



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αποτίμηση της απόδοσης τηλεπικοινωνιακού συστήματος 6ης γενιάς με
τη χρήση μεθόδων τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΡΙΣΣΗ ΔΗΜΗΤΡΗ

ΑΕΜ : 4300

Επιβλέπων Καθηγητής: Βαρδάκας Ιωάννης

Καστοριά Ιούλιος – 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αποτίμηση της απόδοσης τηλεπικοινωνιακού συστήματος 6ης γενιάς με
τη χρήση μεθόδων τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΡΙΣΣΗ ΔΗΜΗΤΡΗ

ΑΕΜ : 4300

Επιβλέπων : Βαρδάκας Ιωάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 01/07/2024

κ. Βαρδάκας Ιωάννης Αναπληρωτής Καθηγητής	κ. Βέργαδος Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πρόεδρος του Τμήματος	κ. Δημόκας Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής
---	--	---

Καστοριά Ιούλιος - 2024

Copyright © 2024 – ΠΑΡΙΣΣΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

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.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ως συγγραφέας της παρούσας εργασίας δηλώνω πως η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και δεν περιέχει υλικό από μη αναφερόμενες πηγές.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας πτυχιακής εργασίας, κύριο Βαρδάκα Ιωάννη, για την συνεργασία, την κατανόηση καθώς και την πολύτιμη βοήθειά του για την ολοκλήρωσή της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την αμέριστη κατανόηση και ηθική τους στήριξη.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση της επίδρασης του θορύβου σε ένα συγκλίνον οπτικό-ασύρματο δίκτυο 6^{ης} Γενιάς που βασίζεται στην ενσωμάτωση της Cell-Free έννοιας. Αν και η εγκατάσταση των δικτύων 5^{ης} Γενιάς είναι, σχετικά, πρόσφατη, από πολύ νωρίς έγινε εμφανές ότι δεν θα είναι αρκετή για να στηρίξει, όχι μόνο τις ανάγκες των χρηστών, αλλά και τα οράματα για νέες τεχνολογίες και λειτουργίες των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Με στόχο μας, την ανταπόκριση τόσο στις απαιτήσεις όσο και στις νέες τεχνολογίες, έγινε η επιλογή της Cell-Free αρχιτεκτονικής. Η αρχιτεκτονική, αυτή, μας παρέχει μία ευέλικτη λύση, όπως επίσης, αποτελεσματική κάλυψη και απόδοση, λόγω της επέκτασης της τεχνολογίας MIMO και της χρήσης των κεραιών MIMO από τα User Equipments (UEs). Επιπλέον, η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει δίκτυα μεταφοράς SDN για τον έλεγχο της κυκλοφορίας, ενισχύοντας την ευελιξία και την απόδοση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η εν λόγω αρχιτεκτονική ανταποκρίνεται στις σύγχρονες απαιτήσεις των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης και την εξασφάλιση υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, προσφέροντας έξυπνες και προσαρμοστικές υπηρεσίες.

Στην παρούσα έρευνα, για την αξιολόγηση της απόδοσης του προαναφερθέντος δικτύου καθώς και των επιπτώσεων του θορύβου, χρησιμοποιείται η μέθοδος RLA. Η επιλογή της έγινε με βάση την ικανότητά της να προσφέρει ακριβή υπολογισμό των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων και της απόδοσης σε διάφορα σενάρια φόρτου και θορύβου. Έτσι μέσω αυτής, αναλύονται οι επιπτώσεις του θερμικού θορύβου και του θορύβου παρεμβολής, και εξετάζεται η απόδοση του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Έτσι, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεις σε κάθε περίπτωση, μας οδηγεί στην αποτελεσματικότητα του τηλεπικοινωνιακού μοντέλου RLA σε συγκλίνον οπτικό-ασύρματο δίκτυο 6^{ης} Γενιάς που ενσωματώνει την Cell-Free έννοια και κατεπέκταση στην αποτίμηση της απόδοσης του δικτύου.

Λέξεις Κλειδιά: οπτικό-ασύρματο δίκτυο, 6G, Cell-Free, MIMO τεχνολογία, User Equipments, δίκτυα μεταφοράς SDN, μέθοδος RLA, θερμικός θόρυβος, θόρυβος παρεμβολής, αξιολόγηση απόδοσης, τηλεπικοινωνιακό μοντέλο.

Abstract

The purpose of this thesis is to analyze the effect of noise in a converged 6th Generation optical-wireless network based on the integration of the Cell-Free concept. Although the deployment of 5th Generation networks is, relatively, recent, it became evident very early on that it will not be sufficient to support not only the needs of users, but also the visions for new technologies and functions of telecommunication networks. With our goal of responding to both the requirements and new technologies, the Cell-Free architecture was chosen. This architecture, this architecture, provides us with a flexible solution ,as well as efficient coverage and performance, due to the extension of MIMO technology and the use of MIMO antennas by User Equipments (UEs). In addition, the architecture includes SDN transport networks for traffic control, enhancing the flexibility and real-time network performance. This architecture meets the modern requirements of telecommunication networks and helps to improve performance and ensure higher data rates, offering intelligent and adaptive services.

In this research, the RLA method is used to evaluate the performance of the aforementioned network as well as the noise impact. It was chosen based on its ability to provide accurate calculation of call loss probabilities and performance under various load and noise scenarios. Thus, through it, the effects of thermal noise and interference noise are analysed, and the performance of the system under different operating conditions is examined. Thus, the comparison of the results of call loss probabilities in each case leads us to the effectiveness of the RLA telecommunication model in a converged 6th Generation optical-wireless network that incorporates the Cell-Free concept and downlink in evaluating the network performance.

Key Words: optical-wireless network, 6G, Cell-Free, MIMO technology, User Equipments, SDN transport networks, RLA method, thermal noise, interference noise, performance evaluation, telecommunication model.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	.....	III
ABSTRACT	.....	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	.....	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	.....	XIII
ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	.....	XV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 6^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ	.....	1
1.1 Η Εξέλιξη Των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων	.....	1
1.2 Εισαγωγή στην 6^η Γενιά Δικτύων	.....	2
1.3 Αρχιτεκτονική Μη Κυψελωτών Δικτύων 6^{ης} Γενιάς (Cell Free)	.....	5
1.3.1 Νέες Τεχνολογίες	.....	6
1.3.2 Υψηλότερες Συχνότητες	.....	6
1.3.3 Κατανεμημένο Συνεκτικό Massive MIMO	.....	7
1.3.4 Ενσωματωμένη Συνδεσιμότητα Και Αίσθηση	.....	7
1.3.5 Ενσωματωμένο AI Για Αυτοματισμό	.....	8
1.3.6 Δίκτυα Που Βασίζονται Σε Υπηρεσίες	.....	9
1.3.7 Ευέλικτες Τοπολογίες Και Αναπτύξεις	.....	9
1.3.8 Συσκευές Μηδενικής Ενέργειας	.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΕΣ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ REDUCED LOAD APPROXIMATION: ΜΙΑ ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	.....	13
2.1 Τηλεπικοινωνιακή Θεωρία Κίνησης	.....	13
2.1.1 Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης	.....	13
2.1.2 Συμφόρηση Κυκλοφορίας & GoS/QoS	.....	14
2.1.3 Χωρητικότητα Συστήματος	.....	15
2.2 Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης	.....	15

2.2.1	Κατανομή Poisson	15
2.2.2	Υπολογισμός Πιθανότητας Απώλειας Κλήσης	16
2.2.3	Πιθανότητα Μόνιμης Κατάστασης	17
2.2.4	Υπολογισμός Πιθανότητας Απώλειας Κλήσης Μέσω Αναδρομικού Τύπου: Kaufman & Roberts	17
2.3	Δίκτυα Απωλειών Τύπου Γινομένου	20
2.3.1	Πιθανότητες Απώλειας Κλήσης & Σταθερής Κατάστασης	21
2.3.2	Σταθερό Δίκτυο Δρομολόγησης Που Υποστηρίζει Μία Μόνο Κατηγορία Υπηρεσιών	21
2.3.3	Η Μέθοδος Μειωμένου Φορτίου Για Δίκτυα Πολλαπλών Υπηρεσιών	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ RLA ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 6^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CELL-FREE		30
3.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος	30
3.2	Περιγραφή Μοντέλου	31
3.3	Μέθοδος Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου	32
3.4	Επίδραση Θορύβου Στην Απόδοση Των Κεραιών	33
3.4.1	Εισαγωγή	34
3.4.2	Θερμικός Θόρυβος	34
3.4.3	Θόρυβος Παρεμβολής	36
3.5	Μέθοδος Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου Συναρτήσει Της Ύπαρξης Θορύβου	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ		38
4.1	Περιγραφή Δικτύου	38
4.2	Ανάλυση Του Μοντέλου RLA Χωρίς Την Επίδραση Θορύβου	38
4.2.1	Αυξανόμενο Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης	39
4.2.2	Αυξανόμενη Χωρητικότητα Κεραιών	40
4.2.3	Αυξανόμενη Χωρητικότητα Fronthaul	41
4.2.4	Αυξανόμενη Χωρητικότητα Ελεγκτή SDN	42
4.3	Ανάλυση Του Μοντέλου RLA Με Την Επίδραση Θορύβου	44
4.3.1	Αυξανόμενο Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης	45
4.3.2	Αυξανόμενη Χωρητικότητα Κεραιών	45
4.3.3	Αυξανόμενη Χωρητικότητα Fronthaul	46
4.3.4	Αυξανόμενη Χωρητικότητα Ελεγκτή SDN	47
4.3.5	Αυξανόμενη Ισχύς Ανά Πηγή Παρεμβολής (P_{int})	47

4.4	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	49
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ.....	55
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	59

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1:1: ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΕΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΣΥΝΔΡΟΜΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ 2020 ΕΩΣ ΤΟ 2030. [3]	3
ΣΧΗΜΑ 1:2: ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ 6G ΜΕ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ (IN-BULIT WIRELESS – IBW). [9]	7
ΣΧΗΜΑ 2:1: ΔΙΚΤΥΟ ΕΞΙ ΖΕΥΞΕΩΝ.	20
ΣΧΗΜΑ 2:2: ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ RLA ΣΕ ΤΗΛΕΦΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΡΙΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ. ..	23
ΣΧΗΜΑ 2:3: ΔΥΟ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΠΟΥ ΦΙΛΟΞΕΝΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΥΟ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ	26
ΣΧΗΜΑ 3:1: ΈΝΑ ΔΙΚΤΥΟ 6G ΧΩΡΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ-ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.	31
ΣΧΗΜΑ 4:1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ Α.....	39
ΣΧΗΜΑ 4:2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ RUS.	41
ΣΧΗΜΑ 4:3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ DU.	42
ΣΧΗΜΑ 4:4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ SDN.	44
ΣΧΗΜΑ 4:5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ Α ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ.	45
ΣΧΗΜΑ 4:6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ RU ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ.....	46
ΣΧΗΜΑ 4:7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ DU ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ.	46
ΣΧΗΜΑ 4:8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ SDN ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ.	47

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1:1: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ 5G & 6G.	4
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:1: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ Α.....	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:2: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ RUS.	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:3: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ DU.	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:4: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ SDN.	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:5 I): ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ P_{INT}	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:6 II): ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ P_{INT}	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:7 III): ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΔΥΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ P_{INT}	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:10: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ FRONTHAUL.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:11: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ CONTROL CENTER.....	52

Σκοπός Της Παρούσας Πτυχιακής Εργασίας

Η ανάγκη για τη μεταφορά πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις σε όσο το δυνατόν συντομότερο χρονικό διάστημα ήταν πάντα ένα κεντρικό ζήτημα για την ανθρωπότητα. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, ο κόσμος συρρικνώθηκε και η επικοινωνία με άτομα που βρίσκονται σε απόσταση από τον εαυτό μας έγινε δυνατή σε απίστευτα σύντομο χρονικό διάστημα. Σήμερα, μπορούμε όχι μόνο να μεταφέρουμε πληροφορίες και μηνύματα, αλλά και να μοιραζόμαστε τη φωνή μας, εικόνες και βίντεο με άλλους σε πραγματικό χρόνο. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών αντανακλά την συνεχή προσπάθεια να ανταποκριθεί σε αυτήν την ανάγκη.

Ως αποτέλεσμα της ανάγκης μας για τη γρήγορη μεταφορά πληροφοριών, τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα διανύουν μια συνεχή εξέλιξη καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας τους. Κάθε νέα γενιά δικτύων φέρνει μεγαλύτερες ταχύτητες και καλύτερη Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS), ενώ παράλληλα εισάγονται καινούργιες υπηρεσίες και δυνατότητες. Αρχικά, οι πρώτες γενιές δικτύων δημιουργήθηκαν με σκοπό τη γρήγορη μεταφορά πληροφοριών. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, έχουν μεταμορφωθεί σε πολυδιάστατα οικοσυστήματα ψηφιακών υπηρεσιών και δυνατοτήτων. Σήμερα, αποτελούν το θεμέλιο για την ανάπτυξη και ενίσχυση της επικοινωνίας, της εργασίας, της ψυχαγωγίας, της εκπαίδευσης, καθώς και της καινοτομίας σε πολλούς τομείς της κοινωνίας μας. Ως αποτέλεσμα κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω εξέλιξη των δικτύων, έχοντας ως στόχο την ανάπτυξη της 6ης γενιάς δικτύων, δηλαδή το 6G. Η έλευση της 6ης γενιάς δικτύων (6G), εκτιμάται ότι θα πραγματοποιηθεί περίπου το 2030, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην επικοινωνία και την τεχνολογία.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, ερευνούμε την απόδοση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος 6ης γενιάς μέσω της μεθόδου Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου (RLA), καθώς και την εκτίμηση της επίδρασης ύπαρξης θορύβου στο σύστημα. Με αντικείμενο την αποτίμηση αυτή, στοχεύουμε στην κατανόηση της απόδοσης και των χαρακτηριστικών λειτουργίας του συστήματος, καθώς και στην ανάδειξη πιθανών βελτιώσεων ή βελτιστοποιήσεων. Με την προσέγγισή μας, επιδιώκουμε να συμβάλουμε στη βελτίωση της επίδοσης και της αποδοτικότητας του συστήματος, προσφέροντας παράλληλα νέες ερευνητικές προοπτικές στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι οργανωμένη ως εξής: Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται η εξέλιξη των δικτύων. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται διάφορες τηλεπικοινωνιακές εννοιολογίες καθώς και η μέθοδος RLA. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται ανάλυση της αρχιτεκτονικής του συστήματός που θεωρήσαμε. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων που πήραμε. Τέλος, η πτυχιακή ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή Στα Δίκτυα 6^{ης} Γενιάς

1.1 Η Εξέλιξη Των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων

Η ανάγκη για την ανταλλαγή έγκυρων πληροφοριών ήταν αυτή που ώθησε την δημιουργία ενός Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος, το οποίο εξελίχθηκε χάρις στην εξέλιξη της τεχνολογίας και λόγω των ολοένα αυξανόμενων χρηστών και της ακόρεστης ανάγκης για μεγαλύτερες ταχύτητες. Ας δούμε πρώτα, όμως, πως τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα εξελίχθηκαν σε αυτό που είναι σήμερα και γιατί υπάρχει η ανάγκη για την περαιτέρω εξέλιξή τους.

Η 1^η τηλεπικοινωνιακών δικτύων, αναφέρεται ως 1G και ήρθε στις ζωές μας την δεκαετία του 1980 με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 2,4kbps. Ωστόσο η πληθώρα μειονεκτημάτων που διέθετε καθώς και το γεγονός ότι υποστήριζε μόνο την μεταφορά φωνής, έφεραν στο τέλος της δεκαετίας του 1990 την 2^η, 2G. Βασιζόμενο, πλέον, στη ψηφιακή τεχνολογία, το πρώτο σύστημα 2G είχε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 64kbps και παρείχε δύο νέες υπηρεσίες, την υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων (SMS) και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Μέσα στην ίδια δεκαετία το 2G αναβαθμίστηκε, γίνοντας γνωστό με το όνομα 2.5G. Ένα σύστημα 2.5G χρησιμοποιεί γενικά πλαίσια συστήματος 2G, αλλά εφαρμόζει μεταγωγή πακέτων μαζί με μεταγωγή κυκλώματος και μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων έως 144kbps.

Η 3^η γενιά, 3G, έκανε την εμφάνισή της στα τέλη του 2000, παρέχοντας ρυθμό μετάδοσης έως και 2Mbps. Το 3G είναι η πρώτη γενιά δικτύων που φέρνει πραγματικές αναβαθμίσεις και εξελίξεις στον τομέα, καθώς τα συστήματα 3G συγχωνεύουν την κινητή πρόσβαση υψηλής ταχύτητας σε υπηρεσίες που βασίζονται στο Πρωτόκολλο Internet (IP). Εκτός από τον ρυθμό μετάδοσης, το 3G υποστηρίζει την δυνατότητα κλήσεων μέσω βίντεο, την παρακολούθηση τηλεόρασης μέσω του διαδικτύου, καθώς επίσης, έδωσε στους χρήστες του, την δυνατότητα να παίζουν παιχνίδια στο διαδίκτυο. Το QoS διατηρήθηκε και αναβαθμίστηκε και σε συνδυασμό με τις πρόσθετες ευκολίες, όπως η παγκόσμια περιαγωγή (roaming) και η βελτιωμένη ποιότητα φωνής έκαναν το 3G μία αξιοσημείωτη γενιά. Ωστόσο, ούτε το 3G υπήρξε τέλειο, και αυτό διότι τα κινητά που το υποστηρίζουν χρειάζονται περισσότερη ενέργεια και τα προγράμματα 3G είναι επίσης πιο ακριβά από τον προκάτοχό του. Ως αποτέλεσμα, η δημιουργία της 4^{ης} γενιάς υπήρξε μονόδρομος, η οποία αποτέλεσε και την πραγματική εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Το 4G, που αποτελεί την εξέλιξη των προηγούμενων γενιών 3G και 2G, εισήγαγε την τεχνολογία Long-Term Evolution (LTE), προσφέροντας ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 10Mbps και 1Gbps. Αυξημένες ταχύτητες σημαίνει, μειωμένες καθυστερήσεις, βελτίωση της ποιότητας φωνής, αύξηση της

αποτελεσματικότητας των υπηρεσιών, καλύτερους ρυθμούς ροής δεδομένων και φυσικά υψηλότερες ταχύτητες λήψης και μετάδοσης. Οι εφαρμογές που αξιοποιούν το 4G μπορούν να κάνουν χρήση υπηρεσιών μηνυμάτων πολυμέσων (MMS), της ψηφιακής μετάδοσης βίντεο (DVB), της συνομιλίας μέσω βίντεο, και έχουν επίσης πρόσβαση σε τηλεοπτικό περιεχόμενο υψηλής ανάλυσης και στην κινητή τηλεόραση. [1]

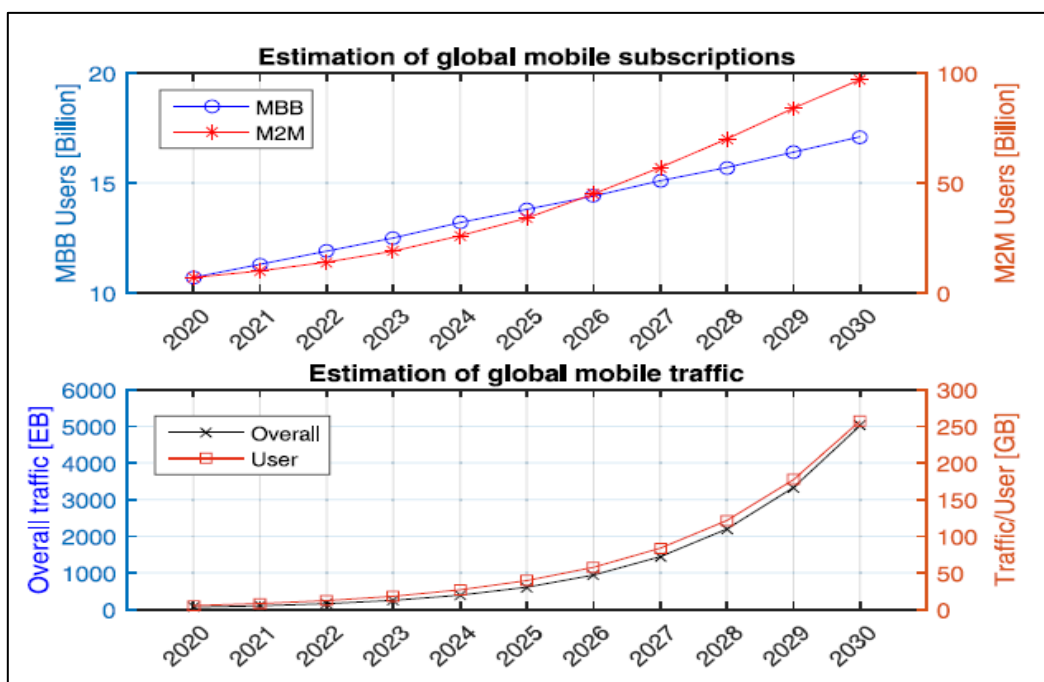
Τέλος, φτάνουμε στο σήμερα, και πιο συγκεκριμένα στην 5^η γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων ή αλλιώς 5G. Αυτή η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G ξεπερνά το LTE από άποψη χαρακτηριστικών και επιδόσεων. Σε σύγκριση με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4G, το 5G έχει σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, πολύ χαμηλότερη καθυστέρηση και πολύ υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος. Η αυξημένη χωρητικότητα του συστήματος, ο τεράστιος αριθμός συνδέσεων, ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων χρήστη, η μειωμένη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, η ευέλικτη ανάπτυξη εύρους ζώνης, ο ποικίλος συνδυασμός υπηρεσιών, η ευελιξία του δικτύου και η μετάβαση σε πιο ενεργειακά αποδοτικές επικοινωνίες αποτελούν τους λόγους που οδηγούν στο 5G. Ορισμένες νέες τεχνολογίες προτείνονται και αναπτύσσονται για το 5G προκειμένου να καλύψουν αυτές τις ανάγκες. [2]

1.2 Εισαγωγή στην 6^η Γενιά Δικτύων

Τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G) έχουν καθιερωθεί παγκοσμίως από το 2020. Παρά την αξιοπιστία, τη μαζική συνδεσιμότητα και τη χαμηλή καθυστέρηση που προσφέρουν, δεν είναι επαρκείς για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των μελλοντικών εφαρμογών. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δίκτυα 6G υπόσχονται να φέρουν νέες καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες, εκμεταλλευόμενα την τεχνητή νοημοσύνη, τις συχνότητες THz και τους δορυφόρους μεγάλης κλίμακας με στόχο την μείωση της καθυστέρησης, προσφέροντας έτσι υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο. Θεμέλια των δικτύων έκτης γενιάς αποτελούν η παγκόσμια κάλυψη, η ασφάλεια, ο υψηλός ρυθμός δεδομένων και η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση.

Η συνεχόμενη αύξηση των χρηστών του δικτύου, της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και της εμφάνιση νέων υπηρεσιών, αλλά και η επιθυμία ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου που να μπορεί να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις των χρηστών, όσο η ανάγκη για αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου από άποψη κόστους, ενέργειας, φάσματος και λειτουργιών είναι προβλήματα τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, αλλά υπόσχονται να λύσουν τα δίκτυα 6G. Παρόλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί πως οι προδιαγραφές για τα δίκτυα 5G εξακολουθούν να αναπτύσσονται, παράλληλα με έρευνες που ήδη διεξάγονται για την ανάπτυξη του 6G. [3]

Ως 6G ορίζουμε τις τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών που υποστηρίζουν το πρότυπο των κυψελοειδών δικτύων δεδομένων έκτης γενιάς [4]. Λόγω της ευρείας διάδοσης της κινητής ευρυζωνικότητας (Mobile BroadBand: MBB), ο συνολικός αριθμός των κινητών συσκευών προβλέπεται να αυξηθεί εκθετικά την τελευταία δεκαετία. Το 6G αναμένεται να είναι σε θέση να διαχειριστεί την προβλεπόμενη αύξηση του όγκου της κινητής κίνησης το 2030 και μετά, ο οποίος θα είναι δύσκολο να αντιμετωπιστεί από την υποδομή 5G. Εκτιμάται ότι θα υπάρξουν 17,1 δισεκατομμύρια πελάτες MBB παγκοσμίως έως το 2030, ενώ ταυτόχρονα, η μέση μηνιαία κατανάλωση δεδομένων κάθε χρήστη κινητής τηλεφωνίας θα αυξηθεί από περίπου 5GB το 2020 σε πάνω από 250GB το 2023, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [3]



Σχήμα 1:1: Εκτιμώμενες παγκόσμιες συνδρομές και κίνηση κινητής τηλεφωνίας από το 2020 έως το 2030. [3]

Επομένως, γίνεται αντιληπτό πως οι υψηλές ταχύτητες σε συνάρτηση με την χαμηλή καθυστέρηση αποτελούν τους κύριους ακρογωνιαίους λίθους των δικτύων 6G. Πιο συγκεκριμένα, το 6G θα προσφέρει **Throughput** το οποίο θα είναι μέχρι και 1000 φορές γρηγορότερο από τον προκάτοχό του. Επιπλέον, το **Latency** θα μειωθεί περίπου 10 φορές, ενώ και το **Reliability** αναμένεται να φτάσει στο 99,99999%. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί μπορούμε να δούμε αναλυτικά τις διαφορές μεταξύ των προτύπων 5G και 6G.

Parameters/Aspects	5G	6G
<i>Αξιοπιστία</i>	10Gbps	1Tbps
<i>Uplink Data Rate</i>	20Gbps	1Tbps
<i>Downlink Data Rate</i>	1ms	<0,1ms
<i>Καθυστέρηση</i>	500km/hr	1000km/hr
<i>Κινητικότητα</i>	3-30GHz	1THz
<i>Συχνότητα λειτουργίας</i>	10cm in 2D	1cm in 3D
<i>Ακρίβεια εντοπισμού</i>	Πολύ περιορισμένη	Ευρεία
<i>Επικοινωνία THz</i>	Μερικώς	Πλήρως
<i>Ενσωμάτωση TN</i>	Μερικώς	Πλήρως
<i>Ενσωμάτωση XR</i>	Μερικώς	Πλήρως
<i>Ολοκλήρωση αυτοματισμού</i>	Μερικώς	Πλήρως
<i>Ολοκλήρωση οπτικής επικοινωνίας</i>	Μερικώς	Πλήρως
<i>Δορυφορική ενσωμάτωση</i>	Μερικώς	Πλήρως

Πίνακας 1:1: Προδιαγραφές 5G & 6G.

Όραμα για το 6G αποτελεί η διαχείριση του δικτύου σχεδόν αποκλειστικά από την Τεχνητή Νοημοσύνη (A.I.), η οποία χρησιμοποιείται, ήδη, σε μικρή κλίμακα στα δίκτυα 5G, με στόχο την βελτιστοποίηση κατανομής πόρων, επεξεργασίας δεδομένων και την ελαχιστοποίηση του λανθάνων χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, στόχο αποτελεί, τα δίκτυα επόμενης γενιάς να χρησιμοποιούν αλγόριθμους μηχανικής και βαθιάς μάθησης (Machine Learning, M.L. & Deep Learning, D.L.), έτσι ώστε να είναι σε θέση να παίρνουν καλύτερες αποφάσεις, όπως θα έκανε ένας άνθρωπος αν μπορούσε να δει και να διαχειριστεί όλο το δίκτυο ταυτόχρονα. Τα δίκτυα 6G αναμφίβολα θα έρθουν αντιμέτωπα με μία πληθώρα δυσκολιών, όπως την περιοδική συλλογή μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων που προέρχονται από διάφορες έξυπνες συσκευές δημιουργώντας έτσι το δίλημμα μεγάλων δεδομένων. Ως αποτέλεσμα οι επικοινωνίες 6G πρέπει να διαθέτουν τη δυνατότητα αυτοεκμάθησης και αυτοδιαμόρφωσης, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω της Τεχνητής Νοημοσύνης, η οποία θεωρείται αναπόσπαστο κομμάτι των μελλοντικών ασύρματων επικοινωνιών. [5]

Ακόμη ένας παράγοντας που επιτάσσει την αναγκαιότητα μετάβασης από το 5G στο 6G αποτελεί η ραγδαία ανάπτυξη των έξυπνων συσκευών, και του

Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT). Ο όρος IoT, έχει εξελιχθεί ώστε να αναφέρεται σε οποιοδήποτε αριθμό διαφορετικών ειδών ηλεκτρικών ή ηλεκτρονικών συσκευών που συνδέονται με το Διαδίκτυο, ανεξάρτητα από το μέγεθος ή τη λειτουργία τους [A Review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT)]. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από μία πληθώρα συσκευών, όπως αυτοκίνητα με ενσωματωμένους αισθητήρες, κάμερες, κλιματιστικά, φώτα, συστήματα ασφαλείας, smartwatches και πολλά ακόμη [wiki]. Βασικό προτέρημα των παραπάνω συσκευών αποτελεί η δυνατότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ τους, καθώς και το γεγονός ότι μπορούν να συνδεθούν τόσο με τον υπολογιστή ή το κινητό του χρήστη, παρέχοντάς του την δυνατότητα απομακρυσμένου χειρισμού της συσκευής. Το δίκτυο των IoT συσκευών αναμένεται να εκτοξευθεί μέχρι το 2030. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν περίπου 11 δισεκατομμύρια IoT συσκευές και μέχρι το 2030 εκτιμάται ότι ο αριθμός αυτός θα φτάσει στις 25 με 30 δισεκατομμύρια συσκευές παγκοσμίως. Ως αποτέλεσμα, τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστούν την ανάπτυξη των IoT συσκευών.

1.3 Αρχιτεκτονική Μη Κυψελωτών Δικτύων 6^{ης} Γενιάς (Cell Free)

Η αρχιτεκτονική Cell Free έχει εξεταστεί ως εναλλακτική προσέγγιση στο δίκτυο 6G, όπου η κοινότητα της έρευνας και η βιομηχανία έχουν αρχίσει να εξερευνούν τις δυνατότητές της. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα υλοποίησης του Cell Free mMIMO, τα οποία περιλαμβάνουν πλήρως συγκεντρωτικά δίκτυα στα οποία τα σήματα πιλότου (pilot signals) και δεδομένων μεταδίδονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας, καθώς και πιο απλοποιημένες προσεγγίσεις όπου η επεξεργασία γίνεται τοπικά στα σημεία πρόσβασης. Η αρχιτεκτονική Cell Free αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση στον τρόπο λειτουργίας των ασύρματων δικτύων, παρέχοντας δυνατότητες υψηλής απόδοσης και ευελιξίας στη μετάδοση δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική μη κυψελωτών δικτύων 6ης γενιάς (Cell Free) εκμεταλλεύεται τη μετάδοση ενός σήματος με συνοχή από πολλές κεραιές. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος χωρίς την αύξηση της συνολικής ισχύος μετάδοσης. Με τη συνεκτική μετάδοση από πολλαπλά σημεία πρόσβασης (Access Points - APs), ακόμα και με διαφορετικά κέρδη καναλιού στον εξοπλισμό χρήστη (User Equipment - UE), η ισχύς μετάδοσης διαιρείται ανάμεσα σε πολλαπλά AP. Αυτή η τεχνολογία, γνωστή και ως δίκτυο MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), προσφέρει υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τον παραδοσιακό τρόπο εξυπηρέτησης όπου κάθε χρήστης εξυπηρετείται από ένα μόνο AP. [6] [7]

Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων, η αρχιτεκτονική των δικτύων 6^{ης} γενιάς αναμένεται να είναι ιδιαίτερα περίπλοκη συγκριτικά με τους προκατόχους του

και σε συνδυασμό με τα πρότυπα που αναφέραμε παραπάνω, οδηγούμαστε στην ανάγκη να εφαρμόσουμε ορισμένες καινοτόμες τεχνολογικές τάσεις στην αρχιτεκτονική του 6G. Παρακάτω θα δούμε συνοπτικά ορισμένες από αυτές.

1.3.1 Νέες Τεχνολογίες

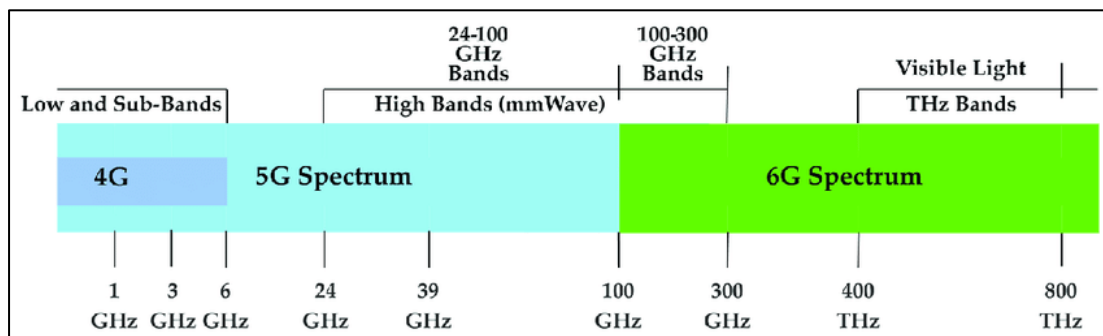
Οι τεχνολογικές τάσεις τις οποίες θα δούμε και αναμένεται να διευκολύνουν τους στόχους του 6G είναι οι παρακάτω:

- Υψηλότερες συχνότητες – Higher Frequencies
- Κατανεμημένο συνεκτικό massive MIMO – Distributed coherent massive MIMO
- Ενσωματωμένη συνδεσιμότητα και αίσθηση – Integrated connectivity and sensing
- Ενσωματωμένο AI για αυτοματισμό – Integrated AI for automation
- Δίκτυα που βασίζονται σε υπηρεσίες – Service-based networks
- Ευέλικτες τοπολογίες και αναπτύξεις – Flexible topologies and deployments
- Συσκευές μηδενικής ενέργειας – Zero-energy devices

1.3.2 Υψηλότερες Συχνότητες

Η χρήση ευρύτερων ζωνών σε υψηλότερες συχνότητες ήταν ένα φυσικό εξελικτικό βήμα για όλες τις γενιές κινητής τηλεφωνίας και με τις προόδους στην τεχνολογία ραδιοφώνου και κεραιών, το φάσμα έως περίπου 300 GHz μπορεί να γίνει προσβάσιμο, βλ. **Σχήμα 1:2**. Η εκμετάλλευση αυτών των πολύ υψηλών συχνοτήτων είναι προφανώς πρόκληση. Για παράδειγμα, η εφαρμογή ραδιοσυχνοτήτων, οι νέες κυματομορφές αποδοτικής ισχύος, οι πτυχές ανάπτυξης, οι λύσεις κινητικότητας και οι τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης είναι παραδείγματα σημαντικών περιοχών προς μελέτη. Το νέο φάσμα θα πρέπει να συμπληρώνει χαμηλότερες ζώνες στο 6G για να συνδυάζει την καλή κάλυψη υψηλών σταθερών ρυθμών μαζί με τοπικές κορυφές ρυθμών Tbps. Οι απώλειες διάδοσης που σχετίζονται με υψηλότερες φέρουσες συχνότητες θα απαιτήσουν νέες προσεγγίσεις στη θέση και την κατευθυντικότητα δέσμης, καθώς και πρόβλεψη κινητικότητας για την πλήρη αξιοποίηση των απαιτούμενων στενών δοκών. Επιπλέον, οι εγγενείς απώλειες διείσδυσης και η μειωμένη περίθλαση σε υψηλές συχνότητες θα οδηγήσουν περαιτέρω την πυκνότητα του δικτύου για να φτάσει στις UE. Επιπλέον, αυτή η χωρική απομόνωση των σημάτων επιτρέπει επίσης πιο κατευθυνόμενη επικοινωνία με μικρότερες παρεμβολές. Παρά το γεγονός ότι η μετάβαση σε υψηλές συχνότητες (έως 300 GHz) είναι ένα φυσικό

εξελικτικό βήμα, απαιτείται επίσης να διερευνηθεί τι είδους σενάρια, περιπτώσεις χρήσης και εφαρμογές θα αντιμετωπίζονται σε αυτές τις συχνότητες. Ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη ότι η απαιτούμενη πυκνότητα δικτύου λόγω των περιορισμών κάλυψης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της χωρητικότητας και σε χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Είναι επιπλέον σημαντικό να παρακολουθούμε την ανάπτυξη των αναπτύξεων mmWave στο 5G για να μάθουμε για τις προκλήσεις και τις λύσεις, ώστε να υιοθετηθούν αργότερα για το 6G και να γίνει κατανοητή η σκοπιμότητα υψηλότερων ζωνών. [8]



Σχήμα 1:2: Ζώνες συχνοτήτων για 6G με διαθέσιμο εύρος ζώνης (In-Built Wireless – IBW). [9]

1.3.3 Κατανεμημένο Συνεκτικό Massive MIMO

Σε υψηλότερες συχνότητες και με περισσότερα στοιχεία κεραίας, θα πρέπει να εξεταστούν νέες μορφές μετάδοσης για βελτιωμένη απόδοση. Συνδυάζοντας συνεκτικά τη μετάδοση από και τη λήψη σε πολλαπλά σημεία, το σήμα μπορεί να διαμορφωθεί τοπικά σύμφωνα με την τοποθεσία και τις απαιτήσεις υπηρεσίας κάθε χρήστη. Αυτό αποτελεί ένα νέο σύνορο για τη μαζική ανάπτυξη MIMO. Οι κοινές μεταδόσεις από και προς πολλαπλές συσκευές που συνεργάζονται είναι μια σχετική τεχνική που μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του δικτύου. Σχηματίζοντας μια αποτελεσματική συστοιχία μαζί, η κάλυψη των συσκευών μπορεί να επεκταθεί, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε υψηλότερες ζώνες. [8]

1.3.4 Ενσωματωμένη Συνδεσιμότητα Και Αίσθηση

Με καλή γνώση σχετικά με τα φυσικά κανάλια, καθίσταται δυνατή η προσαρμογή των εκπομπών για βέλτιστη απόδοση. Οι αισθητήρες στο UE μπορούν να ανιχνεύσουν το περιβάλλον και οι ηχογραφήσεις από τους σταθμούς βάσης (BS) μπορούν να λειτουργήσουν ως ραντάρ και LiDAR (Light Detection and Ranging) για να παρέχουν μια δυναμική ψηφιακή αναπαράσταση

του περιβάλλοντος, όπου το ευρύ φάσμα των εφαρμοζόμενων συχνοτήτων μπορεί ακόμη και να φέρει κάποιες φασματοσκοπικές γνώσεις στην ανάλυση. Αυτό θα μπορούσε, για παράδειγμα, να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη καιρού ή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, αξιολογώντας τις διαφορετικές συνθήκες ραδιοζεύξης. Ταυτόχρονα, οι ίδιες οι ζεύξεις επικοινωνίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλότερο βαθμό για την εξαγωγή παραμέτρων ραδιοδιάδοσης. Ο συνδυασμός των πληροφοριών αποτελεί μια ισχυρή βάση για την αυτοματοποίηση δικτύου και τον συντονισμό συνδέσμων. Η χρήση υπολογιστικών πόρων κοντά στο σταθμό βάσης (BS) θα καθιστούσε δυνατή την εκτέλεση μιας εκτίμησης που μοιάζει με ανίχνευση ακτινών της επιδιωκόμενης μετάδοσης στο περιβάλλον και θα μεγιστοποιήσει το SINR (Signal to Interface & Noise Ratio) για τους χρήστες στην κυψέλη καθώς και σε γειτονικές κυψέλες. [8]

1.3.5 Ενσωματωμένο AI Για Αυτοματισμό

Τα μελλοντικά δίκτυα αναμένεται να χρησιμοποιούν πράκτορες AI για πολλαπλές λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης της διεπαφής ραδιοφώνου, του αυτοματισμού διαχείρισης δικτύου (όπως βελτιστοποίηση παραμέτρων, χειρισμός συναγερμών, αυτοϊαση) και εννορχήστρωση. Για να γίνει αυτό, πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμα ακριβή και έγκαιρα δεδομένα στα σωστά σημεία του δικτύου, έτσι ώστε οι έξυπνοι πράκτορες να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα. Ταυτόχρονα, τα δίκτυα θα πρέπει να μεταδίδουν τα απαραίτητα δεδομένα από διαφορετικούς τομείς και πηγές με αποτελεσματικό τρόπο, ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση και αποθήκευση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που μπορεί να μην χρησιμοποιηθούν ποτέ μέσω διεπαφών διαχείρισης δικτύου. Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης θα πρέπει να αναπτύσσονται και να εκπαιδεύονται σε διαφορετικά επίπεδα του δικτύου: επίπεδο διαχείρισης, πυρήνας, ραδιοφωνικούς σταθμούς βάσης (RBS), καθώς και στο UE, πιθανώς με τη βοήθεια του δικτύου (είτε μέσω διαμόρφωσης ή/και προγραμματισμού UE). Αυτά τα νέα παραδείγματα ενδέχεται να οδηγήσουν στην ανάγκη για μια νέα αρχιτεκτονική που είναι εγγενής στην τεχνητή νοημοσύνη και βασίζεται σε δεδομένα, καθώς οι λειτουργίες δικτύου στους τομείς δικτύου και στον τομέα διαχείρισης δικτύου ενδέχεται να απαιτούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές, όπως λειτουργίες δικτύου στο δίκτυο και ασύρματες συσκευές, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο (δηλαδή, έγκαιρα αλλά χωρίς τη σπατάλη παροχής όλων των πιθανών συλλεγόμενων δεδομένων παντού). Οι αλγόριθμοι φυσικού επιπέδου, όπως η προσαρμογή συνδέσμων, καθώς και οι αλγόριθμοι υψηλότερου επιπέδου, όπως η κινητικότητα, μπορούν να βελτιστοποιηθούν με πράκτορες AI που αναπτύσσονται με ελεγχόμενο και προβλέψιμο τρόπο. Επί του παρόντος, αυτοί οι αλγόριθμοι αναπτύσσονται στατικά, ενώ εάν τους επιτραπεί να αλλάξουν δυναμικά θα ανοίξει για

βελτιωμένη απόδοση και χρήση. Επιπλέον, η δυνατότητα αυτοματοποίησης των διαμορφώσεων του δικτύου μειώνει την ανάγκη για ακριβή πρακτική ανθρώπινη εργασία. [8]

1.3.6 Δίκτυα Που Βασίζονται Σε Υπηρεσίες

Σε ένα δίκτυο βασισμένο σε υπηρεσίες, κάθε λειτουργία δικτύου μπορεί, όταν εξουσιοδοτηθεί, να ζητήσει υπηρεσίες από σχεδόν οποιαδήποτε άλλη λειτουργία δικτύου, χρησιμοποιώντας κοινές λειτουργίες εντοπισμού και παρακολούθησης υπηρεσιών. Η λειτουργία δικτύου που ενεργεί ως πάροχος υπηρεσιών δεν ενδιαφέρεται για το ποια λειτουργία δικτύου καλεί την υπηρεσία, καθιστώντας ευκολότερη την εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών στο μέλλον με τη χρήση υφιστάμενων υπηρεσιών. Αυτή η αρχιτεκτονική αποσυνδέει επίσης το επίπεδο μεταφοράς από το επίπεδο εφαρμογής σηματοδότησης, αποφεύγοντας τις παραδοσιακές διεπαφές σημείο προς σημείο και την αποκλειστική διαχείριση διεπαφών μεταξύ των λειτουργιών δικτύου. Το 5G εισήγαγε μια αρχιτεκτονική βασισμένη στις υπηρεσίες στο επίπεδο του δικτύου πυρήνα (CN), και στο 6G ο σχεδιασμός δικτύου βασισμένος στις υπηρεσίες μπορεί να προχωρήσει ένα βήμα παραπέρα για να συμπεριλάβει επίσης το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) και πιθανά στοιχεία του UE. Θα πρέπει να ανοίξει για την αποτελεσματική υλοποίηση όλων των λειτουργιών του δικτύου στο νέφος, επαναχρησιμοποιώντας ένα κοινό πλαίσιο ανακάλυψης υπηρεσιών, αποθήκευσης δεδομένων κ.λπ. και αποφεύγοντας τις διπλές λειτουργίες στο RAN και το CN, καθώς και τις περιττές λειτουργίες μεσολάβησης. Αυτό διασφαλίζει μια αποτελεσματική ρύθμιση όπου τα χαρακτηριστικά μπορούν να προστεθούν ευέλικτα συνδυάζοντας λειτουργίες δικτύου με νέους τρόπους ή εισάγοντας πρόσθετες λειτουργίες δικτύου με ελάχιστα εμπόδια. [8]

1.3.7 Ευέλικτες Τοπολογίες Και Αναπτύξεις

Για να επεκταθεί η εμβέλεια του δικτύου, θα πρέπει να ενσωματωθούν σε μία λύση δικτύου πολλοί διαφορετικοί τρόποι πρόσβασης και οπισθοδρόμησης, όπου τα δεδομένα μπορούν να δρομολογούνται μέσω πολλαπλών δυναμικά επιλεγμένων διαδρομών. Επιπλέον, η ανάπτυξη θα πρέπει να επιτρέπει υψηλή ευελιξία για ανώτερη αποδοτικότητα κόστους και προσαρμοστικότητα σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης. Μια τέτοια ευέλικτη ανάπτυξη είναι τα δίκτυα πλέγματος (mesh networks), όπου ένα πλήθος κόμβων συνεργάζεται για να προωθήσει ένα μήνυμα στον παραλήπτη. Αυτή η λύση είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για μικρότερες κυψέλες περιορισμένης εμβέλειας. Για την επέκταση της κάλυψης, είναι επιθυμητή η ενσωμάτωση δορυφόρων στο δίκτυο

6G. Επίσης, οι πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου (HAP) και οι κινητές εναέριες κυψέλες που μεταφέρονται π.χ. σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη αποτελούν σημαντικά κομμάτια ενός ιστού ασύρματων συνδέσεων που θα πρέπει να συνδεθούν με τους επίγειους κόμβους σε ένα ευρέως ετερογενές δίκτυο 6G. Αυτές οι συνδέσεις θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ευέλικτα τόσο για πρόσβαση όσο και για μεταφορά σε πολλαπλά άλματα για βέλτιστη απόδοση, κάλυψη και αποδοτικότητα κόστους. Ταυτόχρονα, η διαφοροποίηση των υπηρεσιών απαιτεί την επιλογή διαδρομής για την εγγύηση ιδιοτήτων όπως ο ρυθμός μετάδοσης και η καθυστέρηση. Μια άλλη τεχνολογία που σχετίζεται με τις ευέλικτες τοπολογίες είναι η δυνατότητα προγραμματιζόμενων πρωτοκόλλων στα UEs. Η έννοια της προγραμματισιμότητας συζητήθηκε έντονα κατά τη δημιουργία του 5G και έγινε πιο συγκεκριμένη με τη δημιουργία της συμμαχίας O-RAN, αλλά παραμένει περιορισμένη σε χαρακτηριστικά που δεν έχουν αντίκτυπο στο πρωτόκολλο, π.χ. αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου και βελτιωμένοι αλγόριθμοι μεταπομπής. Παρ' όλα αυτά, τα χαρακτηριστικά με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στις επιδόσεις απαιτούν τυποποίηση στο 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Για το χρονικό πλαίσιο 6G, αξίζει να διερευνηθούν οι δυνατότητες επέκτασης αυτής της έννοιας σε ραδιοπρωτόκολλα τα οποία, λόγω του αντίκτυπου προς τα UE, θα απαιτούσαν ένα πλαίσιο προγραμματισμού UE. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για βιομηχανικές εφαρμογές οι οποίες μπορεί να χρειάζονται πιο προσαρμοσμένες λύσεις πρωτοκόλλων που είναι δύσκολο να εισαχθούν εγκαίρως στις προδιαγραφές 3GPP. [8]

1.3.8 Συσκευές Μηδενικής Ενέργειας

Αντιμετωπίζοντας τη ζήτηση δισεκατομμυρίων φθηνών, απομακρυσμένων ή/και ενσωματωμένων αισθητήρων για π.χ. περιβαλλοντική παρακολούθηση, παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας ή διάχυτη παρακολούθηση βιομηχανικών διεργασιών, καθίσταται αναγκαίο να στοχεύσουμε σε συσκευές «μηδενικής ενέργειας», δηλαδή συσκευές που δεν απαιτούν αλλαγή μπαταρίας, οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν μία φορά και στη συνέχεια να αναφέρουν συνεχώς δεδομένα χωρίς συντήρηση. Αυτό θα μπορούσε επίσης να μειώσει το κόστος παραγωγής των συσκευών, καθώς αυτές θα μπορούσαν να σχεδιαστούν χωρίς την ανάγκη αντικατάστασης εξαρτημάτων, όπου όλα τα εξαρτήματα θα μπορούσαν να είναι πλήρως ενσωματωμένα και η συσκευή θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε οποιαδήποτε δομή χωρίς να υπάρχει ανησυχία για την εύκολη προσβασιμότητα. Ανάλογα με το σενάριο, μπορούν να εξεταστούν διαφορετικές πηγές ενέργειας για τέτοιες συσκευές, με ενέργεια που συλλέγεται π.χ. από την ηλιακή ενέργεια, τις δονήσεις, τις διαφορές θερμοκρασίας ή τα ίδια τα ραδιοκύματα. Τα δεδομένα μπορούν να ανατροφοδοτούνται από τους αισθητήρες με χρήση οπισθοσκέδασης (backscattering) ή «παραδοσιακής» ενεργής μετάδοσης. Οι αποδοτικοί μηχανισμοί αφύπνισης είναι σημαντικοί,

καθώς η ποσότητα της ενέργειας που συλλέγεται σε πολλές περιπτώσεις είναι πολλή μικρή. Η περιορισμένη ενέργεια μπορεί επίσης να απαιτεί την επανεξέταση των σημερινών πρωτοκόλλων μετάδοσης, καθώς η συχνή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων μπορεί να μην είναι δυνατή δεδομένης της περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας. [8]

Κεφάλαιο 2: Τηλεπικοινωνιακές Εννοιολογίες Και Μέθοδος Reduced Load Approximation: Μία Ολιστική Προσέγγιση

2.1 Τηλεπικοινωνιακή Θεωρία Κίνησης

Η Θεωρία της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών δικτύων και την προώθηση της ανάπτυξής τους. Ως αποτέλεσμα, η έννοια της «τηλεπικοινωνιακής κίνησης» εκτείνεται σε όλες τις μορφές επικοινωνίας μέσω υπολογιστή και τηλεπικοινωνίας. Τα μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης καθορίζουν μαθηματικές σχέσεις μεταξύ τριών βασικών παραγόντων ενός συστήματος επικοινωνίας:

- το προσφερόμενο φορτίο κίνησης, α
- τον βαθμό υπηρεσίας (GoS), ο οποίος σχετίζεται με την ποιότητα υπηρεσίας (QoS)
- τη χωρητικότητα του συστήματος, C

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες το μέγεθος μιας εγκατάστασης σχετίζεται άμεσα με την απόδοση της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, εξετάζοντας το μέγεθος ενός καταστήματος (χωρητικότητα συστήματος), ένας καθοριστικός παράγοντας περιλαμβάνει τον αριθμό των προϊόντων (φόρτος κίνησης) που είναι διαθέσιμα προς πώληση ανά ημέρα (GoS). Ομοίως, ο όγκος της μεταφερόμενης κίνησης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της χωρητικότητας ενός συστήματος επικοινωνίας. Η χωρητικότητα του συνδέσμου μπορεί να δηλωθεί είτε με τον αριθμό των trunks του συνδέσμου είτε με την ταχύτητα μετάδοσης στο σύνδεσμο. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι 1 trunk αντιστοιχεί σε ταχύτητα μετάδοσης 64kbps, μπορούμε να πούμε ότι ένας σύνδεσμος επικοινωνίας 2,048Mbps έχει χωρητικότητα εύρους ζώνης 32 trunk ή 32 μονάδες εύρους ζώνης (bandwidth units – b.u.). Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο όρος «κανάλι» (channel), δεδομένου ότι ένα trunk είναι ένα ενιαίο κανάλι μετάδοσης μεταξύ δύο σημείων. [10]

2.1.1 Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης

Με τον όρο «φορτίο κίνησης» σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, αναφερόμαστε στο πλήθος των ήδη υπαρχών κλήσεων, καθώς και αυτών που δημιουργούνται και είναι σε θέση να εξυπηρετηθούν από το σύστημα. Μία κλήση, ορίζεται ως η διαδικασία ζήτησης εγκαθίδρυσης σύνδεσης σε ένα σύστημα επικοινωνίας, καθώς και η διατήρησή της έως ότου τερματιστεί από τον χρήστη. Η διάρκεια μιας κλήσης, ονομάζεται χρόνος εξυπηρέτησης και ο κυκλοφοριακός φόρτος αποτελεί τον χρόνο

αναμονής διεκπεραίωσης όλων των κλήσεων κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος παρατήρησης διαιρεμένος με το χρονικό διάστημα παρατήρησης. Ως εκ τούτου, προκύπτει ότι ο φόρτος κυκλοφορίας είναι ένα αδιάστατο μέγεθος. Ωστόσο το Erlang (erl) έχει οριστεί ως μονάδα μέτρησης του φόρτου κίνησης, προς τιμήν του Δανού μαθηματικού Agner Krarup Erlang (1878-1929), θεμελιωτή της θεωρίας της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

2.1.2 Συμφόρηση Κυκλοφορίας & GoS/QoS

Η κατάσταση κατά την οποία ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα αδυνατεί να εξυπηρετήσει νέους χρήστες, δηλαδή νέες κλήσεις, διότι όλες οι γραμμές (trunks) είναι κατειλημμένες ονομάζεται κυκλοφοριακή συμφόρηση (congestion). Κατά την παραμονή του συστήματος στην κατάσταση αυτή, παρατηρούνται απώλειες και καθυστερήσεις κλήσεων, για την οποία ισχύει ότι:

$$\text{Διεκπεραιούμενη Κίνηση} = \text{Προσφερόμενη Κίνηση} - \text{Χαμένη Κίνηση}$$

Συνέπεια των προαναφερθέντων αποτελεί, η ύπαρξη δύο διαφορετικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Του συστήματος απωλειών, στο οποίο μια εισερχόμενη κλήση μπλοκάρεται και εγκαταλείπει το σύστημα μια εισερχόμενη κλήση μπλοκάρεται και εγκαταλείπει το σύστημα (συχνά λέμε μπλοκαρισμένη και χαμένη), με την εμφάνιση συμφόρησης. Και του συστήματος καθυστέρησης (ή ουρά αναμονής), στο οποίο, μια κλήση μπορεί να περιμένει για μια σύνδεση. Το ποσοστό των κλήσεων που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν και μπλοκάρονται ή καθυστερούν λόγω συμφόρησης του συστήματος καθορίζουν το Βαθμό Υπηρεσίας (GoS) που παρέχει το σύστημα με το ποσοστό αυτό να εκφράζεται ως εξής:

$$B = \frac{\text{Συνολικός Αριθμός Χαμένων Κλήσεων}}{\text{Συνολικός Αριθμός Προσφερόμενων Κλήσεων}}$$

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω, βασικός στόχος ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση όσων το δυνατόν περισσότερων χρηστών διατηρώντας ορισμένες προδιαγραφές οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τόσο τις επιδόσεις που σχετίζονται με το δίκτυο, π.χ. ρυθμός σφάλματος bit (bit error rate), Βαθμός Υπηρεσίας (GoS), όσο και τις επιδόσεις που δεν σχετίζονται με το δίκτυο, π.χ. χρόνος παροχής, χρόνος επισκευής, χρόνος επίλυσης παραπόνων. Οι προαναφερθείσες προδιαγραφές χαρακτηρίζονται ως Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS), η οποία, γενικότερα, αναφέρεται στον βαθμό ικανοποίησης του χρήστη από προσφερόμενη υπηρεσία.

2.1.3 Χωρητικότητα Συστήματος

Με τον όρο «χωρητικότητα συστήματος» αναφερόμαστε στο μετρικό το οποίο προσδιορίζει το πλήθος των λειτουργικών καναλιών/γραμμών ενός συστήματος τα οποία εξυπηρετούν τους χρήστες που επιθυμούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Αναφερθήκαμε προηγουμένως στην ανάγκη ενός συστήματος να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Γίνεται αντιληπτό, ωστόσο, πως ο εφοδιασμός ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος με τόσους πόρους, όσοι είναι απαραίτητοι για τη διαχείριση του μέγιστου όγκου κίνησης έχει αποδειχθεί οικονομικά ανέφικτος. Έτσι λοιπόν, προκύπτει το πρόβλημα καθορισμού της χωρητικότητας ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, ευρύτερα γνωστό ως πρόβλημα διαστασιολόγησης, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Στις μέρες μας, η ύπαρξη δικτύων πολλαπλών ταχυτήτων τα οποία εξυπηρετούν πολλαπλές υπηρεσίες διαφορετικών προδιαγραφών καθιστούν το πρόβλημα διαστασιολόγησης ακόμα πολυπλοκότερο. Ένας από τους τρόπους προσδιορισμού της χωρητικότητας ενός συστήματος γίνεται με βάση τον κυκλοφοριακό φόρτο την ώρα αιχμής, δηλαδή την ώρα κατά την οποία ο φόρτος κίνησης φτάνει στην αιχμή του, και όχι με βάση την κάλυψη κάθε πιθανής αιχμής του φόρτου κυκλοφορίας.

2.2 Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Τα μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης εκφράζουν, ποσοτικά, τις προαναφερθείσες σχέσεις μεταξύ του προσφερόμενου φορτίου κίνησης α , της χωρητικότητας του συστήματος C και του GoS . Επιπλέον, δημιουργούνται με βάση βασικές παραδοχές (υποθέσεις), με τις οποίες προσπαθούμε να περιγράψουμε ένα σύστημα επικοινωνίας. Είναι χρήσιμα επειδή μας βοηθούν να σχεδιάσουμε ένα σύστημα ή να αξιολογήσουμε τις βασικές μετρήσεις απόδοσης και να προβλέψουμε τη συμπεριφορά του ακόμη και υπό περίεργες συνθήκες, διότι όσο πιο πολύπλοκο είναι το σύστημα, τόσο πιο χρήσιμο είναι το μοντέλο. Ως αποτέλεσμα, διευκολύνεται, ιδιαίτερα, η μελέτη ενός συστήματος και είμαστε σε θέση να παράγουμε ασφαλή συμπεράσματα. [10]

2.2.1 Κατανομή Poisson

Βασικό χαρακτηριστικό ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος αποτελεί, η διαδικασία με την οποία μία κλήση γεννιέται καθώς και η διαδικασία με την οποία καταφτάνει στο σύστημα (διαδικασία άφιξης). Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζουμε το μοντέλο Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου (βλ.) για το οποίο θεωρούμε ότι οι απαιτήσεις για εξυπηρέτηση από μία κατηγορία υπηρεσιών k

φτάνουν στο σύστημα σύμφωνα με μία διαδικασία Poisson, επομένως θεωρούμε τον τυχαίο τρόπο γεννήσεως μιας κλήσης. Για να μπορέσουμε να χαρακτηρίσουμε ως «τυχαία» την άφιξη κλήσεων σε ένα οποιοδήποτε σύστημα εξυπηρέτησης είναι αναγκαίο να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Η πιθανότητα $P_1(\Delta t)$ ότι μία κλήση θα γεννηθεί σε χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t]$ τείνει στο $\lambda \Delta t$, χωρίς να εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια t , όπου λ είναι σταθερός αριθμός.
- Η πιθανότητα να γεννηθούν δύο ή περισσότερες κλήσεις μέσα στο χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t]$ πρέπει να τείνει στο μηδέν.
- Η γέννηση των κλήσεων να είναι ανεξάρτητη η μία από την άλλη.

Ως αποτέλεσμα, η τυχαία διαδικασία άφιξης που προκύπτει ονομάζεται Poisson, δεδομένου ότι η πιθανότητα άφιξης εντός του χρονικού διαστήματος Δt είναι $\lambda \Delta t$ και ισχύει ότι δεν εξαρτάται από οποιαδήποτε γνώση του παρελθόντος. Τέλος, η κατανομή Poisson περιγράφεται από τον τύπο που ακολουθεί [11]:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad \text{όπου } \lambda \text{ ο ρυθμός άφιξης κλήσεων} \quad (2.1)$$

2.2.2 Υπολογισμός Πιθανότητας Απώλειας Κλήσης

Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη ενός μοντέλου τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι η μέθοδος με την οποία υπολογίζεται η πιθανότητα απώλειας μιας κλήσης, P_{b_k} , μιας υπηρεσίας k η οποία απαιτεί b_k bandwidth units. Ορίζοντας την πιθανότητα μόνιμου καταστάσεως και θεωρώντας Ω ως το σύνολο των δυνατών καταστάσεων παίρνουμε:

$$P_{b_k} = \sum_{\mathbf{n} \in B_k^+} P(\mathbf{n}), \quad B_k^+ = \{\mathbf{n} \in \Omega : \mathbf{n}_k^+ \notin \Omega\} \quad (2.2)$$

Από την παραπάνω σχέση, προκύπτει πως όταν φτάνει στο σύστημα μια κλήση υπηρεσίας k αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σύστημα να βρεθεί σε κατάσταση η οποία δεν ανήκει στο Ω [11]. Έτσι, η κλήση μπλοκάρεται.

Ως $P(\mathbf{n})$ χαρακτηρίζουμε την πιθανότητα μόνιμης κατάστασης για διάθεση πόρων του συστήματος χωρίς περιορισμούς και ορίζεται ως εξής:

$$P(\mathbf{n}) = G^{-1} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right), \quad G \equiv G(\Omega) = \sum_{\mathbf{n} \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right) \quad (2.3)$$

2.2.3 Πιθανότητα Μόνιμης Κατάστασης

Στις τηλεπικοινωνίες η πιθανότητα μόνιμης κατάσταση ή κατάσταση ισορροπίας, αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία οι βασικές παράμετροι του συστήματος, όπως ροή δεδομένων, χρήση των πόρων, απόδοση κ.α., παραμένουν σταθερές ή κυμαίνονται εντός ενός σύνολο προβλεπόμενων τιμών. Αυτές οι προβλεπόμενες τιμές αναφέρονται σε ένα εύρος τιμών που είναι αναμενόμενες και αποδεκτές βάσει των στατιστικών μοντέλων και των ιστορικών δεδομένων λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή παρουσιάζουν στατικές διακυμάνσεις.

Με άλλα λόγια, το σύστημα βρίσκεται σε μία κατάσταση όπου οι προσωρινές διακυμάνσεις και οι αρχικές συνθήκες δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την λειτουργία του.

2.2.4 Υπολογισμός Πιθανότητας Απώλειας Κλήσης Μέσω Αναδρομικού Τύπου: Kaufman & Roberts

Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σηματοδοτείται από την ανάγκη εξυπηρέτησης ολοένα αυξανόμενου φόρτου δεδομένων, καθώς και την αύξηση των υποστηριζόμενων υπηρεσιών, με σκοπό να ανταποκριθούν στον συνεχώς αυξανόμενο όγκο χρηστών. Αυτό οδήγησε στην εύρεση ενός απλού μονοδιάστατου τύπου για των υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεων, στα αντίστοιχα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Όταν μιλάμε για συστήματα με πολιτική πλήρους διάθεσης, η σταθερά κανονικοποίησης, δηλαδή η $G(\Omega)$, ορίζεται, επιπλέον, ως $G(C, K)$. Έχοντας ως απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της απώλειας κλήσης μιας υπηρεσίας k , P_{b_k} , θεωρούμε υποσύνολο Ω_k του Ω , το οποίο ορίζεται ως $\Omega_k = \{n \in \Omega : \mathbf{nb} \leq C - b_k\}$. Μία κλήση υπηρεσίας k θα εξυπηρετηθεί από το σύστημα όταν αυτό βρίσκεται σε οποιαδήποτε κατάσταση του Ω_k . Όπως είδαμε προηγουμένως, το σύνολο όλων των δυνατών καταστάσεων είναι $\sum_{n \in \Omega_k} P(n)$, επομένως η πιθανότητα απώλειας κλήσης της υπηρεσίας k είναι [11]:

$$P_{b_k} = 1 - \sum_{n \in \Omega_k} P(n) \quad (2.4)$$

και από τη σχέση (2.3) έχουμε:

$$P_{b_k} = 1 - \frac{\sum_{n \in \Omega_k} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)}{\sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)} \Rightarrow P_{b_k} = 1 - \frac{G(C - b_k, K)}{G(C, K)} \quad (2.5)$$

Το $G(C, K)$ υπολογίζεται, με τη σειρά του, από τον ακόλουθο αναδρομικό τύπο:

$$G(j, k) = \sum_{l=0}^{\lfloor j/b_k \rfloor} \frac{a_k^l}{l!} G(j - lb_k, k - 1), \quad k = 2, \dots, K \ \& \ j = 0, 1, \dots, C \quad (2.6)$$

$$G(j, 1) = \sum_{l=0}^{\lfloor j/b_1 \rfloor} \frac{a_1^l}{l!}, \quad j = 0, 1, \dots, C \quad (2.7)$$

Από τους παραπάνω αναδρομικούς τύπους, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τα στοιχεία ενός πίνακα διαστάσεων $[C \times K]$. Ωστόσο, σε συστήματα όπου τόσο το C όσο και K είναι μεγάλα, οι προαναφερθέντες υπολογισμοί γίνονται αρκετά πολύπλοκοι. Ως αποτέλεσμα, με βάση την [11] παρουσιάζεται, στην συνέχεια, το ένας απλός τρόπος υπολογισμού του CBP (Call Blocking Probability) μέσω ενός μονοδιάστατου αναδρομικού τύπου. Αρχικά, θεωρούμε σύνολο καταστάσεων $\Omega_j = \{\mathbf{n} \in \Omega : \mathbf{nb} = j\}$, όπου ακριβώς j μονάδες εύρους ζώνης (trunks) είναι κατειλημμένες.

Η πιθανότητα να είναι j το πλήθος των κατειλημμένων γραμμών στην κατάσταση ισορροπίας είναι:

$$q(j) = \sum_{\mathbf{n} \in \Omega_j} P(\mathbf{n}) = \sum_{\mathbf{n} \in \Omega_j} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} G^{-1}(C, K) \right) \quad (2.8)$$

Μ την πιθανότητα απώλειας κλήσεως P_{b_k} να εκφράζεται ως εξής:

$$P_{b_k} = \sum_{\{\mathbf{n} : \mathbf{nb} > C - b_k\}} P(\mathbf{n}) \quad (2.9)$$

Παρατηρούμε CBP της υπηρεσίας k όταν έχουμε $j = \mathbf{nb} > C - b_k$ κατειλημμένες γραμμές. Ως αποτέλεσμα, απορρέει η πιθανότητα P_{b_k} ως άθροισμα των πιθανοτήτων $q(j)$ με $j > C - b_k$:

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_k+1}^C q(j) = \sum_{j=0}^{b_k-1} q(C-j) \quad (2.10)$$

Εν τέλει, ο υπολογισμός της P_{b_k} βασίζεται στην ανάδειξη ενός μονοδιάστατου αναδρομικού τύπου για τον υπολογισμό των $q(j)$. Για την εύρεση του ανωτέρου αναδρομικού τύπου, αρχικά, θεωρούμε ότι η P_{b_k} μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$P_{b_k} = \frac{a_k - a_k^*}{a_k} \quad (2.11)$$

όπου:

- a_k : το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των κλήσεων της υπηρεσίας k ,
- a_k^* : το φορτίο κίνησης που διεκπεραιώνεται στο σύστημα.

Έχοντας ως γνώμονα τις ιδιότητες του φορτίου κίνησης, το φορτίο κίνησης a_k^* αποτελεί την μέση τιμή του αριθμού των κλήσεων της υπηρεσίας k , n_k . Έτσι έχουμε:

$$E[n_k] = a_k^* = a_k(1 - P_{b_k}) \quad (2.12)$$

Στην συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας το αριστερό μέλος της (2.12) με b_k και παίρνοντας και το άθροισμα για $k = 1, \dots, K$ παίρνουμε την μέση τιμή των δεσμευμένων γραμμών του συστήματος $E[j]$:

$$E[j] = \sum_{k=1}^K b_k E[n_k] \quad (2.13)$$

Από τον ορισμό της μέσης τιμής απορρέει ότι:

$$E[j] = \sum_{j=0}^c j q(j) \quad (2.14)$$

Επιπλέον ισχύει ότι:

$$E[n_k] = a_k(1 - P_{b_k}) = a_k \sum_{\mathbf{n} \in \Omega_k} P(\mathbf{n}) = a_k \sum_{j=0}^{c-b_k} q(j) \quad (2.15)$$

Πολλαπλασιάζοντας την (2.15) και στα δύο μέλη με b_k και παίρνοντας το άθροισμα για $k = 1, \dots, K$ παίρνουμε:

$$\sum_{k=1}^K b_k E[n_k] = \sum_{k=1}^K a_k b_k \sum_{j=0}^{c-b_k} q(j) = \sum_{j=0}^c \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) \quad (2.16)$$

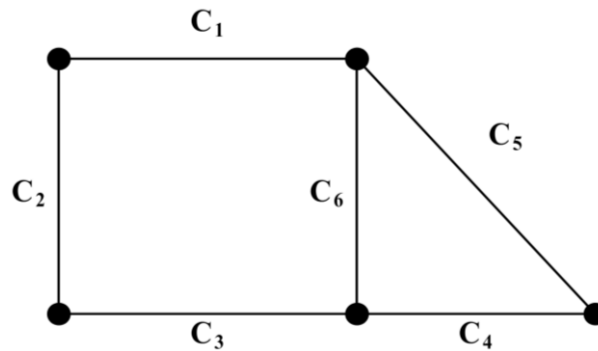
Εξαιτίας της (2.13) και μέσω των (2.15) και (2.14) παίρνουμε:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k), & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.17)$$

Η $q(j)$ είναι η μη κανονικοποιημένη πιθανότητα να υπάρχουν j κατειλημμένες μονάδες στο σύστημα. Διαιρώντας με $G = \sum_{j=0}^C q(j)$ προκύπτει ότι $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$, που είναι η κανονικοποιημένη μορφή της $q(j)$. Ο μονοδιάστατος αναδρομικός τύπος (2.17) είναι γνωστός ως αναδρομικός τύπος των Kaufman & Roberts. [11]

2.3 Δίκτυα Απωλειών Τύπου Γινομένου

Στο **Σχήμα 2:1**, που ακολουθεί, φαίνεται τηλεφωνικό δίκτυο που απαρτίζεται από σύνολο κόμβων και ζεύξεων, όπου οποιαδήποτε ζεύξη (link) l έχει πεπερασμένη χωρητικότητα C_l . Αξίζει να σημειωθεί πως μία ή περισσότερες συνεχόμενες ζεύξεις απαρτίζουν μία διαδρομή (route), ενώ παράλληλα μπορεί να υπάρχουν μία ή περισσότερες διαδρομές που συνδέουν ζευγάρι κόμβων [11].



Σχήμα 2:1: Δίκτυο έξι ζεύξεων.

Ένα δίκτυο σταθερής δρομολόγησης (fixed routing) ορίζεται ως ένα δίκτυο στο οποίο η διαδρομή που παρέχει μια σύνδεση μεταξύ ενός κόμβου προέλευσης και ενός κόμβου προορισμού είναι σταθερή για κάθε κατηγορία υπηρεσιών.

Ας θεωρήσουμε ότι σε ένα δίκτυο σταθερής δρομολόγησης αποτελείται από L συνδέσεις (links), με κάθε link, $l = 1, \dots, L$ έχει σταθερή χωρητικότητα C_l μονάδες εύρους ζώνης. Το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετεί κλήσεις κατηγορίας υπηρεσιών k , οι οποίες καταφτάνουν στο δίκτυο ακολουθώντας μία διαδικασία Poisson (βλ. 2.2.1) με ρυθμό λ_k , απαιτώντας b_k μονάδες εύρους ζώνης και έχοντας κατανομημένο χρόνο εξυπηρέτησης με μέση τιμή μ_k^{-1} . Έστω, R_k η σταθερή διαδρομή των κλήσεων της κλάσης k , όπου $R_k \subseteq \{1, \dots, L\}$. Μία κλήση της υπηρεσίας k γίνεται αποδεκτή στο σύστημα, αν και μόνο αν, οι b_k μονάδες εύρους ζώνης είναι διαθέσιμες σε κάθε link, $l \in R_k$, ειδάλλως η κλήση μπλοκάρεται και χάνεται. Το παραπάνω στοχαστικό σύστημα είναι γνωστό ως δίκτυο απωλειών μορφής γινομένου. [10]

Επιπλέον, ορίζουμε ως n_k τον αριθμό των κλήσεων της υπηρεσίας k του συστήματος και ως $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_K)$ το αντίστοιχο διάνυσμα μόνιμης κατάστασης όλων των κατηγοριών υπηρεσιών του δικτύου δρομολόγησης, όπου γνωρίζουμε τα $n_k (k = 1, \dots, K)$. Αν K_l είναι το σύνολο των κλάσεων υπηρεσιών, των οποίων οι

κλήσεις εξυπηρετούνται στη ζεύξη l , δηλαδή $K_l = \{k \in K : l \in R_k\}$, τότε το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος, Ω , δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Omega = \left\{ \mathbf{n} \in I^K : \sum_{k \in K_l} n_k b_n \leq C_l, \quad l = 1, \dots, L \right\} \quad (2.18)$$

Επίσης, ορίζουμε ως Ω_k το υποσύνολο των καταστάσεων στις οποίες μία κλήση της υπηρεσίας k γίνεται αποδεκτή από το δίκτυο κατά την άφιξη της, και ορίζεται:

$$\Omega_k = \left\{ \mathbf{n} \in \Omega : \sum_{k \in K_l} n_k b_n \leq C_l - b_k, \quad l \in R_k \right\} \quad (2.19)$$

2.3.1 Πιθανότητες Απώλειας Κλήσης & Σταθερής Κατάστασης

Η πιθανότητα σταθερής κατάστασης ενός δικτύου απωλειών προκύπτει από την τύπο (2.3), τον οποίο είδαμε στο κεφάλαιο 2.2.2, ο οποίος είναι ο ακόλουθος:

$$P(\mathbf{n}) = G^{-1} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right), \quad G = \sum_{\mathbf{n} \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)$$

Έπειτα, ορίζουμε ως $a_k = \lambda_k / \mu_k$ το προσφερόμενο φορτίο κίνησης της υπηρεσίας k και έτσι η CBP μιας υπηρεσίας k δίνεται από τον τύπο (2.5), δηλαδή:

$$B_k \equiv P_{b_k} = 1 - \frac{\sum_{\mathbf{n} \in \Omega_k} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)}{\sum_{\mathbf{n} \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)} \Rightarrow B_k = 1 - \frac{G(C - b_k, K)}{G(C, K)}$$

Ο παραπάνω τύπος είναι αυτός που δικαιολογεί τον όρο «δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου».

2.3.2 Σταθερό Δίκτυο Δρομολόγησης Που Υποστηρίζει Μία Μόνο Κατηγορία Υπηρεσιών

Υποθέτουμε ότι ένα σταθερό δίκτυο δρομολόγησης υποστηρίζει κλήσεις μιας μόνο υπηρεσίας, επομένως ισχύει ότι $b_k = 1$, $k \in K$. Ορίζουμε ως \bar{a}_l το συνολικό

προσφερόμενο φορτίο κίνησης του κάθε link, και δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί [11]:

$$\bar{\alpha}_l = \sum_{k \in K_l} a_k \quad (2.20)$$

Έστω, τώρα, ότι $E_C(a)$ η CBP ενός συστήματος απωλειών (Erlang) με προσφερόμενο φορτίο a και C εξυπηρετητές (b.u.). Από την Erlang B-formula [10] παίρνουμε:

$$E_C(a) = \frac{\frac{a^C}{C!}}{\sum_{i=0}^C \frac{a^i}{i!}} \quad (2.21)$$

Η CBP για μία κατηγορία κλήσεων υπηρεσίας k , B_k , μπορεί να περιοριστεί προς τα πάνω (άνω όριο) από το ακόλουθο γινόμενο το οποίο είναι γνωστό ως όριο γινομένου (product bound) [11]:

$$B_k \leq 1 - \prod_{k \in R_k} (1 - E_{C_l}(\bar{\alpha}_l)) \quad (2.22)$$

Αυτό το γινόμενο-όριο παρέχει μια καλή προσέγγιση της CBP μόνο εάν ο αριθμός των συνδέσμων που χρησιμοποιούνται από διαδρομές που ακολουθούν οι κλήσεις στο δίκτυο είναι μικρός. Αν όχι, αυτό το όριο είναι αναξιόπιστο, για παράδειγμα θεωρώντας περίπτωση όπου όλα τα link έχουν χωρητικότητα C και υπό την υπόθεση ότι υπάρχει μία μόνο υπηρεσία που χρησιμοποιεί όλα τα link.

Δηλαδή έχουμε, $\bar{\alpha}_l = a_1$ για όλες τα link $l = 1, \dots, L$. Το όριο γινομένου γίνεται:

$$B_k = B_1 \leq 1 - (1 - E_C(a_1))^L \quad (2.23)$$

Το όριο (2.23) πλησιάζει τη μονάδα όταν αυξάνεται το L , αν και $B_1 = E_C(a_1)$ για κάθε link και, κατά συνέπεια, για ολόκληρο το δίκτυο σταθερής δρομολόγησης.

Μια καλύτερη προσέγγιση της CBP [10] επιτυγχάνεται με τη μείωση του προσφερόμενου φορτίου κίνησης, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη ο αποκλεισμός στους άλλους συνδέσμους (εκτός του l). Συγκεκριμένα, αυτό γίνεται αντικαθιστώντας στην (2.20) τον όρο a_k με τον $a_k r_k(l)$, όπου ο μειωμένος παράγοντας $r_k(l)$ είναι η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον 1 b.u. διαθέσιμο σε κάθε link της διαδρομής $R_k - \{l\}$. Συμβολίζοντας τη προσεγγιστική CBP στο link l με V_l , λαμβάνουμε:

$$V_l = E_{C_l}(\bar{\alpha}_l) = E_{C_l} \left(\sum_{k \in K_l} a_k r_k(l) \right), \quad l = 1, \dots, L \quad (2.24)$$

Στη συνέχεια, υποθέτοντας ότι ο αποκλεισμός είναι ανεξάρτητος από σύνδεσμο σε σύνδεσμο (μια υπόθεση που είναι εσφαλμένη), έχουμε:

$$r_k(l) = \prod_{i \in R_k - \{l\}} (1 - V_i) \quad (2.25)$$

Ο συνδυασμός των (2.24) και (2.25) δίνει την ακόλουθη εξίσωση σταθερού σημείου για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της CBP στο σύνδεσμο l :

$$V_l = E_{C_l} \sum_{k \in K_l} a_k \prod_{i \in R_k - \{l\}} (1 - V_i), \quad l = 1, \dots, L \quad (2.26)$$

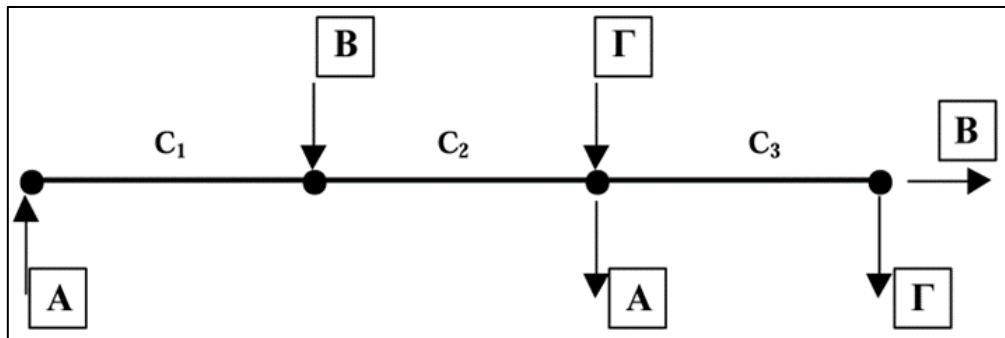
Υποθέτοντας και πάλι ότι η παρεμπόδιση είναι ανεξάρτητη σε κάθε link, έχουμε την ακόλουθη προσέγγιση της CBP της κατηγορίας k :

$$B_k \approx 1 - \prod_{i \in R_k} (1 - V_i), \quad k = 1, \dots, K \quad (2.27)$$

Ο συνδυασμός των (2.26) και (2.27) συνθέτει την προσέγγιση μειωμένου φορτίου (reduced load approximation), η οποία είναι γνωστή στην διεθνή βιβλιογραφία και ως «Εξίσωση Σταθερού Σημείου Erlang – Erlang Fixed Point Equation», για σταθερά δίκτυα δρομολόγησης που υποστηρίζουν ροές κυκλοφορίας μιας μόνο κατηγορίας υπηρεσιών.

Παράδειγμα 2.1 [10]

Για την καλύτερη κατανόηση της παραπάνω ανάλυσης, θεωρούμε το τηλεφωνικό δίκτυο, της εικόνας που ακολουθεί, το οποίο υποστηρίζει $K = 3$ ροές κυκλοφορίας (διαδρομές), με προσφερόμενο φορτίο $A = B = C = 5 \text{ erl}$ και η χωρητικότητα του κάθε link να είναι $C_1 = C_2 = C_3 = 15 \text{ b.u.}$



Σχήμα 2:2: Χρήση της προσέγγισης RLA σε τηλεφωνικό δίκτυο τριών ζεύξεων.

Σύμφωνα με τις (2.24) και (2.25), για $l = 1,2,3$ έχουμε:

$$\begin{aligned} V_1 &= E_{C_1}(a_A r_A(1)) & r_A(1) &= 1 - V_2 & r_A(2) &= 1 - V_1 \\ V_2 &= E_{C_2}(a_A r_A(2) + a_B r_B(2)) & r_B(2) &= 1 - V_3 & r_B(3) &= 1 - V_2 \\ V_3 &= E_{C_3}(a_B r_B(3) + a_C r_C(3)) & r_C(3) &= 1 & & \end{aligned}$$

Έτσι, έχοντας ως γνώμονα τις (2.26) και (2.27) παίρνουμε:

$$\begin{aligned} V_1 &= E_{C_1}(a_A(1 - V_2)) & B_A &\approx 1 - (1 - V_1)(1 - V_2) \\ V_2 &= E_{C_2}(a_A(1 - V_1) + a_B(1 - V_3)) & B_B &\approx 1 - (1 - V_2)(1 - V_3) \\ V_3 &= E_{C_3}(a_B(1 - V_2) + a_C) & B_C &\approx 1 - (1 - V_3) = V_3 \end{aligned}$$

Για να λύσουμε το παραπάνω σύστημα εξισώσεων ακολουθούμε την ακόλουθη διαδικασία, αρχικά θέτουμε $V_1 = V_2 = V_3 = 1$, δηλαδή υποθέτουμε πως η CBP σε κάθε link είναι 100%. Έπειτα, αντικαθιστούμε τις τιμές αυτές στο δεξιό μέλος των εξισώσεων και υπολογίζουμε τις νέες τιμές των $(V_1, V_2, V_3) = (0, 0, 0.000157)$ και τις αντίστοιχες τιμές των $(B_A, B_B, B_C) \approx (1, 0.000157, 0.000157)$. Επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς θεωρώντας τις νέες τιμές ως αρχικές τιμές κ.ο.κ. Τερματίζουμε αυτή την επαναληπτική διαδικασία όταν οι νέες τιμές διαφέρουν από τις προηγούμενες τιμές κατά λιγότερο από μια προκαθορισμένη τιμή, π.χ. 10^{-5} , σε αυτό το παράδειγμα, χρειαζόμαστε οκτώ επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Επανάληψη	V_1	V_2	V_3	B_A	B_B	B_C
1	0.000000	0.000000	0.000157	1.000000	0.000157	0.000157
2	0.000157	0.036466	0.180316	0.036618	0.210207	0.180316
3	0.000013	0.010778	0.168421	0.010791	0.177384	0.168421
4	0.000020	0.019001	0.176808	0.019021	0.192450	0.176808
5	0.000018	0.011104	0.176442	0.011122	0.185557	0.176442
6	0.000018	0.011138	0.176701	0.011156	0.185871	0.176701
7	0.000018	0.011114	0.176690	0.011133	0.185841	0.176690
8	0.000018	0.011158	0.176698	0.011176	0.185885	0.176698

2.3.3 Η Μέθοδος Μειωμένου Φορτίου Για Δίκτυα Πολλαπλών Υπηρεσιών

Θεωρούμε ότι K κατηγορίες υπηρεσιών φιλοξενούνται σε ένα σταθερό δίκτυο δρομολόγησης L συνδέσεων, σύμφωνα με το σύστημα υπηρεσιών που περιγράφεται στο κεφάλαιο (2.3). Έστω, ότι μία κλήση υπηρεσίας k διέρχεται από έναν σύνδεσμο l χωρητικότητας C_l b.u. και υφίσταται εκεί CBP, B_{lk} . Το B_{lk} μπορεί να προσδιοριστεί κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο τύπο:

$$B_{lk}[C_l; a_x, \quad x \in K_l] = \sum_{j=C_l-b_k+1}^{C_l} G^{-1}q(j) \quad (2.28)$$

όπου υποθέτουμε πως το προσφερόμενο φορτίο κυκλοφορίας a_x της υπηρεσίας x σε ολόκληρο το σταθερό δίκτυο δρομολόγησης, είναι το ίδιο με το προσφερόμενο φορτίο κυκλοφορίας της υπηρεσίας x στον σύνδεσμο στον σύνδεσμο l . Το $q(j)$ είναι η μη κανονικοποιημένη πιθανότητα να καταλαμβάνονται j μονάδες εύρους ζώνης σε αυτό το σύνδεσμο (υπολογίζεται μέσω του αναδρομικού τύπου Kaufman & Roberts, (2.17) για όλα τα $x \in K_l = \{x \in K : l \in R_x\}$) και G είναι η αντίστοιχη σταθερά κανονικοποίησης.

Στην συνέχεια, θέτουμε ως V_{lk} την προσεγγιστική πιθανότητα ύπαρξης λιγότερων από b_k μονάδων εύρους ζώνης στο link l . Επιπροσθέτως, βασιζόμενοι στην υπόθεση ότι τα γεγονότα δεν εξαρτώνται το ένα από το άλλο από link σε link και οι κλήσεις της υπηρεσίας x καταφτάνουν στο link, l , ακολουθώντας μία διαδικασία Poisson με μειωμένο προσφερόμενο φορτίο κίνησης, δηλαδή:

$$a_x = a_x \prod_{i \in R_x - \{l\}} (1 - V_{ix}), \quad x \in K_l \quad (2.29)$$

Έτσι, με βάση την ανεξαρτησία των link έχουμε:

$$V_{lk} = B_{lk} \left[C_l; a_x \prod_{i \in R_x - \{l\}} (1 - V_{ix}), \quad x \in K_l \right], \quad k \in K_l, \quad l = 1, \dots, L \quad (2.30)$$

Βασιζόμενοι στην εξίσωση (2.30), ο προσεγγιστικός υπολογισμός της CBP της κατηγορίας υπηρεσιών k , B_k , σε ολόκληρη την διαδρομή (route) R_k , δίνεται από τον παρακάτω εξίσωση:

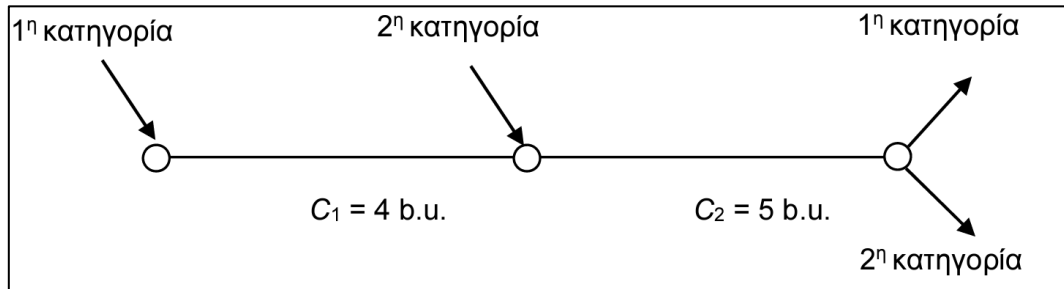
$$B_k \approx 1 - \prod_{l \in R_k} (1 - V_{lk}), \quad k = 1, \dots, K \quad (2.31)$$

Ο συνδυασμός των (2.30) και (2.31) αποτελεί την μέθοδο RLA για σταθερά δίκτυα δρομολόγησης που υποστηρίζουν κλήσεις διαφορετικής κατηγορίας υπηρεσιών. Οι

τιμές του V_{lk} μπορούν να ληφθούν μέσω επαναλαμβανόμενων αντικαταστάσεων, όπως δείχνει το παρακάτω παράδειγμα [10].

Παράδειγμα 2.2

Θεωρούμε το δίκτυο της παρακάτω εικόνας, με σκοπό να υπολογίσουμε τη CBP και των δύο κλάσεων υπηρεσιών, εφαρμόζοντας τη μέθοδο RLA. Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο αποτελείται από δύο link, $C_1 = 4 \text{ b.u.}$, $C_2 = 5 \text{ b.u.}$ και εξυπηρετεί δύο κλάσεις υπηρεσιών ($K = 2$), των οποίων οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι $b_1 = 1$, $b_2 = 2$. Τέλος, το προσφερόμενο φορτίο κίνησης ανέρχεται στα $\alpha_1 = \alpha_2 = 1 \text{ erl.}$



Σχήμα 2:3: Δύο κατηγορίες υπηρεσιών που φιλοξενούνται σε ένα δίκτυο σταθερής δρομολόγησης δύο συνδέσμων

Έστω B_{11} και B_{21} οι CBP της πρώτης κλάσης υπηρεσιών στο πρώτο και στο δεύτερο link, αντίστοιχα, και έστω B_{22} η CBP της δεύτερης κλάσης υπηρεσιών στο δεύτερο link. Τότε, σύμφωνα με την (2.28) έχουμε:

$$B_{11}[C_1; a_x, \quad x \in K_1] = \sum_{j=C_1-b_1+1}^{C_1} G^{-1}q(j), \quad (2.32\alpha)$$

$$B_{21}[C_2; a_x, \quad x \in K_2] = \sum_{j=C_2-b_1+1}^{C_2} G^{-1}q(j), \quad (2.32\beta)$$

$$B_{22}[C_2; a_x, \quad x \in K_2] = \sum_{j=C_2-b_2+1}^{C_2} G^{-1}q(j), \quad (2.32\gamma)$$

Όπου οι τιμές $q(j)$ καθορίζονται από τον αναδρομικό τύπο Kaufman & Roberts (2.17). Με βάση τον τύπο (2.25), προσδιορίζουμε ο μειωμένο προσφερόμενο φορτίο κίνησης της κλάσης υπηρεσιών 1 προς το πρώτο και το δεύτερο link με τις (2.32α) και (2.32β), αντίστοιχα, και το μειωμένο προσφερόμενο φορτίο κίνησης της κλάσης υπηρεσιών 2 προς το δεύτερο link με την (2.32γ):

$$a_x \prod_{i \in R_x - \{l\}} (1 - V_{ix}) \xrightarrow{x=1, l=1} a_1 \prod_{i \in R_1 - \{1\}} (1 - V_{i1}) = a_1 (1 - V_{21}), \quad (2.33\alpha)$$

$$a_x \prod_{i \in R_x - \{l\}} (1 - V_{ix}) \xrightarrow{x=1, l=2} a_1 \prod_{i \in R_1 - \{2\}} (1 - V_{i1}) = a_1(1 - V_{11}), \quad (2.33\beta)$$

$$a_x \prod_{i \in R_x - \{l\}} (1 - V_{ix}) \xrightarrow{x=2, l=2} a_2 \prod_{i \in R_2 - \{2\}} (1 - V_{i1}) = a_2, \quad (2.33\alpha)$$

Στη συνέχεια, σύμφωνα με την (2.30), η βελτιωμένη CBP της πρώτης κλάσης υπηρεσιών στο πρώτο και δεύτερο link, V_{11} και V_{21} , αντίστοιχα, και η βελτιωμένη CBP της δεύτερης κλάσης υπηρεσιών στο δεύτερο link, V_{22} , είναι:

$$V_{11} = B_{11}[C_1; a_1(1 - V_{21})], \quad (2.34\alpha)$$

$$V_{21} = B_{21}[C_2; a_1(1 - V_{11}), \alpha_2], \quad (2.34\beta)$$

$$V_{22} = B_{22}[C_2; a_1(1 - V_{11}), \alpha_2], \quad (2.34\gamma)$$

Παρακάτω, υπολογίζουμε τα V_{11}, V_{21}, V_{22} με επαναλαμβανόμενες αντικαταστάσεις, ξεκινώντας με $V_{11} = V_{21} = V_{22} = 1$:

Επανάληψη 1)

$$V_{11} = B_{11}[C_1; 0] = 0.0$$

$$V_{21} = B_{21}[C_2; 0] = 0.0$$

$$V_{22} = B_{22}[C_2; 0, \alpha_2] = \sum_{j=C_2-b_2+1}^{C_2} G^{-1}q(j) = \frac{q(4) + q(5)}{G} = \frac{0.5}{2.5} = 0.2$$

Επανάληψη 2)

$$V_{11} = B_{11}[C_1; \alpha_1] = \sum_{j=C_1-b_1+1}^{C_1} G^{-1}q(j) = \frac{q(4)}{G} = \frac{0.041667}{2.70833} = 0.01538$$

$$V_{21} = B_{21}[C_2; \alpha_1, \alpha_2] = \sum_{j=C_2-b_1+1}^{C_2} G^{-1}q(j) = \frac{q(5)}{G} = \frac{0.675}{6.38333} = 0.10574$$

$$V_{22} = B_{22}[C_2; \alpha_1, \alpha_1] = \sum_{j=C_2-b_2+1}^{C_2} G^{-1}q(j) = \frac{q(4) + q(5)}{G} = \frac{1.71667}{6.38333} = 0.268993$$

Επανάληψη 3)

$$V_{11} = B_{11}[C_1; \alpha_1(1 - 0.10574)] \Rightarrow V_{11} = 0.01092$$

$$V_{21} = B_{21}[C_2; \alpha_1(1 - 0.01538), \alpha_2] \Rightarrow V_{21} = 0.10469$$

$$V_{22} = B_{22}[C_2; a_1(1 - 0.01538), a_2] \Rightarrow V_{22} = 0.26731$$

...

Επανάληψη 6)

$$V_{11} = 0.01095 \quad V_{21} = 0.10499 \quad V_{22} = 0.26777$$

Σταματάμε στην επανάληψη 6, καθώς οι τιμές των V_{11} , V_{21} και V_{22} είναι αρκετά κοντά σε αυτές που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα. Πιο συγκεκριμένα, το κριτήριο διαφοράς που έχουμε θέσει στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 0.0001, δηλαδή αν οι προηγούμενες από τις επόμενες τιμές έχουν μικρότερη διαφορά, από το κριτήριο που έχουμε θέσει, τότε σταματάμε την επαναληπτική διαδικασία.

Τέλος, σύμφωνα με την (2.31) υπολογίζουμε τις CBP:

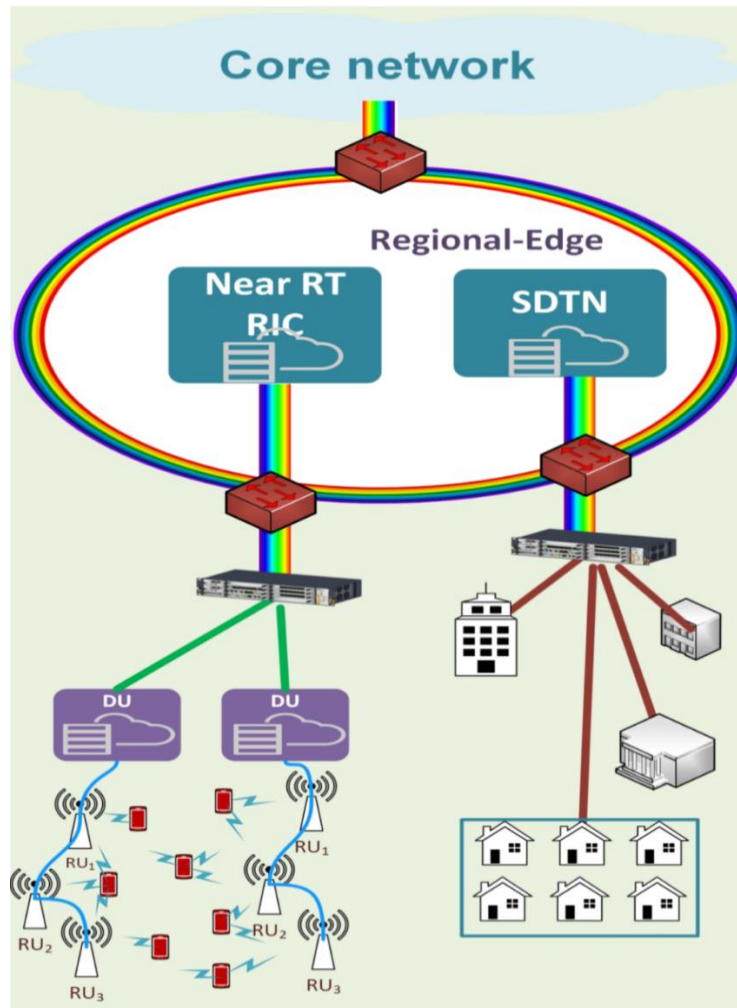
$$B_1 \approx 1 - (1 - V_{11})(1 - V_{21}) = 1 - (1 - 0.010945)(1 - 0.10499) = 0.11479 = \mathbf{11.479\%}$$

$$B_2 \approx 1 - (1 - V_{22}) = V_{22} = 0.26777 = \mathbf{26.777\%}$$

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή Του Μοντέλου RLA Σε Δίκτυο 6^{ης} Γενιάς Βασιζόμενη Στην Τεχνολογία Cell-Free

3.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Εξετάζουμε μία διαμόρφωση συγκλινόμενου οπτικού – ασύρματου δικτύου που ενσωματώνει την έννοια του Cell Free (CF), όπως απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί, βλ. **Σχήμα 3:1**. Τα Radio Units (RUs) διασυνδέονται με τα Distribution Units (DUs) θεωρώντας συνδέσεις fronthaul που ακολουθούν τοπολογία διαύλου, όπως στην περίπτωση των Radio Stripes [12]. Στον περιφερειακό τομέα άκρων, ένα τοπικό δίκτυο για τη διασύνδεση μιας κατακεντρωμένης υποδομής ακραίων σημείων με κέντρα δεδομένων δομημένα σε δύο επίπεδα, με κόμβους τόσο στην περιφερειακό τομέα ακραίων σημείων όσο και στον τομέα ραδιοακραίων σημείων. Οι ευφυείς λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου του Radio Access Network (RAN) ενσωματώνονται στον Ευφυή Ελεγκτή RAN (RIC). Ο RIC είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών που σχετίζονται με τη Διαχείριση Ραδιοπόρων (RRM) και το Δίκτυο Αυτό-Οργάνωσης (SON). Οι απαιτούμενες λειτουργίες SDN (Software Defined Networking) φιλοξενούνται από τον RIC Near-Real Time (Near-RT), προκειμένου να παρέχεται αντίδραση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο στις μεταβολές της κυκλοφορίας. Παράλληλα, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου εξετάζει ένα midhaul οπτικό δίκτυο, το οποίο διασυνδέει τους περιφερειακούς κόμβους άκρων μέσω μιας τοπολογίας δακτυλίου. Η τοπολογία αυτή, αποτελεί λύση Σταθερής-Κινητής Σύγκλισης (FMC), δεδομένου ότι επιτρέπει την πρόσβαση σε κοινόχρηστους πόρους τόσο σε σταθερές εφαρμογές, όπως Fiber-To-The-Home (FTTH), όσο και σε κινητές εφαρμογές που εκτελούνται στο Radio Edge. Η λύση FMC υλοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τοπολογίες PtMP (Point to MultiPoint) (π.χ. Παθητικά Οπτικά Δίκτυα) για τη διασύνδεση των διαφόρων τμημάτων του δικτύου. Ως εκ τούτου, τόσο οι σταθεροί όσο και οι κινητοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται την ίδια περιφερειακή δικτυακή υποδομή, ενώ εξυπηρετούνται και οι δύο από το ίδιο δίκτυο κορμού. Η συγκέντρωση της κυκλοφορίας αυτής της υποδομής εκτελείται στην περιφερειακή άκρη υπό τον έλεγχο του ελεγκτή SDN που βρίσκεται στο Near-RT RIC. Για τον έλεγχο του δικτύου μεταφοράς, εξετάζεται ένας ελεγκτής SDTN (Software Defined Transport Network) για τον έλεγχο της συνάθροισης της κυκλοφορίας στους περιφερειακούς κόμβους, ενώ μπορεί να διαμορφώνει δυναμικά διάφορες παραμέτρους με βάση τις μεταβολές της κυκλοφορίας, π.χ. κατά τη διάρκεια περιόδων μεγάλης κίνησης, αξιοποιώντας τους πόρους άλλου τμήματος δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διασύνδεσης του Near-RT RIC με το SDTN, μέσω μιας διεπαφής SDNi. [13]



Σχήμα 3:1: Ένα δίκτυο 6G χωρίς κυψέλες, με βάση τη σύγκλιση οπτικών-ασύρματων δικτύων.

3.2 Περιγραφή Μοντέλου

Θεωρούμε την προαναφερθείσα αρχιτεκτονική δικτύου, η οποία παρέχει υπηρεσίες σε έναν αριθμό εξοπλισμών χρηστών (User Equipment, UE) και σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε πως κάθε χρήστης μπορεί να συνδέεται σε X πλήθος κεραιών, π.χ. 3 κεραιές. Έτσι, το απαιτούμενο εύρος ζώνης καλύπτεται από όλες τις κεραιές με τις οποίες συνδέεται ο χρήστης, ανάλογα με τη διαθεσιμότητά τους και τις συνθήκες του καναλιού. Όλα τα UEs είναι πανομοιότυπα και εξοπλισμένα με κεραιές MIMO (Multiple Input Multiple Output), καθένα από τις οποίες αποτελείται από N στοιχεία κεραιάς. Από την άλλη πλευρά, κάθε RU έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα R διαθέσιμων μπλοκ πόρων (Resource Blocks, RB), προκειμένου να εξυπηρετήσει τα UEs στην περιοχή κάλυψής του. Επιπλέον, θεωρούμε ότι κάθε RU είναι διασυνδεδεμένη με ένα DU μέσω ενός fronthaul bus link, με χωρητικότητα F μονάδων εύρους ζώνης (bandwidth units, b.u.). Επιπλέον, οι DUs διασυνδέονται με τον ελεγκτή SDN, ο οποίος βρίσκεται στο Near-RT RIC – υποθέτουμε ότι για την

εκτέλεση των κατάλληλων λειτουργιών του δικτύου χρησιμοποιούνται κέντρα δεδομένων (Data Centers, DCs) – θεωρούμε ότι το ραδιοδίκτυο υποστηρίζεται από ένα DC με χωρητικότητα C υπολογιστικών πόρων (computational resources, c.r.) – οι πόροι αυτοί αντιστοιχούν σε πόρους CPU και μνήμης που μπορούν να αξιοποιηθούν από τον ελεγκτή SDN στο Regional Edge για την εκτέλεση των λειτουργιών του δικτύου. Οι απαιτήσεις των UEs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε K διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών, όπου κάθε κατηγορία υπηρεσιών k ($k = 1, \dots, K$) έχει συγκεκριμένη απαίτηση πόρων r_k RBs στο RU, f_k b.u.στη σύνδεση fronthaul και c_k c.r. SDN. Οι απαιτήσεις για εξυπηρέτηση από μία κατηγορία υπηρεσιών k φτάνουν στο σύστημα σύμφωνα με μία διαδικασία Poisson με ρυθμό άφιξης λ_k , ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης μιας αίτησης h_k είναι μία εκθετική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή ίση με $1/\mu_k$. Όταν ένα UE της κλάσης υπηρεσίας k συνδέεται στο δίκτυο, καταλαμβάνονται πόροι τόσο στη ραδιοζεύξη όσο και στο fronthaul, ενώ οι υπολογιστικοί πόροι καταλαμβάνονται και στο ελεγκτή SDN για την εκτέλεση των δικτυακών λειτουργιών της σύνδεσης. Αναλυτικότερα, διατίθενται οι ακόλουθοι πόροι: α) r_k στο RU, β) f_k στο fronthaul και, γ) c_k στον ελεγκτή SDN. Ως εκ τούτου, υποθέτουμε ότι η ακολουθία των RUs, του fronthaul και του ελεγκτή SDN είναι ισοδύναμη ως ένα σταθερό δίκτυο δρομολόγησης, όπου οι απαιτούμενοι πόροι πρέπει να διατεθούν στις κοινές συνδέσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της CF φύσης του δικτύου, όταν ένα UE ζητά υπηρεσία, μπορεί να συνδέεται ταυτόχρονα με πολλές RUs. Υποθέτουμε ότι πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμα RBs σε όλες τις συνδεδεμένες RUs, προκειμένου να εξυπηρετηθεί το UE διαφορετικά, το αίτημα για εξυπηρέτηση απορρίπτεται. Συνεπώς, συμβολίζουμε την ακολουθία των RUs, του fronthaul και των υπολογιστικών στοιχείων δικτύου στο ελεγκτή SDN ως συνδέσεις που αποτελούν ένα σταθερό μονοπάτι P_k . Κατά συνέπεια, θεωρώντας τις N RUs που αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των RUs με τις οποίες συνδέεται ταυτόχρονα ένα UE, το fronthaul και τον ελεγκτή SDN, ο αριθμός των συνδέσεων της διαδρομής P_k ως το υποτιθέμενο δίκτυο δρομολόγησης είναι ίσος με $L = N + 2$. [13]

3.3 Μέθοδος Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου

Για να αξιολογήσουμε την απόδοση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής δικτύου, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου (Reduced Load Approximation, RLA) [10], προκειμένου να προσδιορίσουμε την απόδοση φραγής στο ισοδύναμο δίκτυο δρομολόγησης (και επομένως στο CF δίκτυο, βλ. **Σχήμα 3:1**). Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στο υπολογισμό της πιθανότητας να μην είναι διαθέσιμοι οι απαραίτητοι πόροι για την εξυπηρέτηση ενός αιτήματος μιας κατηγορίας υπηρεσιών k σε μία σταθερή διαδρομή P_k . Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο RLA, η πιθανότητα μπλοκαρίσματος (Blocking Probability, BP) ενός αιτήματος μιας κατηγορίας υπηρεσιών k σε μία συγκεκριμένη σύνδεση l ορίζεται ως εξής:

$$Q_k[L_l; a_k, k \in K] = \sum_{j=L_l-b_k+1}^{L_l} G^{-1}q(j) \quad (3.1)$$

όπου $\alpha_k = \lambda_k h_k$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης της κατηγορίας υπηρεσίας k στη ζεύξη l , L_l είναι η χωρητικότητα της ζεύξης l για $l = 1 \dots L$, G είναι η σταθερά κανονικοποίησης ίση με $G = \sum_{j=0}^{L_l} q(j)$ και $q(j)$ είναι η κατανομή πληρότητας των πόρων, η οποία προσδιορίζεται μέσω του ακόλουθου αναδρομικού τύπου, ο οποίος είναι γνωστός ως αναδρομικός τύπος Kaufman-Roberts [10]:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k), & j = 1, \dots, L_l \\ 0, & \text{αλλιού} \end{cases} \quad (3.2)$$

Λόγω του γεγονότος ότι οι απαιτούμενοι πόροι πρέπει να κατανεμηθούν σε μία ακολουθία συνδέσμων προκειμένου η δημιουργία σύνδεσης να θεωρηθεί επιτυχής, η έκφραση BP πρέπει να ενημερωθεί, ώστε να ληφθεί υπόψη ολόκληρο το σύνολο των συνδέσμων του ισοδύναμου δικτύου δρομολόγησης. Αναλυτικότερα, θεωρούμε ότι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης μιας κατηγορίας υπηρεσίας k σε έναν σύνδεσμο μειώνεται κατά τη διέλευση από μία ακολουθία συνδέσμων. Θεωρώντας ότι ο προσφερόμενος φόρτος κυκλοφορίας a_k μειώνεται σε $a_k \prod_{i \in P_k - \{l\}} (1 - V_{ik})$, συμβολίζουμε το προσεγγιστικό BP μιας κατηγορίας υπηρεσιών k σε έναν συγκεκριμένο σύνδεσμο l ως V_{lk} :

$$V_{lk} = Q_k \left[L_l; a_k \prod_{i \in P_k - \{l\}} (1 - V_{ik}), k = 1, \dots, K \right] \quad (3.3)$$

Επομένως, η συνολική BP ενός αιτήματος μιας κατηγορίας υπηρεσιών k , B_k , σε ολόκληρη τη διαδρομή P_k είναι:

$$B_k \approx 1 - \prod_{l \in P_k} (1 - V_{lk}), k = 1, \dots, K \quad (3.4)$$

3.4 Επίδραση Θορύβου Στην Απόδοση Των Κεραιών

3.4.1 Εισαγωγή

Για να κάνουμε πιο ρεαλιστική την αξιολόγηση απόδοσης του προαναφερθέντος δικτύου, εισάγουμε την έννοια του θορύβου μέσα σύστημα, καθώς αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην απόδοση των ασύρματων επικοινωνιών και επηρεάζει την αξιοπιστία και την ποιότητα των επικοινωνιακών υπηρεσιών. Θεωρούμε την ύπαρξή του μόνο στο επίπεδο των RUs, διότι στο επίπεδο του fronthaul και του backhaul είναι αρκετά μικρός ούτως ώστε να μην χρειάζεται να τον λάβουμε υπόψη. Συνεπώς, εστιάζοντας στον θόρυβο στο επίπεδο των RUs, προσφέρουμε μια ρεαλιστική εκτίμηση του θορύβου που επηρεάζει απευθείας την απόδοση των ασύρματων επικοινωνιών στο δίκτυο. Θα εξετάσουμε ένα σενάριο στο οποίο το προαναφερθέν σύστημα ασύρματης επικοινωνίας λειτουργεί σε μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Η συνολική ισχύς θορύβου εντός αυτής της ζώνης εκφράζεται ως εξής:

$$P_{total} = P_{thermal} + P_{interference} \quad (3.5)$$

όπου:

- $P_{thermal}$ είναι η ισχύς του θερμικού θορύβου, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία του συστήματος και το εύρος ζώνης,
- $P_{interference}$ είναι η ισχύς του θορύβου παρεμβολών, η οποία μπορεί να προέρχεται από άλλα συστήματα επικοινωνίας ή άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

3.4.2 Θερμικός Θόρυβος

Ο θερμικός θόρυβος, γνωστός και ως θόρυβος Johnson-Nyquist, εκφράζει τη θερμική διαταραχή λόγω της θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων σε αγωγούς. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια μέτρησης ηλεκτρικών οργάνων και να πνίξει ασθενή σήματα. Ο θερμικός θόρυβος αυξάνεται με τη θερμοκρασία και όταν περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο εύρος ζώνης, ακολουθεί την κατανομή Gauss [14].

Θεωρούμε ως j τον διακριτό αριθμό των καναλιών που καταλαμβάνονται στο σύστημα επικοινωνίας και ως k μία σταθερά που αντιπροσωπεύει τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου ανά κανάλι. Τότε, η συνολική ισχύς θορύβου P_N μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_N = k \cdot j \quad (3.6)$$

Το παραπάνω μοντέλο υποθέτει ότι κάθε κατειλημμένο κανάλι συνεισφέρει θόρυβο ανεξάρτητα και πως η συνολική ισχύς θορύβου είναι το άθροισμα των δυνάμεων

θορύβου που συνεισφέρει κάθε κατειλημμένο κανάλι. Το k , τώρα, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$k = Dk_B T \quad (3.7)$$

όπου:

- k_B είναι η σταθερά Boltzman, η οποία είναι ίση με $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,
- T είναι η θερμοκρασία σε Κέλβιν,
- και D η ευαισθησία του δέκτη.

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του δέκτη, η προαναφερθείσα έκφραση του k ενημερώνεται σε:

$$k = NFk_B T \quad (3.8)$$

όπου NF είναι η αύξηση θορύβου του δέκτη και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δέκτη. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τιμή του k μπορεί να διαφέρει από το ένα σύστημα στο άλλο και μπορεί να χρειαστεί να βαθμονομηθεί ή να εκτιμηθεί με βάση τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος επικοινωνίας και του περιβάλλοντος λειτουργίας.

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, ο θερμικός θόρυβος ακολουθεί κατανομή Gauss με μέση τιμή 0, διασπορά ίση με την μέση ισχύ και με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας να είναι:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.9)$$

όπου:

- $f(x)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας,
- x είναι η τάση του θορύβου (noise voltage),
- μ είναι η μέση κατανομή, η οποία είναι συνήθως 0 στον θερμικό θόρυβο,
- και σ^2 είναι η διασπορά, η οποία σχετίζεται με την ισχύ του θορύβου.

Επομένως, αν στην (3.9) θεωρήσουμε όπου διασπορά το P_N , δηλαδή την εξίσωση (3.6), τότε έχουμε την κατανομή του θορύβου για κάθε τιμή του j , δηλαδή έχουμε $f_j(x)$. Ως Τοπική Πιθανότητα Αποκλεισμού (Local Blocking Probability, LPB) θεωρούμε την πιθανότητα η συνάρτηση, αυτή, να ξεπεράσει ένα κατώφλι x (0,9 στη δική μας περίπτωση). Άρα:

$$P_{thermal} = LB(j) = P(f_j(x) \geq X) \quad (3.10)$$

3.4.3 Θόρυβος Παρεμβολής

Ο θόρυβος παρεμβολής, γνωστός και ως θόρυβος του περιβάλλοντος, πηγάζει από διάφορες πηγές εκτός των ηλεκτρονικών συσκευών που συμμετέχουν στην επικοινωνία. Παραδείγματα αυτών των πηγών θορύβου περιλαμβάνουν το θόρυβο από τους άλλους χρήστες, άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, ατμοσφαιρικά παράσιτα και άλλες παρεμβολές [15]. Αντίθετα με τον θερμικό θόρυβο, ο θόρυβος παρεμβολής δεν είναι συνήθως κατανομημένος και δεν ακολουθεί κατανομή Gauss.

Θεωρήσαμε ένα απλό μοντέλο για τον θόρυβο παρεμβολής το οποίο εκφράζεται ως εξής:

$$P_{interference} = P_{int} \cdot j \quad (3.11)$$

όπου:

- P_{int} είναι η ισχύς ανά πηγή παρεμβολής, η οποία εξαρτάται σε παράγοντες όπως, η απόσταση από την πηγή παρεμβολής, την ισχύ εκπομπής της και τα χαρακτηριστικά της κεραίας.
- j είναι ο αριθμός των πηγών παρεμβολής εντός εύρους ζώνης που μας ενδιαφέρει.

3.5 Μέθοδος Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου Συναρτήσεως Της Ύπαρξης Θορύβου

Εφόσον λαμβάνουμε υπόψη μας την ύπαρξη θορύβου μέσα στο σύστημά μας, πρέπει να ενημερώσουμε τη μέθοδο Προσέγγισης Μειωμένου Φορτίου για να λάβουμε υπόψη την επίδρασή του. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα μπλοκαρίσματος (BP) ενός αιτήματος μιας κατηγορίας υπηρεσιών k σε μία συγκεκριμένη σύνδεση l (εξίσωση (3.1)) θα ορίζεται, πλέον, ως εξής:

$$Q_k[L_l; a_k, k \in K] = \sum_{j=L_l-b_k+1}^{L_l} G^{-1}q(j) + \sum_{j=1}^{L_l-b_k} G^{-1}q(j) \cdot P_{total}(j) \quad (3.12)$$

Και ο αλγόριθμος κατανομής πληρότητας των πόρων $q(j)$, που υπολογίζεται από τον αναδρομικό τύπο Kaufman-Roberts, (εξίσωση ((3.2))) θα ανανεωθεί ως εξής:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_k (1 - P_{total}(j - b_k)) b_k q(j - b_k), & j = 1, \dots, L_l \\ 0, & \text{αλλιού} \end{cases} \quad (3.13)$$

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου

4.1 Περιγραφή Δικτύου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης του μοντέλου RLA που βρίσκει εφαρμογή σε ένα συγκλίνον οπτικό-ασύρματο δίκτυο 6G που ενσωματώνει την έννοια του (CF) στην περιοχή της ραδιοεπικοινωνίας, το οποίο και εξετάζουμε. Όπως αναλύσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο απωλειών RLA αναφέρεται σε ένα σύστημα όπου, όταν μία νέα κλήση μιας υπηρεσίας k εισέρχεται στο δίκτυο, μπλοκάρεται και απορρίπτεται χωρίς να εξυπηρετηθεί, εφόσον δεν υπάρχουν ελεύθεροι τηλεπικοινωνιακοί πόροι για την διεκπεραίωσή της. Η πιθανότητα αυτής της απώλειας υπολογίζεται με τη χρήση του αναδρομικού τύπου των Kaufman – Roberts.

4.2 Ανάλυση Του Μοντέλου RLA Χωρίς Την Επίδραση Θορύβου

Ως πειραματικό σενάριο θεωρούμε ότι κάθε UE είναι εξοπλισμένο με $N = 3$ κεραιές, επομένως έχει την ικανότητα να συνδεθεί ταυτόχρονα με 3 RUs. Κάθε RU έχει χωρητικότητα ίση με $R = 70$ RBs (Resource Blocks) και διασυνδέεται με ένα DU μέσω ενός fronthaul link μεγέθους $F = 80$ b.u. (bandwidth unit) με το περιφερειακό δίκτυο. Τέλος, θεωρούμε $C = 400$ διαθέσιμα c.r. (computational resources) που μπορούν να αξιοποιηθούν από τον ελεγκτή SDN για την εκτέλεση των λειτουργιών του δικτύου.

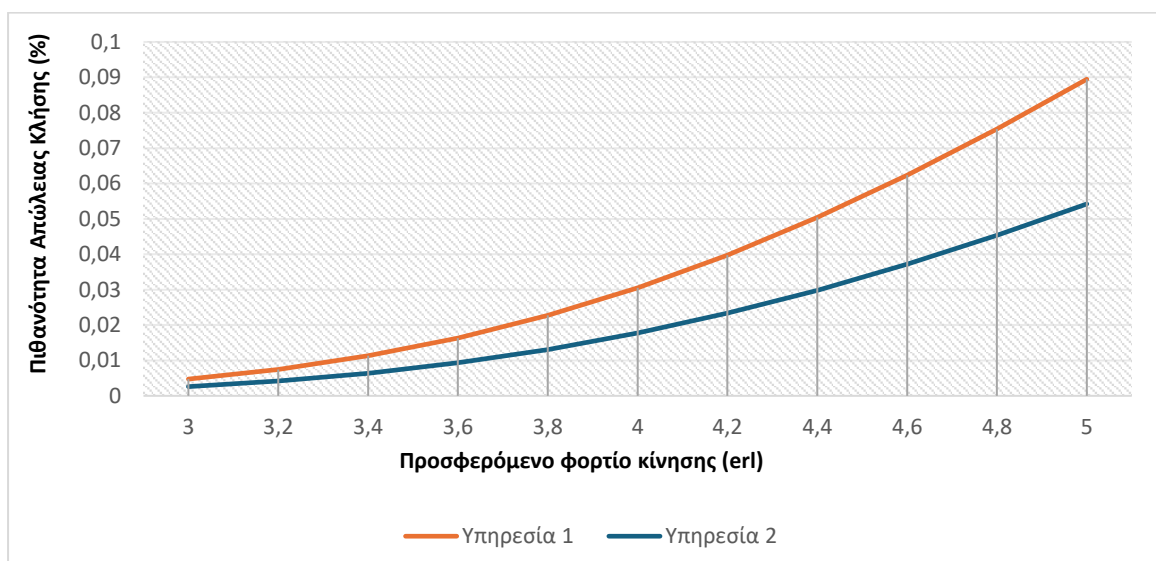
Κάθε UE υποστηρίζει $K = 2$ κλάσεις υπηρεσιών, με την κάθε μία να απαιτεί συγκεκριμένο αριθμό πόρων του δικτύου ούτως ώστε να διεκπεραιωθεί μία σύνδεση, με τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας σε κάθε κεραία να είναι διαφορετικές. Ειδικότερα, οι απαιτούμενοι πόροι για την 1^η υπηρεσία είναι οι ακόλουθοι: $r_{1,1} = 6$, $r_{1,2} = 5$, $r_{1,3} = 4$ RBs σε κάθε κεραία αντίστοιχα, $f_1 = 25$ b.u. στο επίπεδο σύνδεσης του fronthaul, $c_1 = 5$ c.r. στον ελεγκτή SDN. Απ' την άλλη, οι απαιτούμενοι τηλεπικοινωνιακοί πόροι της 2^{ης} υπηρεσίας είναι: $r_{2,1} = 4$, $r_{2,2} = 3$, $r_{2,3} = 2$ RBs σε κάθε κεραία αντίστοιχα, $f_2 = 15$ b.u. στο επίπεδο σύνδεσης του fronthaul, $c_2 = 2$ c.r. στον ελεγκτή SDN. [13]

4.2.1 Αυξανόμενο Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης

Αρχικά εξετάζουμε την ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης (CBP κάθε υπηρεσίας συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης. Οι τιμές που δίνονται στο φορτίο κίνησης είναι $A = \{3, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 5\}$ erl. Παρακάτω μπορούμε να δούμε τον πίνακα με το ολικό CBP κάθε υπηρεσίας για τις διάφορες τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης καθώς και την αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Φορτίο (erl)	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
3	0,004730852	0,002599739
3,2	0,007489756	0,004171506
3,4	0,011296837	0,006369345
3,6	0,016323287	0,009307082
3,8	0,022700428	0,013077724
4	0,030506292	0,017744533
4,2	0,039744064	0,02332753
4,4	0,050378429	0,029822431
4,6	0,062317643	0,037190656
4,8	0,075407458	0,045353476
5	0,0894726	0,0542168

Πίνακας 4:1: Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης A.



Σχήμα 4:1: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης A.

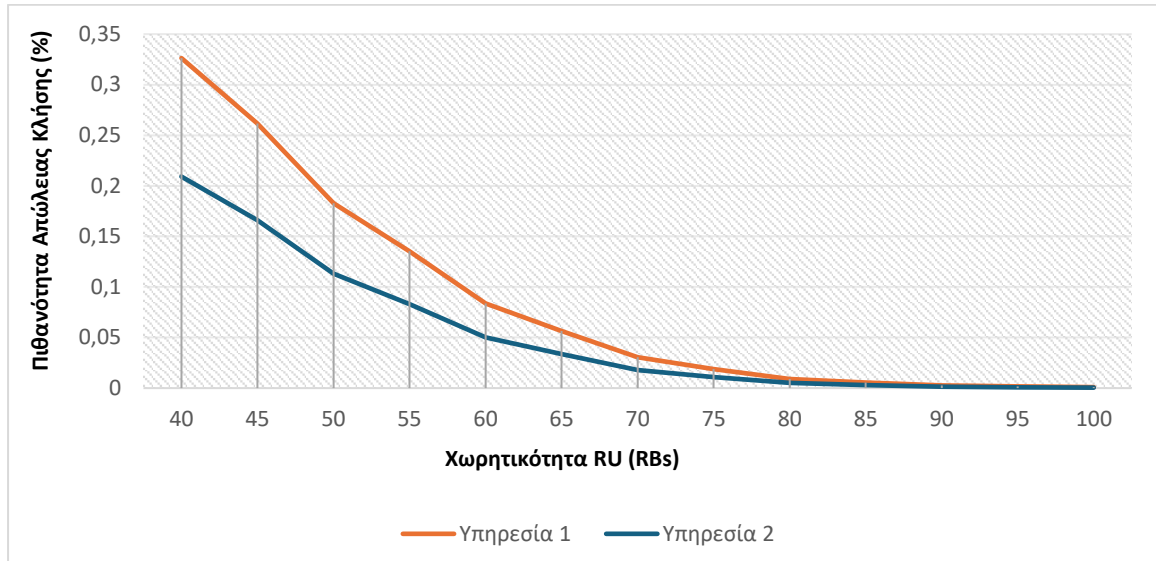
Παρατηρούμε πως η CBP των δύο υπηρεσιών είναι διαφορετική για την κάθε υπηρεσία, η οποία ανταποκρίνεται στις διαφορετικές απαιτήσεις της καθεμίας για τηλεπικοινωνιακούς πόρους. Στον άξονα y , αναπαρίστανται οι προκύπτουσες τιμές CBP, οι οποίες, αναμενόμενα, αυξάνονται όσο αυξάνουμε την τιμή του προσφερόμενου φορτίου και στον άξονα x αναπαρίστανται οι διάφορες τιμές του προσφερόμενου φορτίου. Τέλος, μπορούμε να δούμε πως η CBP διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και για τις δύο υπηρεσίες, κάτω του 0,1%, λόγω των πόρων του δικτύου συναρτήσει των απαιτήσεων κάθε υπηρεσίας.

4.2.2 Αυξανόμενη Χωρητικότητα Κεραιών

Διατηρώντας τα δεδομένα του πρώτου σεναρίου που αφορούν τον αριθμό των κεραιών, τη χωρητικότητα του DU και του ελεγκτή SDN, καθώς και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών σε τηλεπικοινωνιακούς πόρους, εξετάζουμε την επίδραση της χωρητικότητας των RUs στην ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης του συστήματος είναι σταθερό στα 4 erl. Οι τιμές χωρητικότητας που δίνονται στα RU είναι $R = \{40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100\}$. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι τιμές της CBP κάθε υπηρεσίας κίνησης για τις διαφορετικές τιμές των R_{us} και ακολουθεί η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Χωρητικότητα RUs (R.B.)	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
40	0,326240216	0,2091103
45	0,26141353	0,165862722
50	0,182846429	0,113185669
55	0,135430066	0,08293092
60	0,083715629	0,050166917
65	0,056613123	0,033594822
70	0,030506292	0,017744533
75	0,018947254	0,010905738
80	0,009091727	0,005111549
85	0,005389342	0,002976694
90	0,002542153	0,001347468
95	0,001610646	8,23E-04
100	9,57E-04	4,58E-04

Πίνακας 4:2: Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας των RUs.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας των RUs.

Διαπιστώνουμε τη μείωση της ολικής CBP, κάθε υπηρεσίας, με την αύξηση της χωρητικότητας των RUs λόγω της μεγαλύτερης δυνατότητας δέσμευσης πόρων από κλήσεις που εισέρχονται στο σύστημα.

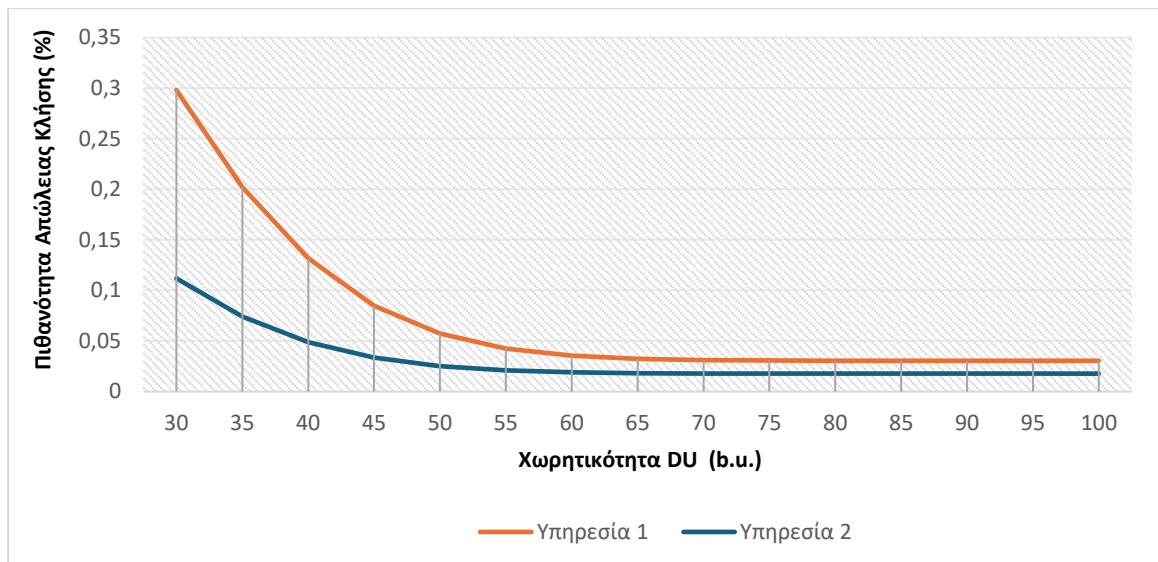
4.2.3 Αυξανόμενη Χωρητικότητα Fronthaul

Κρατώντας την χωρητικότητα των RUs σταθερή στα $R = 70$ R.B. και παραμένοντας σταθεροί στα υπόλοιπα δεδομένα, εξετάζουμε την επίδραση της χωρητικότητας του DU στην ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης. Οι τιμές που δίνονται στην χωρητικότητα του DU είναι $F = \{30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130\}$. Ακολουθούν ο πίνακας με τα αναλυτικά αποτελέσματα καθώς και η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Χωρητικότητα DU (b.u.)	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
30	0,297983109	0,111904834
35	0,202142804	0,074033918
40	0,13166227	0,048841658
45	0,085027347	0,033554379
50	0,057339661	0,025129824
55	0,042557113	0,02090948
60	0,035432041	0,018982939

65	0,032328294	0,018184441
70	0,031096929	0,017881257
75	0,030650389	0,017775724
80	0,030506292	0,017744533
85	0,030460094	0,01773433
90	0,030446841	0,017731502
95	0,030443288	0,017730768
100	0,030442394	0,017730589

Πίνακας 4:3: Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας του DU.



Σχήμα 4:3: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας του DU.

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση παρατηρούμε τη μείωση της ολικής CBP, κάθε υπηρεσίας, με την αύξηση της χωρητικότητας του DU λόγω της ύπαρξης περισσότερων b.u. για την εξυπηρέτηση των κλήσεων που εισέρχονται στο σύστημα.

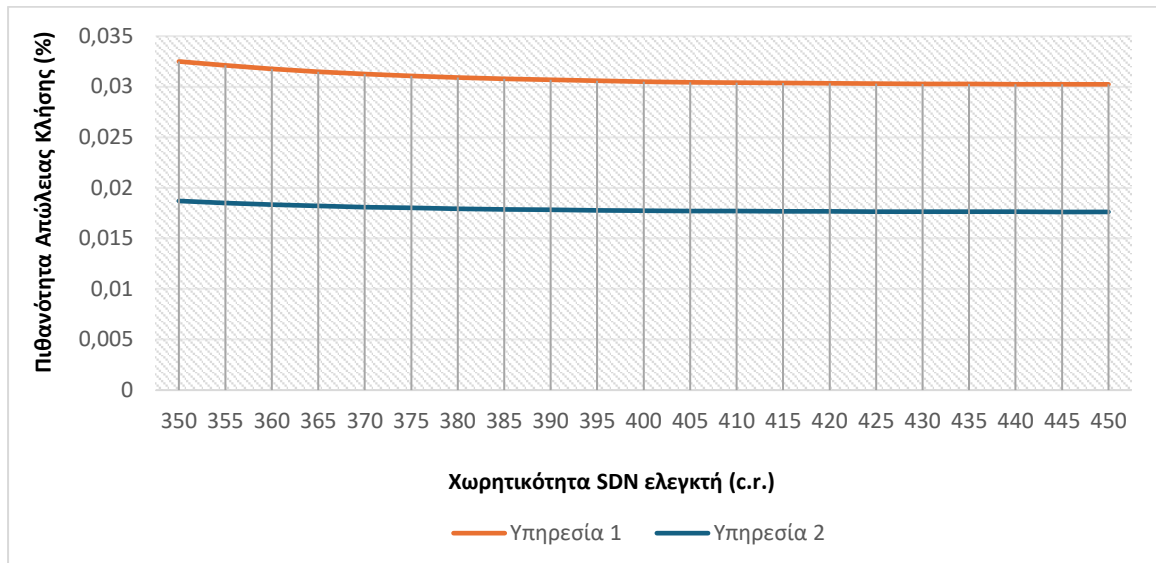
4.2.4 Αυξανόμενη Χωρητικότητα Ελεγκτή SDN

Τέλος, εξετάζουμε την επίδραση της χωρητικότητας του Control Center στην ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης του συστήματος. Διατηρούμε τα δεδομένα του συστήματος αμετάβλητα και την χωρητικότητα του DU σταθερή στα $F = 80$ b.u. Οι

τιμές που δίνονται στην χωρητικότητα του Server είναι $C = \{350, 355, 360, 365, 370, 375, 380, 385, 390, 395, 400, 405, 410, 415, 420, 425, 430, 435, 440, 445, 450\}$. Ακολουθούν ο πίνακας με τα αναλυτικά αποτελέσματα καθώς και η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Χωρητικότητα ελεγκτή SDN (c.r.)	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
350	0,032492614	0,018702345
355	0,032098982	0,018498862
360	0,031772736	0,018342366
365	0,031485506	0,018210724
370	0,031260234	0,018094739
375	0,031064408	0,018007753
380	0,030910389	0,017933252
385	0,030780408	0,017870976
390	0,030668124	0,017820948
395	0,030580002	0,017777371
400	0,030506292	0,017744533
405	0,030445646	0,017716354
410	0,030397927	0,017693785
415	0,030357662	0,017676189
420	0,030326034	0,017661164
425	0,030300396	0,017649772
430	0,030279426	0,017640384
435	0,030263143	0,017632832
440	0,030249737	0,017627055
445	0,030239215	0,017622238
450	0,030230896	0,017618567

Πίνακας 4:4: Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας του ελεγκτή SDN.



Σχήμα 4:4: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας του ελεγκτή SDN.

Όπως και με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και σε αυτήν, η αύξηση της χωρητικότητας του ελεγκτή SDN έχει ως αποτέλεσμα της μείωση της ολικής CBP των δύο υπηρεσιών. Ωστόσο, η μείωση του CBP δεν είναι εξίσου δραστική αυτή τη φορά, λόγω των χαμηλών απαιτήσεων των δύο υπηρεσιών σε υπολογιστικούς πόρους.

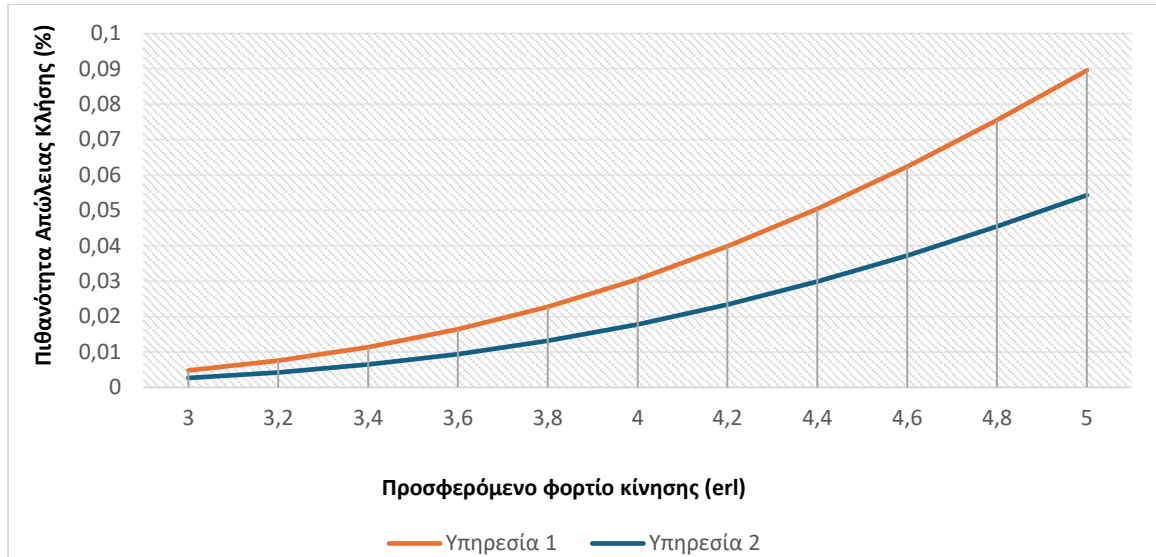
4.3 Ανάλυση Του Μοντέλου RLA Με Την Επίδραση Θορύβου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξετάσαμε πώς η αύξηση του φορτίου ή της χωρητικότητας των κεραιών, του δικτύου fronthaul και του ελεγκτή SDN επηρεάζει το ολικό CBP. Ωστόσο, καθώς δεν λάβαμε υπόψη μας την παρουσία θορύβου εντός του δικτύου, τα αποτελέσματα δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως την πραγματική κατάσταση. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εστιάσουμε στην επίδραση του θορύβου στο δίκτυο, εξετάζοντας τα ίδια σενάρια και χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα. Πιο αναλυτικά, διατηρώντας το ίδιο πειραματικό σενάριο (Βλέπε κεφάλαιο 4.2), θεωρούμε στο σύστημα την ύπαρξη δύο ειδών θορύβων, τον θερμικό και τον θόρυβο παρεμβολής, τους οποίους αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα, και τους εισήγαμε μόνο στο επίπεδο των κεραιών. Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται Τοπική Πιθανότητα Αποκλεισμού (Local Blocking Probability) και αναφέρεται στην πιθανότητα να μην είναι διαθέσιμο εύρος ζώνης σε οποιαδήποτε από τις κεραιές λόγω της παρουσίας θορύβου σε αυτές.

Στο επόμενο κεφάλαιο (4.4) θα συγκρίνουμε πιο αναλυτικά τα δεδομένα, έτσι σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε μόνο τις γραφικές παραστάσεις των δεδομένων.

4.3.1 Αυξανόμενο Προσφερόμενο Φορτίο Κίνησης

Όπως και στο κεφάλαιο 4.2.1, εξετάζουμε αρχικά την ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης CBP κάθε υπηρεσίας συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης.

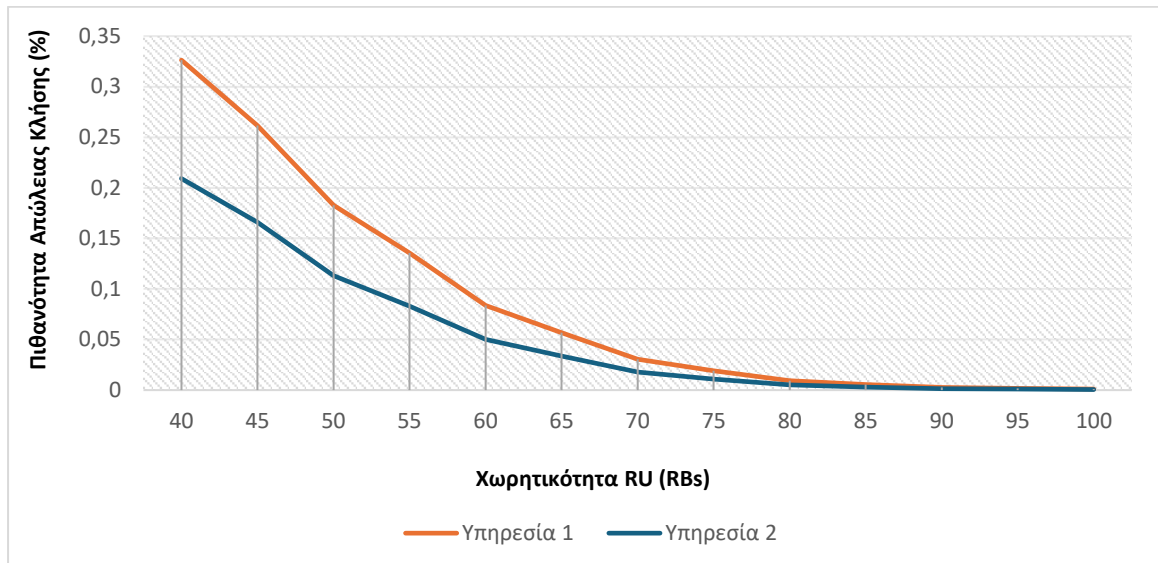


Σχήμα 4:5: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης A και την παρουσία θορύβου.

Παρατηρούμε ότι η CBP και των δύο υπηρεσιών είναι μεγαλύτερη, σε σχέση με τις προηγούμενες. Για την ακρίβεια, κατά μέσο όρο, έχουμε μία αύξηση της τάξεως, περίπου, του 0,42% στις τιμές της 1^{ης} υπηρεσίας, ενώ βλέπουμε μία αύξηση, περίπου, 0,79% στις τιμές της 2^{ης} υπηρεσίας.

4.3.2 Αυξανόμενη Χωρητικότητα Κεραιών

Θέτοντας τα δεδομένα του συστήματος αντίστοιχα με αυτά του κεφαλαίου 4.2.2 παίρνουμε την αντίστοιχη γραφική παράσταση:

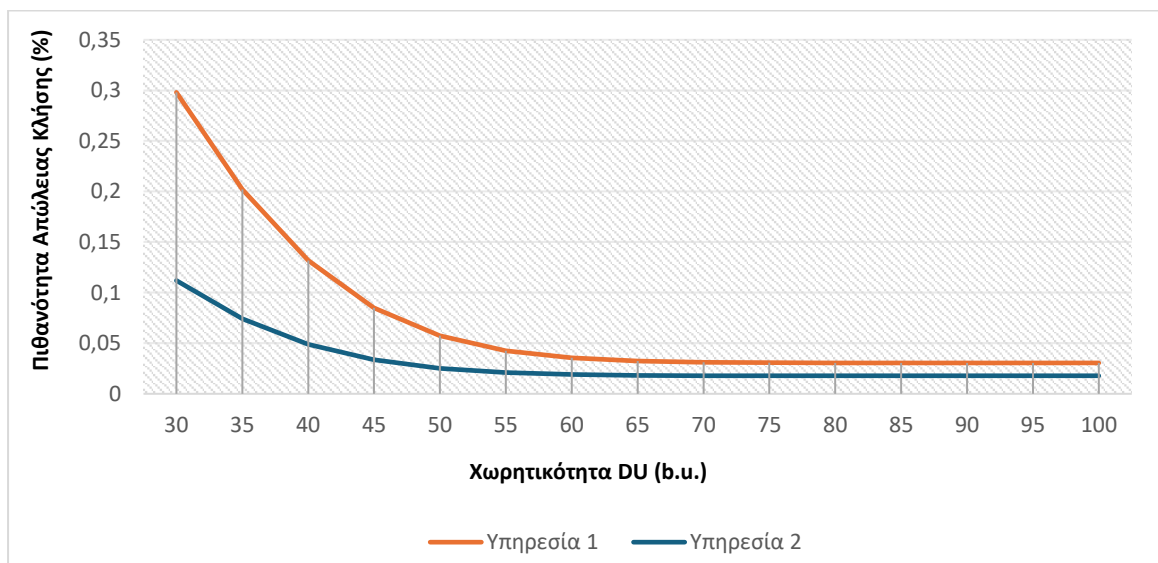


Σχήμα 4:6: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας RU και την παρουσία θορύβου.

Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούμε αύξηση κατά μέσο της τάξεως, περίπου, του 1,8% για την 1^η υπηρεσία, ενώ για την δεύτερη έχουμε αύξηση, περίπου, 3,53% σε σχέση με πριν.

4.3.3 Αυξανόμενη Χωρητικότητα Fronthaul

Διατηρώντας τα δεδομένα ανάλογα με αυτά του κεφαλαίου 4.2.3, παίρνουμε την ακόλουθη γραφική παράσταση:

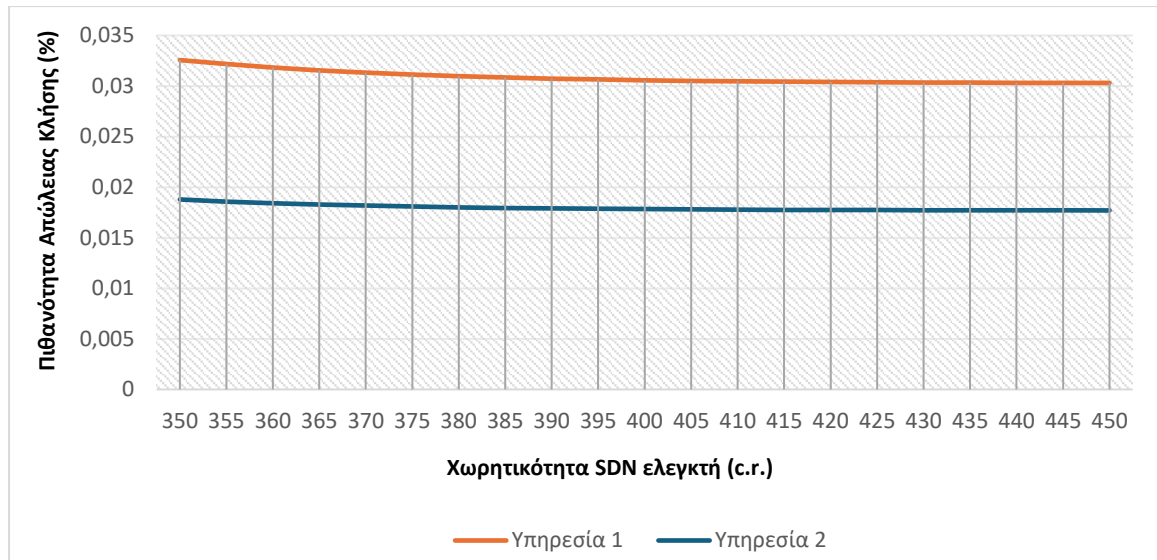


Σχήμα 4:7: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας του DU και την παρουσία θορύβου.

Εδώ έχουμε, μία αύξηση, κατά μέσο όρο, περίπου 0,16% για την 1^η υπηρεσία και 0,35% για την 2^η υπηρεσία, συγκριτικά με τις τιμές χωρίς την παρουσία θορύβου.

4.3.4 Αυξανόμενη Χωρητικότητα Ελεγκτή SDN

Τέλος, κρατώντας τα στοιχεία του πειραματικού σεναρίου ίδια με αυτά του κεφαλαίου 4.2.4, παίρνουμε την παρακάτω γραφική παράσταση:



Σχήμα 4:8: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών κίνησης συναρτήσει της χωρητικότητας του ελεγκτή SDN και την παρουσία θορύβου.

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε μία αύξηση, κατά μέσο όρο, περίπου 0,23% για την 1^η υπηρεσία και 0,44% για την 2^η υπηρεσία συγκριτικά με τις προγενέστερες τιμές.

4.3.5 Αυξανόμενη Ισχύς Ανά Πηγή Παρεμβολής (P_{int})

Στην παρούσα περίπτωση, θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο ο θόρυβος επηρεάζει το σύστημά μας και πιο συγκεκριμένα η μεταβολή της ισχύος ανά πηγή παρεμβολής (P_{int}), την οποία είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Τα δεδομένα του συστήματος είναι τα εξής: $R = 70$ RBs, $F = 80$ b.u., $C = 400$ c.r., φορτίο σταθερό στα 4 erl και διατηρώντας τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας σταθερές, μεταβάλλαμε το P_{int} με τους εξής διαφορετικούς τρόπους: i) $P_{int} = 1 - 9E-07$, ii) $P_{int} = 1 - 9E-06$, iii) $P_{int} = 1 - 9E-05$. Τα αποτελέσματα από την κάθε περίπτωση φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν:

P_{int}	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
1,00E-07	0,030513528	0,017752612
2,00E-07	0,030520763	0,017760691
3,00E-07	0,030527999	0,017768771
4,00E-07	0,030535235	0,017776849
5,00E-07	0,030542471	0,017784928
6,00E-07	0,030544889	0,017790334
7,00E-07	0,030552119	0,017798409
8,00E-07	0,03055935	0,017806485
9,00E-07	0,030566581	0,01781456

Πίνακας 4:5 i): Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών συναρτήσει του P_{int} .

P_{int}	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
1,00E-06	0,030573812	0,017822635
2,00E-06	0,030646115	0,017903381
3,00E-06	0,030718412	0,017984115
4,00E-06	0,030790702	0,018064837
5,00E-06	0,030862986	0,018145548
6,00E-06	0,030935264	0,018226248
7,00E-06	0,031007536	0,018306936
8,00E-06	0,031079801	0,018387612
9,00E-06	0,03115206	0,018468277

Πίνακας 4:6 ii): Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών συναρτήσει του P_{int} .

P_{int}	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2
1,00E-05	0,031224312	0,01854893
2,00E-05	0,031946487	0,019354829
3,00E-05	0,032668023	0,020159572
4,00E-05	0,033388919	0,020963162
5,00E-05	0,03410917	0,021765597
6,00E-05	0,034828775	0,022566877
7,00E-05	0,03554773	0,023367003
8,00E-05	0,036266033	0,024165975
9,00E-05	0,036983682	0,024963792

Πίνακας 4:7 iii): Πιθανότητες απώλειας κλήσης δύο υπηρεσιών συναρτήσει του P_{int} .

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι για την 1^η Υπηρεσία οι τιμές μεταξύ των τριών διαφορετικών περιπτώσεων αυξάνονται, κατά μέσο όρο, με τα παρακάτω ποσοστά:

- Από την πρώτη στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρείται μία αύξηση κατά περίπου 1,06%.
- Από την δεύτερη στη τρίτη περίπτωση, παρατηρείται μία αύξηση κατά περίπου 10,48%.
- Από την πρώτη στη τρίτη περίπτωση, παρατηρείται μία αύξηση κατά περίπου 11,68%.

Ενώ για τη 2^η Υπηρεσία οι τιμές των περιπτώσεων αυξάνονται, κατά μέσο όρο, με τα εξής ποσοστά:

- Από την πρώτη στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρείται μία αύξηση κατά περίπου 2,03%.
- Από την δεύτερη στη τρίτη περίπτωση, παρατηρείται μία αύξηση κατά περίπου 19,81%.
- Από την πρώτη στη τρίτη περίπτωση, παρατηρείται μία αύξηση κατά περίπου 22,36%.

4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων και πειραμάτων που διεξήγαμε

Φορτίο (erl)	Υπηρεσία 1		Υπηρεσία 2	
	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου
3	0,004730852	0,004799067	0,002599739	0,002669465
3,2	0,007489756	0,007560571	0,004171506	0,004244657
3,4	0,011296837	0,011369426	0,006369345	0,006445371
3,6	0,016323287	0,01639674	0,009307082	0,009385364
3,8	0,022700428	0,022773794	0,013077724	0,013157595
4	0,030506292	0,030573812	0,017744533	0,017822635

4,2	0,039744064	0,039814474	0,02332753	0,023408527
4,4	0,050378429	0,050446203	0,029822431	0,029903071
4,6	0,062317643	0,06238224	0,037190656	0,037270449
4,8	0,075407458	0,075468449	0,045353476	0,045431996
5	0,0894726	0,089529705	0,0542168	0,05429371

Πίνακας 4:8: Σύγκριση αποτελεσμάτων πιθανοτήτων απώλειας κλήσης με και χωρίς παρουσία θορύβου για αυξανόμενο φορτίο.

Antenna Capacity (R.B.)	Υπηρεσία 1		Υπηρεσία 2	
	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου
40	0,326240216	0,326250404	0,2091103	0,209137966
45	0,26141353	0,2614293	0,165862722	0,165896959
50	0,182846429	0,182872535	0,113185669	0,113230438
55	0,135430066	0,135465491	0,08293092	0,082983823
60	0,083715629	0,083765077	0,050166917	0,050231175
65	0,056613123	0,056672795	0,033594822	0,033666622
70	0,030506292	0,030573812	0,017744533	0,017822635
75	0,018947254	0,019026748	0,010905738	0,010991313
80	0,009091727	0,009178451	0,005111549	0,005201874
85	0,005389342	0,005479323	0,002976694	0,003069087
90	0,002542153	0,002634953	0,001347468	0,001441626
95	0,001610646	0,001704523	8,23E-04	9,18E-04
100	9,57E-04	0,001051601	4,58E-04	5,53E-04

Πίνακας 4:9: Σύγκριση αποτελεσμάτων πιθανοτήτων απώλειας κλήσης με και χωρίς παρουσία θορύβου για αυξανόμενη χωρητικότητα κεραιών.

Fronthaul Capacity (b.u.)	Υπηρεσία 1		Υπηρεσία 2	
	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου
30	0,297983109	0,297998526	0,111904834	0,111953133
35	0,202142804	0,202170001	0,074033918	0,074092116
40	0,13166227	0,131702205	0,048841658	0,0489081
45	0,085027347	0,085078746	0,033554379	0,03362685
50	0,057339661	0,057399821	0,025129824	0,025206201
55	0,042557113	0,042623073	0,02090948	0,020988126
60	0,035432041	0,035501357	0,018982939	0,019062762
65	0,032328294	0,032399353	0,018184441	0,018264831
70	0,031096929	0,031168786	0,017881257	0,017961888
75	0,030650389	0,030722576	0,017775724	0,017856448
80	0,030506292	0,030573812	0,017744533	0,017822635
85	0,030460094	0,030532492	0,01773433	0,017815127
90	0,030446841	0,030519251	0,017731502	0,017812302
95	0,030443288	0,030515702	0,017730768	0,017811569
100	0,030442394	0,030514809	0,017730589	0,017811391

Πίνακας 4:10: Σύγκριση αποτελεσμάτων πιθανοτήτων απώλειας κλήσης με και χωρίς παρουσία θορύβου για αυξανόμενη χωρητικότητα fronthaul.

Control Center (c.r.)	Υπηρεσία 1		Υπηρεσία 2	
	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης χωρίς παρουσία θορύβου	Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης με παρουσία θορύβου
350	0,032492614	0,032563542	0,018702345	0,01878235

355	0,032098982	0,032170165	0,018498862	0,018579013
360	0,031772736	0,031844131	0,018342366	0,018422637
365	0,031485506	0,031557095	0,018210724	0,018291094
370	0,031260234	0,03133198	0,018094739	0,0181752
375	0,031064408	0,031136291	0,018007753	0,018088285
380	0,030910389	0,03097544	0,017933252	0,018009979
385	0,030780408	0,030846257	0,017870976	0,017948151
390	0,030668124	0,030734653	0,017820948	0,017898496
395	0,030580002	0,030647074	0,017777371	0,017855227
400	0,030506292	0,030573812	0,017744533	0,017822635
405	0,030445646	0,03051354	0,017716354	0,017794663
410	0,030397927	0,030466118	0,017693785	0,01777226
415	0,030357662	0,030426103	0,017676189	0,017754802
420	0,030326034	0,030394676	0,017661164	0,017739889
425	0,030300396	0,030369202	0,017649772	0,017728587
430	0,030279426	0,030348368	0,017640384	0,017719274
435	0,030263143	0,030332192	0,017632832	0,017711782
440	0,030249737	0,030318876	0,017627055	0,017706054
445	0,030239215	0,030311795	0,017622238	0,017703137
450	0,030230896	0,030303483	0,017618567	0,01769947

Πίνακας 4:11: Σύγκριση αποτελεσμάτων πιθανοτήτων απώλειας κλήσης με και χωρίς παρουσία θορύβου για αυξανόμενη χωρητικότητα Control Center.

Οι παραπάνω πίνακες μας δίνουν τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τις πιθανότητες απώλειας κλήσης και να αναλύσουμε τις επιπτώσεις τους στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και την επίδραση του θορύβου σε αυτό. Παρατηρήσαμε ότι οι διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης και ο θόρυβος επηρεάζουν διαφορετικά την πιθανότητα απώλειας κλήσης. Παρ' όλα αυτά, για κάθε πειραματικό σενάριο του συστήματος, με ή χωρίς θόρυβο, ισχύει ότι $CBP_{k1} > CBP_{k2}$ για όλες τις τιμές φορτίου, χωρητικότητας RU, DU και SDN που εξετάσαμε.

Αρχικά είδαμε την επίδραση του φορτίου στην πιθανότητα απώλειας κλήσης για τιμές φορτίου από 3 έως 5 Erlang. Παρατηρήσαμε μια αυξητική τάση της πιθανότητας απώλειας κλήσης με την αύξηση του φορτίου, ενισχυμένη ακόμα περισσότερο όταν λαμβάνεται υπόψη και ο θόρυβος στο σύστημα. Συγκεκριμένα, οι πιθανότητες απώλειας κλήσης αυξήθηκαν από 0,0894726% σε 0,089529705% για την πρώτη υπηρεσία και από 0,0542168% σε 0,05929371% για τη δεύτερη υπηρεσία. Σε πιο εκτενή ανάλυση, παρατηρήθηκε μία αύξηση, κατά μέσο όρο περίπου, 0,42% για τη CBP της 1^{ης} υπηρεσίας, ενώ για τη 2^η μία αύξηση 0,79% σε σχέση με τα αποτελέσματα όπου δεν λάβαμε υπόψη την επίδραση του θορύβου.

Έπειτα, είδαμε την επίδραση που έχει στην CBP η αύξηση της χωρητικότητας των RU, DU και του ελεγκτή SDN. Σε όλες τις περιπτώσεις η αύξηση της εκάστοτε χωρητικότητας είχε ως αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της πιθανότητας απώλειας κλήσης με την επίδραση του θορύβου, όμως, να ενισχύει την CBP. Ειδικότερα, οι πιθανότητες απώλειας κλήσης αυξήθηκαν από $9,57E-04$, $0,030442394$ και $0,030230896$ σε $0,001051601$, $0,030514809$ και $0,030303483$ για την 1^η υπηρεσία και από $4,58E-04$, $0,017730589$ και $0,017618567$ σε $5,53E-04$, $0,017811391$ και $0,01769947$ για την 2^η υπηρεσία, αντίστοιχα. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε μία αύξηση, κατά μέσο όρο περίπου, 1,8%, 0,16% και 0,23% για τις τιμές CBP της 1^{ης} υπηρεσίας αντίστοιχα, ενώ για τη 2^η μία αύξηση 3,53%, 0,35% και 0,44% αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, διαπιστώνουμε ο θόρυβος επηρεάζει σε διαφορετικό βαθμό την αποδοτικότητα του κάθε μέρους του δικτύου και περισσότερο απ' όλα το front end δίκτυο, δηλαδή τα Radio Units. Ωστόσο, θετικό παραμένει το γεγονός ότι η επίδραση του θορύβου στο δίκτυο παραμένει σε χαμηλά επίπεδα σε όλο το δίκτυο, καθώς και για τις δύο υπηρεσίες. Αυτό μας υποδεικνύει μία σχετική ανοχή της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής του συστήματος όσον αφορά την επίδραση του θορύβου σε αυτό.

Τέλος, για την περίπτωση όπου αυξάνουμε την ισχύ ανά πηγή παρεμβολής βλέπουμε και πάλι τις πιθανότητες απώλειας κλήσης των δύο υπηρεσιών να διατηρούνται σε μικρά ποσοστά και συγκεκριμένα να μην ξεπερνούν το, περίπου, 0,036984% και το 0,024964% για την κάθε υπηρεσία αντίστοιχα, όταν το P_{int} παίρνει την τιμή του $9,00E-05$. Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη τιμή του P_{int} είναι αρκετά υψηλή και πάραυτα η CBP διατηρείται σε χαμηλά ποσοστά.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα Και Προτάσεις Για Το Μέλλον

Στην παρούσα πτυχιακή, παρουσιάζουμε την απόδοση της RLA μεθόδου που εφαρμόζεται για τον έλεγχο του υπολογιστικού φορτίου σε συγκλίνοντα οπτικά-ασύρματα δίκτυα 6G χωρίς κυψέλες και αξιολογούμε τον τρόπο με τον οποίο, η μέθοδος RLA διαχειρίζεται την απόδοση του δικτύου, όταν αυτό επιβαρύνεται από την ύπαρξη θορύβου. Όπως διαπιστώθηκε, το μέρος του δικτύου που επηρεάζεται περισσότερο από την παρουσία θορύβου είναι τα Radio Units, ωστόσο η επίδρασή του στο δίκτυο παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, υποδεικνύοντας μία σχετική ανοχή της αρχιτεκτονικής του συστήματος, καθώς και της μεθόδου RLA. Έτσι, λόγω της καλής διαχείρισης του θορύβου από το σύστημα, η μέθοδος RLA παρουσιάζει μία πολύ καλή λύση για τον έλεγχο του υπολογιστικού φορτίου σε δίκτυα 6G, λαμβάνοντας υπόψη και τις πολύ χαμηλές τιμές CBP, με ή χωρίς την παρουσία θορύβου. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία μας έδειξε ότι σε ένα περιβάλλον με συγκλίνουσες οπτικές και ασύρματες τεχνολογίες, η μέθοδος RLA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή αποτελεσματικού ελέγχου του φορτίου και την ελαχιστοποίηση των απωλειών κλήσεων. Η τεχνική αποτελεί μια αξιόπιστη επιλογή για τα δίκτυα 6^{ης} Γενιάς, καθώς τα πειράματα έδειξαν ότι μπορεί να ανταποκριθεί, ικανοποιητικά, ακόμη και σε συνθήκες με έντονη την παρουσία του θορύβου.

Οι στόχοι των μελλοντικών εργασιών περιλαμβάνουν, αρχικά, την προσομοίωση του παρόντος συστήματος με σκοπό την εξακρίβωση της απόδοσης του. Στη συνέχεια, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος κατανομής του προσφερόμενου φορτίου στα RUs, καθώς στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε πως κατανέμεται ίσα μεταξύ των τριών RUs, το οποίο δεν αποτελεί, πάντα, την καλύτερη πρακτική για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Σε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο, το οποίο αποτελέσει και πιθανή βελτίωση της παρούσας εργασίας, θα ήταν η δυναμική κατανομή του προσφερόμενου φορτίου στα RUs, ανάλογα με την πληρότητά τους. Συγχρόνως, επίκεντρο των μελλοντικών εργασιών θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή της μεθόδου RLA σε συνδυασμό με άλλες πρωτοποριακές τεχνολογίες, όπως οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, για τη βελτίωση της διαχείρισης του δικτύου και την πρόβλεψη των αναγκών των χρηστών. Επιπροσθέτως, η ανάλυση των επιπτώσεων άλλων μορφών παρεμβολών στα δίκτυα 6^{ης} Γενιάς θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες και συμπεράσματα, για τη βελτίωση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας του συστήματος. Τέλος, σημαντική είναι η αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος και ο τρόπος με τον οποίο η μέθοδος RLA συμβάλει στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Gupta και R. K. Jha, «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,» *IEEE Access*, pp. 1026-1232, 2015.
- [2] A. F. M. S. Shah, «A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies,» *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1117-1123, 2022.
- [3] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi και H. D. Schotten, «The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey,» *IEEE Open Journal of the Communications Society*, pp. 334-366, 2021.
- [4] Σ. τ. Βικιπαίδειας, «6G,» Βικιπαίδεια, Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια., [Ηλεκτρονικό]. Available: [//el.wikipedia.org/w/index.php?title=6G&oldid=9374632](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=6G&oldid=9374632).
- [5] R. Arshad και R. Muzzammel, «Realizing Intelligence in 6G Communications: A Review,» *2023 2nd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control, and Telecommunication Engineering (EECTE)*, pp. 1-5, 2023.
- [6] E. Björnson και L. Sanguinetti, «Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems,» *IEEE Transactions on Communications*, τόμ. 68, αρ. 7, pp. 4247-4261, 2020.
- [7] J. Zong, Y. Liu, H. Liu, Q. Wang και P. Chen, «6G Cell-Free Network Architecture,» *2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*, pp. 421-425, 2022.
- [8] G. Wikström, J. Peisa, P. Rugeland, N. Johansson, S. Parkvall, M. Gimyk, G. Mildh και I. L. Da Silva, «Challenges and Technologies for 6G,» *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp. 1-5, 2020.
- [9] S. Alraih, I. Shayea, M. Behjati, R. Nordin, N. F. Abdullah, A. Abu-Samah και D. Nandi, «Revolution or Evolution? Technical Requirements and Considerations towards 6G Mobile Communications,» *Sensors* 2022.

- [10] M. Logothetis και I. D. Moscholios, *Efficient Multirate Teletraffic Loss Models Beyond Erlang*, John Wiley & Sons, Ltd, 2019.
- [11] Μ. Δ. Λογοθέτης, *Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως Και Εφαρμογές*, 3 επιμ., Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2018.
- [12] G. Interdonato, E. Björnson, H. Q. Ngo, P. Frenger και E. G. Larsson, «Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019.
- [13] I. P. Keramidi, J. S. Vardakas, K. Ramantas, I. Moscholios και C. Verikoukis, «Computational Load Management Strategies in Cell-Free-Based, Converged-Optical-Wireless 6G Networks,» *ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*, May 2023.
- [14] W. contributors, «Johnson–Nyquist noise,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Johnson%E2%80%93Nyquist_noise&oldid=1224872796.
- [15] Γ. Κ. Καραγιαννίδης και Δ. Κ. Ν. Παππή, *Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα*, 4 επιμ., Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.

Παράρτημα

Κώδικας σε γλώσσα Java, για τον υπολογισμό απώλειας κλήσης σε συγκλίνον οπτικό-ασύρματο δίκτυο μέσω της μεθόδου RLA.

```
package reducedloadapproximation;

import java.io.File;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileWriter;
import java.io.PrintWriter;
import java.util.Scanner;

/**
 *
 * @author user
 */

public class ReducedLoadApproximation {
    public static void main(String[] args) {
        int numoflinks;
        int K;
        int[][] b;
        double[][] trafficLoad;
        int[] C;
        int tload;

        try {
            File source = new File(" input.txt");
            Scanner scanner = new Scanner(source);

            if (!scanner.hasNext()) {
                System.out.println("Error opening input file.");
                scanner.close();
                return;
            }

            numoflinks = scanner.nextInt(); // Eisagogi dedomenwn gia ton
arithmo tw n link
            K = scanner.nextInt(); // Eisagogi dedomenwn gia ton arithmo tw n
ypiresiwn

            C = new int[numoflinks];
            for (int i = 0; i < numoflinks; i++)
                C[i] = scanner.nextInt(); // Eisagogi dedomenwn gia thn
xwritikotita tw n link

            b = new int[numoflinks][K];
            for (int i = 0; i < K; i++) {
                for (int j = 0; j < numoflinks; j++)
                    b[j][i] = scanner.nextInt(); // Eisagogi dedomenwn gia
tis apaitiseis tw n ypiresiwn se kathe link
        }
    }
}
```

```

    }

    trafficLoad = new double[numoflinks][K];
    tload = scanner.nextInt();
    for (int i = 0; i < numoflinks; i++) {
        for (int j = 0; j < K; j++)
            trafficLoad[i][j] = tload; // Eisagogi dedomenwn gia to
prosferomeno fortio sto kathe link
    }
    scanner.close();

    // Antenna Capacity

    File outputFile = new File("Block_LOCAL.txt");
    FileWriter fileWriter = new FileWriter(outputFile);
    PrintWriter printWriter = new PrintWriter(fileWriter);

    while (C[2] != 105) { // Epanalipsi mexri na metavalthei i
xwritikotita tis antennas
        LBlockingCalculation qBlock = new LBlockingCalculation(K, b,
trafficLoad, C); // Dhmioyrgia antikeimenou

// gia thn efarmogh ths

// methodou RLA
        double[][] linkBlockingProbs = qBlock.getLBlocking(); //
Ypologismos twn pi8anothtwn apokleismou gia
//
kathe link

        BlockingProbabilityCalculation bl = new
BlockingProbabilityCalculation(K, C, linkBlockingProbs); // Dhmioyrgia
antikeimenou gia ton ypologismo twn CBPs

        double[] blockings = bl.getBlockProbabilities(); //
Pinakas me tis CBPs

        printWriter.println("The blocking probabilities converge
after " +
            qBlock.getCounter() + " loops");
        printWriter.println("Antenna Capacity: " + C[2]);

        for (int k = 0; k < K; k++) // Ektypwsi twn CBPs gia kathe
ypiresia
            printWriter.println("Pb[" + k + "] = " + blockings[k]);

        for (int i = 2; i < numoflinks; i++) // Ay3isi ths
xwritikotitas twn link
            C[i] += 5;

        printWriter.println();
        printWriter.println();
    }
    printWriter.close();
    fileWriter.close();

    // Fronthaul Capacity

    outputFile = new File("Block_LOCAL_Fronthaul_Noise.txt");
    fileWriter = new FileWriter(outputFile);
    printWriter = new PrintWriter(fileWriter);

```



```

        while (C[0] != 135) { // Epanalipsi mexri na metavalthei i
xwritikotita tou fronthaul
            LBlockingCalculation qBlock = new LBlockingCalculation(K, b,
trafficLoad, C);
            double[][] linkBlockingProbs = qBlock.getLBlocking();

            BlockingProbabilityCalculation bl = new
BlockingProbabilityCalculation(K, C,
            linkBlockingProbs);
            double[] blockings = bl.getBlockingProbabilities();

            printWriter.println("The blocking probabilities converge
after " +
                qBlock.getCounter() + " loops");
            printWriter.println("Fronthaul Capacity: " + C[0]);

            for (int k = 0; k < K; k++) // Ektypwsi tw n CBPs gia kathe
ypiresia
                printWriter.println("Pb[" + k + "] = " + blockings[k]);

            C[0] += 5; // Ay3isi ths xwritikotitas tou fronthaul

            printWriter.println();
            printWriter.println();
        }
        printWriter.close();
        fileWriter.close();

        // Server Capacity

        outputFile = new File("Block_LOCAL_Server_No_Noise.txt");
        fileWriter = new FileWriter(outputFile);
        printWriter = new PrintWriter(fileWriter);

        while (C[1] != 455) { // Epanalipsi mexri na metavalthei i
xwritikotita tou server
            LBlockingCalculation qBlock = new LBlockingCalculation(K, b,
trafficLoad, C);
            double[][] linkBlockingProbs = qBlock.getLBlocking();

            BlockingProbabilityCalculation bl = new
BlockingProbabilityCalculation(K, C,
            linkBlockingProbs);
            double[] blockings = bl.getBlockingProbabilities();

            printWriter.println("The blocking probabilities converge
after " +
                qBlock.getCounter() + " loops");
            printWriter.println("Server Capacity: " + C[1]);

            for (int k = 0; k < K; k++) // Ektypwsi tw n CBPs gia kathe
ypiresia
                printWriter.println("Pb[" + k + "] = " + blockings[k]);

            C[1] += 5; // Ay3isi ths xwritikotitas tou server

            printWriter.println();
            printWriter.println();
        }
        printWriter.close();

```

```

fileWriter.close();

// Blocking Probability when load (a) is increasing

outputFile = new File("Block_LOCAL_Load_Noise.txt");
fileWriter = new FileWriter(outputFile);
printWriter = new PrintWriter(fileWriter);

while (Math.abs(trafficLoad[0][0] - 5.2) > 1e-6) { // Epanalipsi
mexri na ay3ithei to fortio
    LBlockingCalculation qBlock = new LBlockingCalculation(K, b,
trafficLoad, C);
    double[][] linkBlockingProbs = qBlock.getLBlocking();

    BlockingProbabilityCalculation bl = new
BlockingProbabilityCalculation(K, C,
        linkBlockingProbs);
    double[] blockings = bl.getBlockingProbabilities();

    printWriter.println("The blocking probabilities converge
after " +
        qBlock.getCounter() + " loops");
    printWriter.println("Load: " + trafficLoad[0][0]);

    for (int k = 0; k < K; k++) // Ektypwsi tw'n CBPs gia kathe
ypiresia
        printWriter.println("Pb[" + k + "] = " + blockings[k]);

    for (int i = 0; i < numoflinks; i++) { // Ay3isi tou fortiou
gia kathe ypiresia
        for (int j = 0; j < K; j++)
            trafficLoad[i][j] += 0.2;
        }

        printWriter.println();
        printWriter.println();
    }
    printWriter.close();
    fileWriter.close();

// Inter Noise Increase (P increases)

double value = 0.0000001;
double increase = 0.0000001;
outputFile = new File("Block_LOCAL_Inter_Noise_Increase.txt");
fileWriter = new FileWriter(outputFile);
printWriter = new PrintWriter(fileWriter);

while (value != 0.0001) { // Epanalipsi mexri na ay3ithei to
inter noise
    LBlockingCalculation_Noise_Increase qBlock = new
LBlockingCalculation_Noise_Increase(K, b, trafficLoad,
        C, value);
    double[][] linkBlockingProbs = qBlock.getLBlocking();

    BlockingProbabilityCalculation bl = new
BlockingProbabilityCalculation(K, C,
        linkBlockingProbs);
    double[] blockings = bl.getBlockingProbabilities();

```

```

        printWriter.println("The blocking probabilities converge
after " +
        qBlock.getCounter() + " loops");
        printWriter.println("Inter Noise, P increasing: " + value);

        for (int k = 0; k < K; k++) // Ektypwsi tw'n CBPs gia kathe
ypiresia
            printWriter.println("Pb[" + k + "] = " + blockings[k]);

        if (value == 0.000001) { // Metaboles sto value kai to
increase
            increase = 0.000001;
        }
        if (value == 0.00001) {
            increase = 0.00001;
        }
        value += increase;

        printWriter.println();
        printWriter.println();
    }
    printWriter.close();
    fileWriter.close();

    } catch (FileNotFoundException e) { // Diacheirisi exairesis
FileNotFoundException
        System.out.println("Error opening input file.");
    } catch (Exception e) { // Diacheirisi genikis exairesis
        e.printStackTrace();
    }
}
}

```

```

package reducedloadapproximation;

import static java.lang.Math.abs;

/**
 *
 * @author user
 */
public class LBlockingCalculation {

    // Δήλωση μεταβλητών
    private double[][] Q, L, previousL, trafficLoad, reducedTrafficLoad;
    private int[][] b;
    private int K, p, k;
    private int[] C;
    private int numOfLinks;
    private double[] q, qNormalized;
    private int counter;

    // Κατασκευαστής της κλάσης
    public LBlockingCalculation(int K, int[][] b, double[][] trafficLoad, int[]
C) {
        this.K = K;
        this.trafficLoad = trafficLoad;
        this.b = b;
        this.C = C;
    }
}

```

```

    this.numOfLinks = this.C.length;
}

// Μέθοδος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αποκλεισμού L
public double[][] getLBlocking() {
    // Αρχικοποίηση πινάκων
    Q = new double[numOfLinks][K];
    L = new double[numOfLinks][K];
    previousL = new double[numOfLinks][K]; // Πίνακας για τις προηγούμενες
τιμές του L
    reducedTrafficLoad = new double[numOfLinks][K];
    double[] blockingProbabilities;

    // Αρχικοποίηση του πίνακα L με 1 για b > 0, διαφορετικά με 0
    for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
        for (k = 0; k < K; k++) {
            if (b[p][k] <= 0) { // Έλεγχος αν υπάρχει κάποια υπηρεσία με b
= 0
                L[p][k] = 0;
            } else {
                L[p][k] = 1;
            }
        }
    }

    // Υπολογισμός του μειωμένου φορτίου κίνησης
    for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
        for (k = 0; k < K; ++k) {
            if (b[p][k] > 0) {
                double tmpLoad = 1.0;
                for (int j = 0; j < numOfLinks; j++) {
                    if (j != p && b[p][k] > 0) {
                        tmpLoad *= (1 - L[j][k]);
                    }
                }
                reducedTrafficLoad[p][k] = trafficLoad[p][k] * tmpLoad;
            }
        }
    }

    // Αρχικοποίηση μεταβλητών για τον έλεγχο σύγκλισης
    boolean x = true;
    int flag = -1;
    counter = 0; // Μετρητής για τον αριθμό επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση
    int tmp2 = 0; // Μεταβλητή για την καταγραφή των φορών που η διαφορά
των L και previousL < 0.0001

    // Αρχικοποίηση του πίνακα previousL
    for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
        for (k = 0; k < K; k++) {
            previousL[p][k] = 1;
        }
    }

    // Επανάληψη μέχρι τη σύγκλιση
    while (x == true) {
        counter++;

        // Υπολογισμός των πιθανοτήτων αποκλεισμού Q
        for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
            if (p == 0 || p == 1) {

```

```

        KaufmanRobertsFormula kauf = new
KaufmanRobertsFormula(C[p], K, b[p], reducedTrafficLoad[p]);
        q = kauf.getQ();
        qNormalized = kauf.getQNormalized(q);
        blockingProbabilities =
kauf.getBlockingProbabilities(qNormalized);
        for (k = 0; k < K; k++)
            Q[p][k] = blockingProbabilities[k];
    } else {
        KaufmanRobertsFormula kauf = new
KaufmanRobertsFormula(C[p], K, b[p], reducedTrafficLoad[p]);
        q = kauf.getQLocal();
        qNormalized = kauf.getQNormalized(q);
        blockingProbabilities =
kauf.getBlockingProbabilitiesLocal(qNormalized);
        for (k = 0; k < K; k++)
            Q[p][k] = blockingProbabilities[k];
    }
}

// Υπολογισμός των πιθανοτήτων αποκλεισμού Q χωρίς θόρυβο
// for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
// KaufmanRobertsFormula kauf = new KaufmanRobertsFormula(C[p], K,
b[p],
// reducedTrafficLoad[p]);
// q = kauf.getQ();
// qNormalized = kauf.getQNormalized(q);
// blockingProbabilities =
kauf.getBlockingProbabilities(qNormalized);
// for (k = 0; k < K; k++)
// Q[p][k] = blockingProbabilities[k];
// }

L = Q; // Ενημέρωση του L με τις τιμές του Q
flag++;

// Υπολογισμός του μειωμένου φορτίου κίνησης
for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
    for (k = 0; k < K; ++k) {
        if (b[p][k] > 0) {
            double tmpLoad = 1.0;
            for (int j = 0; j < numOfLinks; j++) {
                if (j != p && b[p][k] > 0) {
                    tmpLoad *= (1 - L[j][k]);
                }
            }
            reducedTrafficLoad[p][k] = trafficLoad[p][k] * tmpLoad;
        }
    }
}

// Έλεγχος σύγκλισης των τιμών του L
if (flag >= 1) {
    for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
        for (k = 0; k < K; k++) {
            if (abs(previousL[p][k] - L[p][k]) > 0.00001) {
                previousL[p][k] = L[p][k];
                continue;
            }
            if ((previousL[p][k] != 0) && (L[p][k] != 0)) {
                if ((abs(previousL[p][k] - L[p][k]) <= 0.00001)) {

```

```

        tmp2++;
        if (tmp2 >= (numOfLinks * K)) {
            x = false;
            break;
        }
    }
}
}
}
}
}
return L;
}
}

// Μέθοδος για την επιστροφή του qNormalized
public double[] getQNormalized() {
    return qNormalized;
}

// Μέθοδος για την επιστροφή του counter
public int getCounter() {
    return this.counter;
}
}
}

```

```

package reducedloadapproximation;

import java.util.Arrays;
import java.lang.Math;

/**
 *
 * @author user
 */

public class KaufmanRobertsFormula {

    // Δήλωση μεταβλητών
    private double[] q;
    private double[] qNormalized;
    private int C, K;
    private int[] b; // Απαιτήσεις μονάδων εύρους ζώνης
    private double[] trafficLoad;
    private double[] blockingProbabilities;
    private double G; // Σταθερά κανονικοποίησης
    private double kT = 1.38069 * Math.pow(10, -23);

    // Μέθοδος υπολογισμού θερμικού θορύβου
    public double NoiseThermal(double j) {
        double x = 0.9;
        return (1 / Math.sqrt(2 * Math.PI * Math.pow(kT * j, 2)))
            * Math.pow(Math.E, -1 * (Math.pow(x, 2) / (2 * Math.pow(kT * j,
2)))));
    }

    // Μέθοδος υπολογισμού θορύβου παρέμβασης
    public double NoiseInter(double j) {
        double P = 0.000001;
        return (P * j);
    }
}

```

```

}

// Μέθοδος υπολογισμού συνολικού θορύβου
public double NoiseTotal(double j) {
    // System.out.println(NoiseInter(j) + NoiseThermal(j));
    return (NoiseInter(j) + NoiseThermal(j));
}

// Κατασκευαστής της κλάσης
public KaufmanRobertsFormula(int C, int K, int[] b, double[] trafficLoad) {
    this.C = C;
    this.K = K;
    this.b = Arrays.copyOf(b, b.length); // Αντιγραφή του πίνακα για
    αποφυγή εξωτερικών αλλαγών
    this.trafficLoad = Arrays.copyOf(trafficLoad, trafficLoad.length); //
    Αντιγραφή του πίνακα για αποφυγή εξωτερικών αλλαγών
    this.q = new double[C + 1];
    this.qNormalized = new double[C + 1];
    this.blockingProbabilities = new double[K];
}

// Προεπιλεγμένος κατασκευαστής
public KaufmanRobertsFormula() {
}

// Μέθοδος για τον υπολογισμό του q
public double[] getQ() {
    Arrays.fill(q, 0); // Μηδενισμός του πίνακα πριν από τον υπολογισμό
    q[0] = 1;
    G = 0;
    for (int j = 1; j <= C; j++) {
        for (int k = 0; k < K; k++) {
            if (j - b[k] >= 0) {
                q[j] += trafficLoad[k] * b[k] * q[j - b[k]];
            }
        }
        if (j != 0) { // Αποφυγή διαίρεσης με το μηδέν
            q[j] /= j;
        }
    }
    return q;
}

// Μέθοδος για τον τοπικό υπολογισμό του q με θόρυβο
public double[] getQLocal() {
    Arrays.fill(q, 0); // Μηδενισμός του πίνακα πριν από τον υπολογισμό
    q[0] = 1;
    G = 0;

    for (int j = 1; j <= C; j++) {
        for (int k = 0; k < K; k++) {
            if (j - b[k] > 0) {
                q[j] += (1 - NoiseTotal(j - b[k])) * trafficLoad[k] * b[k]
* q[j - b[k]];
            } else if (j - b[k] == 0)
                q[j] += trafficLoad[k] * b[k] * q[j - b[k]];
        }
        if (j != 0) { // Αποφυγή διαίρεσης με το μηδέν
            q[j] /= j;
        }
    }
}

```

```

    return q;
}

// Μέθοδος για την κανονικοποίηση του q
public double[] getQNormalized(double[] q) {
    G = 0.0;
    for (int j = 0; j <= C; j++) {
        G += q[j];
    }

    for (int j = 0; j <= C; j++) {
        qNormalized[j] = q[j] / G; // Κανονικοποίηση των τιμών του q
        // χρησιμοποιώντας το άθροισμα
    }

    return qNormalized;
}

// Μέθοδος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αποκλεισμού
public double[] getBlockingProbabilities(double[] qNormalized) {
    Arrays.fill(blockingProbabilities, 0); // Μηδενισμός του πίνακα πριν
    // από τον υπολογισμό
    for (int k = 0; k < K; k++) {
        for (int j = (C - b[k] + 1); j <= C; j++) {
            blockingProbabilities[k] += qNormalized[j];
        }
    }
    return blockingProbabilities;
}

// Μέθοδος για τον τοπικό υπολογισμό των πιθανοτήτων αποκλεισμού με θόρυβο
public double[] getBlockingProbabilitiesLocal(double[] qNormalized) {
    Arrays.fill(blockingProbabilities, 0); // Μηδενισμός του πίνακα πριν
    // από τον υπολογισμό

    for (int k = 0; k < K; k++) {
        for (int j = (C - b[k] + 1); j <= C; j++) {
            blockingProbabilities[k] += qNormalized[j];
        }

        for (int j = 1; j <= (C - b[k]); j++) {
            blockingProbabilities[k] += qNormalized[j] * NoiseTotal(j);
        }
    }
    return blockingProbabilities;
}

// Μέθοδος για την επιστροφή μιας συγκεκριμένης πιθανότητας αποκλεισμού
public double getSpecificProbability(int i, double[] blockingProbabilities)
{
    if (i >= 0 && i < blockingProbabilities.length) {
        return blockingProbabilities[i];
    } else {
        // Χειρισμός εκτός ορίων δείκτη
        return 0.0;
    }
}
}

```



```

package reducedloadapproximation;

import static java.lang.Math.abs;

/**
 *
 * @author user
 */
public class LBlockingCalculation_Noise_Increase {

    private double[][] Q, L, previousL, trafficLoad, reducedTrafficLoad; //
    Πίνακες για τις πιθανότητες αποκλεισμού, προηγούμενες τιμές και μειωμένα φορτία
    private int[][] b; // Πίνακας απαιτήσεων εύρους ζώνης
    private int K, p, k; // Αριθμός υπηρεσιών και μεταβλητές βρόχου
    private int[] C; // Πίνακας δυνατοτήτων καναλιών
    private int numOfLinks; // Αριθμός συνδέσμων
    private double[] q, qNormalized; // Πίνακες κατανομής πιθανότητας και
    κανονικοποιημένες τιμές
    private int counter; // Μετρητής για τις επαναλήψεις
    private double noise; // Παράγοντας θορύβου

    // Κατασκευαστής της κλάσης
    public LBlockingCalculation_Noise_Increase(int K, int[][] b, double[][]
trafficLoad, int[] C, double Noise) {
        this.K = K;
        this.trafficLoad = trafficLoad;
        this.b = b;
        this.C = C;
        this.numOfLinks = this.C.length;
        this.noise = Noise;
    }

    public double[][] getLBlocking() {
        // Προσδιορισμός των πιθανοτήτων αποκλεισμού

        Q = new double[numOfLinks][K];
        L = new double[numOfLinks][K];
        previousL = new double[numOfLinks][K]; // Σε αυτόν τον πίνακα
αποθηκεύονται οι προηγούμενες τιμές του L
// προκειμένου να συγκριθούν με
τις επόμενες για το αν συγκλίνουν
        reducedTrafficLoad = new double[numOfLinks][K];
        double[] blockingProbabilities;

        // Ο πίνακας αρχικοποιείται με 1 για b > 0, διαφορετικά αρχικοποιείται
με 0
        for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
            for (k = 0; k < K; k++) {
                if (b[p][k] <= 0) { // Γίνεται ο έλεγχος αν υπάρχει κάποια
υπηρεσία με b = 0 => L = 0
                    L[p][k] = 0;
                } else {
                    L[p][k] = 1;
                }
            }
        }

        for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
            for (k = 0; k < K; ++k) {

```

```

    if (b[p][k] > 0) {
        double tmpLoad = 1.0;
        for (int j = 0; j < numOfLinks; j++) {
            if (j != p && b[p][k] > 0) {
                tmpLoad *= (1 - L[j][k]);
            }
        } // 3ος βρόχος
        reducedTrafficLoad[p][k] = trafficLoad[p][k] * tmpLoad;
    } // τέλος if
} // 2ος βρόχος
} // 1ος βρόχος

boolean x = true;
int flag = -1;
counter = 0; // Αυτός ο μετρητής καταγράφει μετά από πόσα loops οι
τιμές συγκλίνουν
int tmp2 = 0; // Σε αυτή τη μεταβλητή εκχωρείται το πλήθος των φορών
που η διαφορά των L και
// previousL < 0.0001.
// Χρησιμοποιείται προκειμένου να ελεγχθεί ότι συγκλίνουν όλες οι
μεταβλητές ή
// όσες περισσότερες μεταβλητές είναι δυνατόν
for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
    for (k = 0; k < K; k++) {
        previousL[p][k] = 1;
    }
}

while (x) {
    counter++;

    for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
        if (p == 0 || p == 1) {
            KaufmanRobertsFormula_Noise_Increase kauf = new
KaufmanRobertsFormula_Noise_Increase(C[p], K, b[p],
reducedTrafficLoad[p]);
            q = kauf.getQ();
            qNormalized = kauf.getQNormalized(q);
            blockingProbabilities =
kauf.getBlockingProbabilities(qNormalized);
            for (k = 0; k < K; k++)
                Q[p][k] = blockingProbabilities[k];
        } else {
            KaufmanRobertsFormula_Noise_Increase kauf = new
KaufmanRobertsFormula_Noise_Increase(C[p], K, b[p],
reducedTrafficLoad[p]);
            q = kauf.getQLocal(this.noise);
            qNormalized = kauf.getQNormalized(q);
            blockingProbabilities =
kauf.getBlockingProbabilitiesLocal(qNormalized, this.noise);
            for (k = 0; k < K; k++)
                Q[p][k] = blockingProbabilities[k];
        }
    }

    L = Q;
    flag++;

    for (p = 0; p < numOfLinks; p++) {
        for (k = 0; k < K; ++k) {
            if (b[p][k] > 0) {

```



```

private double[] blockingProbabilities;
private double G; // Σταθερά κανονικοποίησης
private double kT = 1.38069 * Math.pow(10, -23);

public double NoiseThermal(double j) {
    double x = 0.9;
    return (1 / Math.sqrt(2 * Math.PI * Math.pow(kT * j, 2)))
        * Math.pow(Math.E, -1 * (Math.pow(x, 2) / (2 * Math.pow(kT * j,
2)))));
}

public double NoiseInter(double j, double p) {
    double P = p;
    return (P * j);
}

public double NoiseTotal(double j, double p) {
    return (NoiseInter(j, p) + NoiseThermal(j));
}

public KaufmanRobertsFormula_Noise_Increase(int C, int K, int[] b, double[]
trafficLoad) {
    this.C = C;
    this.K = K;
    this.b = Arrays.copyOf(b, b.length); // Αντιγραφή του πίνακα για να
αποφευχθεί η εξωτερική τροποποίηση
    this.trafficLoad = Arrays.copyOf(trafficLoad, trafficLoad.length); //
Αντιγραφή του πίνακα για να αποφευχθεί η εξωτερική τροποποίηση
    this.q = new double[C + 1];
    this.qNormalized = new double[C + 1];
    this.blockingProbabilities = new double[K];
}

public KaufmanRobertsFormula_Noise_Increase() {
}

public double[] getQ() {
    Arrays.fill(q, 0); // Επαναφορά του πίνακα στις προεπιλεγμένες τιμές
πριν την υπολογισμό
    q[0] = 1;
    G = 0;
    for (int j = 1; j <= C; j++) {
        for (int k = 0; k < K; k++) {
            if (j - b[k] >= 0) {
                q[j] += trafficLoad[k] * b[k] * q[j - b[k]];
            }
        }
        if (j != 0) { // Αποφυγή διαίρεσης με το μηδέν
            q[j] /= j;
        }
    }
    return q;
}

public double[] getQLocal(double p) {
    Arrays.fill(q, 0); // Επαναφορά του πίνακα στις προεπιλεγμένες τιμές
πριν την υπολογισμό
    q[0] = 1;
    G = 0;

    for (int j = 1; j <= C; j++) {

```

```

        for (int k = 0; k < K; k++) {
            if (j - b[k] > 0) {
                q[j] += (1 - NoiseTotal(j - b[k], p)) * trafficLoad[k] *
b[k] * q[j - b[k]];
            } else if (j - b[k] == 0)
                q[j] += trafficLoad[k] * b[k] * q[j - b[k]];
        }
        if (j != 0) { // Αποφυγή διαίρεσης με το μηδέν
            q[j] /= j;
        }
    }

    return q;
}

public double[] getQNormalized(double[] q) {
    G = 0.0;
    for (int j = 0; j <= C; j++) {
        G += q[j];
    }

    for (int j = 0; j <= C; j++) {
        qNormalized[j] = q[j] / G; // Κανονικοποίηση των τιμών q
χρησιμοποιώντας το άθροισμα
    }

    return qNormalized;
}

public double[] getBlockingProbabilities(double[] qNormalized) {
    Arrays.fill(blockingProbabilities, 0); // Επαναφορά του πίνακα στις
προεπιλεγμένες τιμές πριν την υπολογισμό
    for (int k = 0; k < K; k++) {
        for (int j = (C - b[k] + 1); j <= C; j++) {
            blockingProbabilities[k] += qNormalized[j];
        }
    }
    return blockingProbabilities;
}

public double[] getBlockingProbabilitiesLocal(double[] qNormalized, double
p) {
    Arrays.fill(blockingProbabilities, 0); // Επαναφορά του πίνακα στις
προεπιλεγμένες τιμές πριν την υπολογισμό

    for (int k = 0; k < K; k++) {
        for (int j = (C - b[k] + 1); j <= C; j++) {
            blockingProbabilities[k] += qNormalized[j];
        }

        for (int j = 1; j <= (C - b[k]); j++) {
            blockingProbabilities[k] += qNormalized[j] * NoiseTotal(j, p);
        }
    }
    return blockingProbabilities;
}

public double getSpecificProbability(int i, double[] blockingProbabilities)
{
    if (i >= 0 && i < blockingProbabilities.length) {
        return blockingProbabilities[i];
    }
}

```

```

    } else {
        // Χειρισμός του εκτός εύρους δείκτη
        return 0.0;
    }
}
}

```

```

package reducedloadapproximation;

/**
 *
 * @author user
 */
public class BlockingProbabilityCalculation {

    // Δήλωση μεταβλητών
    private int K, p, k;
    private int[] C;
    private double[][] L;
    private double[] blockingProbabilities;
    private double tmp;

    // Κατασκευαστής της κλάσης
    public BlockingProbabilityCalculation(int K, int[] C, double[][] L) {
        this.C = C;
        this.K = K;
        this.L = L;
        this.blockingProbabilities = new double[this.K];
    }

    // Μέθοδος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αποκλεισμού
    public double[] getBlockingProbabilities() {
        tmp = 1; // Αρχικοποιείται με "1", γιατί οι νέες τιμές
        πολλαπλασιάζονται στο tmp

        for (k = 0; k < K; k++) {
            for (p = 0; p < C.length; p++) {
                tmp *= (1 - L[p][k]); // Υπολογισμός της πιθανότητας
                αποκλεισμού για κάθε υπηρεσία
            }
            blockingProbabilities[k] = 1 - tmp; // Καταγραφή της πιθανότητας
            αποκλεισμού
            tmp = 1; // Επαναφορά του tmp στην αρχική τιμή για την επόμενη
            επανάληψη
        }
        return blockingProbabilities; // Επιστροφή του πίνακα με τις
        πιθανότητες αποκλεισμού
    }
}

```