσία πρόκειται για δύο ανεξάρτητες σημειακές διαδικασίες Poisson, μία μονοδιάστατη χρονική και μία δισδιάστατη χωρική. Αυτές, συντιθέμενες, όπως υποδεικνύει η σχέση (2.17), παρέχουν στο διαχειριστή του δικτύου (*Network Operator*) την πλήρη γνώση ως προς το προφίλ εμφάνισης χρηστών. Ειδικότερα, όταν απαιτείται η μελέτη της χρονικής συμπεριφοράς των χρηστών θα χρησιμοποιείται η χρονική εκδοχή της πραγματικής χωροχρονικής διαδικασίας Poisson $\bar{\lambda}^{xy}(t)$, η οποία δεν έχει χωρικές διαστάσεις. Η χρονική εκδοχή αυτή προκύπτει ολοκληρώνοντας την ένταση $\lambda(t, x, y)$ ως προς τις χωρικές διαστάσεις x, y , δηλαδή

$$\bar{\lambda}^{xy}(t) = \int_0^a \int_0^b \lambda(t, x, y) dy dx = \lambda_t(t) \cdot \int_0^a \int_0^b \lambda_{xy}(x, y) dy dx = \lambda_t(t) \cdot E_{xy} \quad (2.18)$$

όπου η χωρική επίδραση έχει συμπεριληφθεί κατά μέση τιμή σύμφωνα με τον Ορισμό 2.11 στον παράγοντα

$$E_{xy} = \int_0^a \int_0^b \lambda_{xy}(x, y) dy dx \quad (2.19)$$

Από την άλλη πλευρά, ως εργαλείο για την κατανόηση της χωρικής υπόστασης της διαδικασίας αφίξεων, δηλαδή πού αναμένεται να εμφανιστούν περισσότεροι χρήστες, επιλέγεται αντίστοιχα η χωρική εκδοχή της πραγματικής χωροχρονικής διαδικασίας Poisson $\bar{\lambda}^t(x, y)$, η οποία δεν έχει χρονική συνιστώσα. Η προαναφερθείσα χωρική εκδοχή προκύπτει ολοκληρώνοντας την ένταση $\lambda(t, x, y)$ ως προς τη χρονική διάσταση t , δηλαδή

$$\bar{\lambda}^t(x, y) = \int_0^c \lambda(t, x, y) dt = \lambda_{xy}(x, y) \cdot \int_0^c \lambda_t(t) dt = \lambda_{xy}(x, y) \cdot E_t \quad (2.20)$$

όπου η χρονική επίδραση έχει συμπεριληφθεί κατά μέση τιμή σύμφωνα με τον Ορισμό 2.11 στον παράγοντα

$$E_t = \int_0^c \lambda_t(t) dt \quad (2.21).$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΟΥ

3.1 Διατύπωση του προβλήματος

Έστω ο καρτεσιανός χώρος $[0, a] \times [0, b]$, ο οποίος θα αναφέρεται στη συνέχεια ως χώρος S . Κατά το χρονικό διάστημα $[0, c]$, στο χώρο αυτό αναμένεται να εμφανιστούν τηλεπικοινωνιακοί κόμβοι ακολουθώντας μια χωροχρονική διαδικασία Poisson με διαστάσεις το χρόνο t καθώς και τις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y . Έστω ότι η πολυδιάστατη αυτή διαδικασία Poisson χαρακτηρίζεται από ένταση $\lambda(t, x, y)$ με $t \in [0, c]$, $x \in [0, a]$, $y \in [0, b]$, όπως ήδη περιγράφηκε στην υποενότητα 2.4. Η εμβέλεια των κόμβων που θα εμφανισθούν σταδιακά είναι R .

Στο χώρο S θα εγκατασταθούν αρχικά M κόμβοι εμβέλειας R στις θέσεις p_i με $1 \leq i \leq M$. Επειδή οι M αυτοί ισχυροί κόμβοι έχουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία του προς σχεδίαση δικτύου, διαθέτουν αυξημένη υπολογιστική δυνατότητα σε σχέση με τους απλούς κόμβους που θα εμφανισθούν αργότερα. Οι M αυτοί κόμβοι θα τοποθετηθούν έτσι ώστε:

- Να επιτυγχάνεται πλήρης κάλυψη του χώρου, δηλαδή κάθε νεοεισερχόμενος κόμβος να βρίσκεται στην εμβέλεια ενός τουλάχιστον από τους M ισχυρούς κόμβους.
- Κάθε ισχυρός κόμβος να βρίσκεται στην εμβέλεια τουλάχιστον ενός άλλου ισχυρού κόμβου, δηλαδή οι M ισχυροί κόμβοι να συγκροτούν ένα συνεκτικό δίκτυο.
- Το πλήθος των ισχυρών κόμβων να είναι το ελάχιστο δυνατό (M_{min}). Αυτό είναι επιθυμητό διότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι κόμβοι αυτοί πρέπει να διαθέτουν αυξημένες δυνατότητες και, ως εκ τούτου, είναι μεγαλύτερου κόστους.

Πρέπει, επίσης, να τονισθεί, ότι η ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson που διέπει τον τρόπο άφιξης των κόμβων στο χώρο S είναι γνωστή στους ισχυρούς κόμβους.

Ως πόρος στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο νοείται, συνήθως, η χρήση συγκεκριμένης φασματικής ζώνης (καναλιού) επί συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (χρονοσχισμή). Κάθε νεοεισερχόμενος απλός ή συμβατικός κόμβος, ο οποίος στη συνέχεια θα αναφέρεται απλώς ως κόμβος, απαιτεί για τη λειτουργία του A πόρους ενώ έκαστος των M ισχυρών σκόμβων απαιτεί B πόρους. Οι συνολικοί διαθέσιμοι πόροι είναι ίσοι με

$$\Sigma = M \cdot B + K \cdot A \quad (3.1)$$

όπου K ακέραιος. Επίσης πρέπει να ισχύει

$$\Pr \{ \text{κόμβοι που θα εμφανιστούν στο χώρο } S \text{ στο χρονικό παράθυρο } [0, c] > K \} \leq P_0 \quad (3.2.1)$$

δηλαδή

$$1 - \frac{1}{n!} \sum_{j=1}^{j=K} \left(\int_0^c \lambda_t(t) dt \right)^n e^{-\int_0^c \lambda_t(t) dt} \leq P_0 \quad (3.2.2)$$

Η απόδειξη της σχέσης (3.2.2) βρίσκεται στο Παράρτημα 3.1 στο τέλος του Κεφ. 3.

Οι $M \cdot B$ πόροι κατανέμονται ισομερώς στους M ισχυρούς κόμβους, δηλαδή έκαστος εξ αυτών λαμβάνει B πόρους προκειμένου να καλύψει τις ίδιες απαιτήσεις του. Οι υπόλοιποι

$$N = K \cdot A \quad (3.3)$$

πόροι αποδίδονται επίσης στους M ισχυρούς κόμβους προκειμένου, στη συνέχεια, αυτοί να τους κατανείμουν στους νεοεισερχόμενους κόμβους. Με $m_i, 1 \leq i \leq M$ συμβολίζονται οι πρόσθετοι πόροι που λαμβάνει έκαστος των M ισχυρών κόμβων, οπότε έκαστος των M ισχυρών κόμβων διαθέτει $B + m_i$ πόρους. Επομένως, πρέπει να ισχύουν τα εξής:

$$i. \quad m_i > 0, 1 \leq i \leq M, \quad (3.4)$$

αφού ισχυρός κόμβος j με $m_j = 0$ δεν έχει καμία χρησιμότητα για το δίκτυο.

$$ii. \quad \sum_{i=1}^M m_i = N \quad (3.5)$$

αφού δεν υπάρχει λόγος να μείνουν αχρησιμοποίητοι πόροι.

Ο ορθός προσδιορισμός των m_i είναι καθοριστικός για τη λειτουργία του δικτύου: Οι N πόροι πρέπει να κατανεμηθούν όσο το δυνατό πλησιέστερα στις περιοχές όπου αναμένεται να αποδοθούν. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, κακή κατανομή των N πόρων στους M ισχυρούς κόμβους θα οδηγήσει τους νεοεισερχόμενους κόμβους να αναζητήσουν μέρος των A πόρων από ισχυρούς, και όχι μόνο, κόμβους που βρίσκονται μακριά από την εμβέλεια τους, χαρακτηριστικό ανεπιθύμητο. Στην ενότητα 3.3 προτείνεται αλγόριθμος για τον προσδιορισμό των m_i , σύμφωνα με τον προαναφερθέντα σχεδιαστικό στόχο του δικτύου. Δηλαδή η κατανομή των N πόρων πρέπει να ακολουθεί τον τρόπο εμφάνισης των νεοεισερχόμενων κόμβων και περιγράφεται πλήρως από τη χωρική συνιστώσα της πολυδιάστατης διαδικασίας Poisson με ένταση $\lambda(t, x, y)$.

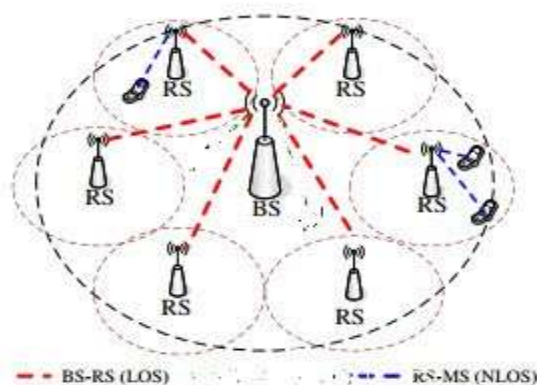
Η χωρική κατανομή των ισχυρών κόμβων στο χώρο S και η κατανομή των διαθέσιμων πόρων σε αυτούς αποτελούν τη φάση έναρξης του προβλήματος (*Initialization Phase*). Στη συνέχεια, ακολουθεί το κυρίως μέρος της διαδικασίας, κατά το οποίο κόμβοι εμφανίζονται στο χώρο S ακολουθώντας τη χωροχρονική διαδικασία Poisson που αναφέρθηκε προηγουμένως, ζητώντας από τους προϋπάρχοντες κόμβους στο χώρο (κύριους και συμβατικούς) να τους παραχωρήσουν πόρους. Ιδιαίτερα σημαντικός ρόλος έχει αποδοθεί στους M αρχικούς κόμβους, οι οποίοι λόγω αυξημένης υπολογιστικής ικανότητας προσδιορίζουν και αποφασίζουν ποιοι κόμβοι θα είναι αυτοί που θα παραχωρήσουν πόρους (και πόσους) σε κάθε νεοεισερχόμενο κόμβο.

3.2 Κατανομή των M ισχυρών κόμβων στο χώρο S

Στην περιοχή συγκέντρωσης χρηστών, το χώρο S , είναι ενδεχόμενο να μην υφίσταται καμία υποδομή δικτύου(Network Infrastructure) ικανή να διαχειριστεί τέτοιου είδους συσσωρευμένη κίνηση που προκαλείται από τη σταδιακή εμφάνιση μεγάλου πλήθους χρηστών. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη και η δόμηση του δικτύου με την τοποθέτηση ισχυρών κόμβων που δρουν ως σημεία πρόσβασης για τους εμφανιζόμενους χρήστες(Access Points-APs).Αυτό τον κρίσιμο για τη λειτουργικότητα του προς μελέτη δικτύου ρόλο αναλαμβάνουν να επιτελέσουν οι M ισχυροί κόμβοι.

Αυτά τα σημεία πρόσβασης ελέγχονται με τη σειρά τους από τον πάροχο δικτύου (Network Operator) που έχει αναλάβει την κάλυψη και την παροχή συνδεσιμότητας για το εκάστοτε γεγονός.

Για το σκοπό αυτό, ο λειτουργός του δικτύου χρησιμοποιεί ένα σταθμό βάσης (superBaseStation-*sBS*) με αυξημένες δυνατότητες προκειμένου να εκτελεί τον προγραμματισμό (Scheduling) και την ανάθεση των ραδιοπόρων (Radio Resource Allocation) στα APs και κατ' επέκταση στους τελικούς χρήστες. Τα σημεία πρόσβασης, λοιπόν, λειτουργούν ως αναμεταδότες (Relay Station-*RS*) μεταξύ των χρηστών και του σταθμού βάσης, ο οποίος και αποτελεί την «καρδιά» του προς διαμόρφωση δικτύου, αφού όλες οι λειτουργίες εκτελούνται ή προγραμματίζονται από αυτόν. Αυτή η εκδοχή αποτελεί τη συγκεντρωτική εκδοχή του αλγορίθμου (*Centralised Version*).



Σχ. 3.1 Αρχιτεκτονική του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου

Η προαναφερθείσα αρχιτεκτονική απεικονίζεται στο Σχ. 3.1 . Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η θέση του ενισχυμένου σταθμού βάσης δεν περιορίζεται εντός του χώρου κάλυψης δικτύου. Ενδεχομένως να βρίσκεται και εκτός αυτού με μόνη προϋπόθεση να εξασφαλίζεται η συνδεσιμότητα με όλους τους M ισχυρούς κόμβους.

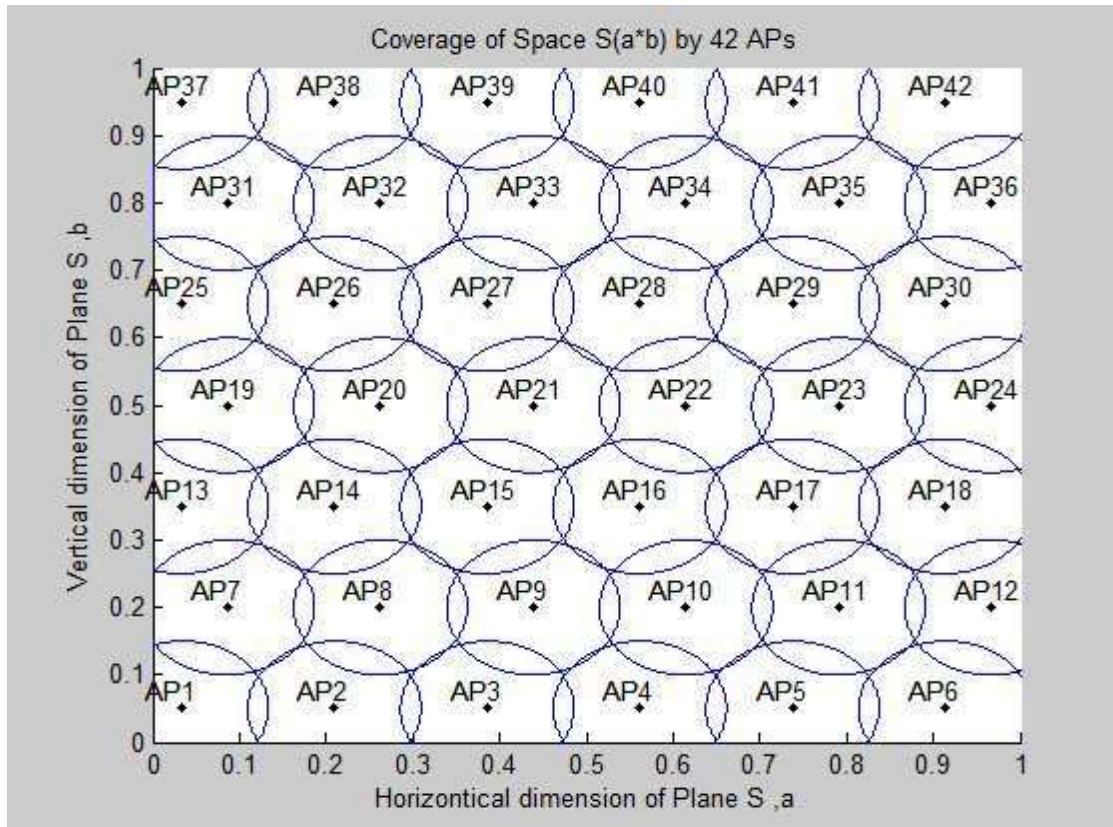
Κριτήριο, λοιπόν, για την τοποθέτηση των M ισχυρών κόμβων με σκοπό την κάλυψη του χώρου S αποτελεί η μείωση της αλληλεπικάλυψης γειτονικών κόμβων. Αυτό, βέβαια, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός δικτύου κορμού(backbone) μεταξύ των κόμβων είτε ενσύρματου (fiber / LAN cable) είτε ασύρματου(X2 interface μεταξύ γειτονικών σταθμών βάσης (eNodeB) στα κυψελωτά δίκτυα 4^{ης} γενιάς LTE), το οποίο εξασφαλίζει και τη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων αυτών. Με την τεχνική αυτή, τόσο η κάλυψη του χώρου S όσο και η συνδεσιμότητα των κόμβων(ή άλλως η συνεκτικότητα του δικτύου) επιτυγχάνονται με το μικρότερο δυνατό αριθμό - M_{min} - απαιτούμενων κόμβων. Συνεπώς, προκύπτουν οικονομικά οφέλη για τον πάροχο που αναλαμβάνει την κάλυψη του χώρου τόσο ως προς το κόστος εγκατάστασης όσο και ως προς το κόστος λειτουργίας του δικτύου. Τέλος, η αρχιτεκτονική του προς διαμόρφωση δικτύου προσομοιάζει προς την κυψελωτή, καθώς η μείωση της αλληλεπικάλυψης των M κόμβων οδηγεί στη μείωση της παρεμβολής μεταξύ γειτονικών κόμβων, η οποία και αποτελεί τον πρωταρχικό σχεδιαστικό στόχο κυψελωτών δικτύων. Έκαστος των M ισχυρών κόμβων μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο πρόσβασης (AP-Access Point) για τους χρήστες που θα εμφανιστούν εντός της εμβέλειάς του, τα όρια της οποίας αποτελούν μια υποτυπώδη κυψέλη (small cell). Η επιλογή αυτή οδηγεί σε αύξηση της φασματικής απόδοσης και άρα της χωρητικότητας του νεοσύστατου δικτύου. Συγκεκριμένα, ο πάροχος υπηρεσίας ενδεχομένως να έχει μισθώσει μια ζώνη συχνοτήτων για όλη τη διάρκεια του προγραμματισμένου γεγονότος εκδήλωσης (συνέδριο,συναυλία) αποσκοπώντας στην όσο το δυνατό αποδοτικότερη αξιοποίηση της μισθωμένης ζώνης συχνοτήτων ώστε να αποκομίσει μεγαλύτερο οικονομικό όφελος ή ισοδύναμα χαμηλότερο κόστος (TCO –Total Cost of Ownership).

Στο Σχ. 3.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο προαναφερθείς τρόπος δόμησης του χώρου S με σημεία πρόσβασης (APs) και συμβολίζονται με μαύρες τελείες (.). Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η εμβέλεια εκάστου εκ των M ισχυρών κόμβων να είναι ίση με το ένα δέκατο των διαστάσεων του τετραγωνικού χώρου, δηλαδή

$$r = a/10 = b/10 .$$

Η προαναφερθείσα επιλογή, λοιπόν, οδήγησε στο ελάχιστο πλήθος απαιτούμενων κόμβων για την κάλυψη του δικτύου ίσο με $M_{min} = 42 APs$.

Να σημειωθεί επίσης ότι η συγκεκριμένη επιλογή θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια για την προσομοίωση που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων. Ακόμη, πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου μπορεί να επεκταθεί και σε ορθογωνικούς χώρους με διαστάσεις $a \neq b$, οι οποίοι και αποτελούν γενίκευση του τετραγωνικού χώρου που επιλέχθηκε στο πλαίσιο της προσομοίωσης .



Σχήμα 3.2 Δόμηση του χώρου S με M_{min} -το πλήθος- σημεία πρόσβασης (APs)

3.3 Κατανομή πόρων στους M ισχυρούς κόμβους

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι N πόροι θα κατανεμηθούν στους M αρχικούς κόμβους. Αρχικά, αναλύεται η έννοια της καλά υποστηριζόμενης κατανομής Poisson από συγκεκριμένη διάταξη κόμβων στον χώρο S και συγκεκριμένη κατανομή πόρων σε αυτούς.

3.3.1 Η καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson

Βοηθητικό απλοποιημένο πρόβλημα:

Έστω κυρτή περιοχή του χώρου S και M αρχικοί κόμβοι τοποθετημένοι στις θέσεις p_i με $1 \leq i \leq M$, οι οποίες προσδιορίστηκαν κατά το προηγούμενο βήμα όπως που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2. Θεωρείται τυχαία κατανομή των N πόρων στους M κόμβους, m_i , $1 \leq i \leq M$, για την οποία, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.1 πρέπει να ισχύουν οι σχέσεις (3.4) και (3.5).

Ας υποθεθεί ότι στο χώρο S εμφανίζονται κόμβοι ακολουθώντας χωρική διαδικασία Poisson δύο διαστάσεων. Κάθε νεοεισερχόμενος κόμβος λαμβάνει ακριβώς A πόρους από κάποιον από τους M ισχυρούς κόμβους με τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει. Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι τον υπολογιστικό φόρτο για την κατανομή των πόρων στον εκάστοτε νεοεισερχόμενο κόμβο αναλαμβάνει κατά τη συγκεντρωτική εκδοχή του αλγορίθμου ο sBS . Στην περίπτωση όπου ένας νεοεισερχόμενος κόμβος είναι σε θέση να επικοινωνήσει με περισσότερους από ένα από τους M κόμβους, επιλέγει με τυχαίο τρόπο ένα από αυτούς.

Καίτοι ο ανωτέρω αλγόριθμος κατανομής πόρων αποτελεί απλοποιημένη εκδοχή του αλγορίθμου που θα περιγραφεί στις επόμενες ενότητες, θα βοηθήσει στην ανάπτυξη ενός κατάλληλου μοντέλου κατανομής των N πόρων στους M κόμβους, έτσι ώστε οι πόροι να αποδοθούν γεωγραφικά όσο το δυνατό πλησιέστερα στις περιοχές του χώρου S από όπου αναμένεται να ζητηθούν. Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί και στον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Με βάση τον Ορισμό 2.11 υπενθυμίζεται ότι, σε οποιοδήποτε χωρίο F που ανήκει στο χώρο S ($F \subseteq S$) θα εμφανιστούν κατά μέσο όρο $\int_F \lambda(x) dx$ κόμβοι. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σημαντικό και αποτελεί τη βάση όσων θα προταθούν στη συνέχεια.

Το ερώτημα που σχετίζεται με το προηγούμενο πρόβλημα είναι το ποιά είναι η κατάλληλη ένταση

$\lambda'(x, y)$ της δισδιάστατης χωρικής διαδικασίας Poisson με

$$\int_S \lambda'(x, y) dx dy = K \quad (3.6)$$

προκειμένου όλοι οι κόμβοι που αναμένεται να εμφανιστούν κατά μέσο όρο στο χώρο S να εξυπηρετηθούν. Η συνθήκη (3.5) εκφράζει ότι το συνολικό πλήθος των διαθέσιμων πόρων θα επαρκεί κατά μέσο όρο για την κάλυψη των αναγκών των κόμβων που θα εμφανισθούν στο χώρο. Η απάντηση στο ανωτέρω ερώτημα δεν είναι φυσικά μοναδική, καθώς για το ανωτέρω ζήτημα είναι δυνατό να ακολουθηθούν διαφορετικές προσεγγίσεις. Οι διαφορετικές αυτές χωρικές διαδικασίες Poisson με ένταση τη συνάρτηση $\lambda'(x, y)$ θα ονομάζονται καλά υποστηριζόμενες κατανομές Poisson.

Επειδή η συνάρτηση $\lambda'(x, y)$ εξαρτάται τόσο από τις θέσεις p_i όσο και από τους πόρους m_i που θα δοθούν αρχικά στους M ισχυρούς κόμβους, στην ουσία αποτελεί συνάρτηση και αυτών δηλαδή

$$\lambda'(x, y) = \lambda'(x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M) \quad (3.7)$$

Πριν από τη διατύπωση της προτεινόμενης καλά υποστηριζόμενης κατανομής Poisson, παρατίθενται ορισμένοι απαραίτητοι μαθηματικοί ορισμοί.

Ορισμός 3.6: Μέτρο στο χώρο R^N ορίζεται μια απεικόνιση της μορφής

$$\|\bullet\|: R^N \rightarrow R, x \rightarrow \|x\|$$

η οποία για κάθε $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^N$ και $\lambda \in R$ ικανοποιεί τις ιδιότητες:

$$1. \quad \|\mathbf{x}\| \geq 0 \text{ και } \|\mathbf{x}\| = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

$$2. \quad \|\lambda \mathbf{x}\| = |\lambda| \|\mathbf{x}\| \quad (3.9)$$

$$3. \quad \|\mathbf{x} + \mathbf{y}\| \leq \|\mathbf{x}\| + \|\mathbf{y}\| \quad (3.10)$$

Θεώρημα 3.2: Στο χώρο R^N έκαστη των κατωτέρων ισοτήτων ορίζει μέτρο υπό την έννοια του προηγούμενου ορισμού :

$$N_1(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|_1 = \sqrt{\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}} = (\sum_{i=1}^N x_i^2)^{1/2} \quad (3.11)$$

$$N_2(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|_2 = |x_1| + |x_2| + \dots + |x_N| = \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (3.12)$$

$$N_3(\mathbf{x}) = \mathbf{max}(\|\mathbf{x}\|_2 = |x_1| + |x_2| + \dots + |x_N|) = \mathbf{max}_{1 \leq i \leq N}(|x_i|) \quad (3.13)$$

Ορισμός 3.7: Το σύνολο $B(\xi, \rho) = \{\mathbf{x} \in R^N: \|\mathbf{x} - \xi\| \leq \rho\}$, όπου το εμφανιζόμενο μέτρο μπορεί να είναι οποιοδήποτε από αυτά του θεωρήματος 3.2, ονομάζεται ανοικτή σφαίρα κέντρου ξ και ακτίνας ρ .

Ορισμός 3.8: Ένα υποσύνολο A του R^N λέγεται ανοικτό σύνολο, εφόσον για κάθε $\xi \in A$, υπάρχει ανοικτή σφαίρα $B(\xi, \rho)$, $\rho > 0$ με $B(\xi, \rho) \subseteq A$.

Ορισμός 3.9: Ένα υποσύνολο A του R^N θεωρείται συνεκτικό αν δεν υπάρχουν δύο μη κενά ανοικτά σύνολα U , τέτοια ώστε

$$A \subseteq (U \cup V), A \cap U \neq \emptyset, \cap V \neq \emptyset \text{ και } (A \cap U) \cap (A \cap V) = \emptyset.$$

Ορισμός 3.10: Στην περιοχή S διακρίνονται οι υποπεριοχές S_i , $1 \leq i \leq L$, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

- Κάθε περιοχή S_i αποτελεί ένα συνεκτικό υποσύνολο του R^2 .
- Όλα τα σημεία μιας περιοχής S_i βρίσκονται στην εμβέλεια των ίδιων ακριβώς ισχυρών κόμβων.

Έτσι, κάθε υποπεριοχή S_i χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα M διαστάσεων που συμβολίζεται ως $s_i = (s_1, s_2, \dots, s_M)$ (3.14)

- $s_i = 1$, εφόσον η περιοχή S_i βρίσκεται στην εμβέλεια του $j(1..M)$ -οστού αρχικού κόμβου.
- $s_i = 0$, εφόσον η περιοχή S_i δεν βρίσκεται στην εμβέλεια του $j(1..M)$ -οστού αρχικού κόμβου.

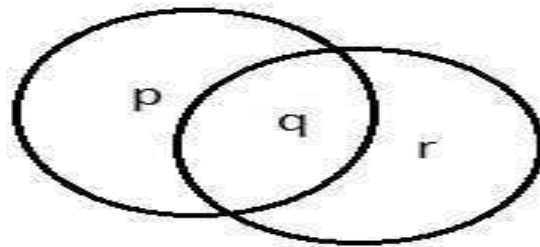
Ορισμός 3.11: Προτεινόμενη καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson

Μία καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson στο χώρο S ορίζεται σε έκαστη των υποπεριοχών S_i ως εξής:

$$\lambda'(x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M) = \sum_{j=1}^M s_{ij} \frac{m_j f(x, y)}{A \cdot \sum_{t=1}^L s_{tj} \left(\int_{S_t} f(x, y) dx dy \right)} \quad (3.15)$$

όπου A οι πόροι τους οποίους ζητεί για τη λειτουργία του κάθε νεοεισερχόμενος κόμβος και $f(x, y)$ πραγματική συνάρτηση η οποία ορίζεται επίσης στο χώρο S και s_{ij} το M -διάστατο διάνυσμα που χαρακτηρίζει κάθε υποπεριοχή S_i σύμφωνα με τον ορισμό 3.10.

Προς διευκρίνιση του πολύπλοκου στη διατύπωση ορισμού 3.11, ακολουθεί ένα απλό παράδειγμα το οποίο θα αποσαφηνίσει τον ορισμό αυτό. Ας υποθεθεί ότι ο χώρος S είναι ο χώρος $p \cup q \cup r$ του Σχ. 3.3. Τα κέντρα των δύο κυκλικών δίσκων (με ακτίνα R) αντιστοιχούν σε δύο κόμβους που είναι τοποθετημένοι στο χώρο S ενώ οι κυκλικοί δίσκοι αντιστοιχούν στις εμβέλειές τους. Έστω, επίσης, ότι ο κόμβος με εμβέλεια το χώρο $p \cup q$ διαθέτει k_1 πόρους ενώ ο κόμβος με εμβέλεια το χώρο $q \cup r$ διαθέτει k_2 πόρους. Επισημαίνεται ότι με βάση τον ορισμό 3.10, το σύνορο μεταξύ των περιοχών p και q καθώς και το σύνορο μεταξύ των περιοχών q και r ανήκουν στην περιοχή q .



Σχήμα 3.3 Τοπολογία παραδείγματος καλά υποστηριζόμενης κατανομής Poisson
Σύμφωνα με τον Ορισμό 3.11 η ένταση της καλά υποστηριζόμενης Poisson είναι:

$$\text{Περιοχή } p: \lambda'(x, y) = \frac{k_1 f(x, y)}{A \int_{p \cup q} f(x, y) dx dy}$$

$$\text{Περιοχή } q: \lambda'(x, y) = \frac{k_1 f(x, y)}{A \int_{p \cup q} f(x, y) dx dy} + \frac{k_2 f(x, y)}{A \int_{q \cup r} f(x, y) dx dy}$$

$$\text{Περιοχή } r: \lambda'(x, y) = \frac{k_2 f(x, y)}{A \int_{q \cup r} f(x, y) dx dy}$$

Η συνάρτηση $f(x, y)$ προσφέρει τη δυνατότητα να δοθεί βάρος σε διάφορα σημεία του χώρου περί κάθε κόμβο. Δηλαδή, η συνάρτηση $f(x, y)$ αντανακλά την πιθανότητα να εμφανιστούν νεοεισερχόμενοι κόμβοι στα σημεία (x, y) κάθε υποπεριοχής S_i . Στα σημεία όπου η συνάρτηση έχει μεγαλύτερη τιμή, η πιθανότητα εμφάνισης κόμβων είναι μεγαλύτερη από αντίστοιχα σημεία όπου η $f(x, y)$ λσμβάνει μικρότερη τιμή.

Για τις ανάγκες του απλοποιημένου βοηθητικού προβλήματος, η προαναφερθείσα δυνατότητα να δοθεί βάρος σε ορισμένα σημεία του χώρου μέσω της επιλογής της συνάρτησης $f(x, y)$ δεν είναι απαραίτητο, οπότε μπορεί να τεθεί απλά $f(x, y) = 1$. Με την επιλογή αυτή, θεωρείται κοινή η πιθανότητα εμφάνισης χρηστών εντός της εμβέλειας κάθε υποπεριοχής S_i .

Ορισμένες παρατηρήσεις για τη συγκεκριμένη καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson:

1. Εύκολα επαληθεύεται ότι ικανοποιείται η συνθήκη (3.5) .
2. Είναι η απλούστερη επιλογή. Κάθε κόμβος ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους διασπείρει τους πόρους που διαθέτει σε όλο το εύρος της εμβέλειάς του. Η διασπορά είναι ομοιόμορφη, όταν $\lambda(x, y) = c \in R$, ή ανομοιόμορφη, όταν ως $\lambda(x, y)$ επιλεγεί μια σύνθετη συνάρτηση.
3. Περιοχές που βρίσκονται στην εμβέλεια περισσότερων του ενός κόμβων ευνοούνται από τη συγκεκριμένη καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson σε σχέση με περιοχές που βρίσκονται στην εμβέλεια ενός μόνο κόμβου. Αυτό αποτελεί συνέπεια του ότι κάθε κόμβος διασπείρει τους πόρους του ανεξάρτητα από τους άλλους κόμβους.

Μία περισσότερο δίκαιη καλά υποστηριζόμενη κατανομή θα ήταν καταλληλότερη για ένα αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, νεοεισερχόμενοι κόμβοι που βρίσκονται στην εμβέλεια πολλών κόμβων είναι πιθανό να αποφάσιζαν χρησιμοποιώντας κάποιο καταλληλότερο αλλά περισσότερο πολύπλοκο τρόπο σε ποιόν ισχυρό κόμβο θα απευθυνθούν για να αποκομίσουν τους απαιτούμενους πόρους. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να υλοποιηθεί από το συγκεκριμένο απλοποιημένο πρόβλημα, αλλά θα μπορούσε να βρει εφαρμογή, αν για παράδειγμα ο εκάστοτε νεοεισερχόμενος κόμβος ανέθετε την εξυπηρέτησή του στον ισχυρό γειτονικό του κόμβο με τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι η πληροφορία αυτή σχετικά με το πλήθος των διαθέσιμων πόρων κάθε ισχυρού κόμβου είναι γνωστή και στους νεοεισερχόμενους κόμβους κατά την ανταλλαγή μηνυμάτων γνωριμίας με τους γείτονες τους, όπως θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα.

3.3.2 Η κατανομή των N πόρων στους M κόμβους

Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο οι N πόροι θα αποδοθούν στους M ισχυρούς κόμβους οι οποίοι έχουν κατανεμηθεί στο χώρο S . Υπενθυμίζεται ότι στο χώρο S θα εμφανισθούν κόμβοι ακολουθώντας συγκεκριμένη χωροχρονική τυχαία διαδικασία Poisson τριών διαστάσεων (με διαστάσεις το χρόνο t και τις δύο καρτεσιανές συντεταγμένες x, y . Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από ένταση $\lambda(t, x, y)$ με $t \in [0, c]$, $x \in [0, a]$, $y \in [0, b]$ ανάλογα με το προφίλ εμφάνισης των εκάστοτε εμφανιζόμενων χρηστών, όπως αυτό έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.4. Η χωρική διαδικασία $\bar{\lambda}^t(x, y)$ αποτελεί ουσιαστικά τη χωρική εκδοχή της πραγματικής χωροχρονικής διαδικασίας Poisson σύμφωνα με τη σχέση (2.20) της ενότητας 2.4. Η ορθή σχεδίαση του δικτύου αποσκοπεί στον προσδιορισμό των m_i , $1 \leq i \leq M$, ώστε η καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson που θα προσδιοριστεί με βάση (i) τη συγκεκριμένη διάταξη ισχυρών κόμβων στο χώρο S και (ii) τη συγκεκριμένη κατανομή πόρων σε αυτούς να πλησιάσει όσο το δυνατό περισσότερο τη διαδικασία $\bar{\lambda}^t(x, y)$. Τότε, η ίδια η $\bar{\lambda}^t(x, y)$, άρα και η πραγματική κατανομή Poisson, θα υποστηρίζεται αρκετά καλά από τη συγκεκριμένη κατανομή ισχυρών κόμβων στον χώρο αλλά και την προσδιορισθείσα αρχική κατανομή των πόρων στους ισχυρούς κόμβους. Δηλαδή, η κατανομή των διαθέσιμων πόρων στους M ισχυρούς κόμβους θα ακολουθεί το τρόπο εμφάνισης των νέων κόμβων υπηρετώντας έτσι τον πρωταρχικό σχεδιαστικό στόχο του δικτύου, να κατανεμηθούν οι πόροι όσο το δυνατόν καλύτερα στα σημεία από τα οποία αναμένεται να ζητηθούν.

Ως συνάρτηση $f(x,y)$ στον ορισμό 3.11 της καλά υποστηριζόμενης κατανομής χρησιμοποιείται η $\bar{\lambda}^t(x,y)$, δηλαδή

$$f(x,y) = \bar{\lambda}^t(x,y) \quad (3.14).$$

Κατ' αυτό τον τρόπο, η καλά υποστηριζόμενη κατανομή διασπείρει με καλύτερη προσέγγιση τους πόρους γύρω από κάθε ισχυρό κόμβο. Αυτό θα της επιτρέψει να προσεγγίσει ευκολότερα την κατανομή $\bar{\lambda}^t(x,y)$. Έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αναλαμβάνει να υλοποιήσει ο ενισχυμένος σταθμός βάσης (sBS) διατυπώνεται ως εξής:

$$\min_{m_1, m_2, \dots, m_M} \sum_{i=1}^L \int_{S_i} \left(\lambda' (x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M) - \bar{\lambda}^t(x, y) \right)^2 dx dy \quad (3.16)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^M m_i = N \quad (3.17)$$

$$m_i > 0, 1 \leq i \leq M \quad (3.18)$$

3.4 Κατάστρωση της συγκεντρωτικής εκδοχής (Centralised Version) του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων

3.4.1 Οι ζητούμενοι πόροι εξευρίσκονται σε ένα βήμα

Στις ενότητες 3.2 και 3.3, προτάθηκε (i) πώς θα κατανεμηθούν οι ισχυροί κόμβοι (RS) στο χώρο S και (ii) πώς θα κατανεμηθούν στους ισχυρούς κόμβους οι N διαθέσιμοι πόροι. Οι προαναφερθείσες σχεδιαστικές ενέργειες συνιστούν τη φάση έναρξης του προβλήματος (*Initialisation Phase*). Το επόμενο βήμα, λοιπόν, είναι η διατύπωση της συγκεντρωτικής εκδοχής του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων. Για λόγους καλύτερης οργάνωσης της διατύπωσης του αλγορίθμου, αυτή γίνεται σε δύο υποενότητες: Στην τρέχουσα υποενότητα, περιγράφεται η περίπτωση κατά την οποία ο νεοεισερχόμενος κόμβος-χρήστης επιτυγχάνει να εξεύρει τους απαιτούμενους για τη λειτουργία του πόρους σε ένα βήμα. Στην επόμενη υποενότητα αναλύονται με τη σειρά τους οι περιπτώσεις όπου απαιτούνται περισσότερα του ενός βήματα, δηλαδή η επαναληπτική εκδοχή του αλγορίθμου.

Ας υποθεθεί ότι κάποια χρονική στιγμή στο χώρο S υπάρχουν $M + i - 1$ κόμβοι, όπου M οι ισχυροί κόμβοι και i οι κόμβοι οι οποίοι εμφανίστηκαν στη συνέχεια και έλαβαν τους απαιτούμενους για τη λειτουργία τους πόρους με $i - 1 \geq 0$. Έστω ότι οι θέσεις των i κόμβων συμβολίζονται με $coords_1, \dots, coords_{i-1}$ και ας υποθεθεί ότι εμφανίζεται νέος κόμβος στη θέση $coords_i$ σύμφωνα με τη χωροχρονική διαδικασία Poisson, όπως αυτή περιγράφηκε λεπτομερώς στην υποενότητα 2.4. Ο νεοαφικθείς αυτός κόμβος βρίσκεται στην εμβέλεια K ισχυρών κόμβων. Υπενθυμίζεται ότι η πλήρης κάλυψη της περιοχής S από τους M ισχυρούς κόμβους (RS) εξασφαλίζει ότι $K \geq 1$. Οι K αυτοί ισχυροί κόμβοι θα αποκαλούνται και γείτονες του νεοεισερχόμενου κόμβου.

Στη συνέχεια, ο νεοεισερχόμενος χρήστης (στο εξής θα συμβολίζεται $i_{th}user$ – για συντομία) επιλέγει με τυχαίο τρόπο κάποιο εκ των K ισχυρών γειτόνων του. Αν $K = 1$, επιλέγει το μοναδικό ισχυρό κόμβο που είναι στην εμβέλειά του, ο οποίος θα συμβολίζεται με I_o . Ακολούθως, ο $i_{th}user$ αναθέτει στον I_o την εξεύρεση των A απαιτούμενων για τη λειτουργία του πόρων. Ο ισχυρός κόμβος I_o , με τη σειρά του, αναθέτει στο ενισχυμένο σταθμό βάσης (sBS) την εξυπηρέτηση ($service$) του νεοεισερχόμενου χρήστη, διαδικασία που υπαγορεύει η συγκεντρωτική εκδοχή του αλγορίθμου. Δηλαδή, όλες οι ενέργειες και λειτουργίες που αφορούν στην εξυπηρέτηση και κατ' επέκταση κατανομή πόρων στους χρήστες ελέγχονται και προγραμματίζονται από τον κεντρικό και με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες σταθμό βάσης. Σε αυτό το σημείο, λοιπόν, αποκτά και νόημα ο χαρακτηρισμός των M ισχυρών κόμβων ως αναμεταδοτών (*Relay Stations*), καθώς λειτουργούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι μεταξύ του εκάστοτε εμφανιζόμενου χρήστη και του sBS .

Στον Πίν. 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνάρτηση εύρεσης του I_o από τον εκάστοτε νεοεισερχόμενο χρήστη σε μορφή ψευδοκώδικα.

Πίνακας 3.1 Συνάρτηση εύρεσης του I_o από τον i -οστό χρήστη/ function findlo for ith user

Input: Nodes' providing Connected Coverage position p_i , number of Strong Nodes M , Users' position vector $coords$, $i_{th}user$, Nodes' Range Radii R

Output: $I_o(i_{th}user)$

1. **for** $j = 1:M$
2. $dist = \text{sqrt} \left((p(j, 1) - \text{coords}(i_{th}user, 1))^2 + (p(j, 2) - \text{coords}(i_{th}user, 2))^2 \right)$;
//euclidean distance between each Strong Node and ith user//
3. **if** $dist \leq R$ **then**
4. $I_o(i_{th}user) = j$; // strong Node Neighbour Found
5. **end_if**
6. **end_for**
7. **end_function**

Πριν παρουσιαστεί η συνολική συγκεντρωτική εκδοχή του προτεινόμενου αλγορίθμου, κρίνεται σκόπιμο να εισαχθεί η έννοια της εξυπηρέτησης ($service$) ενός χρήστη από τον sBS εκ μέρους του εκάστοτε ισχυρού γείτονα I_o στον οποίο και έχει ανατεθεί αρχικά η εξέρευση των A πόρων. Ειδικότερα, ο sBS ελέγχει αν το πλήθος των διαθέσιμων πόρων του εκάστοτε ισχυρού κόμβου I_o . Ως διαθέσιμοι πόροι του εκάστοτε I_o θεωρείται το αρχικό πλήθος των πόρων που απονεμήθηκαν στον I_o κατά την αρχική κατανομή πόρων σε όλους τους M κόμβους σύμφωνα με τη βελτιστοποίηση της ενότητας 3.3.2 μειωμένο κατά το πλήθος των πόρων που έχουν αποδοθεί σε προηγούμενους χρήστες της ευρύτερης γειτονιάς του I_o . Σε περίπτωση όπου οι διαθέσιμοι πόροι του I_o υπερβαίνουν το πλήθος των ζητούμενων από το χρήστη A πόρων, ο sBS δεσμεύει A το πλήθος πόρους από τον I_o προκειμένου να ολοκληρωθεί η εξυπηρέτηση του νεοεισερχόμενου χρήστη. Σε αντίθετη περίπτωση, ο χρήστης δεν εξυπηρετείται (*unserved*), καθώς η απόδοση στο χρήστη λιγότερων των A πόρων δεν εγγυάται την ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που προδιαγράφει η υπηρεσία, για παράδειγμα η θέαση βίντεο ή η βίντεο κλήση, δηλαδή η απόδοση λιγότερων πόρων κρίνεται μη αποδεκτή. Λύση στο συνεπαγόμενο πρόβλημα της μη εξυπηρέτησης κάποιων χρηστών αποτελεί η επαναληπτική εκδοχή του αλγορίθμου αναζήτησης πόρων που θα περιγραφεί στην επόμενη υποενότητα, με βάση την οποία ο sBS αναζητεί το υπόλοιπο των απαιτούμενων για την εξυπηρέτηση του νεοεμφανιζόμενου χρήστη πόρων από κόμβους πέραν του αρχικού I_o . Ο τρόπος αυτός θα αναλυθεί στη συνέχεια. Επίσης, στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να

παρουσιαστεί στον Πίν. 3.2 η διαδικασία της εξυπηρέτησης ενός χρήστη, την οποία και πραγματοποιεί ο *sBS* για λογαριασμό του επιλεγμένου από το χρήστη ισχυρού κόμβου I_0 :

<p>Πίνακας 3.2 Συγκεντρωτική εκδοχή του Αλγορίθμου Εξυπηρέτησης Χρηστών-Ένα Βήμα)/ Centralised Version of Service Algorithm(One_Step)</p> <p><i>Input: p_i Node position, $m_i, 1 < i < M$ (Initial Resource vector for each Node), A Resource amount of demanded by users , number of users N_{users}, I_0 serving Node for ith user</i></p> <p><i>Output: C Resource vector for incoming users</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. if $m(I_0) > A$ then 2. $C(i) = A$ //successful User Service 3. else 4. $C(i) = 0$ //unserved User-i 5. end_if
--

Συνοψίζοντας, η συνολική συγκεντρωτική εκδοχή του αλγορίθμου κατανομής πόρων παρουσιάζεται στον Πίν. 3.3 που ακολουθεί.

<p>Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτική εκδοχή του Αλγορίθμου Κατανομής Πόρων/(Centralised Version of Resource Allocation Algorithm)</p> <p><i>Input: space S, Time Duration T, space-temporal Poisson Point Process Intensity $\lambda(t, x, y)$, number of Strong(Serving) Nodes M, radii of Nodes R , total available Resource Blocks N, amount of demanded by users Resources A,</i></p> <p><i>Output: p_i Node position providing Connected Coverage , $m_i, 1 < i < M$ (Initial Resource vector for each Node)</i></p>
<p>Initialisation Phase</p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Placement of Strong Nodes in space S (minization of intersection between neighboring Nodes , $p_i, 1 < i < M$ minimum number of needed Nodes in order to provide coverage 2. Initial Resource Allocation for Strong Nodes(in order to provide capacity when and where it will be actually be needed according to tempo-spatial user distribution 3. Resource Assignment to Strong Nodes : $R_i = B + m_i, 1 < i < M$
<p>Main Part</p>
<ol style="list-style-type: none"> 4. User Appearance according to space-temporal Poisson Point Process 5. Selection of neighbor I_0 by newcomer User for Resource Discovery(<i>find I_0 function</i>) 6. User Service by superBS(on behalf of I_0)

Τα βήματα 1,2 και 3 συνιστούν τη φάση έναρξης του προβλήματος κατανομής πόρων (*Initialization Phase*). Ειδικότερα, η αρχική τοποθέτηση των M ισχυρών κόμβων με στόχο την κάλυψη του χώρου S με το ελάχιστο πλήθος απαιτούμενων σημείων πρόσβασης (*APs*) αποτελεί την εναρκτήρια ενέργεια του λειτουργού του δικτύου προκειμένου να παράσχει κάλυψη για κάποιο ad-hoc γεγονός. Η αρχική

κατανομή των N συνολικά διαθέσιμων πόρων από τον sBS στους M ισχυρούς κόμβους - που αποτελούν τα APs - υλοποιεί το κύριο κίνητρο του προτεινόμενου αλγορίθμου που είναι οι πόροι να αποδοθούν όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν. Να διευκρινιστεί εδώ ότι έκαστος των M ισχυρών κόμβων απαιτεί B το πλήθος πόρους για ίδια χρήση στους οποίους και προστίθενται οι $m_i, 1 \leq i \leq M$, πόροι που προορίζονται καλύψουν την προσδοκώμενη κίνηση στην εμβέλεια κάθε ισχυρού κόμβου, όπως έχει προδιαγραφεί ο sBS κατά τη βελτιστοποίηση (3.15).

Στη συνέχεια, με την εκτέλεση των βημάτων 4, 5 και 6, ακολουθεί το κύριο μέρος του αλγορίθμου. Επομένως, αρχικά εμφανίζονται χρήστες σύμφωνα με τη χωροχρονική διαδικασία Poisson. Κάθε νεοεισερχόμενος χρήστης επιλέγει τον ισχυρό κόμβο I_o στον οποίο και αναθέτει την εξεύρεση των A απαιτούμενων για τη λειτουργία του πόρων σύμφωνα με τον Πίν. 3.1. Τέλος, ακολουθεί η εξυπηρέτηση του προς αποδοχή στο δίκτυο χρήστη από τον sBS εκ μέρους του I_o , όπως παρουσιάστηκε και στο Πίν. 3.2. Ο sBS είναι τελικά αυτός που αποφασίζει αν ο εκάστοτε νεοεισερχόμενος χρήστης θα γίνει αποδεκτός από το δίκτυο ή θα απορριφθεί, καθώς η ανεπάρκεια πόρων εντός της γειτονιάς του I_o δεν εγγυάται τη συμφωνημένη ποιότητα υπηρεσίας(QoS).

Η εκδοχή αυτή, όμως, της εξυπηρέτησης χρηστών σε ένα βήμα ενδέχεται να οδηγήσει σε υψηλή πιθανότητα αποκλεισμού χρηστών(*Call Blocking Probability-CBP*), ειδικά σε χρονικές περιόδους μεγάλης πυκνότητας χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Για το λόγο αυτό, προτείνεται στην επόμενη υποενότητα η επαναληπτική εκδοχή της εξυπηρέτησης των εμφανιζόμενων χρηστών, η οποία και οδηγεί σε ιδιαιτέρως χαμηλές, ιδανικά και μηδαμινές, τιμές της *CBP* ή ισοδύναμα υψηλά ποσοστά εξυπηρέτησης χρηστών (*Service Rate*).

3.4.2 Οι ζητούμενοι πόροι εξευρίσκονται σε περισσότερα του ενός βήματα

Ας υποθεθεί ότι οι διαθέσιμοι πόροι που διαπιστώνει ο sBS ότι διαθέτει ο ισχυρός κόμβος I_o είναι $C_0 = m(I_o) < A$. Στην περίπτωση αυτή, ο sBS δεσμεύει τους C_0 αυτούς πόρους προκειμένου να τους παραχωρήσει στο νεοεισερχόμενο κόμβο. Στη συνέχεια, ο sBS ενημερώνει το νεοεισερχόμενο χρήστη ότι χρειάζονται $Rest = A - C_0$ επιπλέον πόροι, την αναζήτηση των οποίων αναλαμβάνει να πραγματοποιήσει ο ίδιος ο sBS με στόχο την πλήρη εξυπηρέτηση του προς αποδοχή χρήστη.

Η στρατηγική που ακολουθείται εκ μέρους sBS για την εξεύρεση του υπολειπόμενου σε κάθε βήμα πλήθους των απαιτούμενων για τη λειτουργία του χρήστη πόρων κλιμακώνεται με στόχο να μην επιβαρύνει το προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Αρχικά, ο sBS ταξινομεί τους υπόλοιπους $M - 1$ ισχυρούς κόμβους με βάση το διαθέσιμο πλήθος πόρων εκάστου. Η πληροφορία αυτή περιέχεται στο διάνυσμα m_{sorted} . Ειδικότερα, το διάνυσμα αυτό περιέχει όλους τους υπόλοιπους ισχυρούς κατά φθίνουσα σειρά διαθέσιμων πόρων, με πρώτο στοιχείο τον ισχυρό κόμβο με τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους C_{avail} εκείνη τη χρονική στιγμή εξέλιξης του δικτύου. Η λογική της επιλογής αυτής συνίσταται στην αναζήτηση των υπολειπόμενων κάθε φορά πόρων από εκεί όπου υπάρχει περίσσεια πόρων. Η τρέχουσα διαθεσιμότητα πόρων καθορίζεται τόσο από την αρχική κατανομή πόρων στους M ισχυρούς κόμβους όσο και από τα χωρικά χαρακτηριστικά εμφάνισης χρηστών στο δίκτυο. Δηλαδή, σε περιοχές όπου έχουν εμφανιστεί ήδη πολυάριθμοι χρήστες ενδέχεται να παρατηρηθεί έλλειψη διαθέσιμων πόρων για την εξυπηρέτηση νέων χρηστών, ακόμη και αν στην περιοχή αυτή είχε αποδοθεί αρχικά μεγάλο πλήθος πόρων. Κρίνεται, επομένως, εύλογο να αναζητηθούν οι εκάστοτε αναγκαίοι πόροι

σε περιοχές με περισσότερους διαθέσιμους πόρους. Κατ' αυτό τον τρόπο, λοιπόν, επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση του μέγιστου βάθους αναζήτησης ή ισοδύναμα του μέγιστου πλήθους κόμβων που ενεργοποιούνται για την εξυπηρέτηση του εκάστοτε νεοεισερχόμενου κόμβου. Το βάθος αναζήτησης μεταφράζεται σε όρους καθυστέρησης της εξυπηρέτησης των χρηστών και πρόσβασης αυτών στην παρεχόμενη υπηρεσία. Αυτό συμβαίνει

διότι η αναζήτηση προχωρεί σε επόμενο ισχυρό κόμβο μόνο εφόσον οι διαθέσιμοι πόροι του κόμβου με την υψηλότερη πυκνότητα πόρων δεν επαρκούν για την εξυπηρέτηση του χρήστη. Αυτό εξασφαλίζεται από τη χρήση του διανύσματος m_{sorted} .

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, όταν οι κόμβοι που έχουν εμφανιστεί στο χώρο είναι περισσότεροι από N/A , οι απαιτούμενοι πόροι για νέους κόμβους δεν είναι δυνατό να εξευρευθούν. Στην περίπτωση αυτή, η προηγούμενη διαδικασία δεν θα επιτύχει να δώσει λύση στο πρόβλημα, καίτοι θα έχουν ενεργοποιηθεί έκαστος εκ των M ισχυρών κόμβων με σειρά που υποδεικνύει στον sBS το διάνυσμα m_{sorted} και ο αλγόριθμος θα τερματισθεί. Εναλλακτικά, μπορεί να τεθεί ένα όριο στο μέγιστο βάθος αναζήτησης ($depth$) ή ισοδύναμα στο μέγιστο πλήθος κόμβων που επιτρέπεται να ενεργοποιηθούν κατά τη διαδικασία αναζήτησης πόρων του εκάστοτε νεοεισερχόμενου κόμβου, προκειμένου η αναζήτηση πολύ λίγων πόρων να μην επιφέρει υπερβολική καθυστέρηση που υπερφορτώνει το υπό διαμόρφωση δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, ο αντίστοιχος νεοεισερχόμενος κόμβος αποκλείεται ή πληροφορείται να μετακινηθεί σε άλλη περιοχή, εφόσον επιθυμεί οπωσδήποτε να εξυπηρετηθεί.

Προς αποσαφήνιση της προαναφερθείσας στρατηγικής αναζήτησης πόρων πέραν του αρχικά επιλεγμένου ισχυρού κόμβου I_o , ακολουθεί ο τρόπος με τον οποίο ο sBS αποφασίζει από ποιόν ισχυρό κόμβο θα παραχωρηθούν οι υπολειπόμενοι πόροι στον υπό εξυπηρέτηση χρήστη. Έστω, λοιπόν, $Rest_1 = A - m(I_o)$ οι πόροι που απομένει να εξευρευθούν μετά την ανάθεση της αναζήτησης στον αρχικό I_o . Στο σημείο αυτό, ο sBS εκκινεί την επαναληπτική διαδικασία αναζήτησης των $Rest_1$ πόρων με αρχικό βάθος αναζήτησης $depth = 1$, αφού προηγουμένως έχει υπολογίσει το διάνυσμα m_{sorted} . Ο sBS υπολογίζει τους διαθέσιμους πόρους του ισχυρού κόμβου με τους περισσότερους εκείνη τη στιγμή, τον οποίο και υποδεικνύει η πρώτη θέση του διανύσματος m_{sorted} ως $C_{avail} = m(m_{sorted}(depth = 1))$.

Ακολούθως, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- i. $C_{avail} \geq Rest_{depth}$. Τότε, ακολουθώντας τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί, ο sBS δεσμεύει όλους τους $Rest_0$ και η εξυπηρέτηση του νεοεισερχόμενου χρήστη ολοκληρώνεται χωρίς να χρειάζεται να προχωρήσει η αναζήτηση σε επόμενο ισχυρό κόμβο.
- ii. $Rest_0 < C_{avail}$. Τότε, ο sBS δεσμεύει όλους τους C_{avail} διαθέσιμους πόρους και η διαδικασία αναζήτησης προχωρεί σε βάθος $depth = depth + 1$ του υπολειπόμενου πλήθους πόρων $Rest_{depth} = Rest_{depth-1} - C_{avail}$ με τον επόμενο ισχυρό κόμβο που υποδεικνύει η τιμή του διανύσματος $m_{sorted}(depth)$.

Η προαναφερθείσα διαδικασία συνεχίζεται αναδρομικά μέχρι να εξευρευθεί το σύνολο των ζητούμενων για τη λειτουργία του χρήστη κόμβων, ή μέχρι να καλυφθεί το κριτήριο για τη διακοπή του αλγορίθμου σχετικά με το μέγιστο βάθος αναζήτησης λόγω της αναπόφευκτης χρονικής καθυστέρησης ($delay$) που

εισάγει στο δίκτυο. Στον Πίν.3.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται ολόκληρη η επαναληπτική εκδοχή της εξυπηρέτησης ενός χρήστη σε μορφή ψευδοκώδικα.

Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτική εκδοχή του Αλγορίθμου Εξυπηρέτησης Χρηστών-Επαναληπτική)/Centralised Version of Service Algorithm(Iterative)
<p><i>Input:</i> p_i Node position, $m_i, 1 < i < M$ (Initial Resource vector for each Node), A, number of users <i>Nusers</i>, m_{sorted} vector of sorted Strong Nodes according to their Resource capacity <i>Output:</i> C, Resource vector for incoming users</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $depth=0;$ 2. if $m(I_0) \geq A$ then 3. $C(i, 1) = A;$ //successful User Service in one step 4. $C(i, 1) = depth;$ 5. else 6. $C(i) = m(I_0);$ //Underserved User-i 7. $m(I_0) = 0;$ //Depletion of I_0's Resources 8. $depth = depth + 1;$ //Update Resource Search Depth 9. $Rest_{depth} = A - C(i);$ 10. while ($Rest_{depth} > 0$)&& ($depth < M$) 11. $depth = depth + 1;$ 12. $C_{avail} = m(m_{sorted}(depth));$ //sBS search remaining Resources from highly Allocated //Strong Nodes with indice $m_{sorted}(step)$ 13. if $C_{avail} \geq Rest_{depth}$ then 14. $C(i, 1) = A;$ //successful User Service 15. $C(i, 2) = depth;$ 16. $Rest_{depth+1} = 0;$ 17. $m(m_{sorted}(depth)) = m(m_{sorted}(depth)) - Rest_{depth};$ //Resource Update of serving Node 18. else 19. $C(i, 1) = C(i, 1) + C_{avail};$ 20. $m(m_{sorted}(depth, 1), 1) = 0;$ 21. $depth = depth + 1;$ //Update Resource Search Depth 22. $Rest_{depth} = Rest_{depth-1} - C_{avail};$ 23. end_if 24. end_while 25. end_if

Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ο καθοριστικός ρόλος του διανύσματος m_{sorted} για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αναζήτησης των υπολειπόμενων προς εξυπηρέτηση ενός νεοεισερχόμενου χρήστη πόρων. Συγκεκριμένα, αυτό καθορίζει από πού θα αναζητηθούν οι πόροι αυτοί. Η προαναφερθείσα επιλογή του διανύσματος αυτού κατευθύνει την αναζήτηση σε περιοχές όπου υπάρχει περίσσεια διαθέσιμων πόρων, οδηγώντας έτσι σε όσο το δυνατό ταχύτερη εξυπηρέτηση και πρόσβαση στην υπηρεσία για τους νεοεισερχόμενους χρήστες. Παράλληλα, αυτό μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης εξυπηρέτησης, η οποία και αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου (*metric*). Το συγκεκριμένο κριτήριο αξιολόγησης του αλγορίθμου θα αναλυθεί επαρκώς σε συνδυασμό με πρόσθετα κριτήρια στο αντίστοιχο κεφάλαιο της προσομοίωσης. Ενδεχόμενη διαφορετική επιλογή του διανύσματος m_{sorted} θα οδηγούσε τον sBS να αναζητήσει τους υπολειπόμενους πόρους σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έλλειψη διαθέσιμων πόρων,

προκαλώντας αύξηση τόσο της καθυστέρησης εξυπηρέτησης όσο και της πιθανότητας αποκλεισμού χρηστών και υπερφορτώνοντας άσκοπα το προς σχεδίαση δίκτυο, αυξάνοντας δηλαδή τον εισαγόμενο πλεονασμό (*overhead*).

3.5 Πλεονέκτημα Συγκεντρωτικής Εκδοχής Προτεινόμενου Αλγορίθμου

Κομβική για τη λειτουργία και την αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε μεγάλες εκδηλώσεις συνάθροισης χρηστών σε προκαθορισμένη περιοχή είναι η γνώση της χωροχρονικής κατανομής των αναμενόμενων χρηστών εκ μέρους του αναβαθμισμένου σταθμού βάσης (*sBS*) που έχει αναλάβει την εξυπηρέτησή τους. Στο πλαίσιο της προσομοίωσης, θεωρήθηκε η χωροχρονική κατανομή Poisson. Με βάση τη γνώση αυτή, ο *sBS* αρχικά κατανέμει τους N διαθέσιμους πόρους στα M σημεία πρόσβασης (APs) με στόχο οι πόροι να αποδοθούν όσο το δυνατό πλησιέστερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν ώστε να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατό περισσότεροι χρήστες. Στα συμβατικά δίκτυα, σε κάθε σταθμό βάσης- στην υπό μελέτη περίπτωση τα APs- είναι δυνατή η λειτουργία του χρονοπρογραμματισμού (*scheduling*) για τη διαχείριση της κατανομής των ραδιοπόρων σε κάθε κυψέλη (που ορίζεται από την εμβέλεια εκάστου των M σημείων πρόσβασης). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, όμως, πραγματοποιεί κατανομή των πόρων σε επίπεδο συστήματος (*system-wide resource allocation*) αντιμετωπίζοντας μια ευρύτερη εκδοχή του ίδιου προβλήματος βελτιστοποίησης (*multi cell version of optimisation problem*). Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συγκεντρωτική εκδοχή του προτεινόμενου αλγορίθμου παρέχει μία περισσότερο δυναμική διαχείριση των πόρων και της ζήτησης (*"liquid" resource allocation and traffic management*), καθώς οι πόροι δεν κατανέμονται στατικά σε κάθε σημείο πρόσβασης αλλά ακολουθώντας το προφίλ εμφάνισης χρηστών που υποδεικνύει η γνώση της χωροχρονικής κατανομής της εμφάνισης χρηστών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3.1: Απόδειξη σχέσης (3.2.2)

Η σχέση (3.2.2) προκύπτει εύκολα από τον Ορισμό 2.8 του Κεφ.2, σύμφωνα με τον οποίο το πλήθος των γεγονότων μιας μη ομογενούς διαδικασίας Poisson με μη αρνητική ένταση $\lambda(t)$ στο διάστημα $(a, \beta]$ ακολουθεί ως τυχαία μεταβλητή την κατανομή Poisson με μέση τιμή $\int_a^\beta \lambda(t) dt$, δηλαδή

$$\Pr[X(\beta) - X(a) = n] = \frac{\left(\int_a^\beta \lambda(t) dt\right)^n e^{-\int_a^\beta \lambda(t) dt}}{n!} \quad \text{για } 0 < a \leq \beta, n = 0, 1, 2, \dots \quad (\Pi 3.1.1)$$

Αντικαθιστώντας, λοιπόν, στον τύπο της σχέσης (Π3.1.1) το a με 0 και το β με c προκύπτει η πιθανότητα εμφάνισης n κόμβων στο χρονικό παράθυρο $[0, c]$ με $n = 1, 2, \dots$. Αν το ενδεχόμενο {κόμβοι που θα εμφανιστούν στο χώρο S στο χρονικό παράθυρο $[0, c] > K$ } συμβολιστεί με Ω προκύπτει

$$\frac{1}{n!} \sum_{j=1}^{j=K} \left(\int_0^c \lambda_t(t) dt \right)^n e^{-\int_0^c \lambda_t(t) dt} + \Pr(\Omega) = 1$$

καθώς ο πρώτος όρος του αθροίσματος εκφράζει την πιθανότητα να εμφανιστούν έως και K κόμβοι στο χρονικό διάστημα $[0, c]$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

4.1 Περιπτώσεις εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου ενδέχεται να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε παρόχους κινητών δικτύων (Mobile Network Operators-MNO) προκειμένου να παρέχουν ευρυζωνική κάλυψη και συνδεσιμότητα (coverage & broadband connectivity) σε περιπτώσεις μεγάλων συγκεντρώσεων χρηστών (Mass/Large Scale Events) σε συγκεκριμένη περιοχή (χώρος S). Για παράδειγμα, ως τέτοιου είδους συγκεντρώσεις μπορούν να θεωρηθούν συναυλίες σε ανοικτούς ή κλειστούς χώρους, ένα διήμερο συνέδριο που πραγματοποιείται σε ένα πανεπιστημιακό ή ξενοδοχειακό χώρο, ένας δημοφιλής αθλητικός αγώνας ή διάφορες εκδηλώσεις σε εμπορικά κέντρα. Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των γεγονότων είναι ο συγκεκριμένος και περιορισμένος χώρος όπου πραγματοποιούνται και η συγκεκριμένη και περιορισμένη διάρκεια κατά την οποία εμφανίζονται χρήστες και παρέχεται η υπηρεσία.

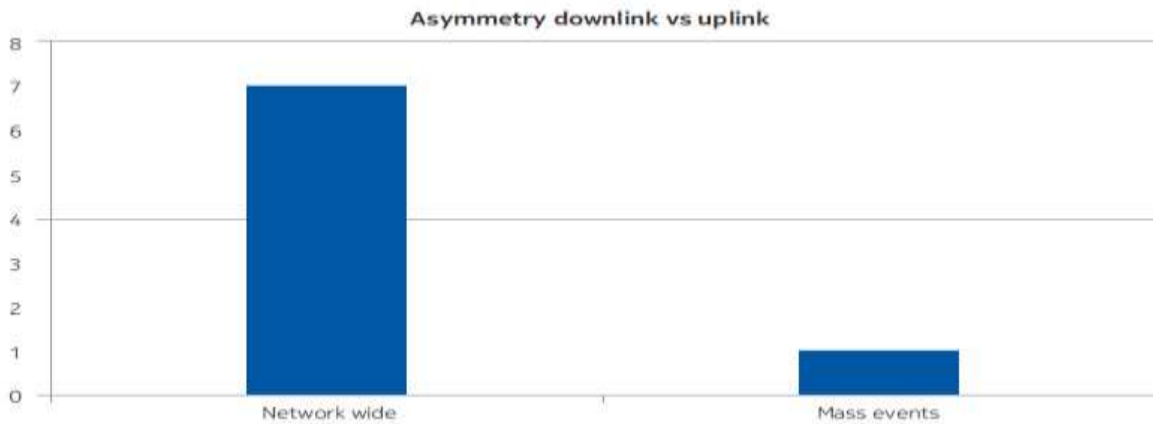
Στα επόμενα εδάφια της παρούσας υποενότητας θα αναλυθούν συγκεκριμένες πτυχές που αφορούν πραγματικά δίκτυα στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος.

4.1.1 Προφίλ Κίνησης σε μεγάλα γεγονότα(Traffic Profiles in Mass Events)

Στα συμβατικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών το προφίλ της αναπτυσσόμενης από τους χρήστες κίνησης (Traffic Profiles) χαρακτηρίζεται από το ότι η τηλεπικοινωνιακή κίνηση της καθοδικής ζεύξης(downlink) είναι έως και δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτήν της ανοδικής ζεύξης(uplink). Δηλαδή, τα δεδομένα που αποστέλλονται από το δίκτυο προς τα τερματικά των χρηστών είναι δέκα φορές περισσότερα σε σχέση με αυτά που ακολουθούν αντίθετη πορεία. Η κίνηση της καθοδική ζεύξης δημιουργείται κυρίως για παρακολούθηση βίντεο (video streaming) μέσω των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones), των Tablets και των φορητών υπολογιστών, καθώς η απλή επίσκεψη ιστοσελίδων αποτελεί ελαφρά δραστηριότητα (lightweight browsing). Αντιθέτως, η κίνηση κατά τη διάρκεια πολυπληθών εκδηλώσεων (crowded social events) είναι συνήθως διαφορετική. Συγκεκριμένα, η κίνηση της ανοδικής ζεύξης είναι σαφώς υψηλότερη και κατά τις ώρες αιχμής είναι δυνατό να υπερβεί κατά τρεις φορές την αντίστοιχη της καθοδικής ζεύξης (uplink traffic dominant). Για παράδειγμα, σε ένα υπαίθριο μουσικό φεστιβάλ ή σε ένα διεθνή ποδοσφαιρικό αγώνα, το κοινό τείνει να «ανεβάζει» (upload/share) φωτογραφίες,βίντεο και μηνύματα στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης(social media), προκαλώντας έτσι έκρηξη στην κίνηση της ανοδικής ζεύξης (Uplink Traffic Burst). Στο Σχ.4.2 απεικονίζεται αυτή η ασυμμετρία της κίνησης μεταξύ των δύο ζεύξεων.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι η περιγραφή της κατανομής εμφάνισης χρηστών μέσω της χωροχρονικής κατανομής Poisson $\lambda(t, x, y)$ ισοδυναμεί ουσιαστικά με εμφάνιση

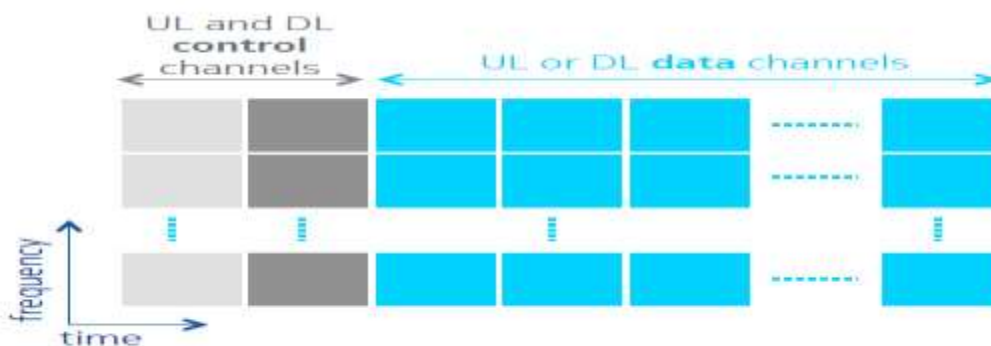
κίνησης στο προς σχεδίαση δίκτυο υποθέτοντας ότι κάθε εμφανιζόμενος χρήστης είναι ενεργός (active).



Σχήμα 4.1 Αναλογία μεταξύ κίνησης καθοδικής και ανοδικής ζεύξης (downlink/uplink traffic) στην επικράτεια του δικτύου(Network wide) και σε περιπτώσεις πολυπληθών γεγονότων (Mass events)

4.1.2 Τεχνική Αμφιδρόμησης(Duplex Method)

Με βάση τα χαρακτηριστικά της κίνησης που αναλύθηκαν προηγουμένως και δεδομένης της ασυμετρίας μεταξύ της κίνησης των δύο ζεύξεων, κρίνεται αναγκαία η επιλογή ως τεχνικής αμφιδρόμησης η δυναμική αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (Dynamic TDD (Time Division Duplex)). Πράγματι, η επιλογή της τεχνικής αυτής οδηγεί σε αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, καθώς όλο το εύρος συχνοτήτων μπορεί να αποδοθεί δυναμικά σε οποιαδήποτε κατεύθυνση ζεύξης με βάση τις άμεσες ανάγκες ζήτησης. Στο Σχ.4.3 φαίνεται η διάταξη των χρονοσχισμών (slot structure) ακολουθώντας την προαναφερθείσα τεχνική αμφιδρόμησης.

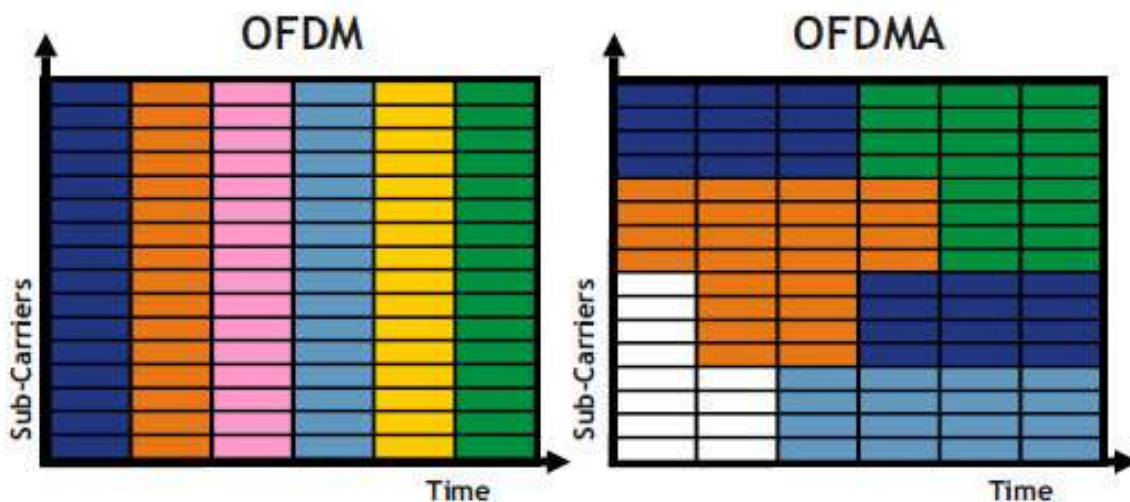


2. Slot structure for flexible TDD

Σχήμα 4.2 Διάταξη χρονοσχισμών για τη δυναμική αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου(Flexible TDD)

4.1.3 Πολλαπλή Πρόσβαση(Multiple Access)

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί και σχολιαστεί η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access), που υπαγορεύουν οι ανάγκες του προς σχεδίαση δικτύου. Συγκεκριμένα, λόγω των πλεονεκτημάτων που τη συνοδεύουν η τεχνική OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) κρίνεται ως η ενδεδειγμένη επιλογή. Στην ουσία, πρόκειται για ένα πολυδιαυλικό σχήμα (multicarrier scheme) κατανομής ραδιοπόρων σε πολλαπλούς χρήστες που χρησιμοποιεί την τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Η τεχνική αυτή χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά επιμέρους φέροντα με φασματική απόσταση 15kHz. Στη συνέχεια, διαμορφώνει εκάστο εξ αυτών χωριστά χρησιμοποιώντας διάφορα ψηφιακά σχήματα διαμόρφωσης όπως QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Η διαφορά μεταξύ της OFDM και OFDMA έγκειται στο ότι, στην πρώτη περίπτωση, ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα (πόροι) ανήκουν σε ένα και μόνο χρήστη επί συγκεκριμένη χρονική περίοδο (slot duration). Αντιθέτως, στην περίπτωση της OFDMA πολλοί χρήστες μοιράζονται το διαθέσιμο φάσμα στη διάρκεια μιας χρονοσχιμής. Αυτό γίνεται ιδιαίτερως αντιληπτό από το διάγραμμα του Σχ.4.4 που ακολουθεί.

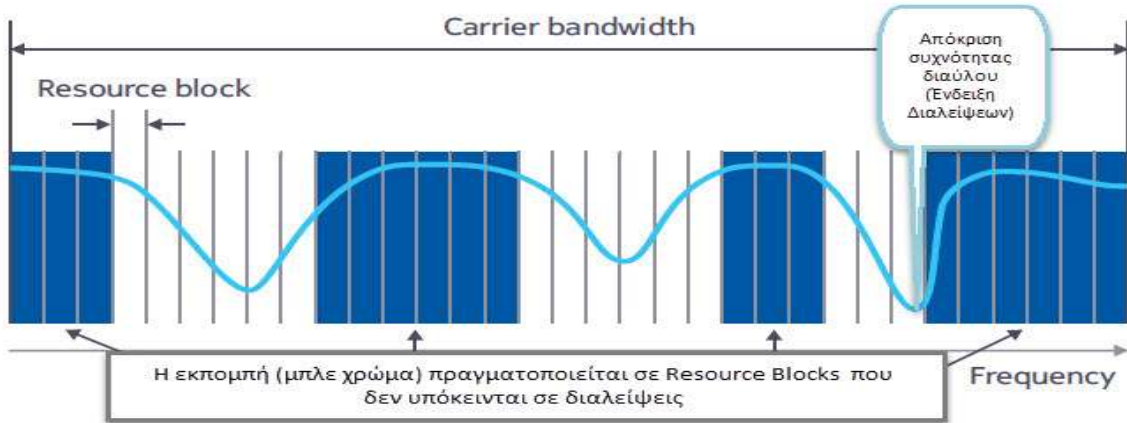


Σχήμα 4.3 OFDM vs. OFDMA: Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει μία έκρηξη στα δεδομένα χρηστών. Η τεχνική OFDMA επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Ακολούθως, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα της τεχνικής OFDM :

- *Υψηλή φασματική απόδοση (High spectral efficiency):* Κάθε κυψέλη κατανέμει διαφορετικά υποφέροντα σε διαφορετικούς χρήστες. Η ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερόντων αυτών μετριάζει σημαντικά την ενδοκυψελική παρεμβολή οδηγώντας σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.
- *Ανθεκτικότητα έναντι των διαλείψεων (Anti-fading):* Η τεχνική OFDMA τεμαχίζει μία μετάδοση ευρείας ζώνης (wideband) σε πολλαπλές μεταδόσεις στενής ζώνης

(narrowband) περί διάφορα επιμέρους φέροντα. Όπως φαίνεται και από το Σχ.4.5 κάθε επιμέρους μετάδοση πραγματοποιείται μέσω διαύλων επίπεδων διαλείψεων (flat fading channel) και δεν παρατηρούνται επιλεκτικές ως προς συχνότητα διαλείψεις (frequency selective fading).



Σχήμα 4.4 Χρονοπρογραμματισμός μετάδοσης (scheduling) προς ελαχιστοποίηση της επίδρασης των διαλείψεων

Στην περίπτωση του προς σχεδίαση δικτύου, όμως, οι διαλείψεις δεν αποτελούν κυρίαρχο περιοριστικό πρόβλημα, καθώς η αρχική εγκατάσταση πολυάριθμων ισχυρών κόμβων στον προς κάλυψη χώρο S (στάδιο, συναυλιακός χώρος) εξασφαλίζει την οπτική επαφή (Line of Sight) ανάμεσα στα τερματικά και το εκάστοτε σημείο πρόσβασης τους.

- *Δυναμική κατανομή πόρων (Dynamic Resource Allocation)*: Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, που αποβαίνει ιδιαίτερος χρήσιμο για το προς σχεδίαση δίκτυο, είναι η διαμερισσιμότητα (granularity) που παρέχει ως προς την κατανομή πόρων στους διάφορους χρήστες. Ουσιαστικά, καθίσταται δυνατή η ανάθεση πολλαπλών στοιχειωδών πόρων ανά χρήση, σε διαφορετικά υποφέροντα και χρονοσχισμές αντίστοιχα προς τις συνθήκες του εκάστοτε διαύλου.

Εκτός, όμως, από τα προαναφερθέντα πλεονέκτηματα, η σχεδόν καθολική αποδοχή της τεχνικής OFDMA από τις σύγχρονες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technologies-RAT), όπως από τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (LTE) και το Wi-Fi, δεν αφήνει περιθώριο για διαφορετική επιλογή. Προς τούτο, λοιπόν, στην επόμενη υποενότητα κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί συνοπτικά η έννοια των ραδιοπόρων στην αρχιτεκτονική LTE και η σύνδεσή της με τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομή πόρων. Να σημειωθεί, επίσης, ότι η επιλογή της τεχνολογίας 4^{ης} γενιάς ως τρόπου ραδιοπρόσβασης στο προς μελέτη τηλεπικοινωνιακό δίκτυο καθιστά ευχερέστερη και τη διαλειτουργικότητά του με τα κυψελωτά δίκτυα. Το γεγονός χαρακτηρίζεται πρωτίστως σημασίας αναφορικά με τις σχεδιαστικές αρχές ενός δικτύου στο πλαίσιο κάποιου ad hoc γεγονότος (συνέδριο, συναυλία, αθλητικός αγώνας), προκειμένου οι εκάστοτε

χρήστες να έχουν αδιάλειπτη πρόσβαση στις παρεχόμενες υπηρεσίες πριν, κατά τη διάρκεια, και μετά το πέρας του γεγονότος.

4.2 Το πλαίσιο χρονοπρογραμματισμού στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (LTE) (The LTE scheduling framework)

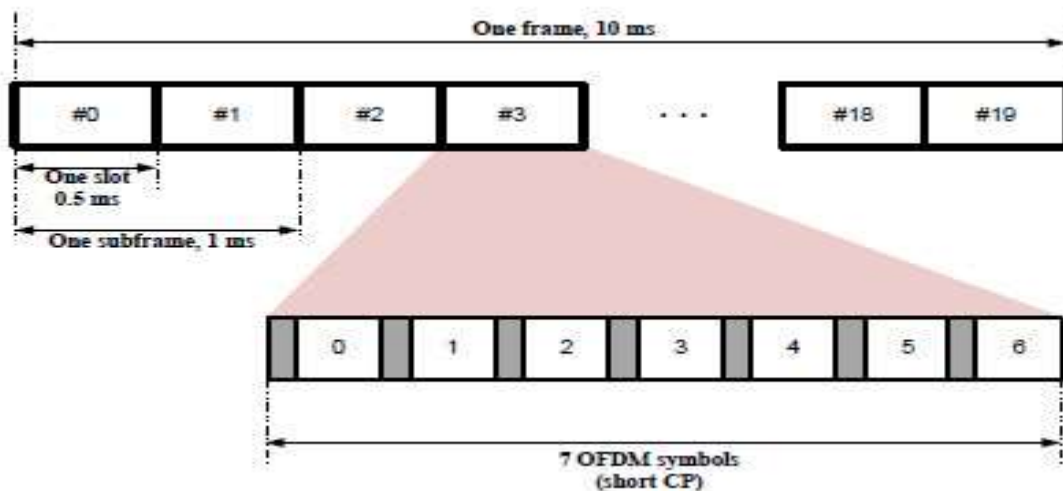
Η διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού έχει καταλυτικό ρόλο για την επίτευξη βέλτιστης και αποδοτικής χρησιμοποίησης των διαθέσιμων ραδιοπόρων του δικτύου. Η επίδρασή του γίνεται ακόμη σημαντικότερη σε περιπτώσεις περιορισμένων διαθέσιμων δικτυακών πόρων, όπου διαφορετικοί χρήστες επιθυμούν να αποκτήσουν ταυτόχρονα πρόσβαση στις παρεχόμενες από το δίκτυο υπηρεσίες. Στις περιπτώσεις αυτές, ανήκουν και τα διάφορα ad hoc γεγονότα συγκέντρωσης μεγάλου πλήθους χρηστών, όπως συναυλίες και αθλητικοί αγώνες, κατά τα οποία παρατηρείται έξαρση της κίνησης, ιδίως μέσω των κοινωνικών δικτύων (social media traffic burst). Οι περιορισμένοι διαθέσιμοι ραδιοπόροι κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όσο περισσότερο αποδοτικά είναι δυνατό, προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες των πολυάριθμων χρηστών για πρόσβαση στο δίκτυο. Αυτό μεταφράζεται σε ανάθεση συγκεκριμένου πλήθους ραδιοπόρων από την οντότητα που οργανώνει τον χρονοπρογραμματισμό (scheduler). Στην προσπάθεια αυτή, λοιπόν, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά και ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής πόρων, στοχεύοντας στην απόδοση των ραδιοπόρων όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν από τους εκάστοτε εμφανιζόμενους χρήστες. Στη συνέχεια, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί η δομή του πλέγματος ραδιοπόρων στα δίκτυα LTE και το πώς αυτή αξιοποιείται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Αρχικά, το φυσικό στρώμα σε ένα σταθμό βάσης τεχνολογίας LTE, eNodeB, είναι υπεύθυνο για την προστασία της πληροφορίας από τα λάθη που οφείλονται στις συνθήκες διάδοσης αξιοποιώντας την τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Modulation and Coding- AMC). Τα σχήματα QSPK, 16QAM, 64QAM συνιστούν τα διαθέσιμα σχήματα διαμόρφωσης, τόσο για την καθοδική όσο και την ανοδική ζεύξη. Τέλος, η πληροφορία για την ποιότητα του διαύλου (Channel Quality Information-CQI) συλλέγεται από το σταθμό βάσης μέσω μετρήσεων πιλοτικών σημάτων (pilot signal measurements) και καθορίζει το επιλεγόμενο κάθε φορά σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που κλαθε φορά επιλέγεται για κάθε χρήστη σε κάθε κυψέλη.

Με σκοπό την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης, οι διαθέσιμοι ραδιοπόροι απονέμονται δυναμικά σε κάθε χρήστη τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας σύμφωνα με μία πολυδιαυλική εκδοχή της πολλαπλής πρόσβασης, την OFDMA. Εικότερα, στην καθοδική ζεύξη εφαρμόζεται η απλή εκδοχή της OFDMA, ενώ κατά την ανοδική ζεύξη χρησιμοποιείται την μονοκαναλική εκδοχή αυτής, η SC(Single Carrier) –FDMA, με στόχο τη μείωση της αναπόφευκτης αλληλοπαρεμβολής μεταξύ των διαφόρων χρηστών. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι τα κυψελωτά δίκτυα 4^{ης} γενιάς χρησιμοποιούν μοναδιαίο συντελεστή αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Δηλαδή, η συχνότητα λειτουργίας είναι ίδια σε

όλες τις κυψέλες που παρέχουν κάλυψη στην περιοχή ενδιαφέροντος. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο, η OFDMA είναι μια πολυδιαυλική τεχνολογία, κατά την οποία το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαχωρίζεται σε πολλαπλούς ορθογώνιους μεταξύ τους υποδιαύλους στενής ζώνης. Στους χρήστες, λοιπόν, αποδίδονται συγκεκριμένοι υποδιαυλοι επί συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, προκειμένου πολλαπλοί χρήστες να μπορούν να επικοινωνήσουν ταυτόχρονα, όπως γίνεται φανερό και από το Σχ.4.3.

Στο Σχ.4.5 απεικονίζεται η δομή του πλαισίου φυσικού στρώματος (Physical Layer Frame) υποθέτοντας πολύπλεξη διαίρεση συχνότητας (FDD) ως τεχνική αμφιδρόμησης. Στη δομή αυτού του πλαισίου βασίζεται η επικοινωνία στο πρότυπο LTE. Συγκεκριμένα, κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια 10ms και διαιρείται σε 10 υποπλαίσια (subframes). Κάθε υποπλαίσιο διαιρείται περαιτέρω σε 2 χρονοσχισμές (slots) διάρκειας 0.5ms. Υποθέτοντας χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος (normal Cyclic Prefix-CP) κάθε χρονοσχισμή αποτελείται από 7 OFDM σύμβολα, ενώ, όταν χρησιμοποιείται εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα (extended CP) από 6 OFDM symbols.



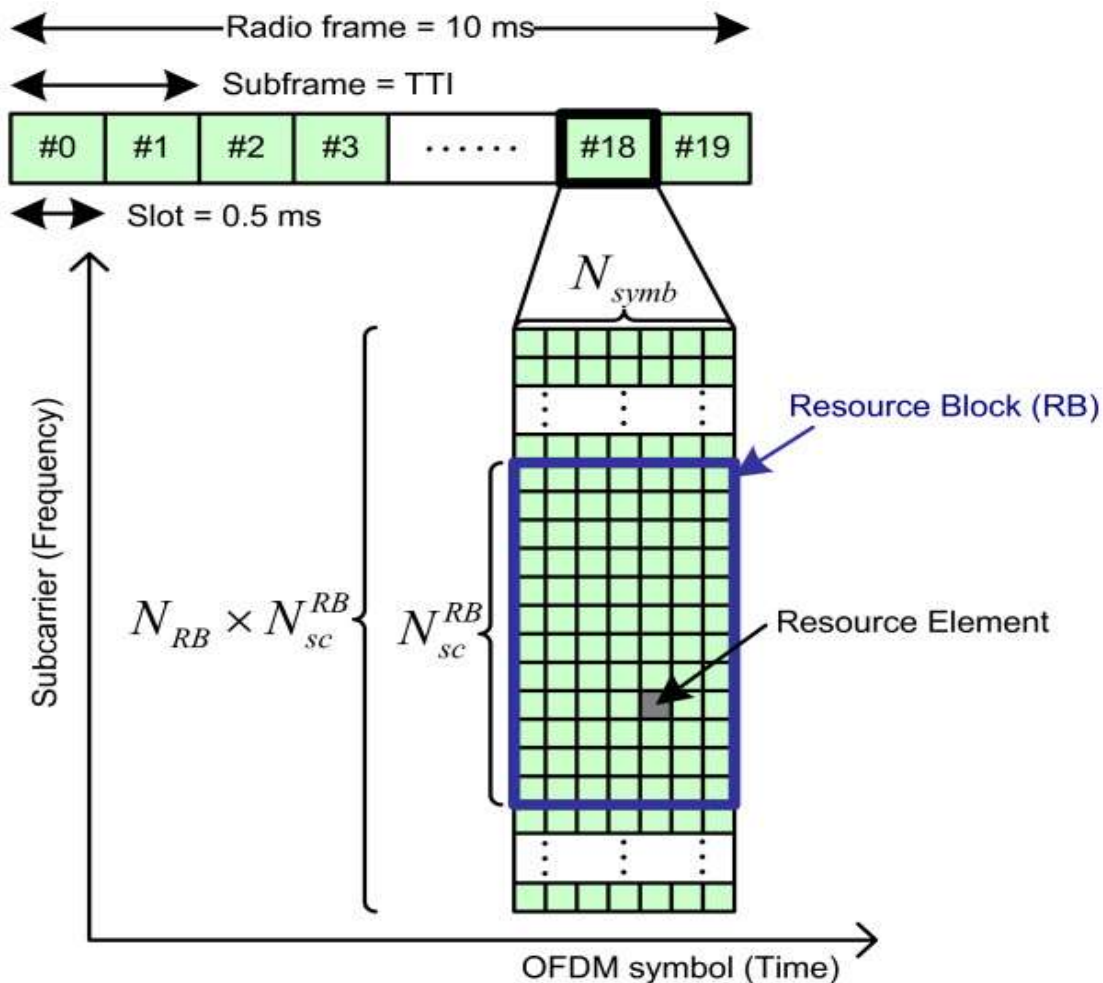
Σχήμα 4.5 Δομή πλαισίου στο LTE (frame structure)

Στο πεδίο του χρόνου, οι ραδιοπόροι απονέμονται ανά 1ms ή TTI (Transmission Time Interval), το οποίο θεωρείται ως ελάχιστη μονάδα χρονοπρογραμματισμού (minimum scheduling unit) στο LTE και αντιστοιχεί σε ένα υποπλαίσιο διάρκειας 1ms. Στο πεδίο της συχνότητας, το διαθέσιμο εύρος ζώνης (1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz) διαιρείται και αυτό σε υποδιαύλους (subchannels), έκαστος των οποίων περιλαμβάνει 12 υποφέροντα (subcarriers) που απέχουν 15kHz μεταξύ τους. Κάθε υποδιαυλος διαθέτει, λοιπόν, εύρος ζώνης 180kHz (12*15kHz) και μαζί με τα 7 σύμβολα συνιστούν ένα Resource Block (RB) στο πεδίο του χρόνου. Το πλήθος των RB μεταβάλλεται από 6 έως 100, αντίστοιχα με εκάστοτε το διαθέσιμο εύρος ζώνης και δίνεται στον Πίν.4.1, όπως αναφέρει το πρότυπο LTE.

Channel Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100

Πίνακας 4.1 Διαθέσιμο πλήθος RBs ανά διαθέσιμο εύρος ζώνης στο LTE

Στη συνέχεια, στο Σχ.4.6 παρουσιάζεται το πλέγμα πόρων (resource grid) για την καθοδική ζεύξη του LTE. Κάθε τετράγωνο στο πλέγμα αντιστοιχεί σε ένα υποφέρον για διάρκεια ενός συμβόλου και ονομάζεται στοιχειώδης πόρος ή Resource Element(RE). Επομένως, κάθε RB αποτελείται από 84 REs στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος ή 72 REs στην περίπτωση του με εκτεταμένου CP. Μερικά από αυτά, μάλιστα, δεσμεύονται για λόγους συγχρονισμού και εκτίμησης του διαύλου και κατέχουν συγκεκριμένη θέση μέσα στο πλέγμα χρόνου-συχνότητας.



Σχήμα 4.6 Πλέγμα ραδιοπόρων στο LTE (LTE resource grid)

4.2.1 Υπολογισμός πλήθους διαθέσιμων πόρων στο πλαίσιο του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων

Στο πλαίσιο του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, κρίνεται σκόπιμο να υιοθετηθεί το δισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης των διαθέσιμων πόρων όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Προς τούτο πρέπει να αποσαφηνιστεί η έννοια πόρος στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ουσιαστικά, πρόκειται για τη χρησιμοποίηση συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων (frequency band) επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (time slot) από το συνολικά διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων που έχει αποδοθεί προς χρήση στο χώρο S . Ο αναβαθμισμένος σταθμός βάσης (sBS) διαχειρίζεται το διαθέσιμο πλέγμα χρόνου συχνότητας λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη κίνηση στην περιοχή ευθύνης εκάστου των M ισχυρών κόμβων ή σημείων πρόσβασης (APs) που καλύπτουν το χώρο S , και προκύπτει μέσω της έντασης της πολυδιάστατης διαδικασίας Poisson, $\lambda(t, x, y)$, η οποία και αποτελεί την είσοδο του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Η έξοδος του προτεινόμενου αλγορίθμου συνίσταται στο πλήθος των χρονοσχημάτων, ή Resource Blocks σε όρους LTE, που αρχικά θα απονεμηθεί στα M σημεία πρόσβασης προκειμένου, στη συνέχεια, να εξυπηρετήσουν τους εκάστοτε εμφανιζόμενους εντός της εμβέλειας τους χρήστες. Ικανοποιείται, έτσι, η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου, η οποία αποσκοπεί στην απόδοση των διαθέσιμων πόρων, RBs , όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν στη συνέχεια.

Κρίνεται αναγκαίο να παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει το συνολικά διαθέσιμο πλήθος πόρων, N , το οποίο στη συνέχεια ο sBS καλείται να κατανείμει κατάλληλα στα M σημεία πρόσβασης. Αρχικά, ο πάροχος του δικτύου, που έχει αναλάβει την κάλυψη του χώρου S στο πλαίσιο ενός ad hoc γεγονότος, διαθέτει συγκεκριμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, το οποίο θα αξιοποιηθεί για να επιτευχθεί η απαιτούμενη χωρητικότητα για το συγκεκριμένο γεγονός. Το εύρος αυτό συχνοτήτων, BW , ενδέχεται να έχει αδειοποιηθεί στον πάροχο του δικτύου κατά της διάρκεια τακτικής δημοπράτησης φάσματος πολύ πριν την πραγματοποίηση του ad hoc γεγονότος ή να παραχωρήθηκε υπό μορφή εκμίσθωσης μόνο στο πλαίσιο του γεγονότος. Για παράδειγμα, σε πολυπληθή αθλητικά γεγονότα, όπως οι ολυμπιακοί αγώνες, όπου οι ανάγκες για χωρητικότητα υπερβαίνουν κατά πολύ τη μέση διαστασιολόγηση των δικτύων, ενδέχεται να αποδοθούν στους παρόχους υπηρεσιών πρόσθετες ζώνες συχνοτήτων με μεθόδους εκμίσθωσης (spectrum leasing) ώστε να ανταποκριθούν στην αύξηση της αναπτυσσόμενης κίνησης. Τέτοιες ζώνες συχνοτήτων είναι πιθανό αποτελέσουν τα αποκαλούμενα TV White Spaces (TVWS), δηλαδή τα μη χρησιμοποιούμενα κανάλια της ζώνης UHF που προέκυψαν από την ολική μετάβαση στην ψηφιακή εκπομπή επίγειου τηλεοπτικού σήματος, γνωστά και ως ψηφιακό μέρισμα (Digital Dividend). Προς αυτή την κατεύθυνση, συμβάλλει καθοριστικά και η τεχνολογική δυνατότητα των δικτύων 4^{ης} γενιάς να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων με σκοπό την αύξηση του συνολικά διαθέσιμου εύρους ζώνης, δυνατότητας γνωστής και ως συνάθροιση φερόντων (Carrier Aggregation-CA).

Στη συνέχεια, το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων, όπως και αν αυτό προέκυψε στην διάθεση του παρόχου του δικτύου, αντιστοιχείται σε ένα συγκεκριμένο πλήθος RBs , N_{RBs} , όπως αυτά φαίνονται στον Πίν.4.1. Έπειτα, τα N_{RBs} διαθέσιμα RBs οργανώνονται σε χρονικά πλαίσια διάρκειας 10ms ώστε να καταστούν διαχειρίσιμα από την οντότητα που πραγματοποιεί το χρονοπρογραμματισμό των χρηστών, δηλαδή τον sBS σε όρους προτεινόμενου αλγορίθμου. Κάθε πλαίσιο περιλαμβάνει 20 χρονοσχισμές διάρκειας 0.5ms, όπως αναλύθηκε εκτενώς στην προηγούμενη υποενότητα, δηλαδή

$$N_{slots} = 20 \quad (4.1)$$

Επομένως, είναι φανερό ότι το πλήθος το συνολικά διαθέσιμων πόρων το οποίο ο sBS θα αναλάβει να καταναίμει στα M APs , προκύπτει:

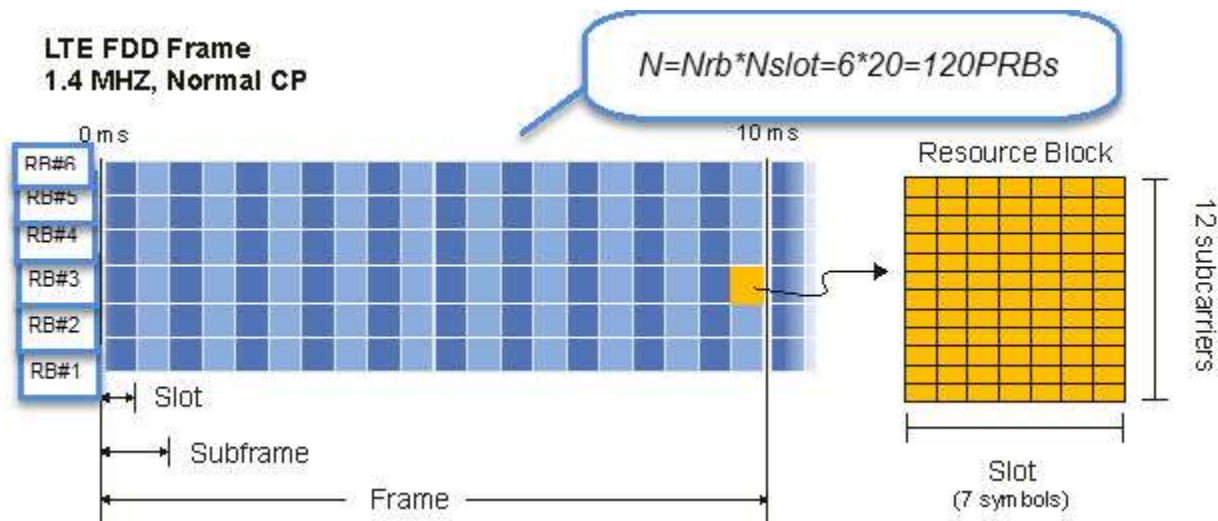
$$N = N_{RBs} \cdot N_{slots} \quad (4.2)$$

Προς κατανόηση του τρόπου υπολογισμού που περιγράφηκε προηγουμένως, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί ένα απλό παράδειγμα υπολογισμού του πλήθους των διαθέσιμων πόρων. Έστω, λοιπόν, ότι το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων εκ μέρους του παρόχου του δικτύου προς κάλυψη ενός ad hoc γεγονότος είναι $BW = 1.4 \text{ MHz}$. Αξιοποιώντας τον Πιν.4.1 διαπιστώνουμε ότι το διαθέσιμο πλήθος RBs είναι ίσο με $N_{RBs} = 6$

Χρησιμοποιώντας, τέλος, τις σχέσεις (4.1) και (4.2) προκύπτει το συνολικά διαθέσιμο πλήθος πόρων

$$N = N_{RBs} \cdot N_{slots} = 6 \cdot 20 = 120 \text{ PRBs (Physical Resource Blocks)} \quad (4.3)$$

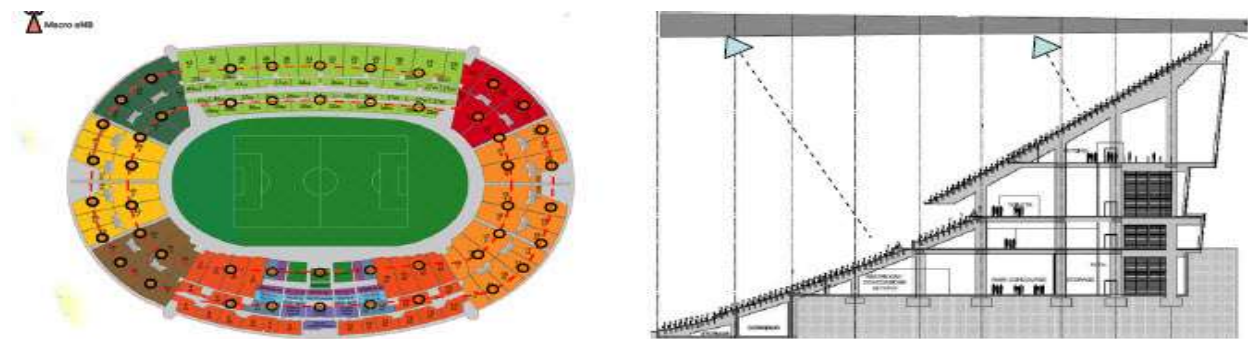
Στο Σχ.4.7 παρουσιάζεται το πλέγμα χρόνου συχνοτήτων στο πλαίσιο του προηγούμενου απλού παραδείγματος. Πράγματι, το συνολικό πλήθος των τετραγώνων, έκαστο των οποίων αντιστοιχεί σε $1RB$, είναι ίσο με 120, γεγονός που μπορεί να επαληθευθεί, χωρίς όμως να προτείνεται, και με απλή καταμέτρηση αυτών.



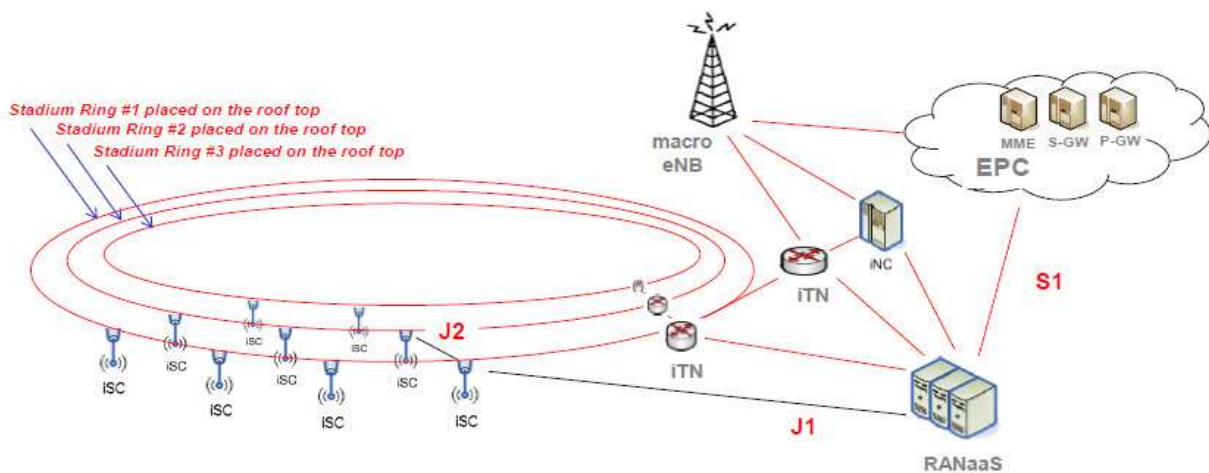
Σχήμα 4.7 Υπολογισμός διαθέσιμων πόρων (PRBs) για εύρος ζώνης $BW=1.4\text{MHz}$

4.3 Εφαρμογή προτεινόμενου αλγορίθμου σε περιπτώσεις κάλυψης εσωτερικών χώρων

Στο σημείο αυτό κρίνεται εύλογο να γίνει εκτενής αναφορά σε χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε κλειστούς χώρους. Σύμφωνα με στατιστικές μελέτες, άλλωστε, το 70% της τηλεπικοινωνιακής κίνησης δημιουργείται εντός κτιρίων. Ενδεικτικές περιπτώσεις, λοιπόν, μπορούν να θεωρηθούν συναυλίες σε κλειστούς χώρους, αθλητικοί αγώνες σε κλειστά γήπεδα (indoor areas coverage application). Ακόμη και τα ανοικτά γήπεδα, όπως αυτά του ποδοσφαίρου, μπορούν να χαρακτηριστούν ως κλειστοί χώροι, καθώς η περιοχή συγκέντρωσης των θεατών-χρηστών προσομοιάζει με κλειστό χώρο λόγω του στέγαστρου που υπάρχει πάνω από τις θέσεις των θεατών. Άλλωστε, στην οροφή αυτού του στέγαστρου αναμένεται εύλογα να εγκατασταθούν οι ισχυροί κόμβοι προκειμένου να παράσχουν κάλυψη και συνδεσιμότητα στους θεατές. Στο Σχ.4.8 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος τρόπος κάλυψης ενός ανοικτού γηπέδου. Ενδεικτικά, στο Σχ.4.8 φαίνεται ο τρόπος διασύνδεσης των σημείων πρόσβασης υπό την εποπτεία ενός αναβαθμισμένου σταθμού βάσης (macro eNB).



Σχήμα 4.8(α) Θέσεις τοποθέτησης των M ισχυρών κόμβων για την κάλυψη των θεατών



Σχήμα 4.8(β) Σύνδεση των APs με το δίκτυο κορμού του LTE με σκοπό τη μεταφορά της αναπτυσσόμενης κίνησης

Κατ' επέκταση, ένα συνέδριο σε κάποιο εκθεσιακό χώρο, όπου κάθε ομάδα εκθέτει στο περίπτερό της τα προϊόντα ή τα ερευνητικά της αποτελέσματα και οι συμμετέχοντες επισκέπτονται το περίπτερο, μπορεί να αποτελέσει ενδεχόμενη εφαρμογή το αλγόριθμου. Επίσης, εκδηλώσεις σε εμπορικά κέντρα που λαμβάνουν χώρα κυρίως τα Σαββατοκύριακα και οδηγούν στην εμφάνιση μεγάλου αριθμού χρηστών, καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ανασχεδιασμό του δικτύου προσαρμοσμένο στο εκάστοτε ad hoc γεγονός. Τέτοια γεγονότα, αποτελούν τα εγκαίνια ενός πολυκαταστήματος ακόμα και ενός εμπορικού κέντρου ή και η αρχική προβολή ενός νέου πολύ δημοφιλούς στο κοινό προϊόντος, όπως το νέο smartphone της εταιρείας Apple, iPhone 7.

Στα δύο τελευταία σενάρια, μάλιστα, η κατανομή των εμφανιζόμενων χρηστών στον προς κάλυψη χώρο, εκθεσιακό ή εμπορικό κέντρο, τείνει να μην είναι ομοιόμορφη, καθώς ενδέχεται να υπάρχει συνωστισμός χρηστών έξω από συγκεκριμένο κατάστημα ή περίπτερο της έκθεσης. Αυτή η ανομοιογένεια, όμως, είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη από το σχεδιαστή του δικτύου (ή τον πάροχο της υπηρεσίας) μέσω κατάλληλης επιλογής της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson $\lambda(t, x, y)$ που περιγράφει την αναμενόμενη εμφάνιση χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Εξάλλου, η διαδικασία $\lambda(t, x, y)$ αποτελεί στην ουσία την είσοδο του προτεινόμενου αλγόριθμου προκειμένου να καταναείμει μέσω του αναβαθμισμένου σταθμού βάσης (sBS) περισσότερους διαθέσιμους ραδιοπόρους σε συγκεκριμένα σημεία πρόσβασης (APs), στην εμβέλεια των οποίων αναμένεται να εμφανιστεί το μεγαλύτερο ποσοστό των δυναμικών χρηστών.

4.3.1 Εμπορική λύση για κάλυψη εσωτερικών χώρων με παράλληλη χρήση του προτεινόμενου αλγόριθμου κατανομής πόρων

Στο εδάφιο αυτό θα παρουσιαστεί συνοπτικά η τεχνολογία Radio Dot System (RDS) ιδιοκτησίας της Ericsson, ενός από τους μεγαλύτερους προμηθευτές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού παγκοσμίως. Το καινοτόμο αυτό προϊόν έχει σχεδιαστεί για την κάλυψη κτιριακών χώρων (commercial solution for indoor coverage), όπου ενδεχομένως η κάλυψη από εξωτερικές κυψέλες να μην είναι ικανή να εξασφαλίσει με αποδοτικό, οικονομικό και κομψό τρόπο την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας που έχει εγγυηθεί ο εκάστοτε πάροχος μέσω των Service Level Agreements (SLAs) στους πελάτες. Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του (RDS) το έχουν ήδη καταστήσει επιτυχημένο στην αγορά, δεδομένου ότι έχει υιοθετηθεί ήδη από πολλούς παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπως Vodafone, Verizon, ChinaTelecom, αν και μετρά μόνο τρία χρόνια εμπορικής παρουσίας.

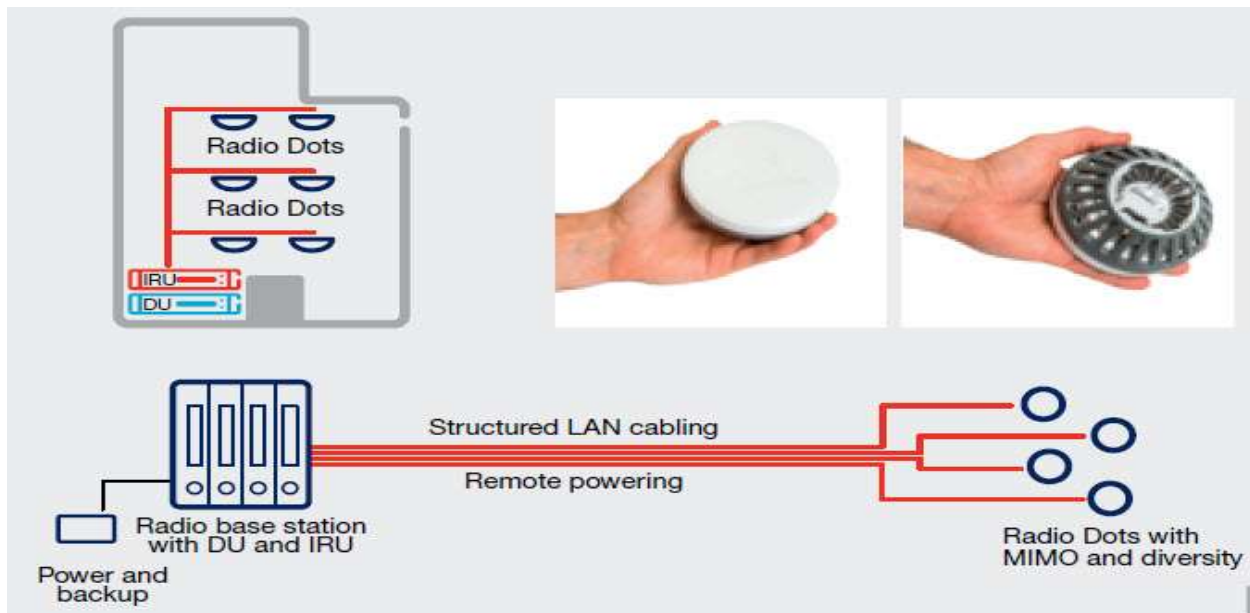
Το Radio Dot System (RDS) της Ericsson είναι σε θέση να άρει τους περιορισμούς συνδεσιμότητας και συμφόρησης που παρατηρούνται συχνά σε πολυπληθείς μεσαίου ή και μεγάλου μεγέθους εσωτερικούς χώρους, παρέχοντας κάλυψη σε διαφορετικού είδους χρήστες εντός των χώρων αυτών. Για την ακρίβεια, το σύστημα RDS χρησιμοποιεί ένα καινοτόμο στοιχείο κεραίας – τη radio dot («ραδιοτελεία») - που είναι σχεδιασμένο να παρέχει κινητές

ευρυζωνικές υπηρεσίες υψηλών επιδόσεων (high performance mobile broadband services). Κάθε στοιχείο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ακόμη και ολόκληρο όροφο. Ενδεχομένως, μπορούν να προστεθούν πρόσθετα στοιχεία, ενισχύοντας έτσι κατακόρυφα τη χωρητικότητα του προς σχεδίαση δικτύου. Με βάρος μόνο 300gr και τόσο μικροί απο πλευράς όγκου (βλ. Σχ.4.9) οι δίσκοι αυτοί (diskshaped Dots) αυξάνουν τη χωρητικότητα βελτιώνοντας την εμπειρία των χρηστών.



Σχήμα 4.9 Το ραδιοστοιχείο- κεραία (Radio Dot) του Radio Dot System

Στο σημείο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να τονιστεί ότι το σύστημα *RDS* είναι πλήρως διασυνδεδεμένο με τα κυψελωτά δίκτυα 3^{ης}/4^{ης} γενιάς. Δηλαδή, το *RDS* αναμεταδίδει μέσω των radio Dots σήμα από το κυψελωτό δίκτυο σε νεκρές ζώνες (dead zones) ή περιοχές με χαμηλή ποιότητα σήματος, φαινόμενο που είναι ιδιαίτερος συνηθισμένο σε μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα. Τέλος, κάθε δίσκος dot συνδέεται και τροφοδοτείται με τυποποιημένα καλώδια δικτύωσης τοπικών δικτύων (LAN cables) στην εσωτερική μονάδα (Indoor Radio Unit, IRU) και, κατ' επέκταση, σε ένα εξωτερικό σταθμό βάσης, όπως και υποδεικνύει το Σχ.4.10, που αποδίδει μια συστημική επισκόπηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Ειδικότερα, το σύστημα *RDS* αποτελείται από τρία στοιχεία: τη Radio Dot, την IRU και τη DU. Περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες σχετικά με τα στοιχεία του συστήματος *RDS* ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει στο αντίστοιχο white paper της Ericsson με τίτλο "Connecting the Dots: small cells shape up for high performance indoor radio", καθώς, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κρίθηκε σκόπιμο να δοθεί μόνο συστημική παρουσίαση (system level) του συγκεκριμένου συστήματος.



Σχήμα 4.10 Σχηματική περιγραφή του Ericsson Radio Dot System (*RDS*)

Συνοψίζοντας, τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας *RDS* είναι:

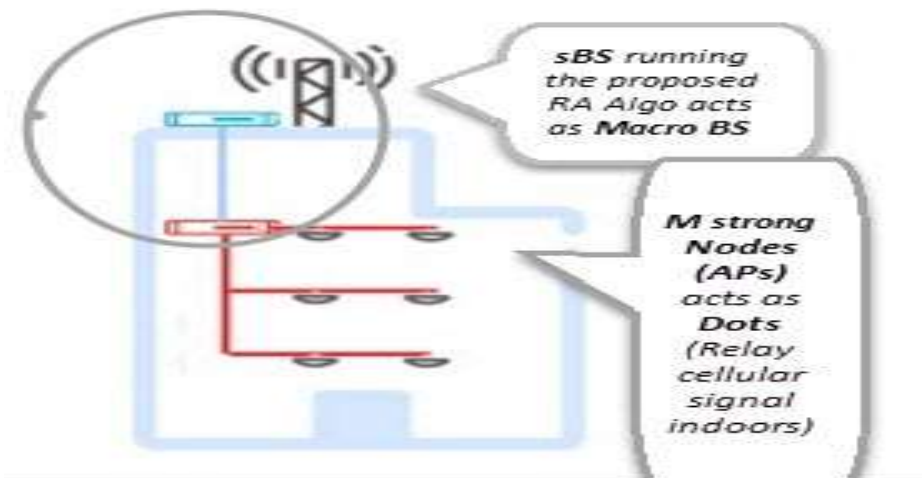
- Κομψότητα σχεδίασης
 - Συμπαγή δομικά στοιχεία μικρού βάρους (300 gr)
 - Εφικτή η ενοποίηση με τον περιβάλλοντα χώρο για αισθητικούς λόγους
- Ευκολία εγκατάστασης (γίνεται αντιληπτή και από το Σχ. 4.11 που ακολουθεί)
 - Απλοποιημένη λύση εσωτερικού χώρου
 - Έγχυση σήματος και ισχύος στα ενεργά στοιχεία κεραιών (Dots) μέσω καλωδίων τοπικού δικτύου LAN
 - Επεκτασιμότητα (scalability): υποστήριξη έως και 96 ταυτόχρονα ενεργών στοιχείων Dots από ένα σταθμό βάσης
 - Απομακρυσμένη ρύθμιση και συντήρηση σε επίπεδο κεραιοστοιχείου (manageable up to the antenna element)
- Υψηλή επίδοση
 - Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και ταχεία πρόσβαση στις παρεχόμενες υπηρεσίες
 - Βελτιωμένη χωρητικότητα και κάλυψη (λόγω δυναμικής εκχώρησης πόρων)
 - Διασύνδεση με τα κυψελωτά δίκτυα (3G/4G/4G+) (ευεργετικό για μεγάλους MNO)
- Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους για τον πάροχο (Total Cost Of Ownership Minimisation)
 - Κυρίως για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους κτιριακά συγκροτήματα (60% μείωση του κόστους καλωδίωσης)



Σχήμα 4.11 Ευκολία εγκατάστασης του συστήματος *RDS*. Σύνδεση κάθε στοιχείου με τυποποιημένο καλώδιο Internet τοπικής δικτύωσης LAN

Τέλος, κρίνεται σημαντικό να παρουσιαστούν οι αναλογίες μεταξύ των στοιχείων του συστήματος *RDS* και των οντοτήτων που συμμετέχουν στον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομής πόρων.

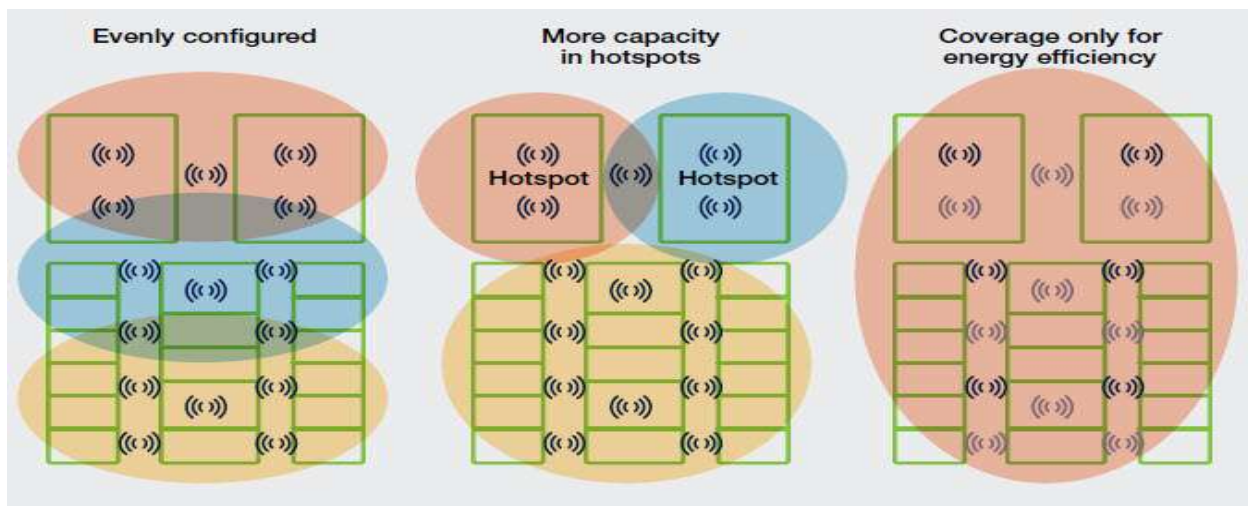
Χρησιμοποιώντας την ορολογία του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, οι δύο πρώτες συνιστώσες του *RDS*, δηλαδή οι IRU και DU, ουσιαστικά επιτελούν το ρόλο του αναβαθμισμένου σταθμού βάσης (*sBS*). Στο πλαίσιο αυτό, διαχειρίζονται και επεξεργάζονται συγκεντρωτικά τους διαθέσιμους ραδιοπόρους πριν τους κατανείμουν κατάλληλα στα διάφορα σημεία πρόσβασης (Radio Dots), τα οποία χρησιμοποιώντας την ορολογία του προτεινόμενου αλγορίθμου αντιστοιχούνται στους *M* ισχυρούς κόμβους που παρέχουν κάλυψη στο εσωτερικό χώρο. Τα προηγούμενα γίνονται αντιληπτά από το Σχ.4.12 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.12 Παράδειγμα υλοποίησης του προτεινόμενου αλγορίθμου με χρήση της τεχνολογίας *RDS*

Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι η αρχιτεκτονική του *RDS* είναι συγκεντρωτική, υπό την έννοια ότι είναι σε θέση να παράσχει χωρητικότητα στο δίκτυο με ευέλικτο τρόπο μέσω του αναβαθμισμένου σταθμού βάσης, *sBS*. Παράλληλα, το σύστημα αυτό είναι διαχειρίσιμο σε επίπεδο κεραιοστοιχείου, καθώς έκαστο εκ των Radio Dots μπορεί να παραμετροποιηθεί

κατάλληλα σε επίπεδο απόδοσης πόρων για την κάλυψη του εσωτερικού χώρου. Επιπλέον, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση που αναπτύσσεται σε εσωτερικούς χώρους (indoor traffic) διαφοροποιείται τόσο χωρικά όσο και με την πάροδο του χρόνου, ιδίως σε μεγάλα εταιρικά και εμπορικά κτίρια. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρείται μία έξαρση στην κίνηση γύρω από καταστήματα, καφετέριες και συνεδριακούς χώρους όπου συναθροίζονται πολλά άτομα. Όμως, η υψηλή αυτή κίνηση μειώνεται δραματικά, καθώς οι χρήστες απομακρύνονται. Επομένως, η χρησιμοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου με στόχο την κατανομή των εκάστοτε διαθέσιμων πόρων εκεί όπου πραγματικά αναμένεται να υπάρξει υψηλή κίνηση και επί όσο χρονικό διάστημα διαρκεί ένα γεγονός συναθροίσεως ατόμων (Large Mass Events), ή, ισοδύναμα, στα σημεία πρόσβασης- Radio Dots που αναμένεται να εξυπηρετήσουν μεγάλο πλήθος χρηστών, μπορεί αν αποβεί ιδιαίτερα ευεργετική σε όρους επίδοσης του δικτύου από πλευράς καθυστέρησης εξυπηρέτησης και πιθανότητας αποκλεισμού χρηστών. Στο Σχ.4.13 που ακολουθεί, γίνεται φανερό η προαναφερθείσα λογική με την οποία κατανέμεται χωρητικότητα στο χώρο με κατά περίπτωση δυναμικό και ευέλικτο τρόπο. Ειδικότερα, στο πρώτο σενάριο, η κατανομή των διαθέσιμων πόρων γίνεται εξίσου σε κάθε σημείο πρόσβασης. Προς τούτο, ο χώρος έχει χωριστεί σε τρεις ισοδύναμες από πλευράς χωρητικότητας ζώνες, έκαστη των οποίων περιλαμβάνει πέντε Dots. Στο δεύτερο σενάριο, η ύπαρξη δύο περιοχών αυξημένης κίνησης (Hotspots) στο άνω τμήμα του προς κάλυψη χώρου επιβάλλει την απόδοση περισσότερων ραδιοπόρων στα Dots που καλύπτουν τις περιοχές υψηλής ζήτησης και την ισοκατανομή των υπολοίπων πόρων στα εναπομείναντα κεραιοστοιχεία. Για το λόγο αυτό, άλλωστε, οι ζώνες που περιέχουν τα Hotspots έχουν χρωματιστεί με εντονότερο χρώμα ώστε να αποδοθεί το μεγαλύτερο πλήθος αποδοθέντων πόρων. Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο, η αναμενόμενη κίνηση είναι ιδιαίτερα χαμηλή, όπως συνήθως συμβαίνει σε εμπορικά κέντρα τις πρωινές ώρες ή αργά το βράδυ. Για την εξασφάλιση χωρητικότητας σε αυτό το χαμηλής κίνησης σενάριο, κρίνεται εύλογο να μη χρησιμοποιηθούν όλα τα σημεία πρόσβασης (Dots με απαλό χρώμα) για λόγους εξοικονόμησης πόρων και ενέργειας.



Σχήμα 4.13 Παραδείγματα δυναμικής εκχώρησης χωρητικότητας(Dynamic Capacity Provisioning)

4.4 Εφαρμογή προτεινόμενου αλγορίθμου σε περιπτώσεις κάλυψης εξωτερικών χώρων

Η ίδια διαδικασία εφαρμογής του αλγορίθμου κατανομής πόρων σε κλειστούς χώρους, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, μπορεί να υιοθετηθεί και στις περιπτώσεις εξωτερικών χώρων. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν συναυλίες ή αθλητικοί αγώνες σε ανοικτούς χώρους, όπως πλατείες και υπαίθριοι χώροι, όπου η υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή υποδομή δεν είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες των πολυάριθμων χρηστών που αναμένεται να εμφανιστούν στο πλαίσιο της εκδήλωσης (ad hoc Mass Event).

Στο σημείο αυτό κρίνεται εύλογο να αναφερθεί ότι η αναπτυσσόμενη κίνηση ενδέχεται να μην είναι μόνο uplink κίνηση που προκαλείται από τους χρήστες (User Driven Traffic), καθώς σε αντίστοιχα γεγονότα παρατηρείται έξαρση της uplink κίνησης (Uplink Traffic Burst) επειδή οι χρήστες δημοσιεύουν μέσω των κοινωνικών δικτύων φωτογραφίες ή ακόμη και βίντεο σε ζωντανή μετάδοση με στιγμιότυπα του συγκεκριμένου αθλητικού γεγονότος ή συναυλίας. Αντιθέτως, είναι πιθανό ο διοργανωτής του εκάστοτε γεγονότος να έχει σκοπό να παράσχει στους θεατές τη δυνατότητα να βλέπουν από το Smartphone ή το Tablet τους στιγμιότυπα από τη σκηνή της συναυλίας ή λήψεις του αθλητικού αγώνα από διαφορετικές κάμερες. Εφόσον, μάλιστα, πρόκειται για ποδοσφαιρικό αγώνα, ο θεατής θα μπορεί να δει σε επανάληψη την επίτευξη ενός τέρματος από διάφορες γωνίες λήψης, δυνατότητα ιδιαίτερως χρήσιμη για όσους βρίσκονται σε λιγότερο ευνοϊκές από άποψη ορατότητας θέσεις. Στο Σχ.4.14 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εφαρμογή αυτής της υπηρεσίας σε ένα ποδοσφαιρικό αγώνα βελτιώνοντας αισθητά την ποιότητα εμπειρίας των θεατών (Quality of Experience-QoE).



Σχήμα 4.14 Χρήση διαδραστικής υπηρεσίας θέασης σε ποδοσφαιρικό αγώνα

Οι προαναφερθείσες εφαρμογές μπορούν να χαρακτηριστούν ως καθολικές, καθώς πρέπει να είναι διαθέσιμες σε κάθε εμφανιζόμενο χρήστη-θεατή και υποκινούνται από το δίκτυο (Network

Driven Traffic). Επειδή, μάλιστα, οι εφαρμογές αυτές διαθέτουν το χαρακτήρα της εκπομπής, υπό την έννοια ότι το ίδιο περιεχόμενο ενδέχεται να εκπέμπεται είτε προς ένα (unicast) είτε προς πολλαπλούς χρήστες (multicast), κρίνεται προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία ραδιοπρόσβασης το LTE-Broadcast (eMBMS – enhanced Multimedia Broadcast Multicast Services). Το συγκεκριμένο πρότυπο διαθέτει τη δυνατότητα να αξιοποιήσει τα αχρησιμοποίητα από την εκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης κανάλια (TV-White Spaces) που διαθέτουν ιδιαίτερως ευνοϊκά χαρακτηριστικά διάδοσης. Παράλληλα, επιτυγχάνεται αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος, η ζήτηση για το οποίο έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια λόγω των ραγδαία εξελισσόμενων μέσων και υπηρεσιών επικοινωνίας, μετατρέποντάς το σε σπάνιο πόρο (Spectrum Scarcity).

Η εφαρμογή, λοιπόν, του προτεινόμενου αλγορίθμου μπορεί να συμβάλει αποφαστικά στην αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων από τον πάροχο που έχει αναλάβει την κάλυψη του εκάστοτε γεγονότος και την παροχή δημοφιλών προς τους θεατές επιλογών θέασης. Για την ακρίβεια, η γνώση των πιθανών σημείων με μεγάλη συγκέντρωση θεατών (Hotspot), η οποία προκύπτει μέσω της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson με ένταση $\lambda(t, x, y)$ που περιγράφει τη χωροχρονικό πρότυπο εμφάνισης χρηστών στο δίκτυο, υποδεικνύει στο σχεδιαστή του δικτύου σε ποιά από τα M το πλήθος σημεία πρόσβασης πρέπει να καταναείμει περισσότερους ραδιοπόρους στοχεύοντας στην αδιάλειπτη παροχή συνδεσιμότητας και πρόσβασης στις παρεχόμενες υπηρεσίες.

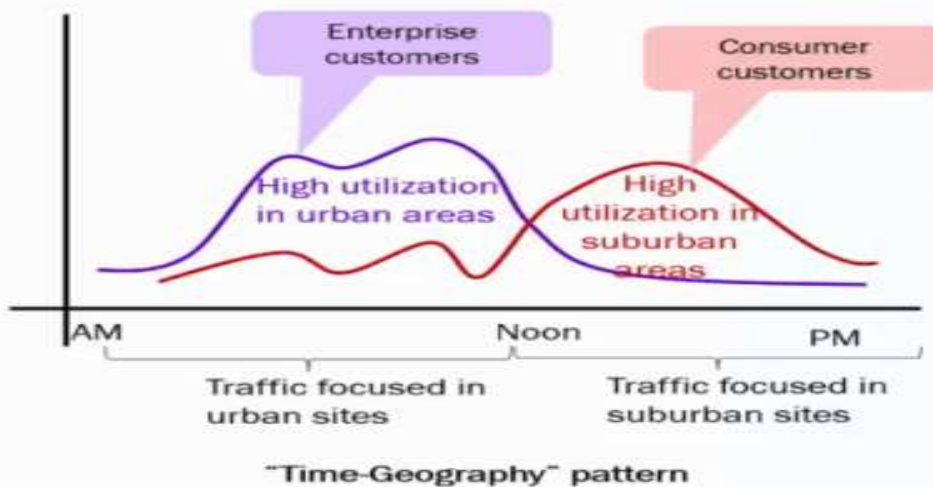
4.5 Εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου για την αντιμετώπιση του παλιρροϊκού φαινομένου

4.5.1 Το παλιρροϊκό φαινόμενο στα κυψελωτά δίκτυα

Ένα χαρακτηριστικό των κυψελωτών δικτύων κινητών επικοινωνιών είναι ότι οι συνδρομητές μετακινούνται. Συγκεκριμένα, από εμπειρικά δεδομένα λειτουργίας πραγματικών δικτύων έχει παρατηρηθεί ότι η κίνηση αυτή των συνδρομητών ακολουθεί συγκεκριμένα χωροχρονικά πρότυπα. Πράγματι, κατά τις πρωινές ώρες, περίπου κατά και λίγο μετά την έναρξη του ωραρίου εργασίας, μεγάλο πλήθος συνδρομητών μετακινείται από τις περιοχές κατοικίας στους χώρους εργασίας. Αντίθετα, μετά το τέλος του εργασιακού ωραρίου, οι συνδρομητές επιστρέφουν στις κατοικίες, επαναφέροντας έτσι τη χωρική κατανομή των χρηστών στην αρχική της μορφή. Συνεπώς, το φορτίο του δικτύου που εκφράζεται μέσω της χωρικής κατανομής εμφάνισης ενεργών χρηστών σε κάθε περιοχή (είτε κατοικιών είτε χώρων εργασίας) ακολουθεί συγκεκριμένο πρότυπο, γνωστό ως παλιρροϊκό φαινόμενο (*tidal effect*). Όπως φαίνεται από το Σχ.4.15, κατά τη διάρκεια του ωραρίου εργασίας, οι σταθμοί βάσης που εξυπηρετούν κυρίως τα κεντρικά γραφεία μεγάλων εταιρειών είναι υπερφορτωμένοι λόγω της αυξημένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης των εκεί εργαζόμενων. Αντίστοιχα, οι περιοχές κατοικιών ή χώρων ψυχαγωγίας εμφανίζουν αυξημένο τηλεπικοινωνιακό φορτίο, μετά τη λήξη του ωραρίου εργασίας και κατά τις ώρες αναψυχής.

Mobility - Tidal Wave Effect

Tidal Wave Effect



Σχήμα 4.15 Ημερήσια κατανομή τηλεπικοινωνιακού φορτίου σε δίκτυο κινητών επικοινωνιών σε περιοχές εργασίας (Urban Areas) και περιοχές κατοικιών (Suburban Areas)

Οι τηλεπικοινωνιακοί πόροι που έχουν αποδοθεί σε κάθε σταθμό βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο από τους ενεργούς χρήστες που βρίσκονται εντός της εμβέλειας των σταθμών. Ως εκ τούτου, σε συγκεκριμένη περιοχή με λίγους ενεργούς χρήστες παρατηρούνται υποχρησιμοποιούμενοι σταθμοί βάσης, ενώ σε χρονικές περιόδους με υψηλότερη πυκνότητα χρηστών συναντώνται υπερφορτωμένοι σταθμοί βάσης. Επομένως, κατά τη διάρκεια μιας ημερολογιακής ημέρας, οι σταθμοί βάσης συγκεκριμένης περιοχής άλλοτε υπερφορτώνονται τηλεπικοινωνιακά και άλλοτε υποχρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, όταν οι συνδρομητές μετακινούνται από μια περιοχή σε μία άλλη σύμφωνα με το προαναφερθέν παλιρροϊκό φαινόμενο, οι σταθμοί βάσης με τη μικρότερη πυκνότητα χρηστών διαχειρίζονται πολύ μικρό τηλεπικοινωνιακό φορτίο, οπότε το μεγαλύτερο μέρος των πόρων τους μένει ανενεργό. Οι διαχειριστές του δικτύου είναι υποχρεωμένοι να παρέχουν εικοσιτετράωρη ημερήσια κάλυψη (24x7), ώστε να εξασφαλίζουν αδιάλειπτη παροχή υπηρεσίας. Άμεσο επακόλουθο αποτελεί η κατανάλωση από τους υποχρησιμοποιούμενους σταθμούς βάσης της ίδιας ηλεκτρικής ενέργειας με αυτήν που καταναλώνουν τις ώρες αιχμής. Επιπλέον, η στατική διαστασιολόγηση των σταθμών βάσης του δικτύου, η οποία έχει ως στόχο να εξυπηρετείται πολύ μεγάλος αριθμός ενεργών συνδρομητών κατά τις ώρες αιχμής, οδηγεί σε κατασπατάληση πόρων σε χρονικές περιόδους χαμηλής κίνησης. Δηλαδή, οι σταθμοί βάσης σχεδιάζονται ώστε να έχουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτή που πραγματικά χρειάζονται για το μεγαλύτερο ποσοστό μιας ημερολογιακής ημέρας.

Η από κοινού κατανομή, λοιπόν, του συνόλου των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των διαφορετικών περιοχών μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των σταθμών βάσης που έχουν αναλάβει την κάλυψη ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος από την πλευρά

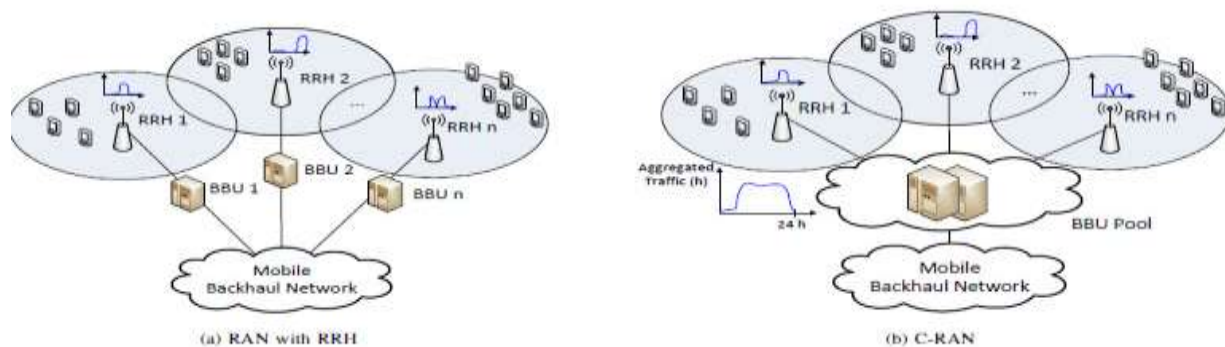
του MNO. Πλέον, γίνεται φανερό και η χρησιμότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, σύμφωνα με τον οποίο περισσότεροι διαθέσιμοι πόροι πρέπει να κατανέμονται σε εκείνους τους σταθμούς βάσης όπου αναμένεται να εμφανιστεί μεγάλο πλήθος χρηστών. Συγκεκριμένα, ο σταθμός βάσης με ενισχυμένες υπολογιστικές δυνατότητες (*sBS*) μπορεί να αναλάβει την κατάλληλη κατανομή των διαθέσιμων πόρων στα M σημεία πρόσβασης, ακολουθώντας την ορολογία του αλγορίθμου, ή στους σταθμούς βάσης, σε ορολογία κυψελωτών δικτύων, με κριτήριο το αναμενόμενο τηλεπικοινωνιακό φορτίο εκάστου εξ αυτών. Η συγκεκριμένη πληροφορία διατίθεται μέσω της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson με ένταση $\lambda(t, x, y)$ που είναι γνωστή στο λειτουργό του δικτύου μέσω των στατιστικών μελετών πραγματικών δικτύων.

Για παράδειγμα, η ένταση της προαναφερθείσας διαδικασίας Poisson $\lambda(t, x, y)$ κρίνεται σκόπιμο να διαθέτει δύο εκδοχές, μία για την περιγραφή της αναμενόμενης κίνησης κατά τις πρωινές ώρες (εργασίμες ώρες) $\lambda_{8:00}(t, x, y)$ και μια για την περιγραφή των απογευματινών ωρών (ώρες αναψυχής) $\lambda_{18:00}(t, x, y)$. Η ένταση $\lambda_{8:00}(t, x, y)$ θα έχει μεγαλύτερη τιμή για περιοχές που περιλαμβάνουν εργασιακούς χώρους, όπου αναμένεται υψηλή τηλεπικοινωνιακή κίνηση κατά τις πρωινές ώρες και μέχρι τη λήξη του εργασιακού ωραρίου. Έχοντας αυτή τη γνώση, ο *sBS* θα καταναίμει κατά την πρώτη εφαρμογή του αλγορίθμου τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου στους σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν τις συγκεκριμένες περιοχές υψηλού φορτίου. Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη εκδοχή της έντασης της διαδικασίας Poisson $\lambda_{18:00}(t, x, y)$ θα έχει μεγαλύτερες τιμές στις περιοχές όπου υπάρχουν κατοικίες ή χώροι αναψυχής, όπου αναμένεται υψηλή τηλεπικοινωνιακή κίνηση κατά τις απογευματινές ώρες. Αντίστοιχα, λοιπόν, με την πρωινή εφαρμογή του αλγορίθμου από τον *sBS*, με τη δεύτερη εφαρμογή του αλγορίθμου θα υπάρξει μετακίνηση των διαθέσιμων πόρων προς τις περιοχές που υποδεικνύει η ένταση $\lambda_{18:00}(t, x, y)$. Συνοψίζοντας, λοιπόν, και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής του αλγορίθμου με διαφορετικά δεδομένα αναμενόμενης κίνησης κάθε φορά, ικανοποιείται η κεντρική σχεδιαστική ιδέα του που συνίσταται στην κατανομή κάθε φορά των διαθέσιμων πόρων όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές που αναμένεται να ζητηθούν. Κρίνεται, επίσης, σκόπιμο να τονιστεί ότι η επίτευξη του στόχου αυτού καθίσταται ευκολότερη μέσω της όσο το δυνατό ακριβέστερης και λεπτομερέστερης γνώσης εκ μέρους του λειτουργού του δικτύου των δύο εκδοχών της έντασης της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson, $\lambda_{8:00}(t, x, y)$ και $\lambda_{18:00}(t, x, y)$. Δεν θα ήταν υπερβολή, επομένως, να αναφερθεί ότι οι δύο εκδοχές της έντασης $\lambda(t, x, y)$ αποτελούν τη βάση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων.

Στο επόμενο εδάφιο θα παρουσιαστεί ένα είδος αρχιτεκτονικής κινητών δικτύων επικοινωνιών το λεγόμενο Centralised Radio Access Network (C-RAN). Η συγκεντρωτική αρχιτεκτονική του, σε συνδυασμό με την κοινή χρήση των πόρων που επιτρέπει, καθιστούν την αρχιτεκτονική C-RAN ιδανικό για την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομή πόρων, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

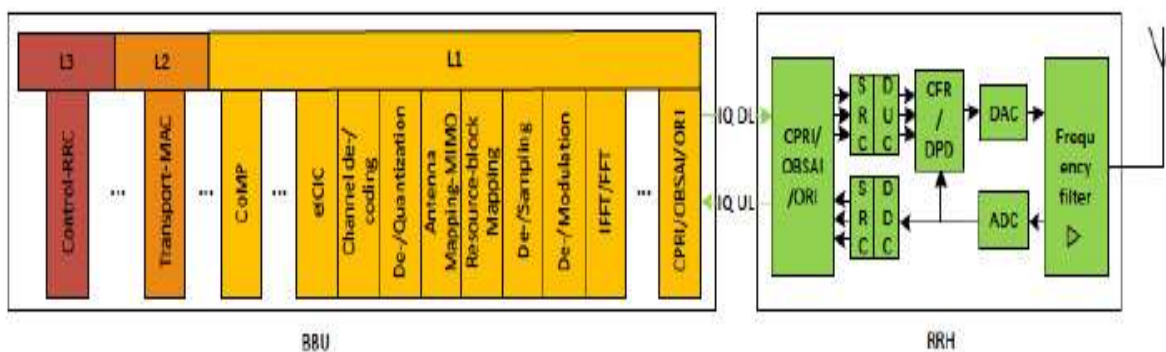
4.6 Συνοπτική παρουσίαση της αρχιτεκτονικής C-RAN

Η αρχιτεκτονική C-RAN (Centralised RAN) αποτελεί μία τεχνική συγκέντρωσης των πόρων βασικής ζώνης (baseband resources pooling technique) με σκοπό την από κοινού χρήση τους μεταξύ των σταθμών βάσης. Το Σχ.4.16 παρέχει μία επισκόπηση της αρχιτεκτονικής C-RAN. Στο εδάφιο αυτό θα γίνει εισαγωγή στη εξέλιξη της αρχιτεκτονικής των σταθμών βάσης και στη βασική ιδέα της C- RAN τεχνολογίας.



Σχήμα 4.16 Στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας(Statistical Multiplexing Gain) στην αρχιτεκτονική C-RAN για τα κυψελωτά δίκτυα

Η γεωγραφική περιοχή την οποία καλύπτει ένα δίκτυο κινητών επικοινωνιών χωρίζεται σε κυψέλες. Παραδοσιακά, στα κυψελωτά δίκτυα οι χρήστες επικοινωνούν με το σταθμό βάσης που εξυπηρετεί την κυψέλη στην εμβέλεια της οποίας βρίσκονται. Οι κύριες λειτουργίες ενός σταθμού βάσης μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που αφορούν την επεξεργασία σήματος βασικής ζώνης (baseband signal processing) και σε αυτές που σχετίζονται με το φυσικό στρώμα μετάδοσης (radio functionalities). Οι κύριες υπο-λειτουργίες της επεξεργασίας βασικής ζώνης παρουσιάζονται στο Σχ.4.17. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η κωδικοποίηση, η διαμόρφωση του σήματος, Fast Fourier Transform(FFT). Με τη σειρά του, το τμήμα ραδιο-συχνοτήτων (RF part) περιλαμβάνει ψηφιακή επεξεργασία σήματος, ενίσχυση και φιλτράρισμα RF του προς εκπομπή σήματος.



Σχήμα 4.17 Λειτουργικό διάγραμμα ενός σταθμού Βάσης (BS functionalities diagram)

A. Παραδοσιακή αρχιτεκτονική

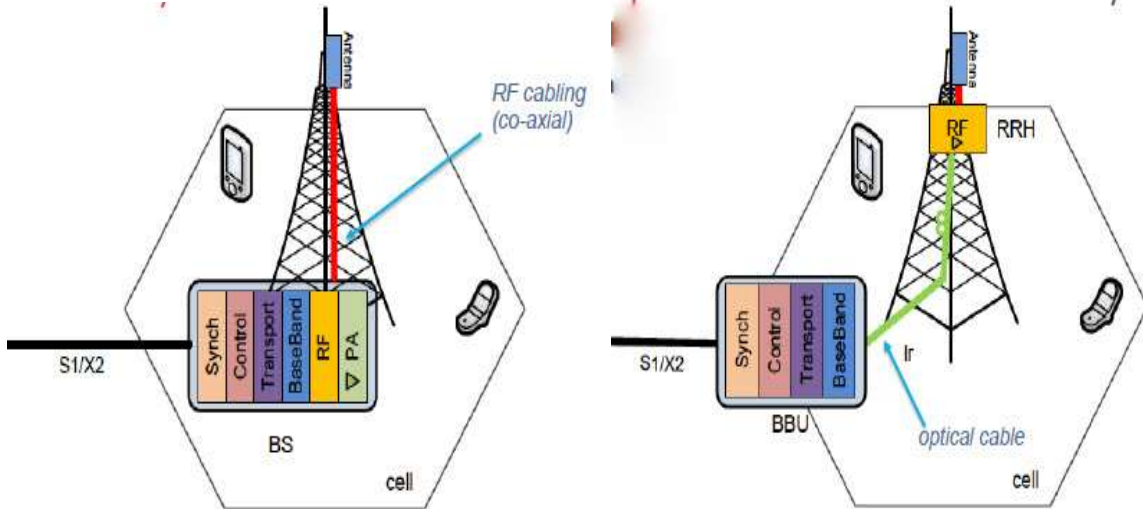
Σύμφωνα με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική, τα τμήματα επεξεργασίας βασικής ζώνης και ραδιοσυχνοτήτων βρίσκονται μαζί μέσα στο σταθμό βάσης. Το τμήμα εκπομπής και η κεραία είναι τοποθετημένα σε απόσταση λίγων μέτρων από το τμήμα ραδιοσυχνότητων και συνδέονται μεταξύ τους μέσω ομοαξονικών καλωδίων τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλες απώλειες, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.18α. Η διεπαφή X2 συνδέει γειτονικούς σταθμούς βάσης μεταξύ τους, ενώ η S1 συνδέει τους σταθμούς βάσης με το δίκτυο κορμού του κυψελωτού δικτύου. Η προαναφερθείσα αρχιτεκτονική ήταν δημοφιλής στα δίκτυα 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς (1G /2G).

B. Σταθμός βάσης με RRH

Κατά την αρχιτεκτονική αυτή, ο σταθμός βάσης περιλαμβάνει μία μονάδα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Unit) και μία μονάδα επεξεργασίας σήματος (signal processing Unit), όπως φαίνεται και στο Σχ.4.18β. Η μονάδα ραδιοσυχνοτήτων συχνά αναφέρεται ως RRH Remote Radio Unit(RRU) και παρέχει τη διεπαφή σύνδεσης με την οπτική ίνα. Επιτελεί λειτουργίες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, μετατροπής από ψηφιακή μορφή σε αναλογική και αντίστροφα, όπως, επίσης, ενίσχυση σήματος και φιλτράρισμα. Η μονάδα επεξεργασίας βασικής ζώνης αναφέρεται ως (BBU-Base Band Unit) ή Data Unit (DU). Η εισαγωγή αυτής της αρχιτεκτονικής συνδυάστηκε με το εμφάνιση των κινητών δικτύων 3^{ης} γενιάς (3G) και έχει ήδη υιοθετηθεί από την πλειονότητα των σταθμών βάσης. Να σημειωθεί, επίσης, ότι η BBU μπορεί να τοποθετηθεί σε θέση εύκολα προσβάσιμη, οδηγώντας σε μείωση του κόστους συντήρησης και εκμίσθωσης των χώρων εγκατάστασης, σε αντίθεση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική όπου η BBU πρέπει να βρίσκεται πολύ κοντά στην κεραία. Τέλος, μία μονάδα BBU έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετεί πολλαπλά RRH και το πρωτόκολλο ραδιοεπαφής μεταξύ RRH και BBU είναι το ευρέως χρησιμοποιούμενο για μετάδοση σταθερού ρυθμού συμφασικών και ορθογώνιων ροών δεδομένων, CPRI (Common Public Radio Interface).

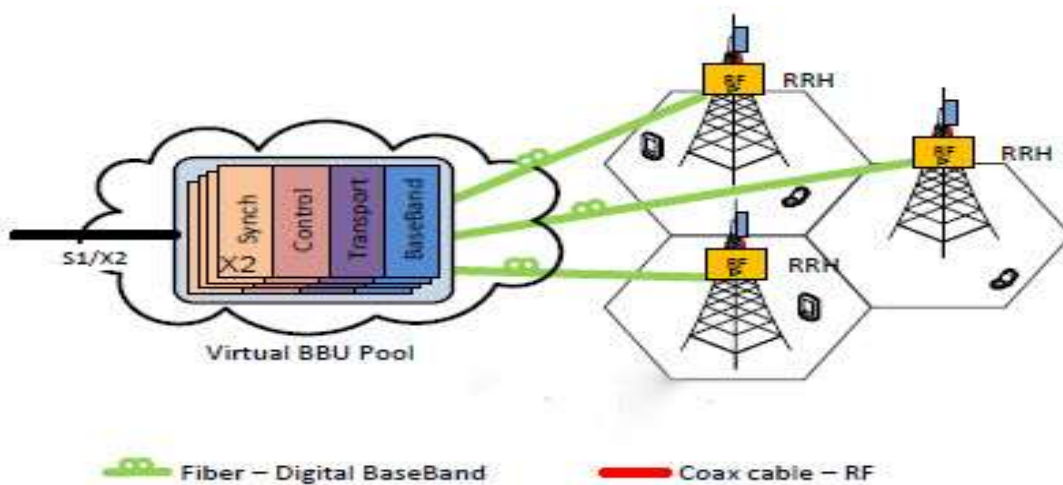
C. Συγκεντρωτική Αρχιτεκτονική C-RAN

Στην αρχιτεκτονική C-RAN, οι μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης κάθε σταθμού βάσης, BBUs, συγκεντρώνονται σε μία οντότητα, την αποκαλούμενη BBU/DU pool/Hotel, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης των BBUs. Εκάστη των BBU pool οντοτήτων διαμοιράζεται μεταξύ πολλαπλών κυψελών και γίνεται εικονική (virtualized), όπως φαίνεται στο Σχ.4.18γ. Στην ουσία, πρόκειται για μία εικονική συστάδα (cluster) από επεξεργαστές γενικού σκοπού που υλοποιούν την επεξεργασία βασικής ζώνης σε φυσικό επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (PHY/ MAC layer). Η διεπαφή X2+, μία νέα εκδοχή της X2, οργανώνει την επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων συστάδων (inter-cluster communication). Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προτάθηκε από την IBM με το όνομα Wireless Network Cloud(WNC). Για το λόγο αυτό, άλλωστε, το γράμμα C στον όρο C-RAN μπορεί να αποδοθεί και ως: Cloud, Centralised processing, Cooperative radio, Collaborative.



α) Παραδοσιακή αρχιτεκτονική
Σταθμού βάσης (macro BS)

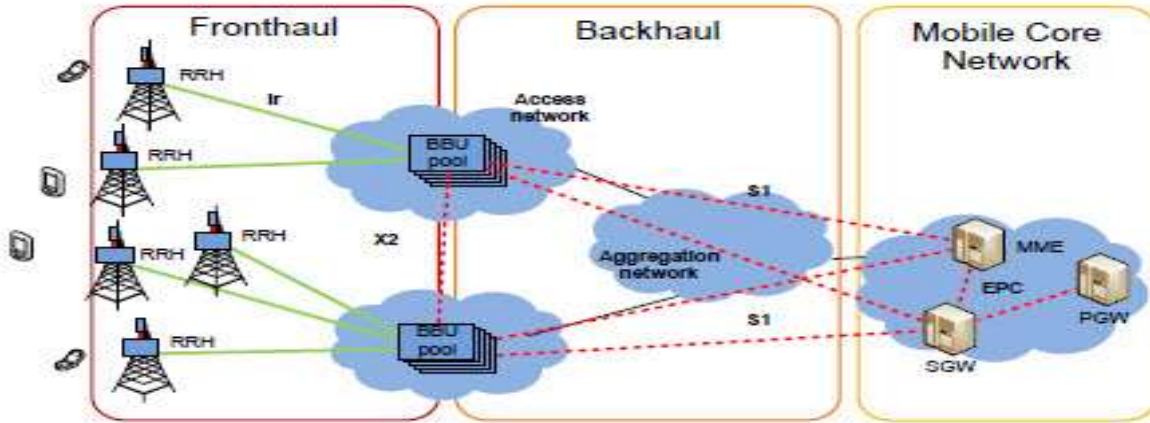
β) Σταθμός βάσης με διαχωρισμένες
μονάδες RRH και BBU



γ) Αρχιτεκτονική C-RAN με RRH

Σχήμα 4.18 Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής των σταθμών βάσης

Στο Σχ.4.19, που ακολουθεί, δίδεται ένα παράδειγμα δικτύου 4^{ης} γενιάς LTE που ακολουθεί την προαναφερθείσα αρχιτεκτονική C-RAN . Το fronthaul μέρος εκτείνεται από την πλευρά των RRH μέχρι την οντότητα που διαχειρίζεται του πόρους, BBU pool. Αντίστοιχα, το backhaul συνδέει την BBU pool με το δίκτυο κορμού. Στους σταθμούς βάσης, κάθε μονάδα RRH βρίσκεται δίπλα στη αντίστοιχη κεραία και συνδέεται με τους υψηλής απόδοσης επεξεργαστές της BBU pool μέσω οπτικών ζεύξεων χαμηλής καθυστέρησης και μεγάλου εύρους ζώνης. Τέλος, ανάλογα με το εφαρμοζόμενο κάθε φορά σχήμα διαμόρφωσης, συμφασικές και ορθογώνιες ροές δεδομένων (I/Q data streams) αποστέλλονται μεταξύ των RRHs και της BBU pool.



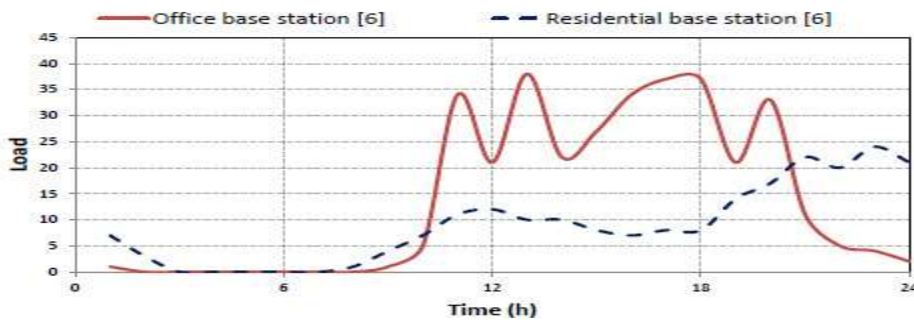
Σχήμα 4.19 Επισκόπηση δικτύου LTE αρχιτεκτονικής C-RAN

4.6.1 Πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής C-RAN

Στο εδάφιο αυτό θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής C-RAN. Κρίνεται εύλογο, όμως, να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην αντιμετώπιση του παλιρροϊκού φαινομένου που, άλλωστε, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας υποενότητας. Παράλληλα, η υιοθέτηση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική δικτύου ενδέχεται να αποβεί ιδιαίτερως ωφέλιμη για τη συνολική επίδοση του προς μελέτη τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

- Προσαρμογή σε μη-ομοιόμορφη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και επεκτασιμότητα

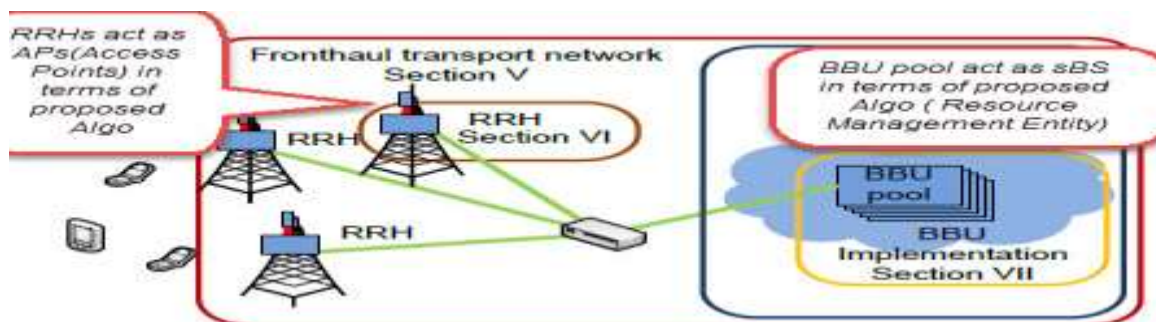
Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι χρήστες των κυψελωτών δικτύων μετακινούνται μεταξύ διαφόρων περιοχών, κυρίως από τις περιοχές κατοικίας προς τις περιοχές εργασίας. Το Σχ.4.20 που ακολουθεί αντικατοπτρίζει πώς μεταβάλλεται το ημερήσιο φορτίο του δικτύου (network load). Οι σταθμοί βάσης συνήθως διαστασιολογούνται με βάση τις ώρες αιχμής με αποτέλεσμα όταν οι χρήστες μετακινούνται από τους χώρους εργασίας προς τις κατοικίες τους ένα μεγάλο ποσοστό πόρων παραμένει αδρανές σε περιοχές από τις οποίες έχουν απομακρυνθεί οι χρήστες.



Σχήμα 4.20 Ημερήσιο φορτίο σταθμών βάσης σε εργασιακούς χώρους (Office BS) και κατοικήσιμες περιοχές (Residential BS)

Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο κατά τις ώρες αιχμής ενδέχεται να είναι και δέκα φορές μεγαλύτερο από αυτό σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Ειδικότερα, η κατανομή της ημερήσιας αναπτυσσόμενης κίνησης ποικίλλει από κυψέλη σε κυψέλη με την αιχμή της κίνησης να παρατηρείται σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, όπως φαίνεται και από το Σχ.4.20. Καθώς, λοιπόν, στην αρχιτεκτονική C-RAN η επεξεργασία βασικής ζώνης για πολλαπλές κυψέλες διενεργείται από τη συγκεντρωτική οντότητα, BBU pool, το συνολικό ποσοστό χρησιμοποίησης μπορεί να βελτιωθεί. Συγκεκριμένα, η απαιτούμενη χωρητικότητα της μονάδας επεξεργασίας βασικής ζώνης στη μονάδα BBU pool πρόκειται να είναι μικρότερη από το άθροισμα των αντίστοιχων χωρητικοτήτων εκάστου των ενεργών σταθμών βάσης όταν δεν ακολουθείται η αρχιτεκτονική C-RAN. Ο λόγος του αθροίσματος των χωρητικοτήτων των ανεξαρτήτως λειτουργούντων σταθμών βάσης προς την απαιτούμενη χωρητικότητα της BBU pool ονομάζεται κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας (statistical multiplexing gain) και αυξάνεται γραμμικά με το μέγεθος του δικτύου και την ένταση της αναπτυσσόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Στο σημείο αυτό κρίνεται εύλογο να εξεταστεί και η επεκτασιμότητα (scalability) της αρχιτεκτονικής C-RAN. Για παράδειγμα, η βελτίωση της εκάστοτε κάλυψης, δηλαδή του χώρου S με βάση την ορολογία του προτεινόμενου αλγορίθμου, απλώς απαιτεί τη σύνδεση νέων ραδιοστοιχείων RRHs, ή σημείων πρόσβασης APs, στην ήδη υπάρχουσα μονάδα BBU pool που διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου. Ακολουθώντας, προς ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου οι ήδη ενεργές κυψέλες μπορούν να διαιρεθούν ή να προστεθούν πρόσθετες μονάδες RRHs, αυξάνοντας παράλληλα και την ευελιξία του δικτύου. Επισημαίνεται η ευκολία υλοποίησης νέων κυψελών, αφού απαιτείται να προστεθεί μόνο μία συσκευή (RRH) μικρού όγκου και όχι ένα συμβατικός σταθμός βάσης. Η αύξηση, λοιπόν, της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αναβάθμισης της επεξεργαστικής ισχύος της BBU pool. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι, όπως γίνεται φανερό και από το Σχ.4.21, η BBU pool επιτελεί ουσιαστικά το ρόλο του αναβαθμισμένου σταθμού βάσης sBS , ακολουθώντας την ορολογία του αλγορίθμου, αναθέτοντας τους διαθέσιμους πόρους στα εκάστοτε λειτουργούντα στοιχεία RRH ή APs, λαμβάνοντας υπόψη τη χωροχρονική συμπεριφορά των αναμενόμενων χρηστών μέσω της έντασης της πολυδιάστατης διαδικασίας Poisson, $\lambda(t, x, y)$.



Σχήμα 4.21 Αναλογία ρόλων διαφόρων οντοτήτων (RRHs-APs, BBU pool-sBS) μεταξύ C-RAN αρχιτεκτονικής και προτεινόμενου Αλγορίθμου

- *Ενεργειακή αποδοτικότητα και μείωση κόστους*

Η υιοθέτηση της αρχιτεκτονικής C-RAN μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ενεργειακά, και κατ' επέταση, οικονομικά οφέλη. Για την ακρίβεια, επειδή το 80% του συνολικού κόστους λειτουργίας ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών δαπανάται στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN), κρίνεται χρήσιμη κάθε προσπάθεια που αποσκοπεί στη μείωση του. Στα κυψελωτά δίκτυα, ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται κατά κόρον από τους ενισχυτές ισχύος, για την αδιάλειπτη παροχή ισχύος στις μονάδες RRH και BBU, και από το σύστημα κλιματισμού (air conditioning). Με βάση τις σχετικές μελέτες, το 40% περίπου του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX) στην πλευρά της κυψέλης καταναλώνεται για ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, σε περιόδους χαμηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης, όπως κατά τις νυχτερινές ώρες, ορισμένες υπομονάδες (BBU subunits) εντός της BBU pool μπορούν να παραμείνουν ανενεργές χωρίς να επηρεάζουν την κάλυψη του δικτύου. Προς την κατεύθυνση αυτή, μάλιστα, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά το προτεινόμενο σχήμα κατανομής πόρων υποδεικνύοντας ποιές BBU subunits πρέπει να μείνουν ανενεργές αξιοποιώντας τη γνώση που προσφέρει η ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson, $\lambda(t, x, y)$, σχετικά με την αναμενόμενη εμφάνιση χρηστών στο προς μελέτη δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, επομένως, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπακόλουθα προκύπτουν οικονομικά οφέλη για τους παρόχους των δικτύων, καθώς η χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης χρηστών στις συγκεκριμένες περιοχές που υποδεικνύει η ένταση $\lambda(t, x, y)$ υπαγορεύει την απενεργοποίηση μέρους του ιδιαίτερα ενεργοβόρου εξοπλισμού του δικτύου. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας μείωσης των απαιτούμενων πόρων για την ψύξη των μονάδων του δικτύου, είναι η θέση των ραδιοστοιχείων RRH πάνω στον ιστό της κεραίας που επιτρέπει τη φυσική ψύξη τους. Επίσης, η συγκέντρωση του μεγαλύτερου μέρους του εξοπλισμού σε μία κεντρική οντότητα, την BBU pool, μειώνει τις ανάγκες για εργασίες εγκατάστασης σε απομακρυσμένα σημεία του δικτύου, επιφέροντας πρόσθετη μείωση του λειτουργικού κόστους. Συνοψίζοντας, σύμφωνα με σχετικές μελέτες, με την υιοθέτηση της αρχιτεκτονικής C-RAN μπορεί να εξοικονομηθεί το 15% του κεφαλαιουχικού (CAPEX) και το 50% του λειτουργικού (OPEX) κόστους σε σχέση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Ως αντιστάθμισμα (trade-off), βέβαια, σε αυτά τα σημαντικά οικονομικά οφέλη για τον πάροχο του δικτύου ανακύπτει το υψηλό κόστος ενοικίασης οπτικών ινών (fiber leasing) για τη σύνδεση μεταξύ RRH και BBU pool προς επίτευξη της ελάχιστης δυνατής καθυστέρησης (latency).

- *Αύξηση της ρυθμαπόδοσης και μείωσης της καθυστέρησης μετάδοσης*

Η συγκέντρωση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου σε ένα κεντρικό σημείο (pooling of baseband resources) διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την αποδοτική κατανομή τους στα υποκείμενα σημεία πρόσβασης και συνεπακόλουθα στους τελικούς χρήστες του δικτύου. Τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς LTE, άλλωστε, λειτουργούν με τη λογική της κατανομής των πόρων μεταξύ

των χρηστών. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη υποενότητα, το επιλεγμένο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης OFDMA καθιστά δυνατή τη δυναμική ανάθεση πόρων τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο πεδίο του χρόνου. Αυτή, λοιπόν, η δυναμική χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων, σε συνδυασμό με εξελιγμένα σχήματα εξάλειψης της αναπόφευκτης διακυψελικής παρεμβολής αφού η συχνότητα λειτουργίας κάθε κυψέλης είναι ίδια, βελτιώνουν αισθητά τη εμπειρία των χρηστών, ακόμα και αυτών που βρίσκονται στα όρια της εμβέλειας κάθε κυψέλης (cell-edge performance improvement).

- *Ευκολία αναβάθμισης και συντήρησης του δικτύου*

Η αρχιτεκτονική C-RAN, σε συνδυασμό με την συνύπαρξη πολλών μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης BBU σε ένα κεντρικό σημείο, συγκεκριμένα την BBU pool, διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη συντήρηση του δικτύου. Πράγματι, όχι μόνο μπορούν να απορροφηθούν μέσω αυτόματης ρύθμισης της BBU pool οι αιχμές της χωρητικότητας, αλλά και, σε περιπτώσεις αστοχιών ή βλαβών του υλικού εξοπλισμού (hardware failure), η ανθρώπινη παρέμβαση περιορίζεται μόνο στις θέσεις όπου έχουν εγκατασταθεί ενεργές BBU pools. Αντιθέτως, όταν προκύψει η ανάγκη αποκατάστασης της ομαλής λειτουργίας ενός παραδοσιακού δικτύου ραδιοπρόσβασης, ενδεχομένως να προέκυπτε η ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης σχεδόν σε οποιοδήποτε σημείο όπου υπάρχει σταθμός βάσης. Τέλος, η αρχιτεκτονική C-RAN υποστηρίζει την τεχνική Software Defined Radio (SDR), η οποία διευκολύνει την υλοποίηση σε κώδικα πολλών συναρτήσεων ραδιοπρόσβασης, όπως διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση, κωδικοποίηση και πρωτόκολλα διασύνδεσης στρωμάτων. Η μονάδα BBU pool της αρχιτεκτονική C-RAN είναι δυνατό να υποστηρίζει ταυτόχρονα διαφορετικά πρότυπα ραδιοπρόσβασης (2G/3G/4G/4G+) υλοποιημένα και ρυθμιζόμενα από λογισμικό (software enabled multi-standard radio communications). Η μετάβαση, επομένως, σε νέες ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας, που ενδεχόμενα έχουν αποδοθεί σε κάποιο πάροχο για την κάλυψη ενός ad hoc γεγονότος, όπως συναυλίας ή συνεδρίου, μπορεί να υλοποιηθεί μέσω μιας απλής αναβάθμισης λογισμικού και όχι με προμήθεια και εγκατάσταση νέου εξοπλισμού που αποτελεί χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία. Έτσι, μετά το πέρας ενός ad hoc γεγονότος, το δίκτυο μπορεί να επανέλθει στις αρχικά ρυθμισμένες συχνότητες και παραμέτρους λειτουργίας μέσω απλής επαναφοράς στην προηγούμενη έκδοση του λογισμικού που εκτελείται στις μονάδες BBU pools.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

5.1 Επιλογή περιβάλλοντος προσομοίωσης

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, κρίθηκε σκόπιμο να επιλεγεί το υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση R2010a, χωρίς βέβαια η επιλογή συγκεκριμένης έκδοσης να επιδρά στην αξιοπιστία της προσομοίωσης. Πράγματι, λοιπόν, το περιβάλλον αυτό προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα που κατέστησαν προτιμητέα την επιλογή του, με κυριότερο τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων υπό μορφή πινάκων. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται ευχερέστερη η διαχείριση των δεδομένων του προς μελέτη τηλεπικοινωνιακού δικτύου, όπως για παράδειγμα οι θέσεις των M σημείων πρόσβασης και των εμφανιζόμενων χρηστών. Επίσης, διαδικασίες επί των δεδομένων του δικτύου, όπως η εύρεση γειτονικών κόμβων ή η εξυπηρέτηση των χρηστών, μπορούν να υλοποιηθούν με απλές εντολές κώδικα. Ένα άλλο πλεονέκτημα του επιλεγμένου περιβάλλοντος προσομοίωσης είναι η εύκολη διατύπωση των χωροχρονικών χαρακτηριστικών που διέπουν την εμφάνιση των χρηστών στο δίκτυο, καθώς η προσομοίωση μιας σημειακής διαδικασίας Poisson συνιστά απλή υλοποίηση σε κώδικα των βασικών μαθηματικών τύπων που τη διέπουν. Τέλος, η βελτιστοποίηση (3.16), που οδηγεί στην κατανομή των πόρων στα M σημεία πρόσβασης και ουσιαστικά αποτελεί τον πυρήνα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με ένα πρόσθετο (AddOn) περιβάλλον βελτιστοποίησης της MATLAB, το CVX Toolbox, μειώνοντας δραστικά τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης, καίτοι τα δεδομένα σε μορφή διανυσμάτων εισόδου ενδέχεται να είναι αρκετά μεγάλων διαστάσεων.

Στα επόμενα εδάφια θα παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος προσομοίωσης των επιμέρους στοιχείων που συναποτελούν το δικτυακό υπόβαρθο επί του οποίου θα μελετηθεί η επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου. Τέτοια επιμέρους στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν η μαθηματική περιγραφή του χώρου S και η κάλυψή του με την τοποθέτηση των M σημείων πρόσβασης, η προσομοίωση της εμφάνισης των χρηστών μέσω της χωροχρονικής κατανομής Poisson. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά σενάρια προσομοίωσης του αλγορίθμου για δεδομένα χαρακτηριστικά χρηστών, δηλαδή για δεδομένη ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson, όπως και για δεδομένο πλήθος ζητούμενων εκ μέρους των χρηστών πόρων. Τέλος, κρίθηκε εύλογο έκαστο των σεναρίων προσομοίωσης να συνοδευτεί από συγκεκριμένα στατιστικά επίδοσης του δικτύου σχετικά με την εξυπηρέτηση των χρηστών σε όρους πιθανότητας αποκλεισμού χρηστών και καθυστέρησης εξυπηρέτησης των χρηστών. Αυτά τα στατιστικά, άλλωστε, θα αξιολογήσουν και την επίδοση του συγκεκριμένου αλγορίθμου σε σχέση με την στατική εκδοχή της κατανομής των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.

5.2 Προσομοίωση της εμφάνισης χρηστών στο προς μελέτη τηλεπικοινωνιακό δίκτυο

Η εμφάνιση νέων χρηστών στο προς σχεδίαση δίκτυο διέπεται από τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας Poisson με ένταση $\lambda(t, x, y)$, όπως αυτή περιγράφηκε λεπτομερώς στην υποενότητα 2.4. Ειδικότερα, η ένταση $\lambda(t, x, y)$ της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson συνιστά και τρόπο πρόβλεψης του αναμενόμενου πλήθους εμφανιζόμενων χρηστών αλλά και των πιθανών τους θέσεων. Πράγματι, λοιπόν, για το σκοπό αυτό θα αξιοποιηθούν οι δύο ανεξάρτητες συνιστώσες της έντασης $\lambda(t, x, y)$ καθώς και οι αντίστοιχες εκδοχές, χρονική και χωρική, της διαδικασίας Poisson.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να υπενθυμιστεί ότι η εμφάνιση κάποιου χρήστη στο δίκτυο πρέπει να συνοδεύεται τόσο από το χρόνο t όσο και από τη θέση άφιξής του που περιγράφεται μέσω των καρτεσιανών συντεταγμένων x, y . Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι δυνατό να προσομοιωθούν χωριστά λόγω της ανεξαρτησίας μεταξύ των δύο συνιστωσών της έντασης της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση του χρόνου άφιξης χρηστών μέσω της χρονικής εκδοχής της διαδικασίας με ένταση $\bar{\lambda}^{xy}(t)$ (βλ. (2.18)) για διάρκεια ίση με το χρονικό παράθυρο εντός του οποίου πραγματοποιείται η προσέλευση θεατών στο εκάστοτε ad hoc γεγονός συγκέντρωσης χρηστών, μεταφράζεται στο συνολικό πλήθος των τελικά εμφανισθέντων στο δίκτυο χρηστών. Από την άλλη πλευρά, για την προσομοίωση των χωρικών χαρακτηριστικών της εμφάνισης κάποιου χρήστη θα χρησιμοποιηθεί η χωρική εκδοχή της διαδικασίας Poisson με ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ (βλ. (2.20)). Στα επόμενα εδάφια, λοιπόν, θα παρουσιαστεί ο τρόπος προσομοίωσης των χρονικών και χωρικών χαρακτηριστικών εμφάνισης χρηστών στο χώρο του ad hoc γεγονότος.

Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι είναι προτιμότερο η χρονική εκδοχή της διαδικασίας να είναι ομογενής, δηλαδή να μην έχει εξάρτηση από το χρόνο t . Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το ότι ο χρόνος δεν αποτελεί το κύριο κριτήριο επίδοσης του αλγορίθμου κατανομής πόρων. Αντιθέτως, κρίνεται απαραίτητο η χωρική εκδοχή, η οποία συνιστά και είσοδο της βελτιστοποίησης (3.16) μέσω του ορισμού της καλά υποστηριζόμενης διαδικασίας Poisson, να χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια, δηλαδή να εξαρτάται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y . Με βάση αυτά τα χωρικά χαρακτηριστικά, άλλωστε, θα πραγματοποιηθεί και η αρχική κατανομή των διαθέσιμων πόρων του δικτύου στα M σημεία πρόσβασης σύμφωνα με την κεντρική ιδέα του αλγορίθμου. Οι πόροι, δηλαδή, να αποδοθούν όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν από τους εμφανιζόμενους κάθε φορά χρήστες.

5.2.1 Προσομοίωση της χρονικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson

Στο εδάφιο αυτό, θα παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της χρονικής διάστασης αναφορικά με την εμφάνιση χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

Σύμφωνα με την πρώτη περίπτωση, η χρονική εκδοχή της διαδικασίας Poisson ενδέχεται να χαρακτηρίζεται από ομογενή χαρακτηριστικά, δηλαδή η ένταση $\bar{\lambda}^{xy}(t)$ να μην εξαρτάται από το χρόνο t και να ισχύει

$$\bar{\lambda}^{xy}(t) = \lambda, \lambda \geq 0 \quad (5.1)$$

Στην περίπτωση αυτή, οι χρονικές στιγμές μεταξύ των αφίξεων διαδοχικών χρηστών (Interarrival Times) στο δίκτυο ακολουθούν την εκθετική κατανομή με ένταση ίση με λ και μέση τιμή ίση με $1/\lambda$, σύμφωνα με το Θεώρημα 2.4 του Κεφ.2.

Σύμφωνα με τη δεύτερη περίπτωση, η χρονική εκδοχή της διαδικασίας Poisson είναι πιθανό να διαθέτει μη ομογενή χαρακτηριστικά, δηλαδή η μη αρνητική ένταση $\bar{\lambda}^{xy}(t)$ να εξαρτάται από το χρόνο t και να ισχύει

$$\bar{\lambda}^{xy}(t) = \lambda(t), \lambda(t) \geq 0, t \in (0, c) \quad (5.2)$$

Και στην περίπτωση αυτή, οι χρονικές στιγμές μεταξύ των αφίξεων διαδοχικών χρηστών ακολουθούν την εκθετική κατανομή με ένταση, όμως, ίση με $\lambda(t)$ και μέση τιμή ίση με $1/\lambda(t)$. Και στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, το χρονικό διάστημα προσομοίωσης ισούται με c χρονικές μονάδες, σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή $t \in (0, c)$ ή ισοδύναμα

$$t \in (0, T) \text{ με } T = c \quad (5.3)$$

Προσομοιώνοντας, επομένως, τους εκθετικά κατανομημένους χρόνους μεταξύ διαδοχικών αφίξεων (interarrival times) για χρονικό διάστημα ίσο με T , με διαφορετική μέση τιμή κάθε φορά που αντιστοιχεί στα ομογενή ή όχι χαρακτηριστικά της έντασης, προκύπτει και ο συνολικός αριθμός των εμφανιζόμενων χρηστών, έστω N_{users} , στο προς μελέτη δίκτυο. Αυτή είναι, στην ουσία, και η λογική της προσομοίωσης της χρονικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson. Στα υποεδάφια που ακολουθούν, θα παρουσιαστεί ο αλγόριθμος προσομοίωσης που υιοθετήθηκε για κάθε περίπτωση.

5.2.1.1 Προσομοίωση ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson

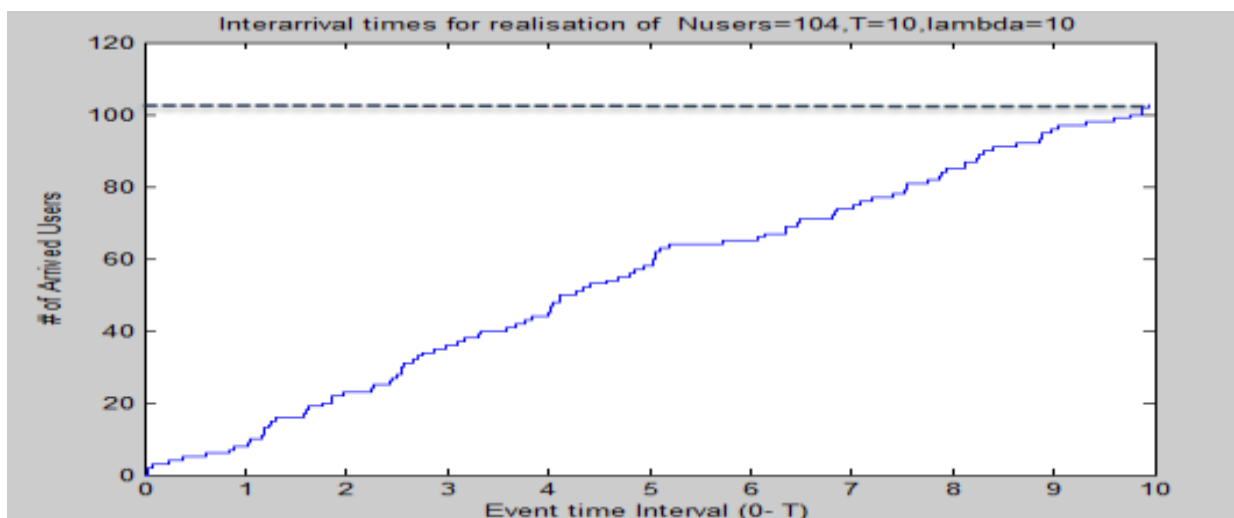
Η εμφάνιση/άφιξη χρηστών στο χώρο S μπορεί να θεωρηθεί ως γεγονός (event) χρησιμοποιώντας την ορολογία της διαδικασίας Poisson. Στον Πίν.5.1 διατυπώνεται ο αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση γεγονότων κατά τη διάρκεια του διαστήματος παρατήρησης T σύμφωνα με την ομογενή διαδικασία Poisson με σταθερή τιμή έντασης ίση με λ . Παράλληλα, στο ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και ο κώδικας που καθιστά εφικτή τη σχετική προσομοίωση στο περιβάλλον Matlab.

Πίνακας 5.1 Αλγόριθμος Προσομοίωσης Αφίξεων Poisson ομογενούς έντασης, λ , στο διάστημα $(0, T)$	
<p>Οι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων X_i είναι εκθετικά κατανομημένες μεταβλητές με ένταση λ: Εκθετική σ.π.π(pdf) $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \in [0, \infty)$ και α.σ.κ(cdf) $F(x) = 1 - \lambda e^{-\lambda x}$. Επομένως $X_i = -\ln(U_i)/\lambda, U_i \sim Uni(0,1), T_j = \sum_{i=1}^j X_i$</p>	
Βήματα Αλγορίθμου (σε ψευδογλώσσα)	Αντίστοιχος Κώδικας Matlab
<ol style="list-style-type: none"> 1. Αρχικοποίηση γεγονός 1^{ης} άφιξης $t = -\frac{\ln(U_0)}{\lambda}, n = 0$ 2. while $t < T$ $n = n + 1, S_n = t$ $t = t - \frac{\ln(U_0)}{\lambda}$ end <p>Output: n # αφίξεων στο διάστημα $(0, T)$ και χρόνοι άφιξης S_1, \dots, S_n</p>	<pre>% % %initialize Nusers Nusers=0; % % %simulate the first arrival t=-1/lambda*log(rand); while t<T Nusers=Nusers+1; %update N S(Nusers)=t; t=t-1/lambda*log(rand); %simulate the next arrival time end</pre>

Προς κατανόηση του ανωτέρω αλγορίθμου προσομοίωσης αφίξεων Poisson, κρίνεται εύλογο να παρουσιαστεί ένα σενάριο προσομοίωσης για τα εξής δεδομένα:

- χρονικό διάστημα $T = 6$ χρονικές μονάδες (έστω ωρολογιακά λεπτά)
- ένταση της ομογενούς διαδικασίας Poisson $\lambda = 10$ χρήστες/λεπτό.

Στατιστικά αναμένεται η εμφάνιση $\lambda * T = 10 * 6 = 100$ χρηστών. Με τη εκτέλεση, όμως, της προσομοίωσης προκύπτουν $N_{users} = 104$ χρήστες. Εδώ, λοιπόν, γίνεται αντιληπτός και ο πιθανοτικός χαρακτήρας της διαδικασίας Poisson που την καθιστά ιδανικό μοντέλο για την προσομοίωση τυχαίων γεγονότων. Αυτή η τυχαιότητα εκφράζεται μέσω των εκθετικά κατανομημένων χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων, όπως γίνεται φανερό και από το Σχ.5.1.



Σχήμα 5.1 Χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων (interarrival times) νέων χρηστών για το ενδεικτικό σενάριο προσομοίωσης

5.2.1.2 Προσομοίωση μη ομογενούς χρονικής διαδικασίας Poisson

Αντίστοιχα προς το προηγούμενο εδάφιο, θα παρουσιαστεί ο αλγόριθμος που ακολουθείται για την προσομοίωση γεγονότων που ακολουθούν τη μη ομογενή διαδικασία Poisson. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα αλγόριθμο αραιώσης (*thinning algorithm*), καθώς η λογική του συνίσταται αρχικά στην προσομοίωση των αφίξεων μιας ομογενούς διαδικασίας με ένταση $\lambda = \max_{t \in [0, T]} \lambda(t)$ και, στη συνέχεια, στην αποδοχή εκάστου των γεγονότων με πιθανότητα ίση με $\lambda(t)/\lambda$. Στον ακόλουθο Πίν.5.2, γίνεται αντιληπτή η λογική του αλγορίθμου αυτού, ενώ, παράλληλα, παρουσιάζεται και ο κώδικας που καθιστά εφικτή την προσομοίωσή του στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab.

Πίνακας 5.2 Αλγόριθμος Προσομοίωσης Αφίξεων Poisson μη ομογενούς έντασης, $\lambda(t)$, στο διάστημα $(0, T)$	
Οι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων X_i είναι εκθετικά κατανομημένες μεταβλητές με ένταση $\lambda(t)$	
Αλγόριθμος Αραιώσης (σε ψευδογλώσσα)	Αντίστοιχος Κώδικας Matlab
<ol style="list-style-type: none"> 1. Αρχικοποίηση $n = 0, \lambda = \max_{t \in [0, T]} \lambda(t)$ 2. Θέσε χρόνο 1^{ης} άφιξης $t = \ln(\text{Uni}(0,1)) / \lambda$ 3. while $t < T$ 4. if $\text{Uni}(0,1) \leq \lambda(t)/\lambda$ 5. $n = n + 1, S_n = t$ //αποδοχή γεγονότος end 6. $t = t - \frac{\ln(U_0)}{\lambda}$ //χρόνος επόμενης άφιξης end <p>Output: n # αφίξεων στο διάστημα $(0, T)$ και χρόνοι άφιξης S_1, \dots, S_n</p>	<pre>% % initialize Nusers Nusers=0; lambda=@(t) %% (Τύπος %συναρτήσεως της μεταβλητής του χρόνου lamstar=max(lambda=@(t)) %max λ % % simulate the first arrival t=-1/lambda*log(rand); while t<T if rand<= lambda(t)/lamstar Nusers=Nusers+1; %update N S(Nusers)=t; end t=t-1/lambda*log(rand); %simulate the next arrival time end</pre>

Προς κατανόηση του ανωτέρω αλγορίθμου προσομοίωσης αφίξεων Poisson, κρίνεται εύλογο να παρουσιαστεί ένα σενάριο προσομοίωσης για τα εξής δεδομένα:

- χρονικό διάστημα $T = 10$ χρονικές μονάδες (έστω ωρολογιακά λεπτά)
- ένταση της ομογενούς διαδικασίας Poisson $\lambda(t) = (t + 4)$ χρήστες/λεπτό.
- $\lambda = \max_{t \in [0, T]} \lambda(t) = 10$

Εκτελώντας, λοιπόν, τον προταθέντα αλγόριθμο προσομοίωσης για τα ανωτέρω δεδομένα προέκυψαν $N_{users} = 109$ χρήστες.

5.2.2 Προσομοίωση χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson

Στο εδάφιο αυτό, θα παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να προσομοιωθεί η χωρική συμπεριφορά των νεοεμφανιζόμενων χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, δηλαδή, σε ποιές θέσεις του χώρου S τελικά θα εμφανιστούν οι χρήστες. Προς το σκοπό αυτό, ως εργαλείο θα αξιοποιηθεί η χωρική εκδοχή της διαδικασίας με ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ (βλ. (2.20)). Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί, ουσιαστικά, επέκταση δύο

διαστάσεων του αλγορίθμου αραιώσης που διατυπώθηκε στην προηγούμενη υποενότητα για την προσομοίωση της μη ομογενούς χρονικής διαδικασίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ της χωρικής εκδοχής της αρχικής διαδικασίας Poisson, που περιγράφει συνολικά την εμφάνιση χρηστών στο δίκτυο, χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια, δεδομένου ότι εξαρτάται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y . Αυτά τα χαρακτηριστικά, άλλωστε, αξιοποιούνται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομής πόρων προκειμένου οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου να αποδοθούν στις περιοχές όπου τελικά θα ζητηθούν από τους χρήστες.

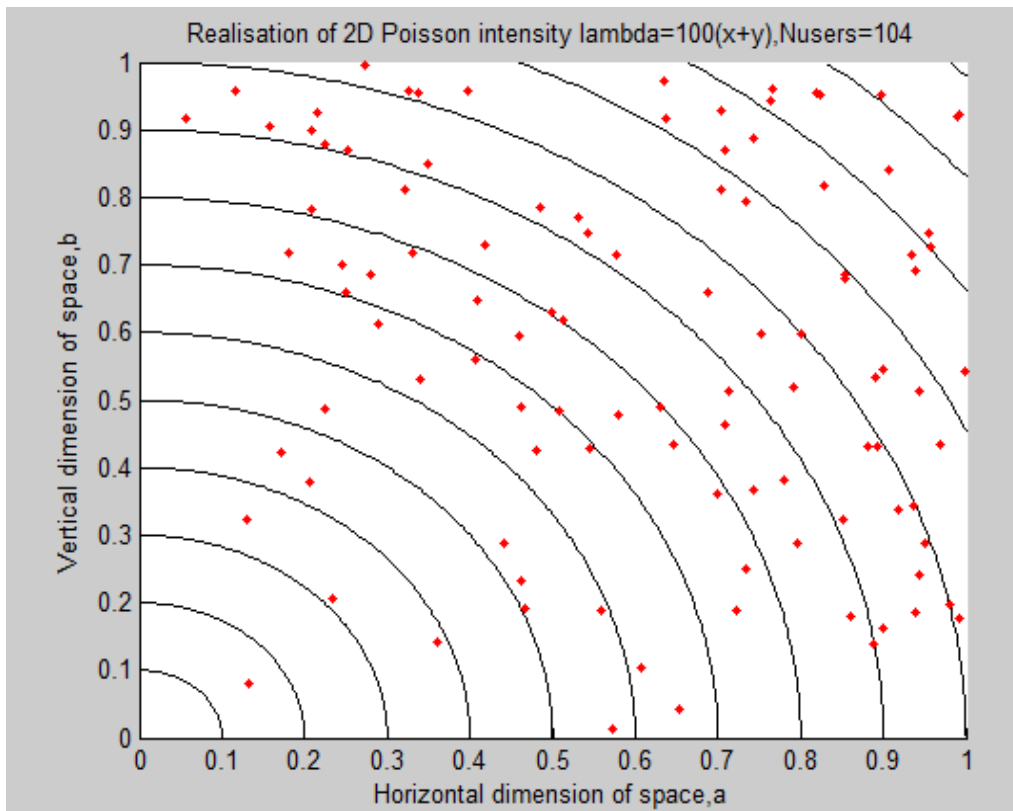
Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προσομοιώνει μόνο τη θέση εκάστου των N_{users} εμφανιζόμενων χρηστών, καθώς το πλήθος των αναμενόμενων χρηστών προκύπτει από τη χρονική εκδοχή της διαδικασίας με ένταση $\bar{\lambda}^{xy}(t)$, στην οποία έχει συμπεριληφθεί κατά μέση τιμή η χωρική συνιστώσα μέσω των διαστάσεων του χώρου S . Ειδικότερα, λοιπόν, αν ο χώρος επιλεγεί να έχει μεγαλύτερες διαστάσεις, αυτές θα ληφθούν υπόψη μέσω της σχέσης (2.18) και θα οδηγήσουν επακόλουθα σε υψηλότερη τιμή της έντασης $\bar{\lambda}^{xy}(t)$, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μεγαλύτερο τελικό πλήθος εμφανιζόμενων χρηστών. Εξάλλου, σε χώρο με μεγαλύτερες διαστάσεις, είναι λογικό να εμφανιστούν περισσότεροι χρήστες σε σχέση με χώρο μικρότερων διαστάσεων. Ικανοποιείται, έτσι, και αυτή η λογική απαίτηση από το επιλεγμένο μοντέλο για την περιγραφή της άφιξης των χρηστών, όπως αυτό περιγράφηκε στην ενότητα 2.4.

Πίνακας 5.3 Αλγόριθμος Προσομοίωσης δισδιάστατων Αφίξεων (θέσεων χρηστών) Poisson μη ομογενούς έντασης, $\bar{\lambda}^t(x, y)$, στο διάστημα $x \in (0, a), y \in (0, b)$	
Αλγόριθμος Αραιώσης (σε ψευδογλώσσα)	Αντίστοιχος Κώδικας Matlab
<p>Input: #χρηστών, N_{users} (από προσομοίωση χρονικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Αρχικοποίηση $\lambda = \max_{x \in (0,a), y \in (0,b)} (\bar{\lambda}^t(x, y))$ 2. for $n = 1: N_{users}$ 3. Θέσε τυχαία θέση n-οστού χρήστη $x = Uni(0,1); y = Uni(0,1);$ $accepted = false$ 4. while not accepted 5. if $Uni(0,1) \leq \bar{\lambda}^t(x, y) / \lambda$ 6. $Coords(n, 1) = x; Coords(n, 2) = y$ $accepted = true$ //αποδοχή γεγονότος 7. else $x = Uni(0,1); y = Uni(0,1);$ end_if end_while end_for <p>Output: $Coords(1..N_{users}, 1), Coords(1..N_{users}, 2)$ θέσεις εκάστου των N_{users} χρηστών</p>	<pre>% input Nusers (from previous %simulation %of time Poisson Process lambda=@(x,y);%%(Formula of %Poisson Intensity lamstar=max(lambda)%max value of %lambda in Space(a*b) for n=1:1:Nusers x1=rand;y1=rand;% generate %random position flag=false;%function of Thinning %Algorithm while ~flag if rand<= lambda(x,y)/lamstar coords(n,1)=x1;coords(n,2)=y1; flag=true % Event accepted else x1=rand;y1=rand;% Regenerate %random position end end end</pre>

Προς κατανόηση του τρόπου προσομοίωσης των θέσεων χρηστών που περιγράφηκε προηγουμένως, θα παρουσιαστούν συγκεκριμένα σενάρια υλοποίησης του σχετικού αλγορίθμου. Ειδικότερα, ως είσοδος του αλγορίθμου θα αξιοποιηθεί το παράδειγμα του εδαφίου 5.5.1.1, το οποίο προσδιορίζει το πλήθος των τελικά εμφανιζόμενων χρηστών στο χώρο S . Έστω, λοιπόν, ότι $N_{users} = 104$ χρήστες. Στη συνέχεια, για το πρώτο σενάριο η ένταση της χωρικής εκδοχής της αρχικής διαδικασίας Poisson, που περιγράφει συνολικά την εμφάνιση χρηστών στο δίκτυο, η $\bar{\lambda}^t(x, y)$, επιλέγεται να έχει την εξής μη ομογενή ως προς τις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y μορφή:

$$\bar{\lambda}^t(x, y) = 100 * (x + y) \quad (5.4)$$

Η ένταση της σχέσης (5.4) λαμβάνει μεγάλες τιμές για μεγάλες τιμές των καρτεσιανών συντεταγμένων x, y , υποδηλώνοντας ότι περισσότεροι χρήστες είναι αναμενόμενο να εμφανιστούν σε περιοχές του χώρου S που χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές των συντεταγμένων x, y . Πράγματι, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου προσομοίωσης του Πιν.5.3 προκύπτει ότι η πλειονότητα των χρηστών βρίσκεται στο άνω και δεξιά τμήμα του χώρου S . Η διαπίστωση αυτή, μάλιστα, καθίσταται ευχερέστερη από τα σχεδιαζόμενα τεταρτημόρια διαφορετικής ακτίνας του Σχ.5.2 στο οποίο και απεικονίζονται οι τελικές θέσεις των χρηστών (κόκκινες τελείες) για τη συγκεκριμένη επιλογή της $\bar{\lambda}^t(x, y)$.

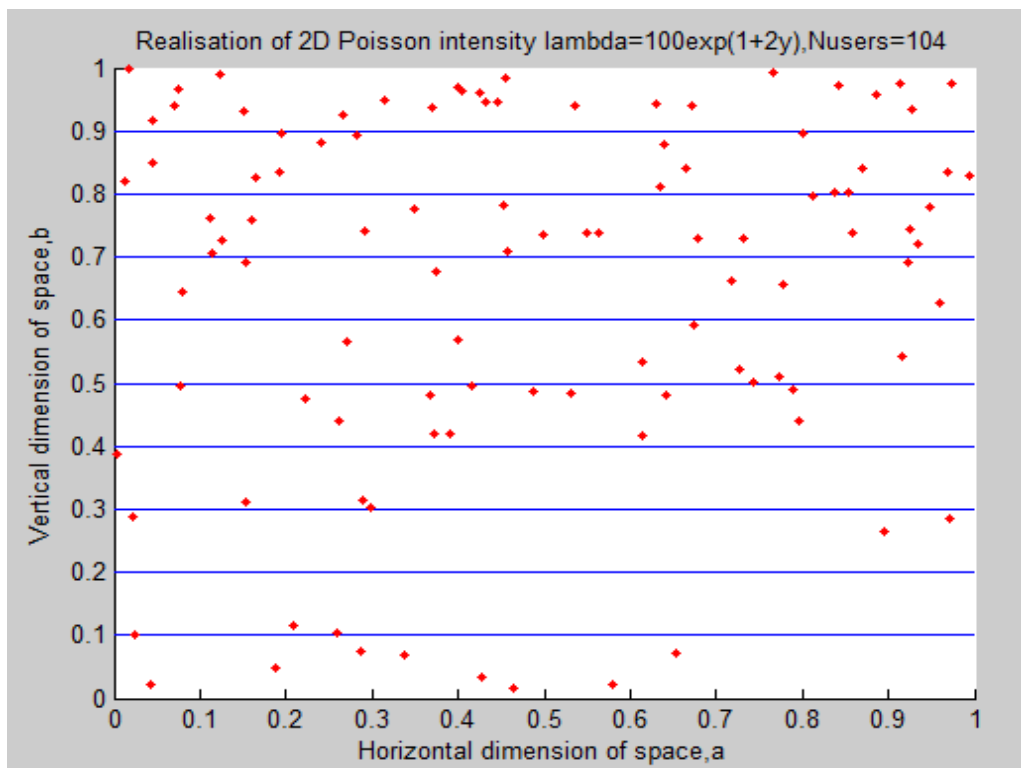


Σχήμα 5.2 Προσομοίωση θέσεων των $N_{users}=104$ χρηστών σύμφωνα με τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\bar{\lambda}^t(x, y) = 100 * (x + y)$

Για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, κρίθηκε σκόπιμο να επιλεγεί μια χωρική εκδοχή της διαδικασίας Poisson με εντονότερα μη ομογενή χαρακτηριστικά ως προς τη μία από τις καρτεσιανές συντεταγμένες, έστω τη y . Έτσι, η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ επιλέχθηκε να ισούται με

$$\bar{\lambda}^t(x, y) = 100 * e^{1+2y} \quad (5.5)$$

Ειδικότερα, λοιπόν, η ένταση της σχέσης (5.5) λαμβάνει μεγάλες τιμές για μεγάλες τιμές της καρτεσιανής συντεταγμένης y , ενώ δεν επηρεάζεται καθόλου από τις αντίστοιχες τιμές της οριζόντιας συντεταγμένης x . Το γεγονός αυτό επομένως, μεταφράζεται σε μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης των χρηστών σε περιοχές του χώρου S με μεγάλη τιμή της y , οι οποίοι θα διασπείρονται σε όλο το οριζόντιο εύρος τους χώρου λόγω της ανεξαρτησίας της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$ από την οριζόντια συντεταγμένη x . Πράγματι, με την εκτέλεση του αλγορίθμου προσομοίωσης του Πιν.5.4, προκύπτει ότι η πλειονότητα των χρηστών βρίσκεται στο άνω τμήμα του χώρου S . Μάλιστα, η συγκεκριμένη κατανομή των χρηστών συναντάται συνήθως σε περιπτώσεις ad hoc γεγονότων, όπως συναυλίες ή ομιλίες συνεδρίων, όπου οι θεατές, και ταυτόχρονα χρήστες του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, συνηθίζουν να συγκεντρώνονται μπροστά από την κεντρική σκηνή, υπό την προϋπόθεση, βέβαια, ότι η σκηνή ή το βήμα του συνεδρίου βρίσκονται στο άνω τμήμα του προς κάλυψη χώρου S . Στο Σχ. 5.3 απεικονίζονται οι θέσεις των χρηστών (κόκκινες τελείες) σύμφωνα το προαναφερθέν πρότυπο.



Σχήμα 5.3 Προσομοίωση θέσεων των $N_{users}=104$ χρηστών σύμφωνα με τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\bar{\lambda}^t(x, y) = 100 * e^{1+2y}$

5.3 Υλοποίηση της βελτιστοποίησης (3.16) στο υπολογιστικό περιβάλλον της Matlab

Η βελτιστοποίηση της (3.16) αποτελεί τον πυρήνα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων. Ειδικότερα, με εφαρμογή της βελτιστοποίησης αυτής, ο αναβαθμισμένος σταθμός βάσης *sBS* καλείται να καταναίμει τους N συνολικά διαθέσιμους πόρους στα M σημεία πρόσβασης, ή *APs*, προκειμένου αυτά με τη σειρά τους να εξυπηρετήσουν τους εμφανιζόμενους εντός της περιοχής ευθύνης εκάστου εξ αυτών χρήστες. Δηλαδή ο *sBS* αποσκοπεί στην απόδοση των διαθέσιμων πόρων όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν στη συνέχεια. Η πληροφορία αυτή, δηλαδή σε ποιές περιοχές του χώρου S αναμένεται να εμφανιστούν οι περισσότεροι χρήστες ή ισοδύναμα ποιά σημεία πρόσβασης έχουν πιθανότητα να εξυπηρετήσουν μεγάλο πλήθος εμφανιζόμενων χρηστών, εμπεριέχεται στην ένταση της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson $\bar{\lambda}^t(x, y)$. Αυτή, λοιπόν, την πληροφορία αξιοποιεί ο *sBS* ως είσοδο της βελτιστοποίησης, η οποία, στη συνέχεια, θα του υποδείξει το πλήθος των Resource Blocks (*RBs*) που θα αποδώσει σε έκαστο των M *APs* ικανοποιώντας παράλληλα την προαναφερθείσα κεντρική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να ληφθεί υπόψη η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης, την οποία ο *sBS* καλείται να ελαχιστοποιήσει υπό δεδομένο πλήθος διαθέσιμων πόρων του δικτύου, δηλαδή η συνάρτηση

$$utility\ function = \sum_{i=1}^L \int_{S_i} (\lambda'(x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M) - \bar{\lambda}^t(x, y))^2 dx dy \quad (5.6)$$

Ειδικότερα, λοιπόν, πρόκειται για προσαρμογή της έντασης της καλά υποστηριζόμενης κατανομής Poisson, $\lambda'(x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M)$, όπως αυτή ορίστηκε στο Κεφ.3 και προκύπτει από την τελική κατανομή των πόρων στα M *APs*, στην ένταση της χωρικής εκδοχής διαδικασίας Poisson, $\bar{\lambda}^t(x, y)$, που περιγράφει την άφιξη των χρηστών στο δίκτυο. Δηλαδή, ο *sBS* καλείται να αποφασίσει το σχήμα κατανομής των διαθέσιμων πόρων στα M *APs* μέσω του διανύσματος πόρων m_i , και, κατ' επέκταση, την καλά υποστηριζόμενη κατανομή που προσεγγίζει καλύτερα τη χωρική εκδοχή της διαδικασίας Poisson που αποτελεί εργαλείο εκτίμησης της αναμενόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στο προς σχεδίαση δίκτυο. Όσο περισσότερο συγκλίνει η ένταση $\lambda'(x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M)$ - που προκύπτει από την εκάστοτε κατανομή πόρων - στη χωρική ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ τόσο καλύτερα ικανοποιείται και η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου και οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται κατάλληλα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν στη συνέχεια.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας κρίθηκε εύλογο η προσαρμογή της καλά υποστηριζόμενης κατανομής στη χωρική κατανομή που εκφράζει την αναμενόμενη θέση των εμφανιζόμενων στο χώρο S χρηστών να γίνει με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Least Square Fitting). Προς τούτο, χρησιμοποιήθηκε το πρόσθετο υπολογιστικό εργαλείο της Matlab, CVX, που έχει σχεδιαστεί για τη διατύπωση και επίλυση προβλημάτων κυρτής

βελτιστοποίησης (Convex Optimization), στα οποία, άλλωστε, ανήκει και η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης συνίσταται στην ευκολία εισαγωγής των δεδομένων του προβλήματος υπό μορφή πινάκων και στην ταχεία εκτέλεση των απαιτούμενων υπολογισμών. Παράλληλα, αυξάνοντας τις διαστάσεις των δεδομένων εισόδου αυξάνεται και η υπολογιστική ακρίβεια του μοντέλου, καθώς η προσαρμογή των δύο εντάσεων αναφέρεται σε περισσότερα σημεία του χώρου S . Στον Πίν.5.4, παρουσιάζεται η υλοποίηση της βελτιστοποίησης στο πακέτο CVX, παράλληλα με τη μαθηματική διατύπωση, προκειμένου να γίνουν αντιληπτά τα πλεονεκτήματα του επιλεγέντος πακέτου προσομοίωσης.

Πίνακας 5.4 Υλοποίηση βελτιστοποίησης (3.16) στο περιβάλλον Matlab για την κατανομή των N διαθέσιμων πόρων στα M σημεία πρόσβασης	
<i>Μαθηματική διατύπωση</i>	
$\min_{m_1, m_2, \dots, m_M} \sum_{i=1}^L \int_{S_i} \left(\lambda' (x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M) - \bar{\lambda}^t(x, y) \right)^2 dx dy$	(3.16)
Όπου $(\cup_{i=0}^L S_i = S)$, οι υποπεριοχές του χώρου σύμφωνα με τον Ορισμό 3.9	
$s.t. \quad \sum_{i=1}^M m_i = N$	(3.17)
$m_i > 0, 1 \leq i \leq M$	(3.18)
Output: σχήμα κατανομής Πόρων (Resource Allocation Scheme) στα M σημεία πρόσβασης μέσω του διανύμαστος \mathbf{m}	
<i>Απαιτούμενος Κώδικας Matlab (με χρήση του πακέτου CVXToolbox)</i>	
Input:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ πίνακας \mathbf{Q} που μοντελοποιεί την καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson συναρτήσσει του διανύσματος πόρων , δηλαδή $\lambda' (x, y; p_1, \dots, p_M, m_1, \dots, m_M) = \mathbf{Q} * \mathbf{m}$, για κάθε υποπεριοχή S_i ➤ διάνυσμα lambdaxy που μοντελοποιεί ένταση της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson , $\bar{\lambda}^t(x, y)$, στο χώρο S 	
<pre>cvx_begin %% CVX tool setup variable m(M,1); minimize (norm(Q*x-lambdaxy)) %%Minimize utility function Least Square Method) subject to %%optimiztions Constraints sum(m) == N; %%Total available RBs m > 0; cvx_end</pre>	
Output: διάνυσμα πόρων στα M σημεία πρόσβασης, \mathbf{m}	

5.4 Διαστασιολόγηση και κριτήρια αξιολόγησης της επίδοσης του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου

Πριν παρουσιαστούν τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης του αλγορίθμου κατανομής πόρων και η αξιολόγηση της επίδοσής του, κρίνεται εύλογο να αναφερθεί ο τρόπος διαστασιολόγησης του δικτύου. Στην ουσία, πρόκειται για την επιλογή του πλήθους N των διαθέσιμων πόρων εκ μέρους του λειτουργού του δικτύου, προκειμένου να εξυπηρετηθούν όλοι οι εμφανιζόμενοι στο ad hoc γεγονός χρήστες. Ως εργαλείο εκτίμησης της αναμενόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης μπορεί να αξιοποιηθεί η χρονική εκδοχή της πολυδιάστατης διαδικασίας Poisson που περιγράφει την άφιξη χρηστών στο εκάστοτε γεγονός, που μπορεί να είναι αθλητικός αγώνας, συναυλία ή συνέδριο.

Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, την ένταση της χρονικής εκδοχής του μοντέλου περιγραφής της εμφάνισης των χρηστών, $\bar{\lambda}^{xy}(t)$, επί τη χρονική διάρκεια κατά την οποία διαρκεί το ad hoc γεγονός, έστω T , προκύπτει ο μέσος αναμενόμενος αριθμός χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, έστω $E[N_{users}]$:

$$E[N_{users}] = \left\lfloor \int_0^T \bar{\lambda}^{xy}(t) dt \right\rfloor \quad (5.7)$$

όπου $\lfloor X \rfloor$ δηλώνει το ακέραιο μέρος της ποσότητας X .

Στο διαχειριστή του δικτύου είναι επίσης γνωστό και το πλήθος των απαιτούμενων από κάθε χρήστη πόρων, έστω A_{user} . Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να επιλεγεί σταθερό πλήθος ζητούμενων από τους χρήστες πόρων, καθώς η υιοθέτηση πολύπλοκων μοντέλων για την περιγραφή των δικτυακών αναγκών των χρηστών υπερβαίνει τα όρια της εργασίας. Δηλαδή, όλοι οι αναμενόμενοι χρήστες ανήκουν στην ίδια κλάση υπηρεσίας (*QoS class*), καθώς απαιτούν ίδιο πλήθος πόρων για την εξυπηρέτησή τους.

Εύκολα, λοιπόν, μπορεί να προκύψει το πλήθος των διαθέσιμων πόρων ώστε το δίκτυο να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει όλους τους στατιστικά αναμενόμενους χρήστες. Συγκεκριμένα, πολλαπλασιάζοντας το μέσο πλήθος χρηστών επί το πλήθος των ανά χρήστη ζητούμενων πόρων υπολογίζονται οι συνολικές ανάγκες του δικτύου για την παροχή συνδεσιμότητας στο συγκεκριμένο ad hoc γεγονός υπό την προϋπόθεση, βέβαια, ότι όλοι οι εμφανιζόμενοι χρήστες είναι ταυτόχρονα ενεργοί. Δηλαδή, το συνολικό πλήθος Resource Blocks (*RBs*) που καλείται να κατανείμει ο *sBS* στα M σημεία πρόσβασης που παρέχουν κάλυψη στο χώρο S είναι ίσο προς:

$$N = E[N_{users}] \cdot A_{user} \quad (5.8)$$

Επισημαίνεται ότι η εμφάνιση περισσότερων χρηστών από το μέσο αναμενόμενο πλήθος αυτών θα οδηγήσει αναπόφευκτα στον αποκλεισμό όσων υπερβαίνουν τη χωρητικότητα του δικτύου, που έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί έως και $E[N_{users}]$ - ταυτόχρονα ενεργούς χρήστες. Έτσι, λοιπόν, προκύπτει το πρώτο κριτήριο αξιολόγησης (*Algorithm metric*) της συνολικής επίδοσης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που είναι το ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων

(*Call Blocking Percentage/Probability – CBP*), δηλαδή το ποσοστό των συνολικά εμφανισθέντων στο δίκτυο χρηστών που δεν απέκτησαν πρόσβαση στην υπηρεσία λόγω εξάντλησης των διαθέσιμων δικτυακών πόρων. Ιδανικά, ο σχεδιαστής του δικτύου αποσκοπεί σε μηδενικό ποσοστό αποκλεισμού χρηστών. Πρακτικά, και λόγω της στατιστικής διαστασιολόγησης των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, σε ποσοστό μικρότερο μιας προκαθορισμένης ανεκτής τιμής της τάξης του 1-3%.

Ένα άλλο κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης του αλγορίθμου κατανομής πόρων είναι το μέσο βάθος αναζήτησης (*average Depth*) των A_{user} ζητούμενων από κάθε νεοεμφανιζόμενο χρήστη πόρων κατά τη διαδικασία εξυπηρέτησής του, όπως αυτή περιγράφηκε λεπτομερώς στο Κεφ.3. Δηλαδή, ενδιαφέρει να είναι γνωστό πόσοι εκ των M ισχυρών κόμβων εμπλέκονται κατά μέσο όρο στη διαδικασία εξεύρεσης πόρων για κάθε νέο χρήστη. Ειδικότερα, κατά την πρώτη λειτουργία του δικτύου, κατά την οποία έχει εμφανιστεί μικρός αριθμός χρηστών, υπάρχει περίσσεια πόρων στις περιοχές όπου αναμένεται να εμφανιστεί η πλειονότητα των χρηστών. Αυτό έχει εξασφαλιστεί μέσω της αρχικής κατανομής των N πόρων στα M APs εκ μέρους του sBS . Η εξυπηρέτηση, λοιπόν, κάθε νέου χρήστη θα ολοκληρώνεται μόνο με τη διαχειριστική εμπλοκή του AP στην περιοχή ευθύνης του οποίου εμφανίστηκε ο εκάστοτε χρήστης, δηλαδή του I_0 , οδηγώντας τελικά σε μηδενικό βάθος αναζήτησης πόρων. Από την άλλη πλευρά, καθώς ο αριθμός των εμφανιζόμενων χρηστών αυξάνει και πλησιάζει το θεωρητικό όριο χωρητικότητας του δικτύου, δηλαδή τους $E[N_{users}]$ ταυτόχρονα ενεργούς χρήστες, οπότε και οι διαθέσιμοι δικτυακοί πόροι σταδιακά εξαντλούνται, είναι φανερό ότι στην εξυπηρέτηση κάθε νέου χρήστη θα εμπλέκονται περισσότερα του ενός σημεία πρόσβασης για να συμβάλουν έτσι στην εξεύρεση των απαιτούμενων A_{user} πόρων. Αναμένεται, επομένως, αύξηση του μέσου βάθους αναζήτησης πόρων, η οποία μεταφράζεται τόσο σε όρους καθυστέρησης εξυπηρέτησης (*service delay*) των εμφανιζόμενων χρηστών όσο και σε εισαγωγή αναπόφευκτου πλεονασμού (*overhead*) στο δίκτυο.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, θεωρήθηκε ότι, μέχρι να εμφανιστεί νέος χρήστης στο προς σχεδίαση δίκτυο, η εξυπηρέτηση κάθε χρήστη θα έχει περατωθεί ανεξάρτητα από το βάθος αναζήτησης που θα απαιτηθεί για αυτήν. Η επιλογή αυτή, μάλιστα, υποδεικνύεται από το κύριο σχεδιαστικό κίνητρο του προτεινόμενου αλγορίθμου, το οποίο σχετίζεται με την κατάλληλη χωρική κατανομή των διαθέσιμων πόρων στις περιοχές του χώρου S όπου αναμένεται να ζητηθούν στη συνέχεια, και όχι με τη μελέτη της χρονικής επίδοσης της διαδικασίας εξυπηρέτησης των χρηστών.

Προς ανάδειξη της χρησιμότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, κρίνεται σκόπιμο τα προαναφερθέντα κριτήρια αξιολόγησης που σχετίζονται με το ποσοστό αποκλεισμού χρηστών και το μέσο βάθος αναζήτησης πόρων να παρουσιαστούν συγκριτικά με τα αντίστοιχα κάποιου αλγορίθμου αναφοράς (*reference algorithm*). Τέτοιος αλγόριθμος είναι η στατική κατανομή των N διαθέσιμων πόρων στα M APs εκ μέρους του sBS , σύμφωνα με την οποία αποδίδεται αρχικά το ίδιο πλήθος πόρων σε έκαστο των M σημείων πρόσβασης. Για λόγους διάκρισης των δύο συγκρινόμενων αλγορίθμων, ο προτεινόμενος αλγόριθμος θα

αναφέρεται και ως προσαρμοστική κατανομή πόρων (*Adaptive RA*), καθώς προσαρμόζει την κατανομή των διαθέσιμων πόρων σύμφωνα με τα χωρικά χαρακτηριστικά εμφάνισης των χρηστών μέσω της έντασης της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson $\bar{\lambda}^t(x,y)$ ενώ ο δεύτερος αλγόριθμος αναφοράς θα αναφέρεται ως στατική κατανομή πόρων (*Static RA*). Στον Πίν.5.5 παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των κριτηρίων αξιολόγησης της επίδοσης (*Algorithm metrics*) των δύο υπό σύγκριση εκδοχών κατανομής πόρων, της δυναμικής (προτεινόμενου αλγορίθμου) και της στατικής. Η συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμοποιείται μετά την ολοκλήρωση της εξυπηρέτησης όλων των εμφανισθέντων χρηστών για κάθε σενάριο προσομοίωσης και αποτελεί τη βάση για την εξαγωγή των διαγραμμάτων που θα παρουσιαστούν στο επόμενο εδάφιο για κάθε περίπτωση δικτύου χωριστά.

Πίνακας 5.5 RA_Algorithm_metrics function/Συνάρτηση Υπολογισμού δεικτών επίδοσης Αλγορίθμου Κατανομής Πόρων

Input: total Initial available Resources N , number of demanded resources A , total number of users N_{users} , User's resource allocation vector $C : C(:,1)$ #RBs allocated to each user, $C(:,2)$ each user resource Search Depth

Output: UnusedRBs, UnservedUsers, Call Blocking Probability CBP, average Resource Search's Depth avgDepth

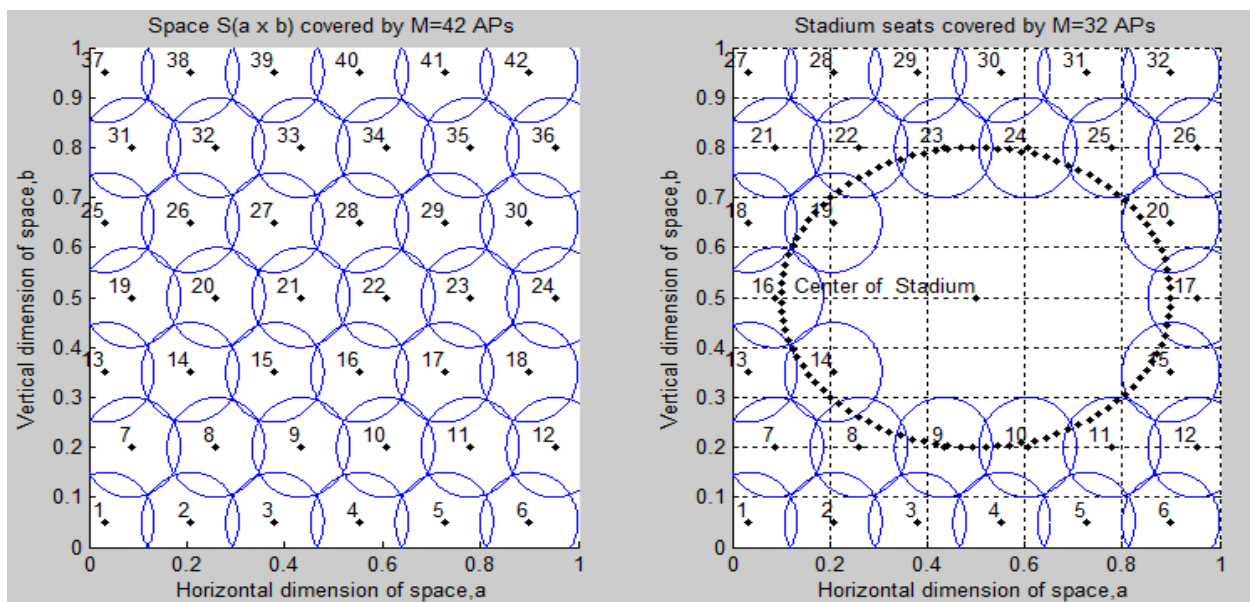
1. $UnusedRBs = N - sum(C(:,1));$ //Calculation of unused RBs
2. $UnservedUsers = 0; sum = 0;$ //Initialisation of counting vars
3. **for** $i = 1:N_{users}$
4. **if** $C(i,1) < A$ **then**
5. $UnservedUsers = UnservedUsers + 1;$ //Count unserved Users
6. **end_if**
7. $sum = sum + C(:,2);$
8. **end_for**
9. $avgDepth = sum/N_{users};$ // average Resource Search Depth Calculation
10. $CBP = (UnservedUsers / NoNodes) * 100$ // Call Blocking Percentage Calculation
11. **end_function**

5.5 Σενάρια προσομοίωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων

Στο εδάφιο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν ορισμένα ενδεικτικά σενάρια εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, συνοδευόμενα με τα αντίστοιχα διαγράμματα των κριτηρίων επίδοσης (*metrics charts*) του αλγορίθμου. Ειδικότερα, λοιπόν, σε όλα τα σενάρια οι διαστάσεις του χώρου S επιλέχθηκαν ίσες με $a = b = 1$, χωρίς βέβαια η επιλογή αυτή να επιδρά στη γενικότητα του αλγορίθμου. Στην ουσία, πρόκειται για κανονικοποίηση των διαστάσεων του προς κάλυψη χώρου, προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί, στη συνέχεια, σε οποιοδήποτε χώρο διαφορετικών διαστάσεων. Καίτοι η επιλογή ίσων μεταξύ τους διαστάσεων οδηγεί σε τετραγωνικό χώρο, εύκολα μπορεί να γενικευτεί ο

αλγόριθμος για οποιοδήποτε ορθογωνικό χώρο S με $a \neq b$, με μόνη διαφορά το διαφορετικό πλήθος των απαιτούμενων, για την κάλυψη του συνολικού χώρου, σημείων πρόσβασης (APs), δηλαδή $M_{square} \neq M_{rectangular}$. Τέλος, η εμβέλεια τόσο των σημείων πρόσβασης όσο και των εμφανιζόμενων χρηστών επιλέχθηκε ίση με $r = a/10 = b/10 = 0.1$.

Στα επόμενα υποεπάφια πα τα αντίστοιχα σενάρια προσομοίωσης υπό δεδομένη ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson, $\lambda(t, x, y)$, που περιγράφει τον αναμενόμενο τρόπο άφιξης των χρηστών στο χώρο S , και, ουσιαστικά, αποτελεί τον πυρήνα του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι ο χώρος S ενδέχεται να διαφέρει από σενάριο σε σενάριο προσομοίωσης, δεδομένου ότι ο εκάστοτε προς κάλυψη χώρος είναι ο χώρος πραγματοποίησης ενός ad hoc γεγονότος, για το οποίο κρίνεται αποδοτικό να εφαρμοστεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής πόρων. Προς τούτο, λοιπόν, στα δύο πρώτα σενάρια επιλέχθηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος ολόκληρος ο χώρος S διαστάσεων, $a \times b$. Για παράδειγμα, η επιλογή αυτή ενδέχεται να αντιστοιχεί σε ένα συναυλιακό ή συνεδριακό χώρο, εμπορικό κέντρο, πλατεία, όπου αναμένεται αθρόα προσέλευση χρηστών, καθιστώντας αναγκαία την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου στο προς μελέτη τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, στο τρίτο και τελευταίο σενάριο, ως ad hoc γεγονός θεωρήθηκε ένας δημοφιλής αθλητικός αγώνας ή συναυλία. Κρίνεται, επομένως, εύλογο ως περιοχή ενδιαφέροντος να οριστεί η περιοχή των κερκίδων του σταδίου, όπου αναμένεται να πραγματοποιηθεί το ad hoc γεγονός και συνεπώς, για την παροχή συνδεσιμότητας στους θεατές, απαιτείται η τοποθέτηση διαφορετικού πλήθους σημείων πρόσβασης σε σχέση με την προαναφερθείσα εκδοχή του χώρου S . Τέλος, στο Σχ.5.4 απεικονίζονται συγκριτικά οι δύο εκδοχές του χώρου για τις οποίες θα προσομοιωθεί στη συνέχεια η επίδοση του αλγορίθμου κατανομής πόρων.



Σχήμα 5.4 Κάλυψη με APs των 2 εκδοχών του χώρου S (αριστερά-τετραγωνικός χώρος διαστάσεων $a \times b$, δεξιά-περιοχή κερκίδων σταδίου)

5.5.1 Προσομοίωση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε ολόκληρο το χώρο S

Στο εδάφιο αυτό θα παρουσιαστούν δύο ενδεικτικά σενάρια προσομοίωσης του συγκεκριμένου αλγορίθμου υπό δεδομένη κάθε φορά ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson που περιγράφει στατιστικά την αναμενόμενη άφιξη των χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό και από τον τίτλο του εδαφίου, η περιοχή ενδιαφέροντος από πλευράς του λειτουργού του δικτύου (MNO) είναι ολόκληρος ο χώρος S , διαστάσεων $a \times b$. Και για τα δύο ενδεικτικά σενάρια, το πλήθος των ζητούμενων ανά χρήστη πόρων επιλέχθηκε ίσο προς

$$A_{user} = 5 RBs \quad (5.9)$$

Στη συνέχεια, ο MNO αξιοποιεί την πληροφορία της χρονικής εκδοχής της έντασης $\overline{\lambda^{xy}}(t)$ της διαδικασίας Poisson για το χρονικό διάστημα T κατά το οποίο πραγματοποιείται άφιξη νέων χρηστών στο δίκτυο στο πλαίσιο του ad hoc γεγονότος, με σκοπό τη διαστασιολόγηση του δικτύου σύμφωνα με τη μεθοδολογία της υποενότητας 5.4. Η ένταση $\overline{\lambda^{xy}}(t)$, άλλωστε, συνιστά ένα μοντέλο πρόβλεψης του μέσου αναμενόμενου πλήθους $E[N_{users}]$ εμφανιζόμενων χρηστών στο δίκτυο, το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με το ζητούμενο ανά χρήστη πλήθος πόρων A_{user} προσδιορίζει το συνολικά απαιτούμενο πλήθος διαθέσιμων πόρων N . Το τελευταίο, με τη σειρά του, εξασφαλίζει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση όλων των τελικά αναμενόμενων χρηστών στο δίκτυο. Αυτούς τους N συνολικά διαθέσιμους πόρους καλείται ο sBS να κατανείμει στα M σημεία πρόσβασης, λαμβάνοντας υπόψη την πληροφορία για τη θέση άφιξης των χρηστών στο χώρο S που παρέχει η ένταση της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson $\overline{\lambda^t}(x, y)$.

Στα επόμενα βήματα της προσομοίωσης, περιλαμβάνονται η προσομοίωση των N_{user} – το πλήθος- τελικά εμφανισθέντων χρηστών στο δίκτυο σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε λεπτομερώς στην αντίστοιχη υποενότητα 5.2 και η εξυπηρέτηση εκάστου εξ αυτών από τον ισχυρό κόμβο - που συμβολίζεται με I_0 -, στην περιοχή ευθύνης του οποίου εμφανίζεται ο εκάστοτε προς εξυπηρέτηση χρήστης. Πρέπει να επισημανθεί ότι η εμφάνιση περισσότερων τελικά χρηστών στο δίκτυο σε σχέση με τη θεωρητική χωρητικότητα των $E[N_{users}]$ ταυτόχρονα ενεργών χρηστών θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε αποκλεισμό χρηστών λόγω της εξάντλησης των διαθέσιμων πόρων. Το ενδεχόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό μέσω του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών, το οποίο στην προκείμενη περίπτωση παρουσιάζει αναπόφευκτα μικρή αύξηση. Στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης, πραγματοποιείται η εξαγωγή των αντίστοιχων για κάθε σενάριο διαγραμμάτων των κριτηρίων επίδοσης του αλγορίθμου και γίνεται η αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου (*Adaptive RA*) συγκριτικά με τη στατική εκδοχή της κατανομής των διαθέσιμων πόρων του δικτύου (*Static RA*) σε όρους καθυστέρησης εξυπηρέτησης.

i. Πρώτο σενάριο προσομοίωσης

Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης η ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson που διέπει την άφιξη των χρηστών στο χώρο S επιλέχθηκε ίσο προς

$$\lambda(t, x, y) = \lambda_t(t) \cdot \lambda_{xy}(x, y) = 100 \cdot (x + y) \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια, το χρονικό παράθυρο, κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιείται η συγκέντρωση των χρηστών στο δίκτυο στο πλαίσιο του ad hoc γεγονότος (συναυλία, συνέδριο, εμπορική εκδήλωση) επιλέχθηκε ίσο με $T = 10$ χρονικές μονάδες.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.18) – (2.21) της υποενότητας 2.4, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι αντίστοιχες εντάσεις της χρονικής και της χωρικής εκδοχής της ανωτέρω διαδικασίας Poisson, $\bar{\lambda}^{xy}(t)$ και $\bar{\lambda}^t(x, y)$, που αποτελούν απαραίτητα εργαλεία τόσο για τη διαστασιολόγηση όσο και για τη λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου. Ισχύουν, επομένως:

$$\bar{\lambda}^{xy}(t) = \lambda_t(t) \cdot (a \cdot b) \cdot \frac{a + b}{2} = 100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{(1 + 1)}{2} = 100 \text{ χρήστες / χρονική μονάδα} \quad (5.11)$$

$$\bar{\lambda}^t(x, y) = \lambda_{xy}(x, y) \cdot 100 \cdot 10 = 1000 \cdot (x + y) \quad (5.12)$$

Αξιοποιώντας τη σχέση (5.11) σε συνδυασμό με τις (5.7), (5.8), ο σχεδιαστής/λειτουργός του δικτύου είναι σε θέση να υπολογίσει τους συνολικά απαιτούμενους πόρους προς εξυπηρέτηση του μέσου αναμενόμενου πλήθους εμφανιζόμενων χρηστών στο δίκτυο ως εξής:

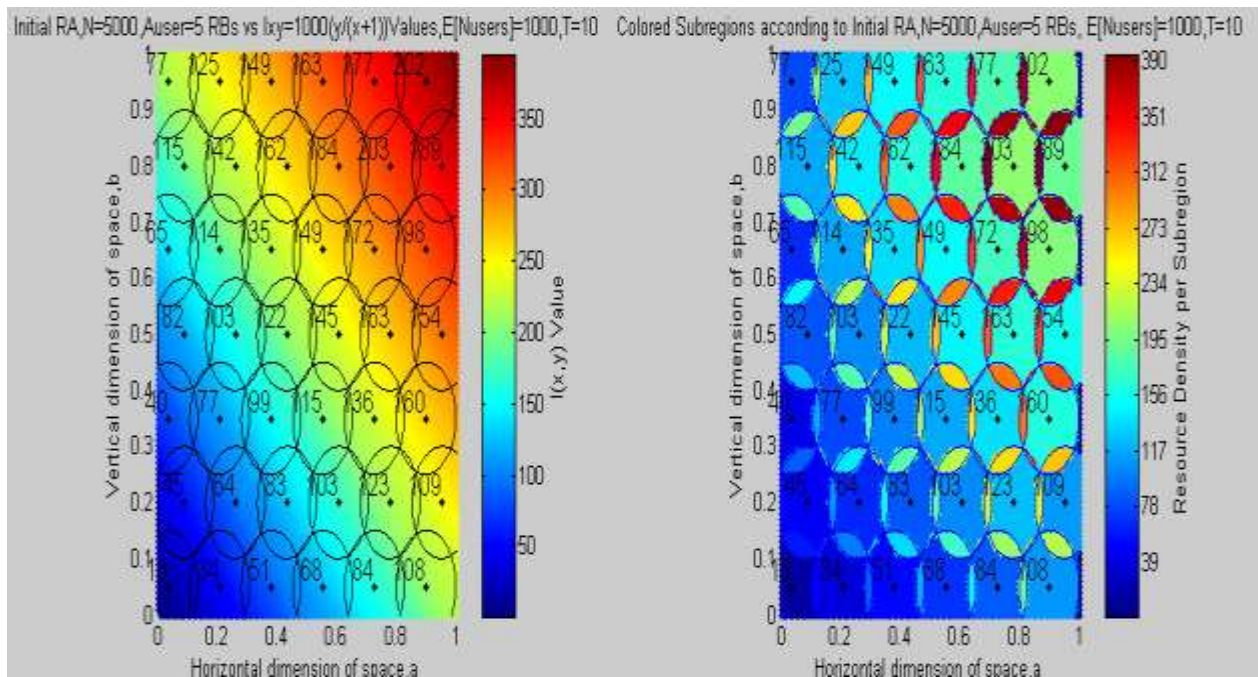
$$E[N_{users}] = 100 \text{ χρήστες / χρον. μονάδα} \cdot 10 \text{ χρον. μονάδες} = 1000 \text{ χρήστες} \quad (5.13)$$

$$N = E[N_{users}] \cdot A_{user} = 1000 \text{ χρήστες} \cdot 5 \text{ RBs / χρήστη} = 5000 \text{ RBs} \quad (5.14)$$

Αυτούς, λοιπόν, τους N διαθέσιμους πόρους καλείται ο sBS να καταναίμει στα M APs εφαρμόζοντας τη βελτιστοποίηση που χρησιμοποιεί ως είσοδο την ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson όπως περιγράφεται λεπτομερώς στον Πίν.5.4. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ο καθοριστικός ρόλος της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson στην επίτευξη της κεντρικής ιδέας του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων. Πράγματι, το σχήμα κατανομής πόρων που θα υποδείξει στον sBS η ανωτέρω βελτιστοποίηση υπαγορεύεται, ουσιαστικά, από τη μορφή της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$. Ειδικότερα, σε περιοχές όπου η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ λαμβάνει μεγάλες τιμές, στην προκειμένη για μεγάλες τιμές των δύο καρτεσιανών συντεταγμένων x, y (δηλαδή στο άνω και δεξιά τμήμα του χώρου S), διαπιστώνεται μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης χρηστών στις συγκεκριμένες περιοχές σε σχέση με άλλες περιοχές του χώρου όπου η ένταση λαμβάνει μικρότερες τιμές. Προς τούτο, στα σημεία πρόσβασης οι περιοχές ευθύνης των οποίων αντιστοιχούν στις περιοχές αυτές, πρέπει να αποδοθεί μεγαλύτερο πλήθος πόρων κατά την αρχική κατανομή αυτών, προκειμένου να ικανοποιήσουν την εκεί υψηλή αναμενόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι η υψηλή πιθανότητα εμφάνισης χρηστών σε ορισμένες περιοχές, που απορρέει από τις αντίστοιχα υψηλές τιμές της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$, είναι πιθανό να οφείλεται και στα χαρακτηριστικά του

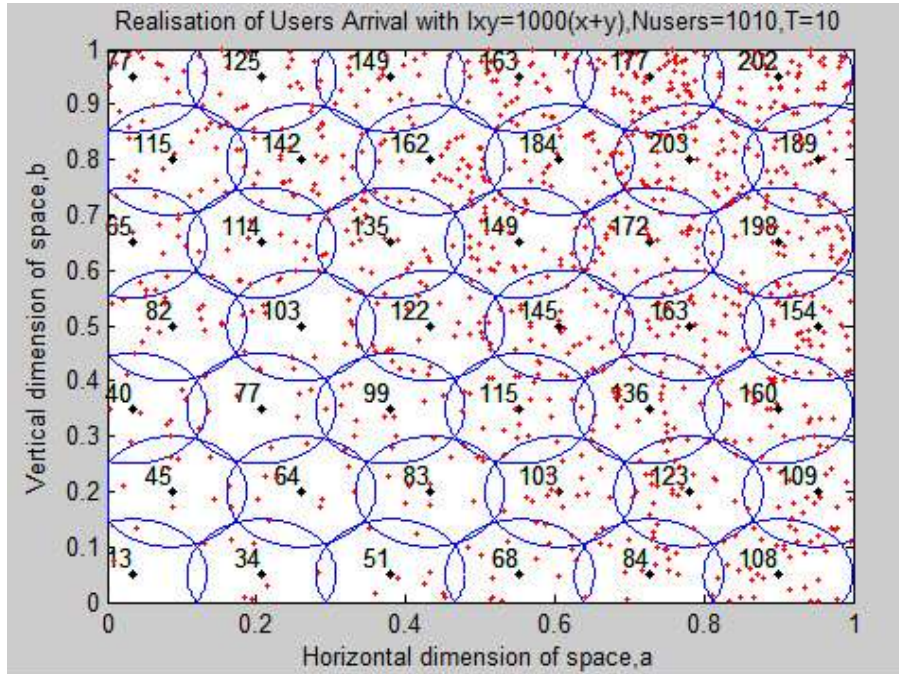
εκάστοτε ad hoc γεγονός στο πλαίσιο του οποίου εφαρμόζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Θεωρώντας, λοιπόν, την εκδοχή μιας συναυλίας, είναι λογικό στις περιοχές που βρίσκονται κοντά στην σκηνή να αναμένονται περισσότεροι χρήστες σε σχέση με απομακρυσμένες περιοχές του χώρου συγκέντρωσης των θεατών/χρηστών. Επομένως, στα *APs* που εξυπηρετούν τις κοντά στη σκηνή περιοχές, κρίνεται σκόπιμο να αποδοθεί μεγαλύτερο μέρος των N διαθέσιμων πόρων.

Επιστρέφοντας στο υπό μελέτη σενάριο προσομοίωσης, θα παρουσιαστεί η αρχική κατανομή των N διαθέσιμων πόρων στα M *APs* εκ μέρους του *sBS* λαμβάνοντας υπόψη τα χωρικά χαρακτηριστικά της εμφάνισης χρηστών στο δίκτυο που περιγράφονται μέσω της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$ της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson. Με στόχο την καλύτερη κατανόηση της κεντρικής ιδέας του αλγορίθμου, παρουσιάζονται σε αριστερό διάγραμμα του Σχ.5.5 οι αντίστοιχες τιμές της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$ για τις διάφορες περιοχές του χώρου που υπαγορεύουν, άλλωστε, την κατανομή των πόρων στα αντίστοιχα σημεία πρόσβασης. Να σημειωθεί, επίσης, ότι κάθε *AP* συνοδεύεται από το πλήθος των πόρων που τελικά του απονεμήθηκαν από τον *sBS*, ενώ η περιοχή ευθύνης εκάστου χρωματίζεται αναλόγως. Δηλαδή, σε περιοχές με έντονο χρώμα, έχει αποδοθεί πληθώρα πόρων σε αντιστοιχία με την υψηλή τιμή της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$, όπως φαίνεται στο αριστερό διάγραμμα, και της συνεπαγόμενης εμφάνισης μεγάλου πλήθους χρηστών. Αντίθετα, στα *APs*, οι περιοχές των οποίων χρωματίζονται με ψυχρές αποχρώσεις, έχει αποδοθεί μικρό πλήθος διαθέσιμων πόρων εξαιτίας των μικρότερων τιμών της έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$ που αντιστοιχούν σε μικρό πλήθος τελικά εμφανιζόμενων χρηστών. Όλα τα ανωτέρω γίνονται κατανοητά από το Σχ.5.5.



Σχήμα 5.5 Αρχική κατανομή των N πόρων στα M *APs* για χωρική ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y) = 1000 \cdot (x + y)$

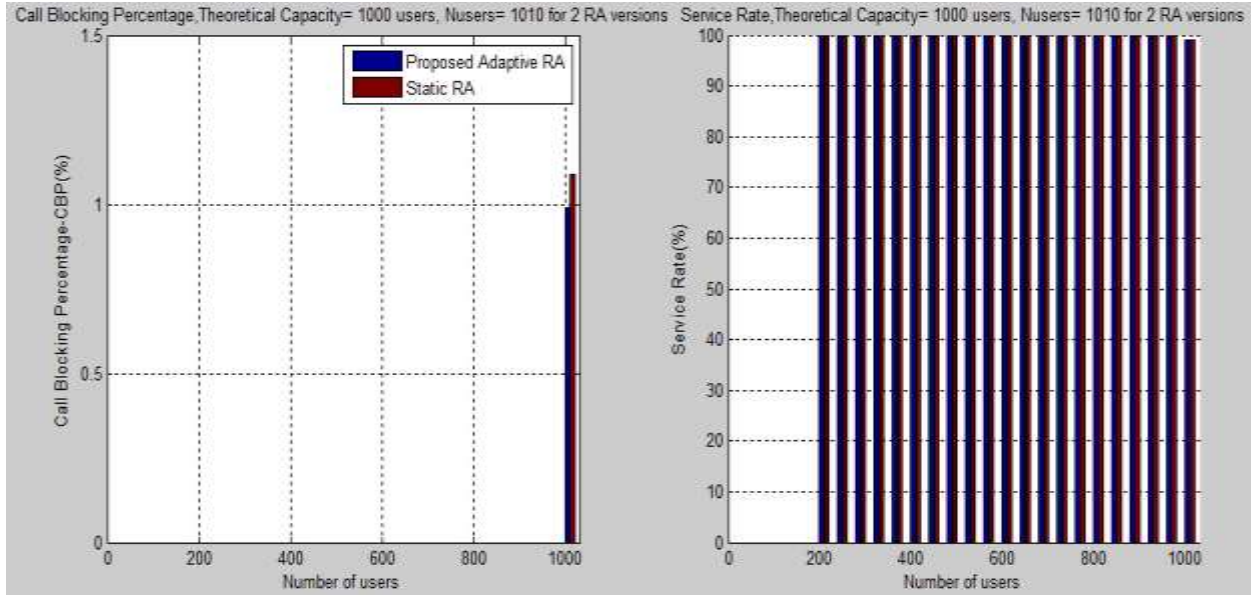
Ακολούθως, προσομοιώνεται η άφιξη των χρηστών στο χώρο S , σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην υποενότητα 5.2 και χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τόσο τη χρονική, για την προσομοίωση του χρόνου άφιξης, όσο και τη χωρική, για την αντίστοιχη θέση κάθε χρήστη, εκδοχή της διαδικασίας Poisson. Καίτοι οι θεωρητικά αναμενόμενοι χρήστες στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι 1000, οι τελικά εμφανισθέντες χρήστες υπερβαίνουν το πλήθος αυτό κατά 10, δηλαδή $N_{users} = 1010$ χρήστες. Οι θέσεις αυτών των N_{users} χρηστών αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα στο Σχ.5.6, στο οποίο επίσης διακρίνονται τα αντίστοιχα APs με μαύρο χρώμα και το πλήθος πόρων που αρχικά αποδόθηκε σε έκαστο εξ αυτών.



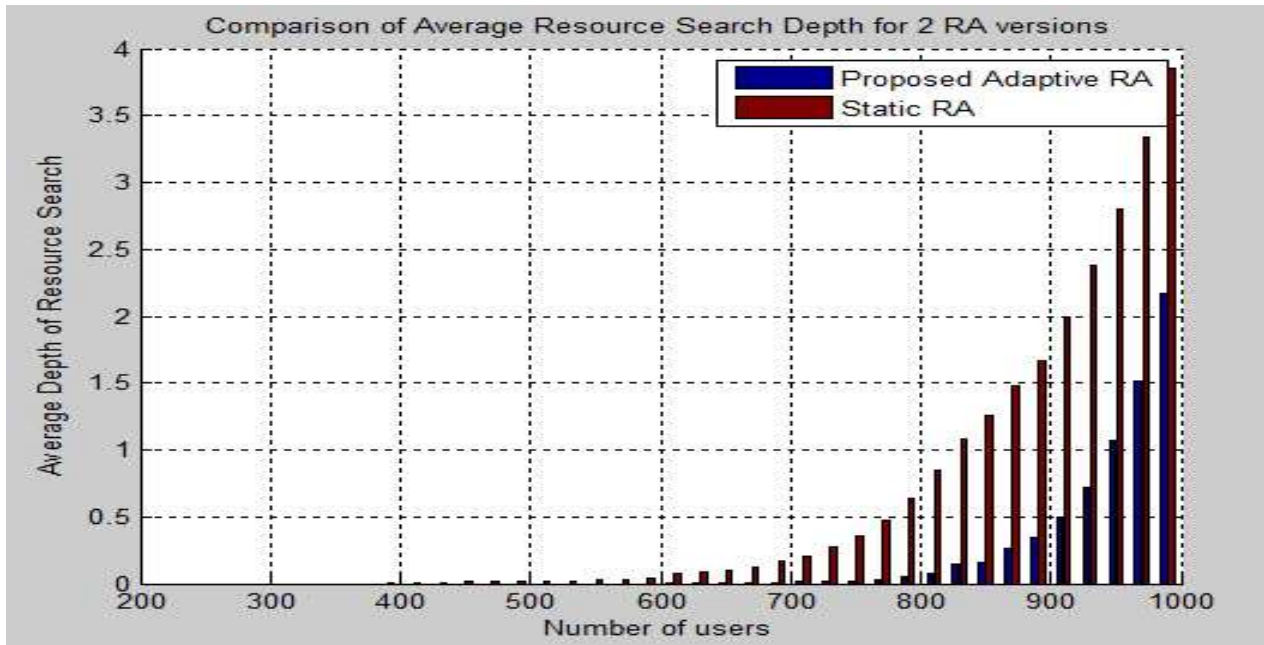
Σχήμα 5.6 Προσομοίωση άφιξης χρηστών στο χώρο S , $\bar{\lambda}^t(x,y) = 1000 \cdot (x+y)$, $T = 10$ χρον. μον., $N_{users} = 1010$ χρήστες

Πράγματι, λοιπόν, στις περιοχές όπου αναμένονταν περισσότεροι χρήστες - και τελικά εμφανίστηκαν σύμφωνα με προσομοίωση - ,δηλαδή στο άνω και δεξιό τμήμα του χώρου S , κατά την αρχική κατανομή που εκτελεί ο sBS αποδόθηκαν περισσότεροι πόροι στα αντίστοιχα APs . Αυτό θα αποδειχθεί ευεργετικό κατά την εξυπηρέτηση κάθε εμφανιζόμενου χρήστη γιατί μειώνεται δραστικά το πλήθος των APs που εμπλέκονται στη διαδικασία εξεύρεσης των απαιτούμενων για τη λειτουργία κάθε χρήστη πόρων, άρα και η καθυστέρηση εξυπηρέτησης. Παράλληλα, όμως, λόγω της εμφάνισης μεγαλύτερου πλήθους χρηστών από τη θεωρητική χωρητικότητα του δικτύου σε χρήστες, παρατηρείται μικρή ανεκτή αύξηση, της τάξης του 1% του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών στο προς μελέτη τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Όλα τα ανωτέρω παρουσιάζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα των κριτηρίων αξιολόγησης του προτεινόμενου αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, στο Σχ.5.7 φαίνεται η διακύμανση του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών και του αντίστοιχου ποσοστού εξυπηρέτησης αυτών για διάφορες τιμές του πλήθους των εμφανισθέντων χρηστών, προσομοιώνοντας έτσι την εξέλιξη της λειτουργίας

του δικτύου. Το Σχ.5.8 παρουσιάζει το μέσο βάθος αναζήτησης των απαιτούμενων πόρων για τη λειτουργία κάθε χρήστη, συγκρινόμενο, μάλιστα, με το αντίστοιχο βάθος για την στατική κατανομή των διαθέσιμων πόρων στα $M APs$. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μέσω της υπεροχής του έναντι της στατικής κατανομής, αναδεικνύεται η χρησιμότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, καθώς επιτυγχάνει μικρότερο μέσο βάθος αναζήτησης των πόρων για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη ή, ισοδύναμα, επιτυγχάνει μικρότερη καθυστέρηση εξυπηρέτησης.



Σχήμα 5.7 Ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων και αντίστοιχο ποσοστό εξυπηρέτησης των $N_{users} = 1010$ χρηστών



Σχήμα 5.8 Μέσο απαιτούμενο βάθος εξεύρεσης πόρων για την εξυπηρέτηση χρηστών για τις δύο εκδοχές κατανομής πόρων του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα του πρώτου σχήματος παρουσιάζεται το συνολικό πλήθος των τελικά εμφανισθέντων στο δίκτυο χρηστών, $N_{users} = 1010$ χρηστών, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αδυναμία εξυπηρέτησης των χρηστών που υπερβαίνουν το θεωρητικό όριο χωρητικότητας χρηστών του δικτύου $E[N_{users}] = 1000$ χρήστες. Αντίθετα, στο διάγραμμα του δεύτερου σχήματος, το οποίο σχετίζεται με την επιτυχή εξυπηρέτηση των χρηστών, δεν έχει νόημα η παρουσίαση και του πλήθους των χρηστών που τελικά δεν κατόρθωσαν να εξυπηρετηθούν. Για το λόγο αυτό, άλλωστε, ο αντίστοιχος άξονας του πλήθους των χρηστών ορίστηκε έως το θεωρητικό όριο χωρητικότητας του δικτύου, δηλαδή $E[N_{users}] = 1000$ χρήστες.

ii. Δεύτερο σενάριο προσομοίωσης

Η διαδικασία της προσομοίωσης του δεύτερου σεναρίου είναι αντίστοιχη αυτής που ακολουθήθηκε για το πρώτο σενάριο με μόνη διαφορά την αλλαγή στον τύπο της έντασης $\lambda(t, x, y)$ της αρχικής χωροχρονικής διαδικασίας Poisson που περιγράφει την άφιξη των χρηστών στο δίκτυο. Κρίνεται, επομένως, εύλογο να γίνει συνοπτική παρουσίαση των αντίστοιχων δεδομένων προσομοίωσης του συγκεκριμένου σεναρίου. Ισχύει:

$$\lambda(t, x, y) = \lambda_t(t) \cdot \lambda_{xy}(x, y) = 290 \cdot y/(x + 1) \quad (5.15)$$

Το χρονικό παράθυρο, κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιείται η συγκέντρωση των χρηστών στο δίκτυο στο πλαίσιο του ad hoc γεγονότος (συναυλία, συνέδριο, εμπορική εκδήλωση), επιλέχθηκε ίσο με $T = 10$ χρονικές μονάδες.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.18) – (2.21) της υποενότητας 2.4, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι αντίστοιχες εντάσεις της χρονικής και της χωρικής εκδοχής της ανωτέρω διαδικασίας Poisson, $\bar{\lambda}^{xy}(t)$ και $\bar{\lambda}^t(x, y)$, απαραίτητων εργαλείων τόσο για τη διαστασιολόγηση όσο και για τη λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου. Ισχ, επομένως:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}^{xy}(t) &= \lambda_t(t) \cdot E_{xy} = \lambda_t(t) \cdot 0.5b^2 \cdot \ln(a + 1) = 290 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot \ln(1 + 1) \\ &= 100 \text{ χρήστες/ χρον. μον.} \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\bar{\lambda}^t(x, y) = \lambda_{xy}(x, y) \cdot 100 \cdot 10 = 1000 \cdot y/(x + 1) \quad (5.17)$$

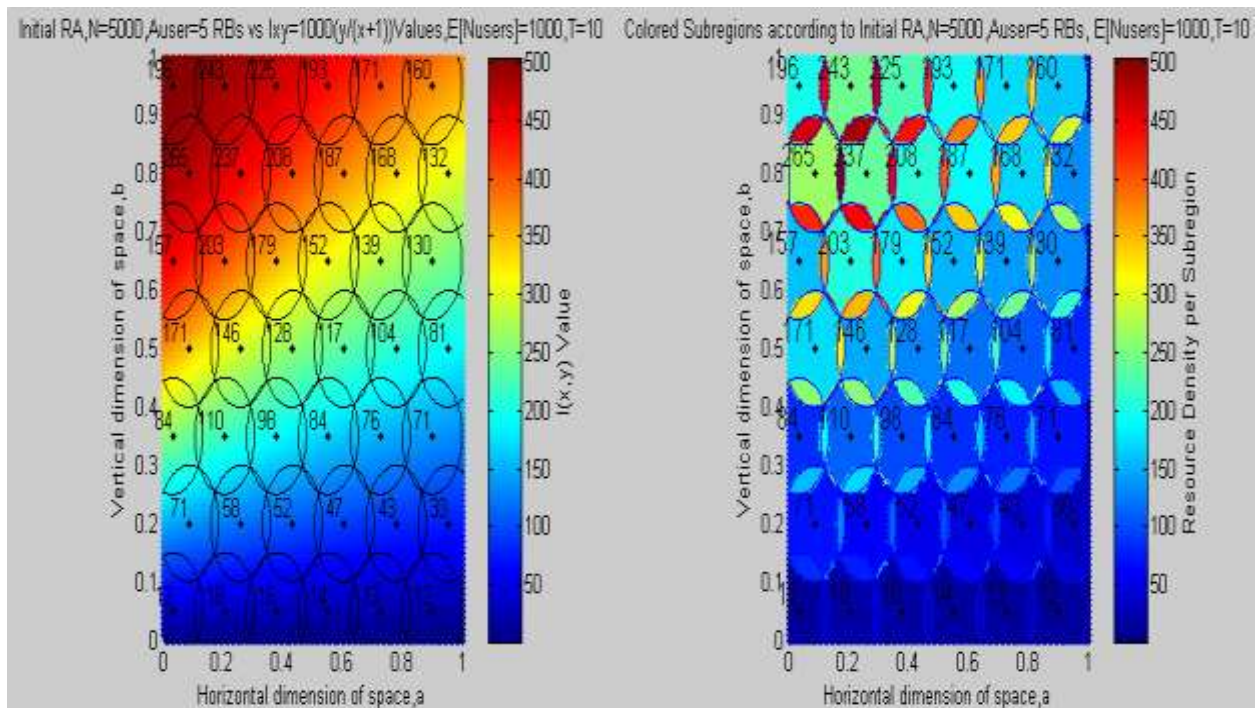
Αξιοποιώντας, λοιπόν, τη σχέση (5.17) σε συνδυασμό με τις (5.7), (5.8) ο σχεδιαστής/λειτουργός του δικτύου είναι σε θέση να υπολογίσει τους απαιτούμενους συνολικά διαθέσιμους πόρους για τη εξυπηρέτηση του μέσου αναμενόμενου πλήθους χρηστών στο δίκτυο ως εξής:

$$E[N_{users}] = 100 \text{ χρήστες/χρον. μονάδα} \cdot 10 \text{ χρον. μονάδες} = 1000 \text{ χρήστες} \quad (5.18)$$

$$N = E[N_{users}] \cdot A_{user} = 1000 \text{ χρήστες} \cdot 5RBs/\text{χρήστη} = 5000RBs \quad (5.19)$$

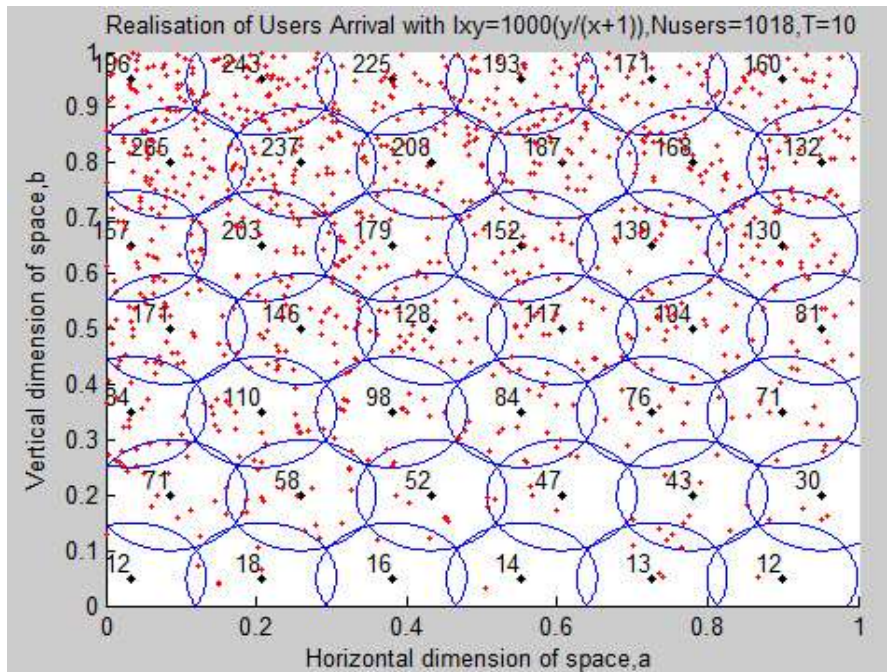
Η διαστασιολόγηση του δικτύου στο πλαίσιο του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοιάζει με την αντίστοιχη του πρώτου σεναρίου, καθώς αναμένεται ο ίδιος αριθμός χρηστών με αποτέλεσμα να απαιτείται το ίδιο πλήθος διαθέσιμων πόρων για την εξυπηρέτηση αυτών. Εντούτοις, η

αντίστοιχη κατανομή των N πόρων στα M APs αναμένεται να διαφέρει από αυτήν του πρώτου σεναρίου λόγω της διαφορετικής έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)$ της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson. Ειδικότερα, λοιπόν, στο άνω και αριστερό τμήμα του χώρου S όπου η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ λαμβάνει μεγάλες τιμές, αναμένεται να αποδοθούν περισσότεροι πόροι συγκριτικά με αντίστοιχες περιοχές, κάτω και δεξιό τμήμα του χώρου S , όπου οι τιμές της $\bar{\lambda}^t(x, y)$ είναι μικρότερες. Πράγματι, λοιπόν, η αρχική κατανομή πόρων ακολουθεί τις τιμές της έντασης, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το Σχ.5.9, στο οποίο έχει εφαρμοστεί η ίδια μεθοδολογία χρωματισμού των περιοχών με βάση το πλήθος πόρων που έχει αποδοθεί αρχικά σε έναστο των σημείων πρόσβασης.



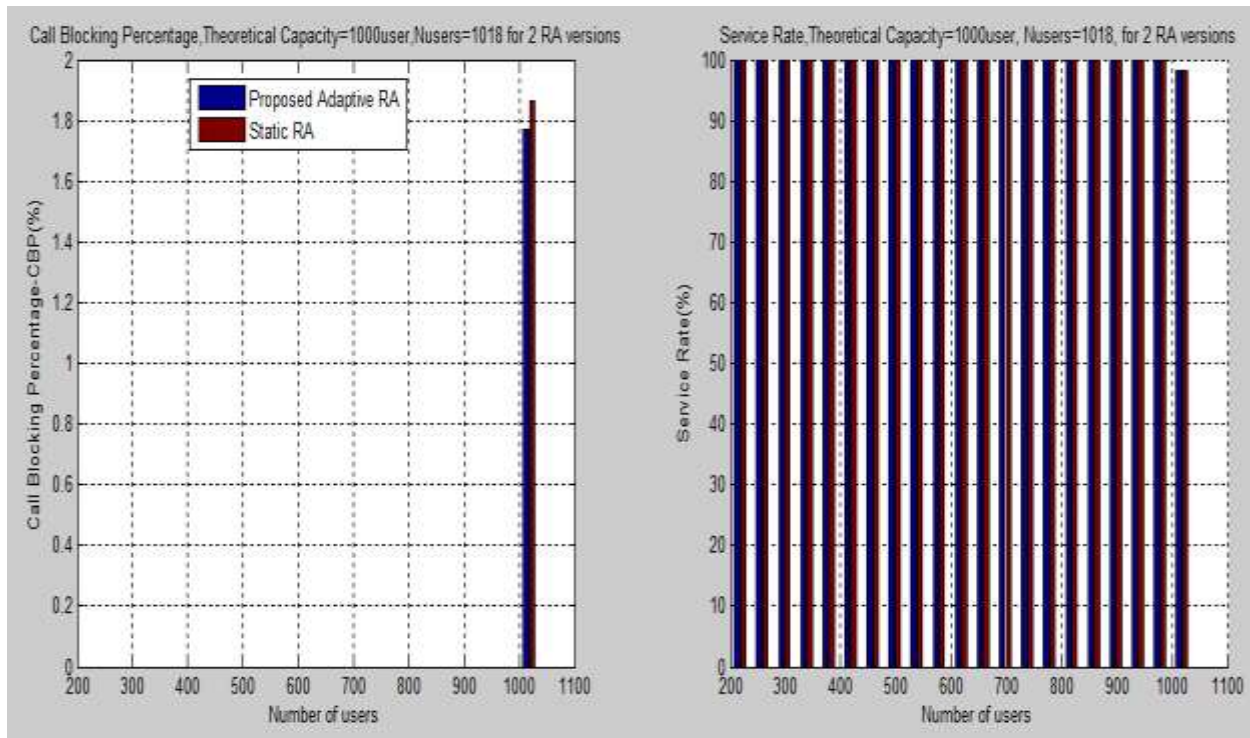
Σχήμα 5.9 Αρχική κατανομή των N πόρων στα M APs για χωρική ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y) = 1000 \cdot y/(x + 1)$

Ακολουθως, προσομοιώνεται η άφιξη των χρηστών στο χώρο S , ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην υποενότητα 5.2 και χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τόσο τη χρονική, για τη προσομοίωση του χρόνου άφιξης, όσο και τη χωρική, για την αντίστοιχη θέση κάθε χρήστη, εκδοχή της διαδικασίας Poisson. Καίτοι το θεωρητικά αναμενόμενο πλήθος χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι 1000 χρήστες, οι τελικά εμφανισθέντες χρήστες υπερβαίνουν το όριο χωρητικότητας θεατών του δικτύου κατά 18 χρήστες, δηλαδή $N_{users} = 1018$. Οι θέσεις αυτών των N_{users} χρηστών απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στο Σχ.5.10, στο οποίο επίσης διακρίνονται τα αντίστοιχα σημεία πρόσβασης με μαύρο χρώμα και το πλήθος πόρων που αρχικά αποδόθηκε σε έναστο εξ αυτών.

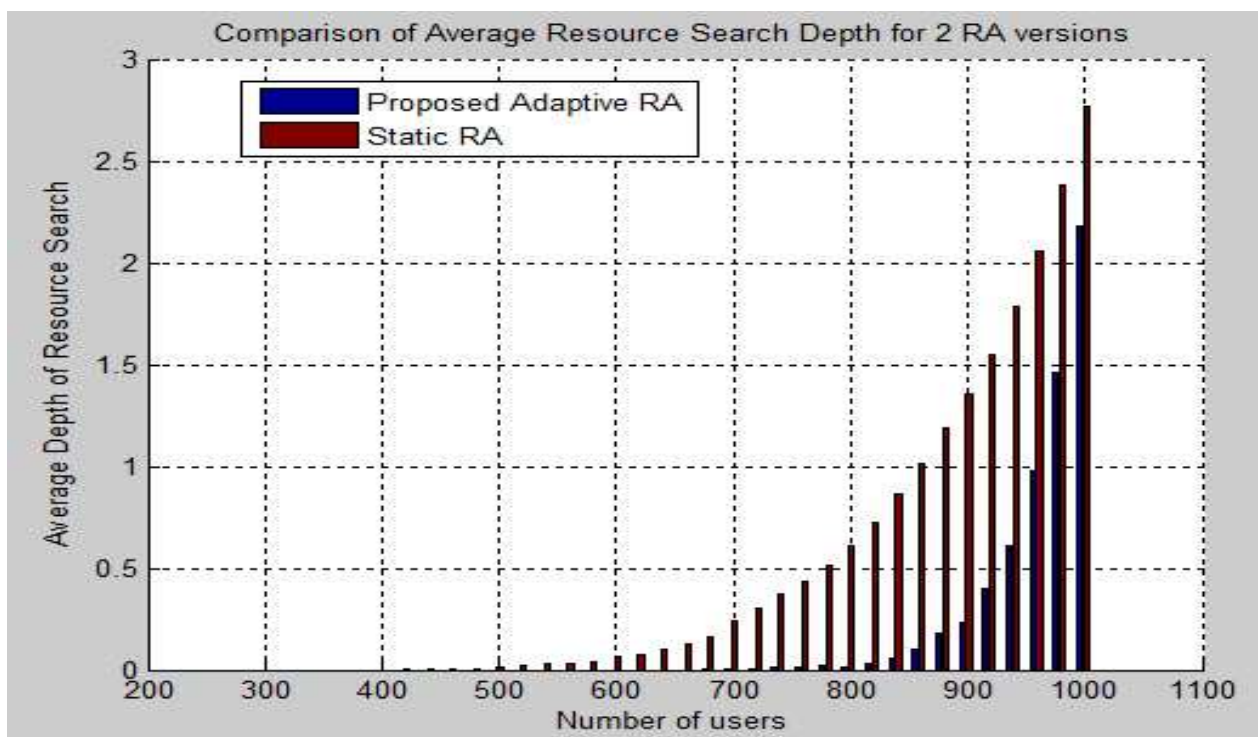


Σχήμα 5.10 Προσομοίωση άφιξης χρηστών στο χώρο S , $\bar{\lambda}^t(x, y) = 1000 \cdot \frac{y}{x+1}$, $T = 10$ χρον. μον., $N_{users} = 1018$ χρήστες

Επιβεβαιώνεται ότι στις περιοχές όπου αναμένονταν περισσότεροι χρήστες - και τελικά εμφανίστηκαν σύμφωνα με προσομοίωση -, δηλαδή στο άνω και αριστερό τμήμα του χώρου S , κατά τη αρχική κατανομή που εκτελεί ο sBS αποδόθηκαν περισσότεροι πόροι στα αντίστοιχα APs . Αυτό αποδεικνύεται ιδιαίτερως επωφελές κατά την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη, μειώνοντας δραστικά το πλήθος των APs που εμπλέκονται στη διαδικασία εξεύρεσης των απαιτούμενων για τη λειτουργία κάθε χρήστη πόρων, το οποίο ισοδυναμεί με μειωμένη καθυστέρηση εξυπηρέτησης. Παράλληλα, όμως, εξαιτίας της εμφάνισης μεγαλύτερου πλήθους χρηστών από το θεωρητικό όριο χωρητικότητας θεατών του δικτύου, παρατηρείται μικρή αύξηση, της τάξης του 1-2%, του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Όλα τα ανωτέρω παρουσιάζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα των κριτηρίων αξιολόγησης του προτεινόμενου αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, στο Σχ.5.11 φαίνεται η διακύμανση του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών και του αντίστοιχου ποσοστού εξυπηρέτησης αυτών για διάφορες τιμές του πλήθους των εμφανισθέντων χρηστών, προσομοιώνοντας έτσι την εξέλιξη της λειτουργίας του δικτύου. Το Σχ.5.12 παρουσιάζει το μέσο βάθος αναζήτησης των απαιτούμενων πόρων για τη λειτουργία κάθε χρήστη, συγκρινόμενο, μάλιστα, με το αντίστοιχο βάθος που απαιτεί η στατική κατανομή των διαθέσιμων πόρων στα M APs . Αναδεικνύεται, επομένως, η χρησιμότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων μέσω της υπεροχής του έναντι της στατικής κατανομής, καθώς επιτυγχάνεται μικρότερο μέσο βάθος αναζήτησης πόρων προς εξυπηρέτηση κάθε χρήστη οδηγώντας έτσι σε μικρότερη καθυστέρηση εξυπηρέτησης.



Σχήμα 5.11 Ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων και αντίστοιχο ποσοστό εξυπηρέτησης των $N_{users} = 1018$ χρηστών



Σχήμα 5.12 Μέσο απαιτούμενο βάθος εξεύρεσης πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών για τις δύο εκδοχές κατανομής πόρων του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης

5.5.2 Προσομοίωση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων σε περίπτωση κάλυψης σταδίου

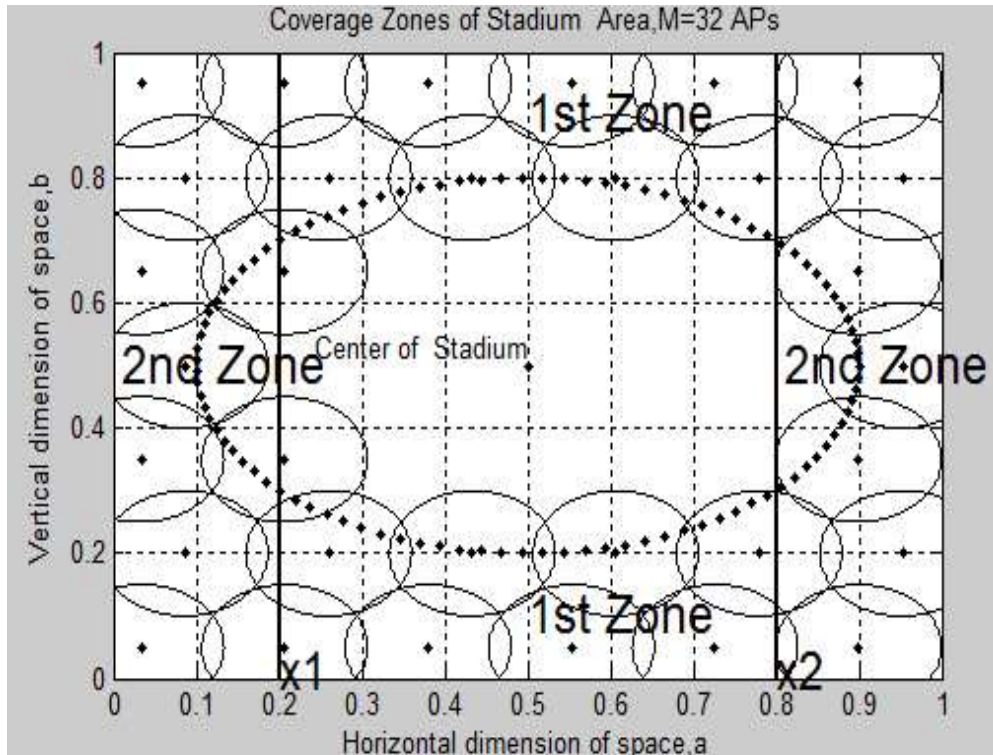
Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό και από την επικεφαλίδα του εδαφίου, η περιοχή ενδιαφέροντος δεν είναι ολόκληρος ο χώρος S , διαστάσεων $a \times b$, αλλά η περιοχή των κερκίδων του σταδίου. Εκεί, άλλωστε, αναμένονται να εμφανιστούν και οι θεατές του αγώνα, συναυλίας ή οποιουδήποτε ad hoc γεγονότος που λαμβάνει χώρα στο συγκεκριμένο χώρο και για το οποίο κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος κατανομής πόρων. Η συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος φαίνεται στο δεξιό διάγραμμα τους Σχ.5.4. Ειδικότερα, η εσωτερική περιοχή του σταδίου, δηλαδή ο στίβος, όπου δεν αναμένεται εμφάνιση χρηστών, προσομοιώθηκε ως έλλειψη περί το γεωμετρικό κέντρο του χώρου S , $X_0 = a/2, Y_0 = b/2$. Επομένως, η περιοχή ενδιαφέροντος στην οποία απαιτείται η εγκατάσταση σημείων πρόσβασης, δηλαδή η οροφή του σκεπάστρου των κερκίδων, προκύπτει αφαιρώντας από τη συνολική επιφάνεια του χώρου S την αντίστοιχη επιφάνεια της έλλειψης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, απαιτούνται $M_{Stadium} = 32 APs$ για την κάλυψη της περιοχής των κερκίδων του σταδίου.

Το πλήθος των ζητούμενων ανά χρήστη πόρων επιλέχθηκε ίσο με $A_{user} = 5 RBs$, όπως ακριβώς επιλέχθηκε και στα προηγούμενα σενάρια. Στη συνέχεια, η διαδικασία που ακολουθείται για τη διαστασιολόγηση του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου στο πλαίσιο του συγκεκριμένου ad hoc γεγονότος είναι πανομοιότυπη με αυτή που διατυπώθηκε στην αρχή του υποεδαφίου 5.5.1. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί συνοπτικά η διαδικασία υπολογισμού του απαιτούμενου πλήθους διαθέσιμων πόρων υπό δεδομένη ένταση της διαδικασίας Poisson, που περιγράφει στατιστικά την αναμενόμενη άφιξη χρηστών στο στάδιο. Ειδικότερα, η ένταση $\lambda(t, x, y)$ κρίθηκε σκόπιμο να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες με διαφορετική τιμή ανάλογα με την περιοχή του σταδίου που περιγράφει στατιστικά έκαστη εξ αυτών, επίσης, να διαθέτει ομογενή χωρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή να μην εξαρτάται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y . Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το ότι, στην περίπτωση του σταδίου, οι θέσεις άφιξης των πιθανών χρηστών είναι προκαθορισμένες από τις θέσεις των κερκίδων του σταδίου με μόνο άγνωστο παράγοντα το τελικό πλήθος των εμφανιζόμενων θεατών. Το συγκεκριμένο πλήθος εύκολα προκύπτει από την ένταση της χρονικής εκδοχής της αρχικής διαδικασίας Poisson, όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Εύλογα, λοιπόν, η περιοχή των κερκίδων του σταδίου μπορεί να χωριστεί σε δύο ζώνες με διαφορετική ένταση $\lambda(t, x, y)$ η καθεμία. Η πρώτη ζώνη ορίζεται για τις περιοχές με $0.2 < x < 0.8$, και περιλαμβάνει τις θέσεις των εισιτηρίων διαρκείας για την περίπτωση ενός αθλητικού αγώνα, όπου είναι λογικό να εμφανιστούν περισσότεροι χρήστες, αφού πρόκειται για ευνοϊκές θέσεις από πλευράς ορατότητας του στίβου. Οι υπόλοιπες περιοχές, που ορίζονται αντίστοιχα για $x < 0.2$ και $x > 0.8$, αποτελούν τη δεύτερη ζώνη, που περιλαμβάνει τις λιγότερο εμπορικές από άποψη ζήτησης θέσεις με αποτέλεσμα εκεί να αναμένεται μικρότερος αριθμός θεατών. Είναι λογικό, λοιπόν, η ένταση της πρώτης περισσότερο δημοφιλούς ζώνης να διαθέτει μεγαλύτερη τιμή συγκριτικά με την αντίστοιχη που περιγράφει τις περιοχές της δεύτερης ζώνης. Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι τα όρια διαχωρισμού των δύο ζωνών του σταδίου μπορούν να γενικευτούν

ώστε να αντανakλούν στα συγκεκριμένα τοπολογικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη σταδίου, καθιστώντας παράλληλα εφικτή τη διαίρεση του σταδίου σε περισσότερες των δύο ζωνών. Στην τρέχουσα περίπτωση

$$x_1 = 0.2, x_2 = 0.8 \quad (5.20)$$

Η προαναφερθείσα διαίρεση της περιοχής των κερκίδων του σταδίου απεικονίζεται στο Σχ.5.13, στο οποίο φαίνονται και τα απαιτούμενα για την κάλυψη του χώρου σημεία πρόσβασης (μαύρες τελείες).



Σχήμα 5.13 Διαίρεση του προς κάλυψη χώρου σε ζώνες αναμενόμενης κίνησης (1^η ζώνη-υψηλή /2^η ζώνη -χαμηλότερη προσέλευση χρηστών)

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο ορισμός των δύο συνιστωσών της έντασης της διαδικασίας Poisson , που περιγράφει την αναμενόμενη άφιξη χρηστών σε κάθε ζώνη χωριστά. Ισχύουν:

$$\lambda(t, x, y) = \begin{cases} \lambda_1(t) \cdot \lambda_{xy}(x, y) = 625 \cdot 1 = 625, & x_1 < x < x_2 & (1\eta \text{ ζώνη}) \\ \lambda_2(t) \cdot \lambda_{xy}(x, y) = 125 \cdot 1 = 125, & x < x_1, x > x_2 & (2\eta \text{ ζώνη}) \end{cases} \quad (5.21)$$

Το χρονικό παράθυρο, κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιείται η προσέλευση των θεατών/χρηστών στο στάδιο στο πλαίσιο του εκάστοτε αγώνα ή συναυλίας, επιλέχθηκε ίσο με $T = 10$ χρονικές μονάδες.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.18) – (2.21) της υποενότητας 2.4 υπολογίζονται οι αντίστοιχες εντάσεις της χρονικής και της χωρικής εκδοχής της ανωτέρω διαδικασίας Poisson, $\bar{\lambda}^{xy}(t)$ και $\bar{\lambda}^t(x, y)$.

Επισημαίνεται ότι η επιλογή $\lambda_{xy}(x, y) = 1$ και για τις δύο ζώνες οφείλεται στα ομογενή χαρακτηριστικά της διαδικασίας Poisson, με αποτέλεσμα οι ποσότητες E_{xy_1}, E_{xy_2} να ισοδυναμούν ουσιαστικά στο εμβαδό εκάστης των αντίστοιχων ζωνών, που μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά. Επομένως, ισχύουν:

$$\bar{\lambda}^{xy}(t) = \begin{cases} \bar{\lambda}^{xy}(t)_1 = \lambda_1(t) \cdot E_{xy_1} = 150 \cdot 2 \cdot (x_2 - x_1) \cdot 0.2 = 150 \text{ χρ./χρον. μον.}, x_1 < x < x_2 \\ \bar{\lambda}^{xy}(t)_2 = \lambda_2(t) \cdot E_{xy_2} = 50 \cdot b \cdot (1 - (x_2 - x_1)) = 50 \text{ χρ./χρον. μον.}, x < x_1, x > x_2 \end{cases} \quad (5.22)$$

$$\bar{\lambda}^t(x, y) = \begin{cases} \bar{\lambda}^t(x, y)_1 = \lambda_{xy}(x, y) \cdot \lambda_1(t) \cdot T = 1 \cdot 625 \cdot 1 = 6250, x_1 < x < x_2 \\ \bar{\lambda}^t(x, y)_2 = \lambda_{xy}(x, y) \cdot \lambda_2(t) \cdot T = 1 \cdot 125 \cdot 1 = 1250, x < x_1, x > x_2 \end{cases} \quad (5.23)$$

Αξιοποιώντας τη σχέση (5.22) σε συνδυασμό με τις (5.7), (5.8) υπολογίζονται οι συνολικά απαιτούμενοι πόροι προς εξυπηρέτηση του μέσου αναμενόμενου πλήθους εμφανιζόμενων χρηστών για κάθε ζώνη του σταδίου ως εξής:

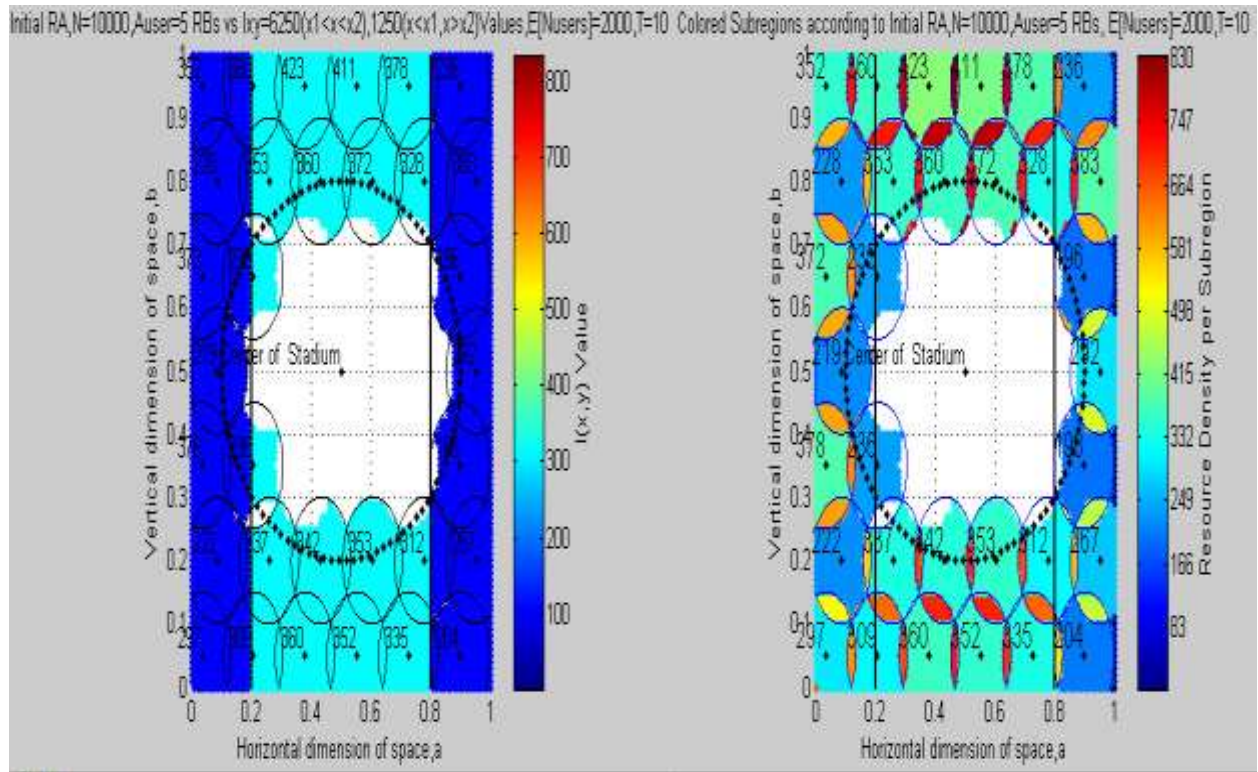
$$E[N_{users}]_1 = \bar{\lambda}^{xy}(t)_1 \cdot T = 150 \text{ χρ./χρον. μον.} \cdot 10 \text{ χρον. μον.} = 1500 \text{ χρήστες} \quad (5.24)$$

$$E[N_{users}]_2 = \bar{\lambda}^{xy}(t)_2 \cdot T = 50 \text{ χρ./χρον. μον.} \cdot 10 \text{ χρον. μον.} = 500 \text{ χρήστες} \quad (5.25)$$

$$E[N_{users}] = E[N_{users}]_1 + E[N_{users}]_2 = 1500 + 500 = 2000 \text{ χρήστες} \quad (5.26)$$

$$N = E[N_{users}] \cdot A_{user} = 2000 \text{ χρήστες} \cdot 5 \text{ RBs/χρήστη} = 10000 \text{ RBs} \quad (5.27)$$

Αυτούς, λοιπόν, τους N διαθέσιμους πόρους καλείται ο sBS να καταναίμει στα M APs σύμφωνα με το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί ως είσοδο την ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson. Η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ αποτελεί τη βάση για τη βελτιστοποίηση που υλοποιεί ο sBS , προκειμένου να καταναίμει τους πόρους σύμφωνα με την κεντρική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου. Ειδικότερα, αναμένεται ότι στην πρώτη ζώνη, δηλαδή στις κεντρικές θέσεις των κερκίδων όπου η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)_1$ λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή, να αποδοθούν περισσότεροι πόροι συγκριτικά με τις περιοχές της δεύτερης ζώνης, όπου η τιμή της αντίστοιχης έντασης $\bar{\lambda}^t(x, y)_2$ είναι μικρότερη. Πράγματι, η αρχική κατανομή πόρων ακολουθεί τις τιμές της έντασης, όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχ.5.14, στο οποίο έχει εφαρμοστεί η ίδια μεθοδολογία χρωματισμού των περιοχών ανάλογα με το πλήθος πόρων που έχει αποδοθεί αρχικά σε έκαστο των M σημείων πρόσβασης.

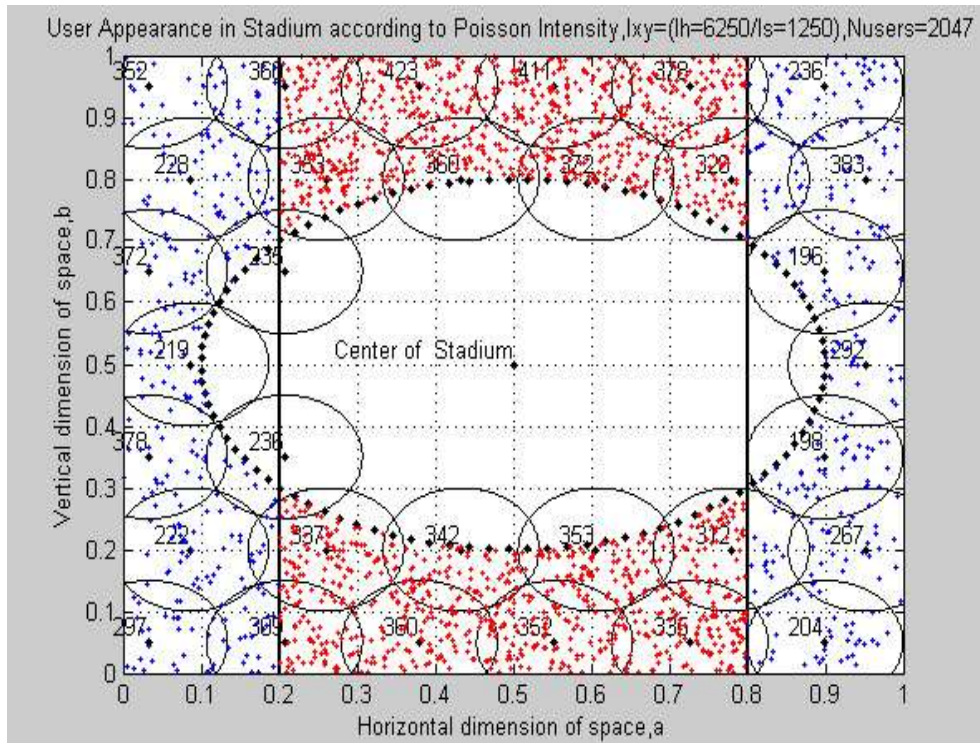


Σχήμα 5.14 Αρχική κατανομή των N πόρων στα $M_{Stadium}$ APs

Ακολουθως, προσομοιώνεται η άφιξη των χρηστών στις κερκίδες του σταδίου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε εκτενώς στην υποενότητα 5.2, και χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη ένταση της χρονικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson για κάθε ζώνη του χώρου των κερκίδων χωριστά. Καίτοι το στατιστικά αναμενόμενο πλήθος χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι 2000 χρήστες, οι τελικά εμφανισθέντες θεατές/χρήστες υπερέβησαν το όριο χωρητικότητας του δικτύου κατά σαράντα επτά χρήστες. Δηλαδή,

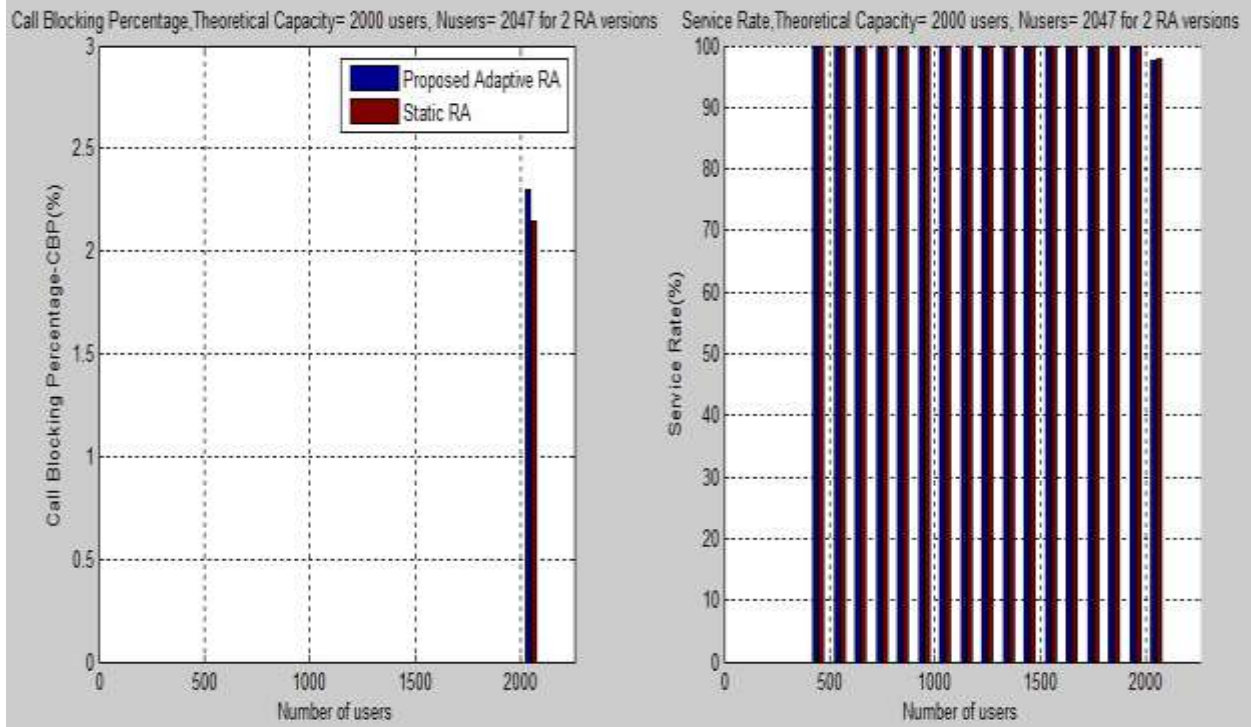
$$N_{users} = N_{users_1}(\overline{\lambda^{xy}}(t)_1) + N_{users_2}(\overline{\lambda^{xy}}(t)_2) = 1521 + 526 = 2047 \text{ χρήστες} \quad (5.28)$$

Οι θέσεις των N_{users} εμφανισθέντων χρηστών απεικονίζονται στο Σχ.5.15 με διαφορετικό χρώμα για κάθε ζώνη, προκειμένου να γίνει φανερό η διαφορά στην αντίστοιχη τιμή της έντασης $\overline{\lambda^{xy}}(t)$ για κάθε ζώνη. Έτσι, οι θεατές της 1^{ης} ζώνης, που χρωματίζονται με κόκκινο χρώμα, είναι σχεδόν τριπλάσιοι σε πλήθος συγκριτικά με τους θεατές της 2^{ης} ζώνης, που χρωματίζονται με μπλε χρώμα. Η ποσοτική αυτή διαφορά ανάμεσα στους εμφανισθέντες χρήστες κάθε ζώνης επαληθεύεται από την αναλογία μεταξύ των εντάσεων $\overline{\lambda^{xy}}(t)_1, \overline{\lambda^{xy}}(t)_2$, καθώς η τιμή της πρώτης είναι τριπλάσια της δεύτερης. Στο συγκεκριμένο σχήμα διακρίνονται, επίσης, με μαύρο χρώμα τα αντίστοιχα APs και το πλήθος πόρων που αρχικά αποδόθηκε σε έκαστο εξ αυτών.

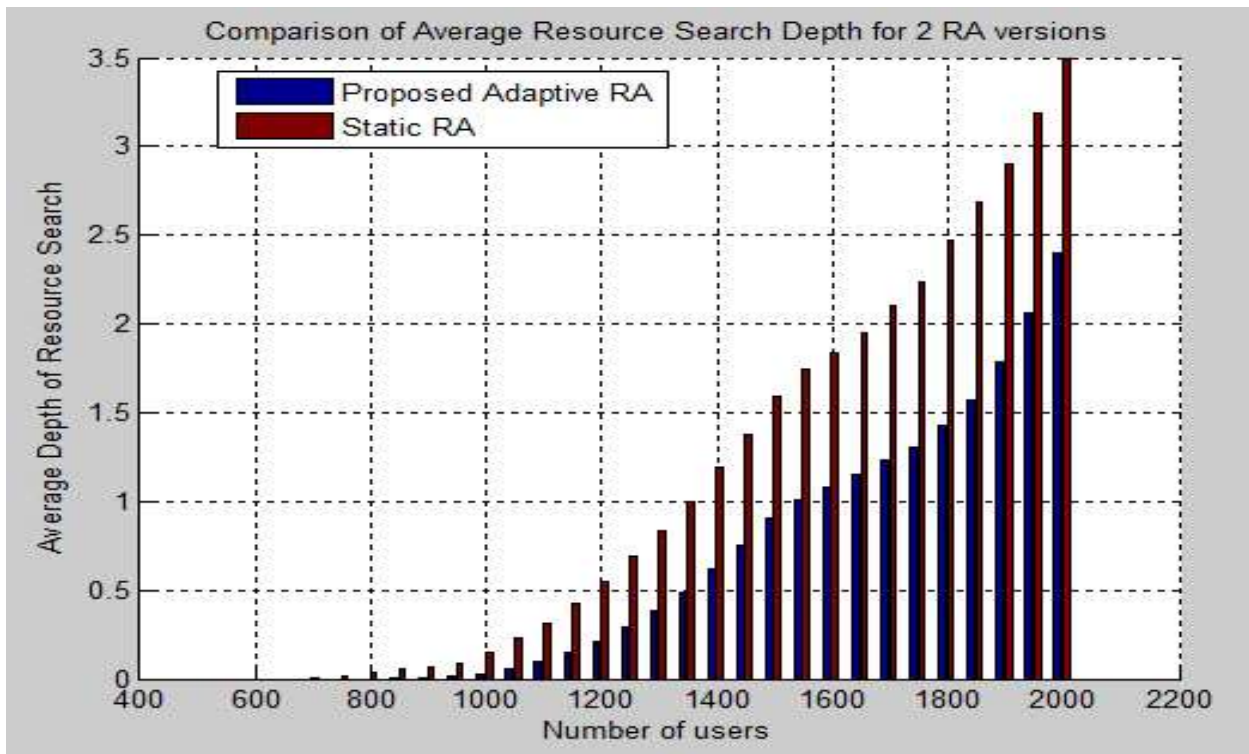


Σχήμα 5.15 Προσομοίωση άφιξης χρηστών στο στάδιο σύμφωνα με τις αντίστοιχες εντάσεις κάθε ζώνης $(\lambda^{xy}(t))_1$ κόκκινο χρώμα/ $(\lambda^{xy}(t))_2$ μπλε χρώμα)

Επαληθεύεται εκ νέου ότι στις περιοχές όπου αναμένονταν περισσότεροι χρήστες - και τελικά εμφανίστηκαν σύμφωνα με προσομοίωση -, δηλαδή στην πρώτη ζώνη του χώρου των κερκίδων του σταδίου, κατά τη αρχική κατανομή που εκτελεί ο *sBS* αποδόθηκαν περισσότεροι πόροι στα αντίστοιχα *APs*. Αυτό αποδεικνύεται ιδιαίτερα επωφελές κατά την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη, μειώνοντας δραστικά το πλήθος των *APs* που εμπλέκονται στη διαδικασία εξεύρεσης των απαιτούμενων για τη λειτουργία κάθε χρήστη πόρων, χαρακτηριστικό το οποίο ισοδυναμεί με μειωμένη καθυστέρηση εξυπηρέτησης. Παράλληλα, όμως, εξαιτίας της εμφάνισης μεγαλύτερου πλήθους χρηστών από το θεωρητικό όριο χωρητικότητας θεατών του δικτύου, παρατηρείται μικρή αύξηση, της τάξης του 1-2%, του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Όλα τα ανωτέρω παρουσιάζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα των κριτηρίων αξιολόγησης του προτεινόμενου αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, στο Σχ.5.16 φαίνεται η διακύμανση του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών και του αντίστοιχου ποσοστού εξυπηρέτησης αυτών για διάφορες τιμές του πλήθους των εμφανισθέντων χρηστών, προσομοιώνοντας έτσι την εξέλιξη της λειτουργίας του δικτύου. Το Σχ.5.17 παρουσιάζει το μέσο βάθος αναζήτησης των απαιτούμενων πόρων για τη λειτουργία κάθε χρήστη, συγκρινόμενο, μάλιστα, με το αντίστοιχο βάθος που απαιτεί η στατική κατανομή των διαθέσιμων πόρων στα *M APs*. Αναδεικνύεται, επομένως, η χρησιμότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων μέσω της υπεροχής του έναντι της στατικής κατανομής, καθώς επιτυγχάνει μικρότερο μέσο βάθος αναζήτησης πόρων προς εξυπηρέτηση κάθε χρήστη οδηγώντας έτσι σε μικρότερη καθυστέρηση εξυπηρέτησης.



Σχήμα 5.16 Ποσοστό αποκλεισμού κλήσεων και αντίστοιχο ποσοστό εξυπηρέτησης των $N_{users} = 2047$ εμφανισθέντων χρηστών στο στάδιο



Σχήμα 5.17 Μέσο απαιτούμενο βάθος εξεύρεσης πόρων για την εξυπηρέτηση των εμφανισθέντων στο στάδιο χρηστών για τις δύο εκδοχές κατανομής πόρων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

Μέσω των διαγραμμάτων της προσομοίωσης των ενδεικτικών σεναρίων, που παρουσιάστηκαν στο Κεφ.5, γίνεται αντιληπτή η χρησιμότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων. Ειδικότερα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιοποιεί τη χωροχρονική διαδικασία Poisson με ένταση $\lambda(t, x, y)$ ως μέτρο πρόβλεψης της αναμενόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στην περιοχή ενδιαφέροντος η οποία είναι ο τόπος διεξαγωγής του προς κάλυψη ad hoc γεγονότος, μια συναυλίας, ενός αθλητικού γεγονότος ή συνεδρίου, στο πλαίσιο του οποίου αναμένεται αθρόα προσέλευση χρηστών στο προς σχεδίαση δίκτυο. Με βάση αυτήν την πληροφορία, λοιπόν, ο αλγόριθμος επιτυγχάνει να κατανέμει τους συνολικά διαθέσιμους πόρους του δικτύου όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου πρόκειται να ζητηθούν από τους τελικά εμφανιζόμενους χρήστες στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, η ικανοποίηση της προαναφερθείσας κεντρικής ιδέας του προτεινόμενου αλγορίθμου αναδεικνύεται μέσα από τη σύγκριση της επίδοσής του μέσω επιλεγμένων κριτηρίων αξιολόγησης, συγκεκριμένα της πιθανότητας αποκλεισμού χρηστών και της καθυστέρησης εξυπηρέτησης κάθε νεοεμφανιζόμενου χρήστη με τη στατική εκδοχή της κατανομής των διαθέσιμων πόρων για την κάλυψη του χώρου. Εύκολα διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη δυναμική κατανομή πόρων οδηγεί σε μειωμένη καθυστέρηση εξυπηρέτησης των χρηστών ή ισοδύναμα μικρότερο μέσο βάθος αναζήτησης πόρων κατά την εξυπηρέτηση εκάστου εκ των εμφανιζόμενων χρηστών. Αντίθετα, κατά την στατική εκδοχή η αρχική κατανομή των πόρων στο δίκτυο αγνοεί την εκτίμηση της θέσης και της χρονικής αλληλουχίας εμφάνισης χρηστών, η οποία στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφεται μέσω της έντασης της χωρικής εκδοχής της διαδικασίας Poisson. Άμεσα, λοιπόν, επακόλουθο αποτελεί η αναζήτηση του συνόλου ή μέρους των απαιτούμενων για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη πόρων μακριά από την περιοχή εμφάνισής του, εισάγοντας αναπόφευκτα πλεονασμό στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια του χωροχρονικού μοντέλου περιγραφής της άφιξης νέων χρηστών στο δίκτυο. Ειδικότερα, η ένταση $\bar{\lambda}^t(x, y)$ της χωρικής εκδοχής της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson συνιστά ένα εργαλείο πρόβλεψης της αναμενόμενης θέσης κάθε χρήστη στο δίκτυο, βάσει του οποίου πραγματοποιείται η αρχική κατανομή των διαθέσιμων πόρων του δικτύου στα σημεία πρόσβασης του προς κάλυψη χώρου. Επομένως, όσο ακριβέστερο είναι το μοντέλο πρόβλεψης της αναμενόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης τόσο καλύτερα θα ικανοποιείται και η κεντρική ιδέα του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων, δηλαδή οι πόροι να κατανέμονται όσο το δυνατό εγγύτερα στις περιοχές όπου αναμένεται να ζητηθούν.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, καταδεικνύεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής πόρων αποτελεί ιδανική επιλογή σε περιπτώσεις ad hoc δικτύων προσανατολισμένων για την κάλυψη γεγονότων όπου αναμένεται μαζική προσέλευση χρηστών. Η εφαρμογή του προτεινόμενου

αλγορίθμου, μάλιστα, σε συνδυασμό με καινοτόμα συστήματα ραδιοκάλυψης, όπως το σύστημα *RDS* και η αρχιτεκτονική C-RAN που παρουσιάστηκαν στο Κεφ.4, οδηγεί σε αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου με πολλαπλά οφέλη.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν ορισμένες επεκτάσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου. Αρχικά, προτείνεται η αντιστοίχιση του πλήθους των N συνολικά διαθέσιμων πόρων (*RBs*) του δικτύου με το εύρος ζώνης (*BW*), τη χρήση του οποίου ο εκάστοτε λειτουργός του δικτύου οφείλει να έχει εξασφαλίσει στο πλαίσιο του *ad hoc* γεγονότος. Στην περίπτωση του LTE ως χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης, η προαναφερθείσα αντιστοίχιση καθίσταται δυνατή μέσω του Πιν.4.1 του Κεφ.4, όπου απεικονίζονται η επιτρεπτοί συνδυασμοί πλήθους *RBs* και εύρους ζώνης. Στη συνέχεια, το πλήθος A_{user} των απαιτούμενων για τη λειτουργία κάθε χρήστη πόρων προτείνεται να συνδεθεί με τον αντίστοιχο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτεί η εκάστοτε παρεχόμενη στο χρήστη υπηρεσία, έστω R_{user} , υπό δεδομένο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (*MOD/FEC Scheme*) κάθε φορά. Ο αναπόφευκτα εισαγόμενος πλεονασμός, μάλιστα, μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ως το 25% του συνολικά διαθέσιμων πόρων αποσκοπώντας στον όσο το δυνατό ακριβέστερο προσδιορισμό του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, τον οποίο και αντιλαμβάνεται ο χρήστης μέσω διαδραστικών υπηρεσιών όπως η θέαση βίντεο. Επίσης, προτείνεται η επέκταση του προτεινόμενου αλγορίθμου για περιπτώσεις μεταβλητού πλήθους ζητούμενων ανά χρήστη πόρων, ή ισοδύναμα ρυθμού μετάδοσης. Αυτό μεταφράζεται σε πολλαπλές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας (*Multi - QoS*) στο προς μελέτη δίκτυο. Προς αυτή την κατεύθυνση, λοιπόν, κρίνεται εύλογο να υιοθετηθεί κάποιο στατιστικό μοντέλο περιγραφής του πλήθους των απαιτούμενων για τη λειτουργία κάθε χρήστη πόρων. Ενδεικτικά, αναφέρεται η ομοιόμορφη κατανομή, η οποία καθιστά δυνατή την περιγραφή των διαφορετικών απαιτήσεων κάθε χρήστη ανάλογα με την υπηρεσία στην οποία κάθε χρήστης ζητεί πρόσβαση μέσω του δικτύου.

Βιβλιογραφία

1. Διπλωματική Εργασία, Μιχαήλ Μυλωνάκη, «Κατανομή Πόρων σε Ad-Hoc Ασύρματα Δίκτυα, Απρίλιος 2014
2. Node Placement for Connected Coverage in Sensor Networks, Koushik Kar, Suman Banerjee
3. Mohamed Younis, Kemal Akkaya, Mohamed Younis, Kemal Akkaya, Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey, Ad Hoc Networks (2008)
4. Radha Krishna Ganti, Stochastic Geometry and Wireless Networks, SPCOM 2012
5. Random Point Processes, Donald L. Snyder, Wiley, 1975
6. Multivariate Nonhomogeneous Poisson Processes, Evan Saltzman
7. Convex Optimization, Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe, Cambridge University Press, 2004
8. Saltzman, E. A., Drew, J. H., Leemis, L. M., and Henderson, S. G. 2012. Simulating multivariate nonhomogeneous Poisson processes using projections. ACM Trans. Model. Comput. Simul. 22, 3, Article 15 (August 2012)
9. POISSON PROCESS GENERATION
10. Dirk P. Kroese, Zdravko I. Botev, Spatial Process Generation, 2 August 2013
11. Evan Saltzman, Multivariate Nonhomogeneous Poisson Processes, 29 April 2008
12. Raghu Pasupathy, Generating Nonhomogeneous Poisson Processes
13. CVX Research, Inc. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0. <http://cvxr.com/cvx>, April 2011
14. M. Grant and S. Boyd. Graph implementations for nonsmooth convex programs, Recent Advances in Learning and Control (a tribute to M. Vidyasagar), V. Blondel, S. Boyd, and H. Kimura, editors, pages 95-110, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, 2008. http://stanford.edu/~boyd/graph_dcp.html.
15. Aleksandra Checko, Henrik L. Christiansen, Ying Yan, Lara Scolari, Georgios Kardaras, Michael S. Berger, Lars Dittmann, Cloud RAN for Mobile Networks - a Technology Overview, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, 2013
16. Checko, A., Berger, M. S., Kardaras, G., Dittmann, L., & Christiansen, H. L. (2016). Cloud Radio Access Network architecture. Towards 5G mobile networks. Technical University of Denmark.
17. Matthew C. Valenti, Joint work with Peter Rost, Nokia Networks, Aleksandra Checko, MTI Radiocomp C-RAN *Moving Baseband To the Cloud* C-RAN The Road Towards Green RAN, White Paper Version 3.0 (Dec, 2013)
18. Connecting the dots: small cells shape up for high-performance indoor radio, Ericsson, White Paper, December 19, 2014
19. Enabling LTE for Control System Applications in a Smart Grid Context Kalalas, Charalampos KTH, School of Electrical Engineering (EES), Automatic Control, 2014