



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΜΗΜΑΤΟΣ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**Τίτλος Εργασίας: Design and development of management functionality in the
context of 5G infrastructures**

Διπλωματική Εργασία

Όνομα φοιτητή: ΣΤΑΜΠΟΛΟΓΛΟΥ ΗΛΙΑΝΝΑ

Αθήνα, 2017



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΜΗΜΑΤΟΣ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή: Γεώργιος Δημητρακόπουλος,
Μάρα Νικολαΐδου,
Κωνσταντίνος Τσερπές**

**Όνομα Πρώτου Καθηγητή (Επιβλέπων)
Γεώργιος Δημητρακόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής, ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**Όνομα Δεύτερου Καθηγητή
Μάρα Νικολαΐδου
Καθηγήτρια, ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**Όνομα Τρίτου Καθηγητή
Κωνσταντίνος Τσερπές
Επίκουρος Καθηγητής, ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

Η Σταμπολόγλου Ηλιάννα, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

*Στους γονείς μου και στη μνήμη
της θείας μου και του θείου μου,
Φανή και Μανώλη.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα, ξεκινώντας να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους εκείνους που με τον δικό του τρόπο ο καθένας ξεχωριστά μπόρεσε να με βοηθήσει στην περάτωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Δημητρακόπουλο, για τη συνεχή καθοδήγηση αλλά και ενθάρρυνση του. Από την αρχή της συνεργασίας μας για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας μου, έδειξε την αμέριστη εμπιστοσύνη προς το πρόσωπό μου. Τα σχόλια αλλά και οι παρατηρήσεις του πάνω σε τεχνικά θέματα αποτέλεσαν πολύτιμα εφόδια για την ολοκλήρωση αυτής.

Επίσης ευχαριστώ όλους τους καθηγητές που συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής, του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου.

Ευχαριστώ ακόμα, τους συναδέλφους του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος με τους οποίους μέσα από συζητήσεις και τις συνεργασίες για την υλοποίηση αρκετών κοινών εργασιών μας, καταφέραμε να διευρύνουμε το γνωστικό μας πεδίο στις τρέχουσες τεχνολογίες.

Πέραν και πάνω από όλους όμως, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ, στην οικογένεια μου, η οποία με στηρίζει όλα τα χρόνια σε κάθε μου βήμα και μου προσφέρει ανιδιοτελή ψυχολογική υποστήριξη.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
Περίληψη	8
Abstract	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
Εισαγωγή	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
Εξέλιξη ασύρματων δικτύων	15
Εισαγωγή	15
Πρώτη γενιά (1G): Τα κυψελωτά δίκτυα	15
Δεύτερης γενιάς (2G): Τα κυψελωτά Δίκτυα GSM.....	16
Τρίτης γενιάς (3G): Μεταφορά Δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες	16
Τέταρτη γενιά (4G): Μεγαλύτερη ταχύτητα και χωρητικότητα.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	19
Κατανόηση των χαρακτηριστικών του LTE-Advanced	19
Εισαγωγή	19
Εφαρμογή της LTE στην Ελλάδα.....	19
Απαιτήσεις.....	20
Κυριότερες Απαιτήσεις IMT-Advanced	21
Τεχνολογική εξέλιξη συστημάτων από 3G σε 4G.....	22
LTE-Advanced	27
Τεχνολογίες LTE-Advanced.....	28
Carrier Aggregation (CA)	28
Πιθανά σενάρια Carrier Aggregation	29
Intra-band Contiguous Carrier Aggregation	29
Intra-band Non-Contiguous Carrier Aggregation	30
Inter-band Non-Contiguous Carrier Aggregation	30

Συμμετρική και Ασύμμετρη Συνάθροιση Φερόντων Καναλιών.....	30
Symmetric Carrier Aggregation	30
Asymmetric Carrier Aggregation	30
Τύποι Component Carriers.....	31
Carrier Aggregation – Cell Configuration.....	31
Primary Serving Cell (Pcell).....	32
Secondary Serving Cell (Scells)	32
Προτυποποίηση LTE-Advanced	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	34
Οι ασύρματες επικοινωνίες των 5G.....	34
Εισαγωγή	34
Σχεδιασμός και διαχείριση δικτύων.....	34
Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Νέες Τεχνολογίες	35
Σχεδιαστικές Αρχές Δικτύου 5G	40
Ultra Dense Deployments	41
Software Defined Networking.....	43
Network Function Virtualization	49
Cloud Computing.....	51
Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	54
Εξέλιξη των 5G ασύρματων δικτύων	54
Εισαγωγή	54
Προδιαγραφές 5G	54
Network Softwarization and Programmability.....	55
Κινητικότητα στα 5G δίκτυα.....	63
Distributed Mobility Management.....	63
Ανάλυση των DMM προσεγγίσεων	67
Πρωτόκολλο προερχόμενο από την προσέγγιση διαχείρισης κινητικότητας IP, PMIPv6	67
Μηχανισμός βασιζόμενος στο Software Defined Networking (SDN)	70

Λύση βασισμένη στη δρομολόγηση	71
Τρέχων Έρευνες	73
Σύγκριση 5G δικτύων με 4G δίκτυα	74
Χρονοδιάγραμμα 5G δικτύων	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	77
Radio Access Technology Selector	77
Εισαγωγή	77
Μοντέλο Προσομοίωσης.....	79
Ανάλυση Προσομοίωσης.....	79
Συμπεράσματα	83
ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών μέσα στα χρόνια και συγκεκριμένα το πέρασμα από τα δίκτυα των τεσσάρων πρώτων γενεών στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G). Έπειτα από το γρήγορο πέρασμα από τα πρώτα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, η εξέλιξη που γνώρισαν οι τηλεπικοινωνίες συνέβαλε στην ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών επενδύσεων καθώς και των περαιτέρω καινοτόμων συστημάτων, που στόχο έχουν να ανταπεξέλθουν στις συνεχόμενες και αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών. Τα δίκτυα αυτά αναφέρονται ως ασύρματα δίκτυα όπου συνεχώς εξελίσσονται διαμέσου της παροχής συνεχώς ανανεωμένων και επαναστατικών υπηρεσιών, με σκοπό την άμεση και ευέλικτη εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών σε μεγαλύτερη εμβέλεια. Ακόμα, το πέρασμα από τα αναλογικά στα ψηφιακά δίκτυα καθώς και η εμφάνιση των δικτύων 3^{ης}, 4^{ης} και η εξέλιξη αυτών στα μελλοντικά δίκτυα 5^{ης} γενιάς, σηματοδοτούν μία νέα και φιλόδοξη εποχή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η εργασία αυτή, πραγματεύεται την εξέλιξη των ασύρματων γενιών με σκοπό τη σύγκριση των χαρακτηριστικών τους. Επίσης παρουσιάζει ένα νέο σχέδιο για την αρχιτεκτονική δικτύου για τα μελλοντικά 5G δίκτυα, περιλαμβάνοντας πρωτόκολλα και αλγορίθμους. Ο σχεδιασμός αυτός βασίζεται στην κεντρικοποίηση του κινητού περιβάλλοντος. Θα δούμε ότι το τερματικό του χρήστη έχει τη δυνατότητα να αλλάξει την τεχνολογία πρόσβασης (Radio Access Technology) – RAT βασιζόμενο σε αρκετά κριτήρια. Ενώ με τη βοήθεια ενός σεναρίου θα δούμε πως ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται παρέχει πολύ καλύτερες μετρήσεις από τους προγενέστερους αλγορίθμους.

Για το σκοπό αυτό, στο 1^ο κεφάλαιο, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και αναφέρονται με συντομία τα κυριότερα χαρακτηριστικά των γενιών των ασύρματων δικτύων. Στο 2^ο κεφάλαιο, περιγράφεται η LTE (Long Term Evolution) τεχνολογία και γίνεται μία σύγκριση μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς δικτύων. Έπειτα στο 3^ο και 4^ο κεφάλαιο, γίνεται μία εκτεταμένη αναφορά στα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων 5^{ης} γενιάς. Ύστερα, γίνεται μία περιγραφή ενός καινοτόμου αλγορίθμου για radio networks selection σε ετερογενές περιβάλλον. Πραγματοποιείται μία σύγκριση αυτού του αλγορίθμου με τους υπόλοιπους αλγορίθμους που υπάρχουν στην αγορά, ενώ τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν με τη βοήθεια ενός γραφήματος.

Λέξεις Κλειδιά : 5G, Heterogeneous Wireless Networks, Quality of Service (QoS), Policy Routing

Abstract

The diploma thesis deals with the evolution of telecommunication means over the years and particularly the evolution from 4G to 5G networks. After the quick passage from the first telecommunication systems, the evolution telecommunications experienced contributed to the development of the telecommunication investments and the development of further innovative systems, aiming to cope with the continuing and growing needs of users.

These networks are referred to as wireless networks, are constantly evolve through the provision of continuously renewed and revolutionary services, aiming to direct and flexible service of more users, in a wider range. Furthermore, the transition from analogue to digital networks and the emergence of networks of 3rd, 4th generations and their evolution to future 5th generation networks, signal a new and ambitious season in the sector of telecommunications.

This diploma thesis deals with the evolution of wireless generations with a purpose to compare with their characteristics. In addition to a new project about the network architecture is presented for future 5g networks, including protocols and algorithms. This design is based on the centralization of the mobile environment. We will see that the user terminal is able to change its access technology (Radio Access Technology) - RAT based on several criteria. While, by using and applying a certain scenario it will be seen that the algorithm that is used provides better metrics compared to the previous algorithms.

For this purpose, the first chapter is a flashback to telecommunication networks and shortly it refers to the main characteristics of wireless networks generations. At the second chapter, the LTE (Long Term Evolution) technology is developed and a comparison takes place between the third and fourth generation networks. At the third and fourth chapter an extensive reference is done to the characteristics of the 5th generation of wireless networks. Next, a description is done of an innovative algorithm for radio networks selection in a heterogeneous environment. A comparison of this algorithm is done with other algorithms that are available in the market, and finally, with the help of a chart, the conclusions are presented.

Keywords: 5G, Heterogeneous Wireless Networks, Quality of Service (QoS), Policy Routing

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων.....	18
Εικόνα 2 : Κάλυψη 4G δικτύων στην Ελλάδα.....	19
Εικόνα 3: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης LTE-Advanced ως προς τις απαιτήσεις της ITU [3].....	21
Εικόνα 4:Κυριότερες απαιτήσεις IMT-Advanced.....	21
Εικόνα 5: UMTS/IMT - 2000 network.....	24
Εικόνα 6: Επικοινωνία σε περιβάλλον 4G και ενοποίηση των κυτταρικών δικτύων, των ασύρματων δικτύων δεδομένων και των ευρυζωνικών τεχνολογιών	25
Εικόνα 7: Απεικόνιση απαιτήσεων χρήστη δικτύου	26
Εικόνα 8: LTE και LTE-Advanced 3GPP releases	27
Εικόνα 9: LTE rel8 έως rel12 και χρήση CA	29
Εικόνα 10: Προς τα πίσω συμβατότητα της CA	29
Εικόνα 11: Asymmetric vs Symmetric Carrier Aggregation	31
Εικόνα 12: Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE/LTE-A.....	33
Εικόνα 13: Η οργανωτική δομή του 3GPP	33
Εικόνα 14: Δυνατότητες τεχνολογίας 5G.....	34
Εικόνα 15: Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps.....	36
Εικόνα 16: Σύγκριση Peak Data Rate και latency μεταξύ 4G και των προβλέψεων του 5G.....	36
Εικόνα 17: Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G για την ποιότητα υπηρεσιών σε σχέση με τη γεωγραφική θέση του χρήστη.....	37
Εικόνα 18: Ο κύριος στόχος των 5G δικτύων.....	38
Εικόνα 19: Radar Chart θεωρητικών δυνατοτήτων των 5G δικτύων.....	40
Εικόνα 20: mmWave Σήματα.....	41
Εικόνα 21: Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης μέσω της τεχνολογίας Network Densification.....	42
Εικόνα 22: Τύποι κυψελών καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών.....	43
Εικόνα 23: Βασικές αρχές κλασσικών δικτύων	45
Εικόνα 24: Αρχιτεκτονική SDN.....	47
Εικόνα 25: Δομικά Μέρη του OpenFlow.....	49
Εικόνα 26: Network Function Virtualization	50
Εικόνα 27: Επίπεδα αρχιτεκτονικής Cloud Computing	52
Εικόνα 28: Αρχιτεκτονική προγραμματιζόμενων δικτύων	53
Εικόνα 29: Τα τμήματα του software και του προγραμματιστικού δικτύου.....	55
Εικόνα 30: Αρχιτεκτονική 5G Δικτύων	58
Εικόνα 31: Protocol Layout για τα στοιχεία της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής.....	59
Εικόνα 32: Software Diagram του προτεινόμενου εικονικού δικτύου.....	61
Εικόνα 33: CAGR 2013-2018	64
Εικόνα 34: Centralized and hierarchical architecture vs Distributed and flat architecture	65
Εικόνα 35: Απεικόνιση των DMM-GWs	66
Εικόνα 36: Proxy Mobile IPv6, Flat Domain Model and Proxy Mobile IPv6, Domain Chaining	68
Εικόνα 37: PMIPv6-based DMM.....	68
Εικόνα 38: SDN-based DMM	70
Εικόνα 39: Routing-based DMM	72
Εικόνα 40: Σύγκριση κινητών δικτύων επικοινωνίας	74
Εικόνα 41: Διαγραμματική απεικόνιση των τεχνολογιών με το πέρασμα των ετών	76
Εικόνα 42 : Σχήμα Radio Access Network selection.....	77

Εικόνα 43: Αρχικό μέγεθος buffer.....	79
Εικόνα 44: Σενάριο προσομοίωσης	80
Εικόνα 45: Πιθανότητα ικανοποιημένων χρηστών.....	82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας GSM και UMTS	24
Πίνακας 2: Βασικές παράμετροι των 5G δικτύων.....	55
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των τριών DMM προσεγγίσεων.....	73

Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των σύγχρονων δικτυακών συσκευών, κατακλύζει τη σύγχρονη αγορά, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη σταθερών υπολογιστών, ταμπλετών, φορητών υπολογιστών, netbooks, notebooks, έξυπνων τηλεφώνων και πλήθος άλλων συσκευών, που έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, έχει καταστήσει ιδιαίτερα ζωτικής σημασίας την ανάγκη για επέκταση των δικτύων τηλεπικοινωνιών. Σε μικρό χρονικό διάστημα, οι δικτυακές διευθύνσεις, που υπάρχουν στο πρωτόκολλο IPv4, δε θα επαρκούν και θα επικρατήσει το IPv6 πρωτόκολλο για τα σύγχρονα δίκτυα. Η χρήση των συσκευών επεκτείνεται όλο και περισσότερο, ενώ οι σύγχρονες ανάγκες για επικοινωνία και πρόσβαση στο διαδίκτυο δημιουργούν την ανάγκη για την προέκταση των δικτύων επικοινωνιών.

Η συνεχόμενη αυτή αύξηση των αναγκών σε πόρους οδήγησε στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων. Σκοπός αυτής της αλλαγής είναι η αύξηση των δυνατοτήτων που διαθέτουν τα κινητά τερματικά και κατ' επέκταση την βελτίωση των υπηρεσιών που παρέχονται στον τελικό χρήστη. Ουσιαστικά η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων, βοήθησε στην παροχή επιπλέον υπηρεσιών στους χρήστες πέραν από αυτές που μπορούσαν να προσφέρουν οι προκάτοχοί τους εξαιτίας των λιγότερων δυνατοτήτων τους. Εκτός από τις υψηλές ταχύτητες που υπόσχονται, αποσκοπούν στη δημιουργία ενός ετερογενούς δικτύου, το οποίο θα ενσωματώνει όλα τα προϋπάρχοντα δίκτυα και θα εξυπηρετεί έναν ακόμα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εξέλιξη ασύρματων δικτύων

Εισαγωγή

Οι ασύρματες επικοινωνίες για να επιτύχουν τα σημερινά χαρακτηριστικά και για να παρέχουν τις σημερινές υπηρεσίες πέρασαν από πολλές μεταβατικές γενιές. Στο παρόν κεφάλαιο θα δοθούν ιστορικά στοιχεία από κάθε μία γενιά καθώς επίσης και τεχνολογικές πληροφορίες αυτών. Επίσης γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των ασύρματων γενιών.

Πρώτη γενιά (1G): Τα κυψελωτά δίκτυα

Τα πρώιμα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα αναπτύχθηκαν στα 1980 και είναι γνωστά ως «συστήματα πρώτης γενιάς» (1G). Η σημαντικότερη εξέλιξη που επέφεραν τα συστήματα αυτά ήταν η δυνατότητα που παρείχαν στο χρήστη να επικοινωνεί μέσω του κινητού τηλεφώνου χωρίς να διακόπτεται η σύνδεση όταν μεταφέρεται από περιοχή σε περιοχή και είχαν ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων έως 2,4kbps.

Το πρώτο κυψελωτό δίκτυο (cellular network) μπήκε σε λειτουργία στην Ιαπωνία το 1979 και έως το 1984 έγινε το πρώτο εθνικό δίκτυο 1^{ης} γενιάς κινητής τηλεφωνίας. Έπειτα εμφανίστηκαν στις Σκανδιναβικές Χώρες, με το δικό τους δίκτυο 1^{ης} γενιάς, το NMT (Nordic Mobile Telephone) το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή το 1981. Και άλλες χώρες στη συνέχεια δημιούργησαν τα δικά τους δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο κάθε χώρα δημιούργησε τα δικά της πρότυπα και συστήματα επικοινωνίας και για την ύπαρξη μίας ολοκληρωμένης επικοινωνίας ήταν απαραίτητη η ενοποίηση των διεθνών αγορών με σκοπό η χρήση των κινητών τηλεφώνων να μην οριοθετείται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Τα συστήματα αυτής της γενιάς ήταν αναλογικά συστήματα όπου η φωνή θεωρούνταν η κύρια κίνηση. Επιπλέον παραδείγματα των συστημάτων αυτών ήταν:

- AMPS
- Hicap
- CDPD
- Mobitex
- DataTac

Δεύτερης γενιάς (2G): Τα κυψελωτά Δίκτυα GSM

Ο περιορισμένος αριθμός χρηστών που μπορούσαν να εξυπηρετήσουν τα συστήματα πρώτης γενιάς, σε συνδυασμό με την ερευνητική προσπάθεια για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, οδήγησαν στην εμφάνιση των συστημάτων δεύτερης γενιάς (2G), τα οποία βγήκαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του '90. Τα πρότυπα που ανήκουν σε αυτή την γενιά είναι εμπορικής χρήσης και ψηφιακής μορφής, με αποδοτικότερη εκμετάλλευση του φάσματος και παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών. Μερικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι τα ακόλουθα:

- GSM
- Iden
- D-AMPS
- IS-95
- PDC
- CSD
- PHS
- GPRS

Η βασική διαφορά τους με τα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι ότι χρησιμοποιούν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα να μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες τόσο φωνής όσο και δεδομένων σε χαμηλές όμως ταχύτητες (9,6-14,4kbps). Η χρήση του ψηφιακού αυτού δικτύου βοήθησε ακόμα στη μείωση των περιπτώσεων απάτης. Συγκεκριμένα, ενώ στις αναλογικές συσκευές με μία μικρή διαμόρφωση μπορούσε κανείς να έχει δύο συσκευές με τον ίδιο τηλεφωνικό αριθμό, κάτι τέτοιο δεν επιτρεπόταν στις ψηφιακές.

Το μειονέκτημα ωστόσο των 2G δικτύων εντοπίζεται στο γεγονός ότι η σύνδεση αν δεν ήταν καλή είτε θα έκανε πολλές διακοπές ή θα τερματιζόταν η συνομιλία. Στην αντίπερα όχθη, ενώ στα αναλογικά δίκτυα θα υπήρχαν παράσιτα, θα συνεχιζόταν η συνομιλία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Τρίτης γενιάς (3G): Μεταφορά Δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες

Τα 3G πρότυπα άρχισαν να αναπτύσσονται, στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, εξαιτίας της μεγάλης ζήτησης και της ανάγκης για ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Παράλληλα οι κινητές συσκευές άρχισαν να εξοπλίζονται με νέες δυνατότητες, τις multimedia υπηρεσίες,

όπως είναι η δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο αλλά και η δυνατότητα αποστολής και λήψης φωτογραφιών.

Τα 3G δίκτυα προσφέρουν ταχύτητες από 125kbps έως 2Mbps. Η παγκόσμια περιαγωγή (Roaming), η ενσωμάτωση τηλεόρασης στις κινητές συσκευές (mobile TV), οι τηλεδιασκέψεις μέσω βίντεο (video conferencing) αλλά και άλλες υπηρεσίες που έχουν άμεση συνάφεια με την τοποθεσία του χρήστη, όπως είναι η πρόβλεψη καιρού, η κίνηση στους δρόμους καθώς και η εύρεση κοντινών επιχειρήσεων, είναι ανάμεσα στις καινούργιες υπηρεσίες που προσφέρονται από τα 3G δίκτυα. Χαρακτηριστικά πρότυπα της τρίτης γενιάς είναι:

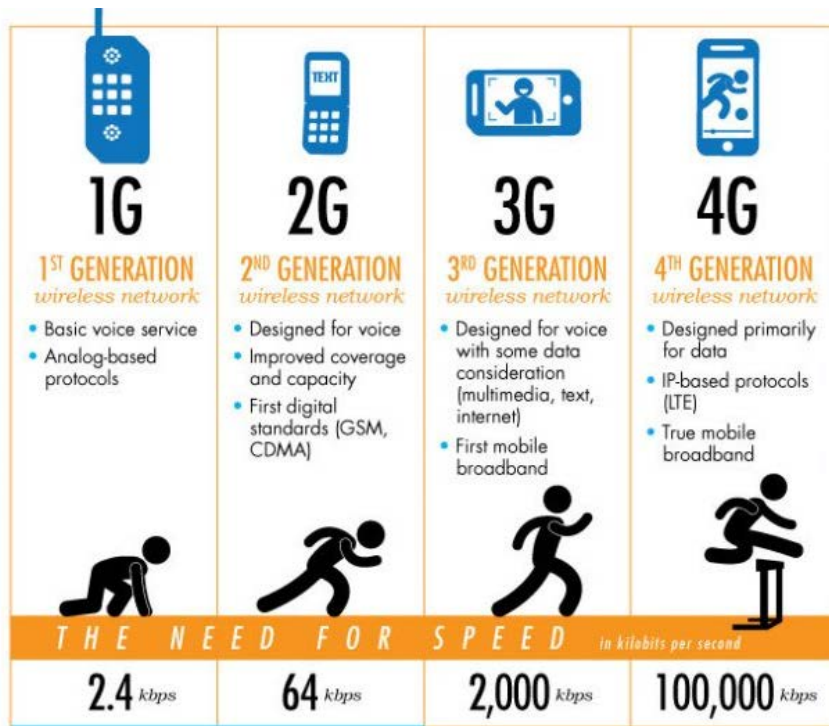
- CDMA
- W-CDMA ή UMTS (3GSM)
- FOMA
- TD-SCDMA
- GAN/UMA

Τέταρτη γενιά (4G): Μεγαλύτερη ταχύτητα και χωρητικότητα

Τα δίκτυα 4G είναι κατά πολύ γρηγορότερα από τα δίκτυα των προηγούμενων γενιών και διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα. Χρησιμοποιούνται κυρίως από κατόχους smartphones, tablets και laptops που συχνά απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης. Οι τεχνολογίες που θεωρούνται ως 4G, χρησιμοποιούνται στα παρακάτω πρότυπα:

- WiMax
- WiBro
- 3GPP (Long Term Evolution)
- 3GPP2 (Ultra Mobile Broadband)

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών, των δικτύων 4^{ης} γενιάς.



Εικόνα 1: Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων

Στην εικόνα 1, απεικονίζονται οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά των κινητών συσκευών με το πέρασμα από την μία γενιά στην επόμενη γενιά δικτύων. Όπως φαίνεται, η πάροδος των χρόνων οδήγησε στην εξέλιξη της ασύρματης τεχνολογίας. Το 1970 εμφανίστηκαν τα πρώτα ασύρματα τηλέφωνα που με την πάροδο των ετών γνώρισαν ταχύ εξέλιξη. Στην αρχή κατασκευάστηκαν για να καλύπτουν μικρές αποστάσεις όπως είναι τα σπίτια, τα γραφεία ή ένα εργοστάσιο, ενώ στην πορεία μπόρεσαν να ανταπεξέλθουν σε αυτό το σχεδιαστικό πρόβλημα και κατάφεραν να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις. Τα πρώτα ασύρματα τηλέφωνα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ήταν αναλογικά και το αποτέλεσμα ήταν η ύπαρξη πολλών παρεμβολών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κατανόηση των χαρακτηριστικών του LTE-Advanced

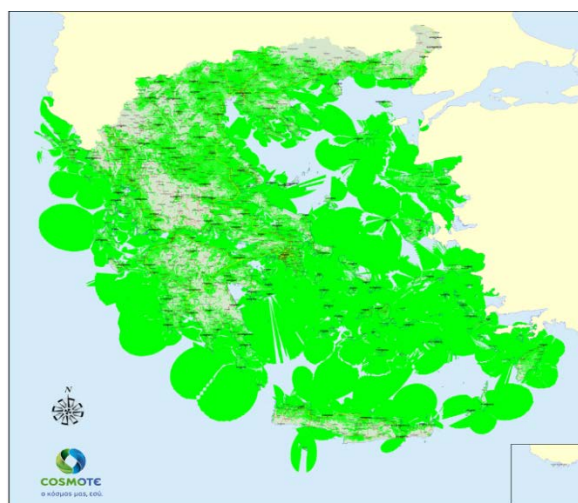
Εισαγωγή

Η LTE (Long Term Evolution) τεχνολογία που ουσιαστικά αποτελεί τον προπομπό της τέταρτης γενιάς ασύρματης τεχνολογίας, περιγράφεται στην ενότητα αυτή. Επιπλέον δίνονται κάποιες επιπλέον λεπτομέρειες για τις προηγούμενες γενιές δικτύων ενώ τέλος γίνεται και μία σύγκριση μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς δικτύων. Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι η κατανόηση των χαρακτηριστικών των 4G δικτύων.

Εφαρμογή της LTE στην Ελλάδα

Η πρώτη εταιρεία τηλεπικοινωνιών, η οποία κατάφερε να φέρει την τεχνολογία των LTE στην Ελλάδα ήταν η Cosmote. Εφάρμοσε ένα πιλοτικό πρόγραμμα στις περιοχές του Αμαρουσίου και Χαλανδρίου. Οι περιοχές αυτές δεν επιλέχθηκαν τυχαία. Εκεί βρίσκονταν οι τεχνικές υπηρεσίες της εταιρείας.

Με την εφαρμογή αυτή, δόθηκε η δυνατότητα στους χρήστες να χρησιμοποιούν προηγμένες εφαρμογές. Έτσι οι χρήστες είναι ικανοποιημένοι με τις υψηλές ταχύτητες που τους προσφέρονται [1].



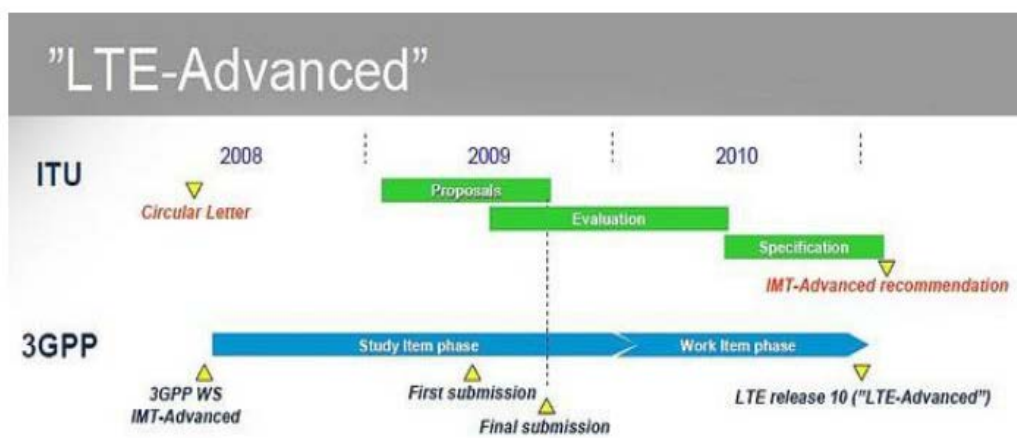
Εικόνα 2 : Κάλυψη 4G δικτύων στην Ελλάδα

Απαιτήσεις

Τα δίκτυα LTE (Long Term Evolution) αποτελούν ένα από τα πρότυπα για την ασύρματη επικοινωνία, τα οποία αναπτύχθηκαν από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project) και τεκμηριώνονται στις εκδόσεις 8 και 10 της 3GPP. Πρόκειται για την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων GSM (Global System for Mobile) και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) προς ένα δίκτυο ευρείας ζώνης με αυξημένη χωρητικότητα και μεγαλύτερη ταχύτητα δικτύου. Παρά του ότι το δίκτυο LTE αποτελεί φυσική εξέλιξη των δικτύων GSM/UMTS, το οποίο έχουν υιοθετήσει και πάροχοι άλλων δικτύων όπως το CDMA με παρόχους τις Verizon στη Β. Αμερική και au by KDDI στην Ιαπωνία [2]. Η έκδοση 8 του δικτύου LTE αν και αναφερόταν ως σύστημα 4^{ης} γενιάς κινητής τηλεφωνίας (4G) στην πραγματικότητα δεν ίσχυε αυτό καθώς δεν ανταποκρινόταν στις απαιτήσεις που είχε ορίσει ο διεθνής οργανισμός ITU-R. Για αυτό το λόγο, το LTE αναβαθμίστηκε στην έκδοση 10 και μετονομάστηκε σε LTE Advanced για να πληροί τις προϋποθέσεις έτσι ώστε να θεωρείται σύστημα 4G. Ο κύριος στόχος του LTE είναι να παρέχει ένα υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών με χαμηλή καθυστέρηση (low latency) και πακέτα με βελτιστοποιημένη radio access τεχνολογία που υποστηρίζει την ευελιξία στη χρήση εύρους ζώνης. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει σχεδιαστεί με στόχο την χαμηλότερη πολυπλοκότητα, τη συνεχή απαίτηση από τους χρήστες για χαμηλότερο κόστος καθώς και την ανάγκη για ένα βελτιστοποιημένο σύστημα με ανταλλαγή πακέτων.

Οι απαιτήσεις είναι συγκεκριμένες και έχουν προκύψει από την επεξεργασία των αναγκών των μελλοντικών καταναλωτών. Βασική απαίτηση είναι το 4G δίκτυο να παρέχει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας συγκριτικά με τα 3G δίκτυα. Ένα τέτοιο προϊόν το οποίο επιτυγχάνει τόσο σημαντικούς ρυθμούς μετάδοσης αναμένεται να ενσωματώσει έναν τεράστιο αριθμό χρηστών συγκριτικά με τα προϋπάρχοντα δίκτυα. Αυτό έχει ως επακόλουθο την αύξηση της διακίνησης πολυμεσικών δεδομένων με αποτέλεσμα η χωρητικότητα συστημάτων όπως το 3G να θεωρείται πρακτικά αδύνατο να τους εξυπηρετήσει. Έτσι, τα 4G δίκτυα πρέπει να επιτυγχάνουν τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερη χωρητικότητα από την αντίστοιχη των 3G δικτύων. Επιπλέον, μια ακόμα σημαντική απαίτηση είναι η παροχή κινητών υπηρεσιών υψηλής ποιότητας (QoS). Δεδομένου ότι τα ασύρματα συστήματα υποφέρουν από συμφόρηση εξαιτίας της χρήσης περιορισμένου εύρους συχνοτήτων και μεταδιδόμενης ισχύος. Έτσι, μια εξαιρετική ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών είναι αναγκαία για την υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών. Μια επιπλέον απαίτηση είναι η υποστήριξη σε μεγάλο βαθμό παγκόσμιας κοινής λειτουργίας, διατηρώντας την ευελιξία και την υποστήριξη μεγάλου εύρους υπηρεσιών και εφαρμογών. Τέλος, εξαιτίας του χαρακτήρα του νέου συστήματος το οποίο θα ενσωματώσει

πολλές και διαφορετικές τεχνολογίες, χρησιμοποιείται τεχνολογία σε πρωτόκολλα IP ώστε να μπορεί να υπάρχει συνεργασία και με άλλα συστήματα ασύρματης πρόσβασης.



Εικόνα 3: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης LTE-Advanced ως προς τις απαιτήσεις της ITU [3]

Κυριότερες Απαιτήσεις IMT-Advanced

Στην εικόνα 4 απεικονίζονται οι κυριότερες απαιτήσεις του IMT-Advanced.

Εύρος φρεά	5–20 MHz, κλιμακωτά
Ρυθμός μετάδοσης (στατικό χρήση)	1 Gbit/s
Ρυθμός μετάδοσης (κινούμενο χρήση)	100 Mbit/s
Φασματική απόδοση (downlink)	15 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (uplink)	6.75 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (Συστήματος)	3 bit/s/Hz/cell
Φασματική απόδοση (Συστήματος σε εσωτερικό χώρο)	2.25 bit/s/Hz/cell
Χαρακτηριστικά	• Αποκλειστικά IP δίκτυο μεταγωγής πακέτου • Διασυνδεσιμότητα με υπάρχοντα πρότυπα • Δυναμικός διαμορφασμός πόρων • Παγκόσμια περιαγωγή μεταξύ πολλαπλών δικτύων με απροβλημάτιστες μεταπομπές

Εικόνα 4:Κυριότερες απαιτήσεις IMT-Advanced

Τεχνολογική εξέλιξη συστημάτων από 3G σε 4G

Βασικό χαρακτηριστικό της ανθρώπινης ύπαρξης και εξέλιξης είναι η «επικοινωνία». Επί της ουσίας, ο όρος αυτός αναφέρεται στη διαδικασία της ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ δύο ή περισσότερων μερών για τα οποία η πληροφορία έχει νόημα, έτσι αποκτά νόημα και η ανταλλαγή της ως πράξη. Αυτό διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του ανθρώπινου γένους. Με το πέρασμα των ετών ωστόσο και την έλευση των τηλεπικοινωνιών, ο τρόπος επικοινωνίας άλλαξε ριζικά. Η κάθε μορφής ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνίας που πραγματοποιείται ανεξαρτήτως απόστασης, οδήγησε στην ταχύτερη και πιο άμεση ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ των μερών.

Οι ασύρματες επικοινωνίες αποτελούν τον τρόπο επικοινωνίας που βρίσκεται στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος και παρουσιάζουν μια αλματώδη εξέλιξη. Στόχος τους είναι η δημιουργία ενός εύκολου στη χρήση, αποτελεσματικού και με δυνατότητες συνεχούς βελτίωσης παγκόσμιου τηλεπικοινωνιακού συστήματος μέσω της ενοποίησης διαφόρων τεχνολογιών.

Αν και θεωρούμε ως βασικό δίαυλο πρόσβασής μας στο διαδίκτυο τις ευρυζωνικές συνδέσεις, είναι γεγονός ότι η βιομηχανία των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει επιτύχει σημαντική ανάπτυξη και αποτελεί έτσι ένα μεγάλο παράθυρο στον παγκόσμιο ιστό. Η συνεχής εξάπλωση και ενίσχυση των δικτύων δεδομένων οδηγεί στη συνεχόμενη προώθηση νέων υπηρεσιών που απολαμβάνουμε μέσω των κινητών μας συσκευών (smartphones, tablets, laptops κλπ.)

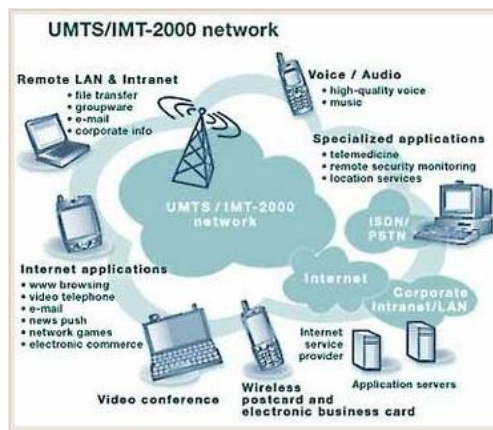
Η εισαγωγή των κυψελοειδών συστημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη της κινητής επικοινωνίας, κυρίως στη χωρητικότητα και στην κινητικότητα. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως «συστήματα πρώτης γενιάς» (1G). Η μέθοδος της αναλογικής διαμόρφωσης συχνότητας (Frequency Modulation - FM) για την επικοινωνία φωνής καθώς και η Πολλαπλή Διαίρεση Πρόσβασης Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access - FDMA) ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο, είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα αυτά της πρώτης γενιάς μεταδίδουν αναλογική πληροφορία φωνής.

Η ανάπτυξη των κυψελοειδών συστημάτων «δεύτερης γενιάς» (2G), δημιουργήθηκε από την ανάγκη καλύτερης ποιότητας, χωρητικότητας συστήματος και κάλυψης. Αποτέλεσαν τα πρώτα ψηφιακά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, καθότι ήταν τα πρώτα που χρησιμοποίησαν τεχνική ψηφιακή διαμόρφωση, με αποτέλεσμα να διαθέτουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών τόσο φωνής όσο και δεδομένων σε μικρές όμως ταχύτητες (9,6-14,4 kbps). Χαρακτηριστικά

συστήματα είναι τα GSM (Group Special Mobile), DAMPS (Digital AMPS), CDMA (Code Division Multiple Access) και PDC (Personal Digital Communication).

Ωστόσο, οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται δραματικά. Υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης σε υπηρεσίες δεδομένων θεωρούνται απαραίτητες. Παράλληλα, οι συσκευές εξοπλίζονται με τη δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο (internet). Αυτά συνέβαλαν στην ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων «τρίτης γενιάς» (3G). Ο σημαντικότερος εκπρόσωπος της τρίτης γενιάς είναι για την Ευρώπη το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Στη πραγματικότητα, πρόκειται για την εξέλιξη σε σχέση με τη χωρητικότητα, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ύπαρξη νέων υπηρεσιών, των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς. Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων (εικόνα και ήχο) με πολύ υψηλές ταχύτητες και σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ευρέος φάσματος επικοινωνίας (μεγέθους 5MHz) μεταξύ κινητού και σταθμού βάσης. Τα συστήματα 3G προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης της τάξεως των 144kbps για χρήστες υψηλής κινητικότητας σε ευρείες περιοχές, 384 kbps για χρήστες χαμηλής κινητικότητας σε ευρείες περιοχές αλλά και 2Mbps για τοπική κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μεταγωγής κυκλώματος για υπηρεσίες ευαίσθητες στη χρονική καθυστέρηση (φωνή, video) και τη χρήση μεταγωγής πακέτου για υπηρεσίες περισσότερο ανθεκτικές στη χρονική καθυστέρηση (κίνηση δεδομένων). Έτσι προκύπτει η αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος. Στο σύστημα UMTS, η πρόσβαση των συνδρομητών στο δίκτυο μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, επειδή διαχωρίζονται με τη χρήση κωδικών.

Σε αντιδιαστολή με το σύστημα GSM, δύο γειτονικοί σταθμοί βάσης μιας εταιρείας μπορούν να εκπέμπουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και κάθε συνδρομητής μπορεί να εξυπηρετείται ταυτόχρονα από δύο ή περισσότερους σταθμούς βάσης. Το μέγεθος της κυψέλης που καλύπτει ο σταθμός βάσης δεν είναι σταθερό, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας σταθμός UMTS πρέπει να εκπέμπει μεγάλο όγκο πληροφοριών, είτε επειδή λειτουργούν πολλά κινητά τηλέφωνα στις κυψέλες του, είτε επειδή υπάρχει απαίτηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων από λίγες συσκευές, μειώνεται η ισχύς εκπομπής από την κεραία αυτή, ώστε να μικρύνει η περιοχή κάλυψης του σταθμού.

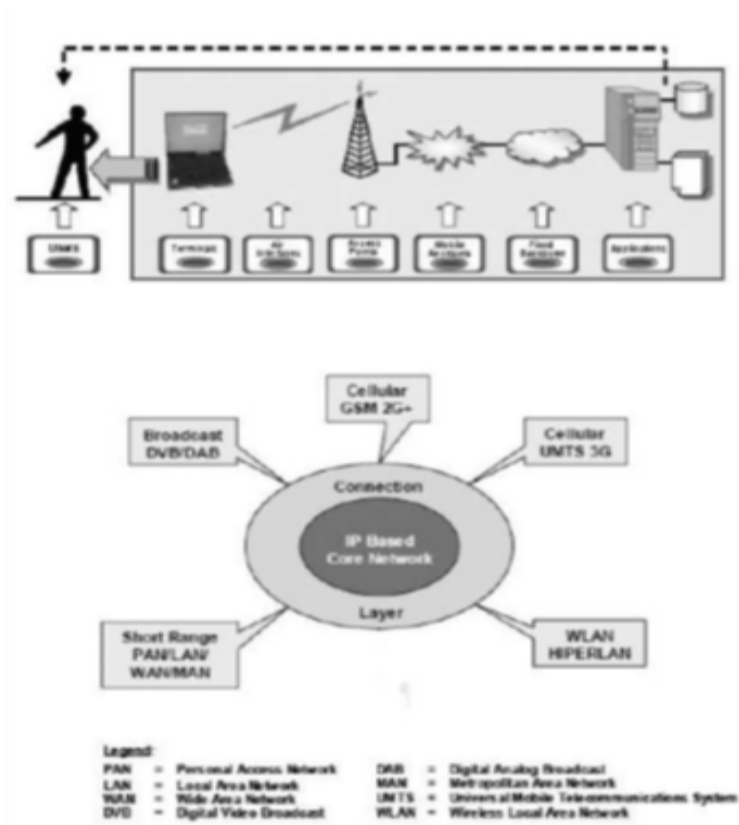


Εικόνα 5: UMTS/IMT - 2000 network

Σύγκριση	GSM	UMTS
Κανάλια	Πολλά διαφορετικά κανάλια εύρους 200kHz	Ευρυζωνική επικοινωνία με λίγα κανάλια εύρους 5MHz
Διαχωρισμός συνδρομητών	Έως 8 συνδρομητές μιλούν διαδοχικά στο ίδιο κανάλι	Διαχωρισμός με κώδικες
Διαχωρισμός κυψελών	Διαφορετικά κανάλια συχνότητας στις γειτονικές κυψέλες	Δύο γειτονικές κυψέλες μπορεί να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι
Μεταγωγή	Σύνδεση μόνο με την κυψέλη που έχει το καλύτερο σήμα	Δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης με δύο ή περισσότερες κυψέλες
Μέγεθος κυψέλης	Σταθερό	Μεταβλητό

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας GSM και UMTS

Ωστόσο, είναι αδιαμφισβήτητο πως οι ανάγκες για τεχνολογική εξέλιξη δεν σταματά ποτέ. Έτσι αναπτύχθηκε η «τέταρτη γενιά ασύρματων δικτύων δεδομένων» (4G). Στόχος της γενιάς αυτής είναι η ενοποίηση των κινητών και ασύρματων δικτύων. Στην πραγματικότητα τα 4G έχουν να κάνουν με την ενοποίηση τερματικών, δικτύων και εφαρμογών, ώστε να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες ανάγκες των συνδρομητών. Το 4G περιλαμβάνει όλα τα συστήματα από διάφορα δίκτυα, δημόσια ή ιδιωτικά, broadband ή προσωπικών επικοινωνιών αλλά και ad-hoc δίκτυα. Επιπλέον, παρέχει διαλειτουργικότητα με τα δίκτυα 2G και 3G καθώς και με τα ψηφιακά ευρυζωνικά συστήματα, ενώ βασίζεται στο IP πρωτόκολλο, το οποίο είναι και ο μηχανισμός ενοποίησης και παρέχει ασύρματο Internet.



Εικόνα 6: Επικοινωνία σε περιβάλλον 4G και ενοποίηση των κυτταρικών δικτύων, των ασύρματων δικτύων δεδομένων και των ευρυζωνικών τεχνολογιών

Βασικός στόχος της τεχνολογίας τέταρτης γενιάς είναι η βελτίωση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών (QoS-Quality of Service) καθώς και η δημιουργία των κατάλληλων εφοδίων για τις επερχόμενες τεχνολογικές εφαρμογές που θα ακολουθήσουν όπως είναι η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, MMS (Multimedia Messaging Service), video chat, mobile TV, Digital Video Broadcasting- DVB κ.α.

Το πρότυπο του 4G ικανοποίησε τους παρακάτω στόχους:

- Ένα φασματικά αποδοτικό σύστημα
- Υψηλή χωρητικότητα συστήματος, δηλαδή περισσότεροι ταυτόχρονοι χρήστες ανά κυψέλη, και μικρότερο κόστος ανά δυαδικό ψηφίο. Έτσι η χωρητικότητα των 4G συστημάτων είναι τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη των 3G, ενώ το κόστος ανά δυαδικό ψηφίο μειώθηκε σημαντικά, έτσι ώστε η χρέωση να γίνει χαμηλή. Για αυτό το λόγο αυξήθηκε σημαντικά και η χρήση του διαδικτύου σε κινητές συσκευές
- Υψηλός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν μέχρι 1Gbps για ταχύτητα download και τουλάχιστον 500Mbps για upload ταχύτητες, ενώ για τα κινούμενα οχήματα η μικρότερη ταχύτητα είναι τα 100 Mbps

- Επιπλέον, είναι σημαντική η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και δυνατότητα περιαγωγής σε πολλαπλά δίκτυα
- Παροχή εξαιρετικής ποιότητας υπηρεσιών (Quality of service- QoS) για τις εφαρμογές πολυμέσων, όπως MMS , video chat , mobile TV , Digital Video Broadcasting
- Δημιουργία ομαλών διασυνδέσεων με συστήματα 3G, ασύρματα δίκτυα υπολογιστών (WLAN – Wireless Local Area Network) και σταθερά δίκτυα. Με τη χρήση τεχνολογίας βασισμένης σε πρωτόκολλα Internet (IP – Internet Protocol) μεταγωγής πακέτων καθίσταται ομαλή η διασύνδεση διαφορετικών τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα, ο κάθε χρήστης μπορεί να διαλέγει το καλύτερο δίκτυο ανά περίπτωση (ανάλογα με τον χρόνο, χώρο και κόστος).
- Περιλαμβάνει αρκετά καλή χωρική κάλυψη, με μεταβλητή ταχύτητα μετάδοσης. Καθώς οι ταχύτητες μετάδοσης αυξάνονται, το απαιτούμενο επίπεδο λαμβανόμενου σήματος, θα αυξηθεί ανάλογα

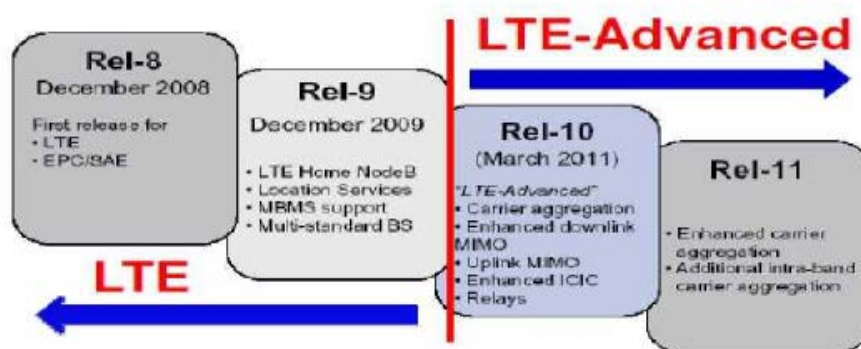


Εικόνα 7: Απεικόνιση απαιτήσεων χρήστη δικτύου

LTE-Advanced

Η 3GPP για να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές που έθεσε η ITU-R (International Telecommunication Union – Radiocommunication sector) για τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (4G), στο IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced), άρχισε το 2008 τις εργασίες ανάπτυξης μιας τεχνολογίας, βασισμένης στο LTE release 8, η οποία ονομάστηκε LTE-Advanced. Βασικά χαρακτηριστικά του LTE-Advanced είναι οι πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, ελάχιστες καθυστερήσεις στη μετάδοση, βελτίωση στη φασματική απόδοση του συστήματος τόσο για τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης όσο και για τους χρήστες στα άκρα της κυψέλης καθώς και μεγάλη αύξηση στη χωρητικότητα του συστήματος ώστε να ικανοποιεί τον αυξανόμενο αριθμό χρηστών.

Στο release 10 της 3GPP, καθορίστηκαν οι πρώτες βελτιώσεις και λειτουργίες πάνω στο 3G πρότυπο LTE στο release 8. Οι εργασίες για το release 10 ολοκληρώθηκαν τον Μάρτιο του 2011 ενώ παράλληλα είχαν ξεκινήσει οι εργασίες για την προτυποποίηση του LTE release 11, οι οποίες ολοκληρώθηκαν τον Δεκέμβριο του 2012 και είχαν ως σκοπό περισσότερο να βελτιώσουν τις λειτουργίες και τις τεχνικές του release 10. Οι δύο αυτές εκδόσεις της 3GPP για το LTE αποτελούν το πρώτο στάδιο ανάπτυξης της τεχνολογίας LTE-Advanced.



Εικόνα 8: LTE και LTE-Advanced 3GPP releases

Το πρότυπο LTE-Advanced δημιουργήθηκε για να βελτιώσει τον προκάτοχό του LTE.

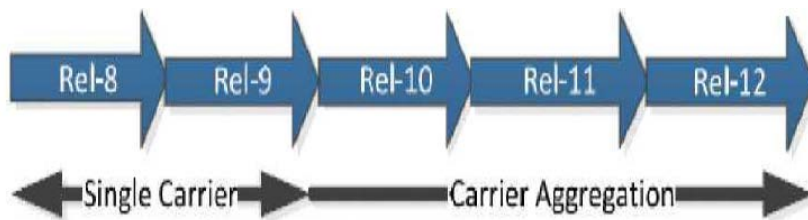
Τεχνολογίες LTE-Advanced

Στο σημείο αυτό, γίνεται μια παρουσίαση των σημαντικότερων τεχνολογιών που χρησιμοποιεί το LTE-Advanced προκειμένου να επιτύχει τους στόχους που θέτει το IMT-Advanced για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και φασματική απόδοση. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες, εισήχθησαν ήδη στο Release 10 του LTE-Advanced και υπέστησαν βελτιώσεις και προσθήκες στο Release 11.

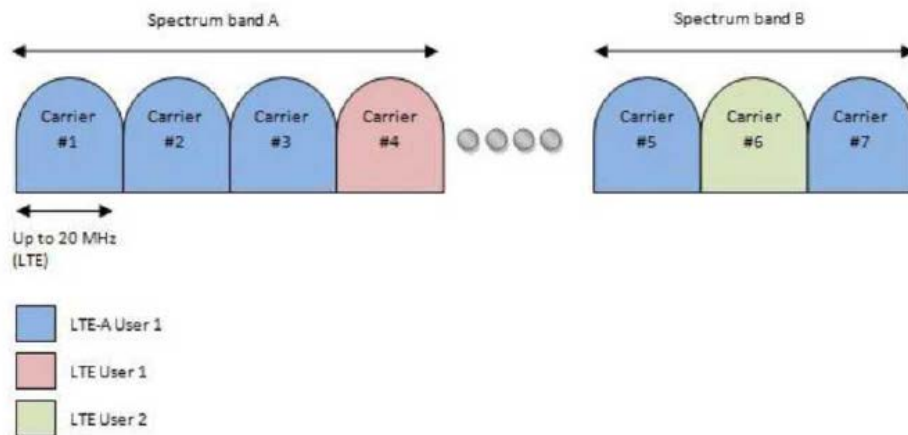
Carrier Aggregation (CA)

Ο απώτερος στόχος του LTE-Advanced είναι να υποστηρίξει το μέγιστο εύρος ζώνης των 100 MHz. Ωστόσο, αυτό αποτελεί ένα αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης το οποίο είναι σχεδόν απίθανο να είναι διαθέσιμο ως μια συνεχόμενη κατανομή. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, το LTE-Advanced επιτρέπει σε ένα κινητό να μεταδίδει και να λαμβάνει έως και πέντε διαφορετικά φέροντα (CCs), καθένα από τα οποία έχει ένα μέγιστο εύρος ζώνης των 20 MHz. Η τεχνική αυτή ονομάζεται συνάθροιση φερόντων (CA).

Η Συνάθροιση Φερόντων Καναλιών ή Carrier Aggregation, αποτελεί ένα από τα βασικότερα και πιο καινοτόμα χαρακτηριστικά του προτύπου LTE-Advanced, ως πρότυπο δικτύων 4^{ης} γενιάς. Η τεχνική αυτή εισήχθη πρώτη φορά στο LTE release 10, ενώ στο release 11 ενισχύθηκε με νέα σενάρια υλοποίησης και πολλαπλές βελτιώσεις. Σε αντιδιαστολή με το πρότυπο 3G LTE (release 8 και 9) όπου υποστηρίζει την τεχνική Μονού Φέροντος (Single Carrier) εκμεταλλευόμενο το εύρος ζώνης από 1.4MHz έως 20MHz ανά φέρον, το 4G LTE-Advanced αποσκοπεί στην εκμετάλλευση του εύρους ζώνης του συστήματος πέρα των 20MHz. Αυτό οδηγεί στην αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης. Στην Συνάθροιση Φερόντων Καναλιών, πολλαπλά φέροντα (Component Carrier-CC) των 1.4, 3, 5, 15 ή 20MHz συναθροίζονται στο επίπεδο του κινητού σταθμού (UE), με σκοπό να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο εύρος μετάδοσης και λήψης (downlink/uplink) από τη συσκευή. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι μέχρι πέντε διαφορετικά πολλαπλά φέροντα μπορούν να συναθροιστούν, για αυτό το λόγο το μέγιστο εύρος ζώνης φτάνει τα 100MHz. Μια συσκευή που υποστηρίζει την CA μπορεί ταυτόχρονα να λαμβάνει και να μεταδίδει δεδομένα σε ένα έως και πέντε CC. Τα CC καθότι έχουν εύρος ζώνης έως 20MHz καθιστούν την CA τεχνολογία ικανή να υποστηρίζει παράλληλα με τις συσκευές νέας τεχνολογίας (4G LTE) και τις παλαιότερες 3G LTE (release 8/release 9), αυτό το χαρακτηριστικό αποτελεί τμήμα της «προς τα πίσω συμβατότητας». Τέλος η CA υποστηρίζει την FDD αλλά και την TDD τεχνική.



Εικόνα 9: LTE rel8 έως rel12 και χρήση CA

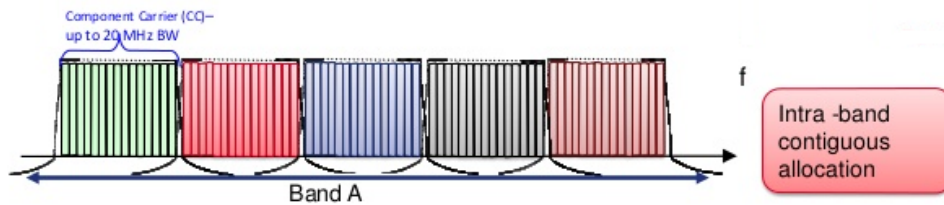


Εικόνα 10: Προς τα πίσω συμβατότητα της CA

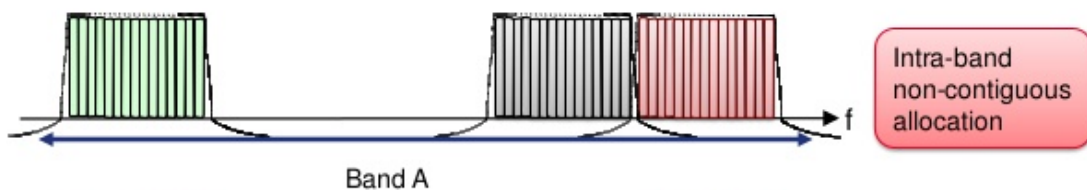
Πιθανά σενάρια Carrier Aggregation

Βάσει τη θέση των CC στο φάσμα συχνοτήτων, η τεχνική CA μπορεί να εφαρμοστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, την intra-band Contiguous Carrier Aggregation, την intra-band Non-Contiguous Carrier Aggregation και την inter-band Non-Contiguous Carrier Aggregation.

- Intra-band Contiguous Carrier Aggregation:** Τα πολλαπλά φέροντα (CC) που είναι προς συνάθροιση ανήκουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και είναι γειτονικά μεταξύ τους, χωρίς να παρεμβάλλονται άλλα CC μη χρησιμοποιούμενα από τον συγκεκριμένο κινητό σταθμό. Τα φέροντα χωρίζονται από ένα πολλαπλάσιο των 300kHz, που συμβάλει στην ορθογωνικότητα των σημάτων με σκοπό τα διάφορα φέροντα να είναι ορθογώνια μεταξύ τους και να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους. Αποτελεί την πιο απλή μορφή CA. Ο τύπος αυτός είναι σπάνια εφαρμόσιμος δεδομένου ότι σπάνια μπορούν να βρεθούν συνεχόμενα φέροντα προς συνάθροιση. Ωστόσο, γίνεται χρήση μόνο ενός πομποδέκτη (transceiver), αφού το άθροισμα των καναλιών αντιμετωπίζεται ως ενιαίο κανάλι.



- **Intra-band Non-Contiguous Carrier Aggregation:** Τα φέροντα σήματα είναι στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Αυτό ελαττώνει κάποια από τα προβλήματα και απλοποιεί τον σχεδιασμό του κινητού και του δικτύου.



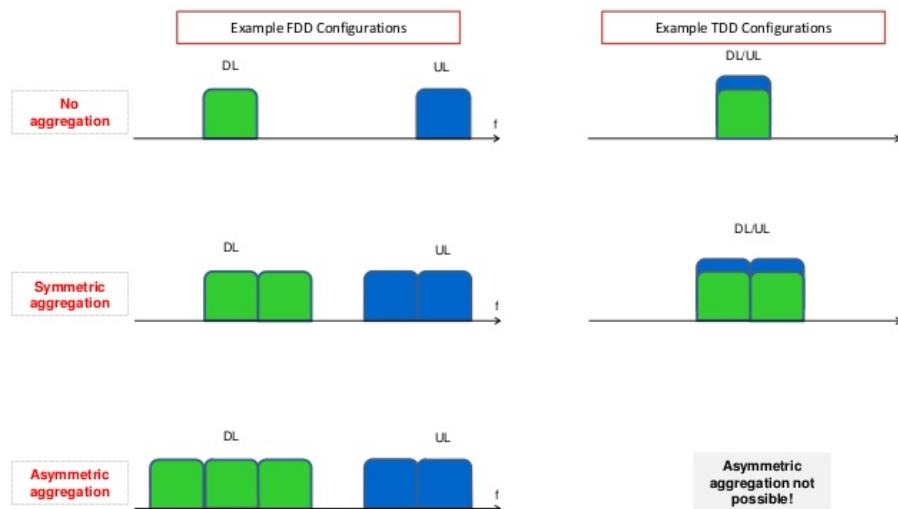
- **Inter-band Non-Contiguous Carrier Aggregation:** Αποτελεί τον τελευταίο τύπο CA. Εδώ τα πολλαπλά φέροντα όχι μόνο δεν είναι γειτονικά αλλά βρίσκονται και σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Το σενάριο αυτό εισάγει υψηλή πολυπλοκότητα αφού απαιτούνται πολλαπλοί πομποδέκτες. Η περίπτωση χρήσης αυτού του σεναρίου είναι καλή για τους χρήστες που και δεν κατέχουν όλο το φάσμα μιας μπάντας αλλά και οι συχνότητες που χρησιμοποιούν ανήκουν σε διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων.



Συμμετρική και Ασύμμετρη Συνάθροιση Φερόντων Καναλιών

- **Symmetric Carrier Aggregation:** Συμμετρική συνάθροιση φερόντων καναλιών ορίζεται η περίπτωση όπου υπάρχουν ίσος αριθμός από πολλαπλά φέροντα (Component Carrier-CC) για στο downlink και στο uplink.
- **Asymmetric Carrier Aggregation:** Ασύμμετρη συνάθροιση φερόντων καναλιών από την άλλη πλευρά, ορίζεται η περίπτωση όπου υπάρχει διαφορετικός αριθμός από πολλαπλά φέροντα (Component Carrier-CC) στο downlink και στο uplink. Ωστόσο, ο αριθμός των πολλαπλών φερόντων (Component Carrier-CC) είναι πάντα ίσος ή μικρότερος από τον

αριθμό των DL component carriers. Τα μεμονωμένα component carriers μπορούν επίσης να έχουν διαφορετικά εύρη ζώνης (bandwidths).



Εικόνα 11: Asymmetric vs Symmetric Carrier Aggregation

Τύποι Component Carriers

Τα Component Carriers μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες:

- **Primary component carrier (PCC):** Είναι το κύριο φέρον σε κάθε ομάδα. Θα υπάρχει ένα primary downlink carrier και ένα συνδεδεμένο uplink primary component carrier. Στην περίπτωση που αλλάξει το DL PCC τότε θα αλλάξει και το UL PCC.
- **Secondary component carrier (SCC):** Μπορεί να υπάρχει ένα ή περισσότερα secondary component carriers. Τα SCCs προστίθενται και μετακινούνται όπου απαιτείται, ενώ το PCC αλλάζει μόνο στη μεταβίβαση.

Carrier Aggregation – Cell Configuration

Για κάθε ένα component carrier υπάρχει και το αντίστοιχο serving cell το οποίο και εξυπηρετεί. Τα serving cells, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο δεδομένων που μεταφέρονται στα αντίστοιχα Ccs. Η μία από τις serving cells ορίζεται ως primary cell, ενώ οι υπόλοιπες είναι γνωστές ως secondary cells. Η primary cell είναι η πιο σημαντική από τις δύο κατηγορίες cells και είναι υπεύθυνη για την διαχείριση των ρυθμίσεων του CA. Ο αριθμός των serving cells που μπορούν να διαμορφωθούν εξαρτάται από την συνολική ικανότητα του UE. Όσον αφορά την κάλυψη των cells, ποικίλει εξαιτίας της συχνότητας των αντίστοιχων Ccs,

αλλά και λόγω κάποιων άλλων παραγόντων δευτερεύουσας σημασίας. Κατά συνέπεια διαφορετικά Ccs μπορούν να σχεδιαστούν για να παρέχουν διαφορετική κάλυψη.

- **Primary Serving Cell (Pcell):** Το Pcell (Primary serving Cell) είναι ένα και μοναδικό, είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και εγκαθίδρυση της RRC σύνδεσης καθώς ακόμα και για τη διαχείριση καταστάσεων κινητικότητας. Το Pcell εξυπηρετείται από το PCC (Primary Component Carrier). Αυτό στο downlink είναι υπεύθυνο για τη λήψη των πληροφοριών NAS στον κινητό σταθμό, ενώ στην περίπτωση του uplink είναι υπεύθυνο για την μεταφορά πληροφοριών ελέγχου. Υποστηρίζει τα κανάλια PDCCH, PDSCH, PUSCH και PUCCH.
- **Secondary Serving Cell (Scells):** Τα Scells διαμορφώνονται μετά την εγκαθίδρυση της σύνδεσης ως βοηθητικοί πόροι για την μεταφορά δεδομένων. Χρησιμοποιούνται μόνο από κινητά στη λειτουργία RRC_CONNECTED και προστίθενται ή αφαιρούνται μέσω συγκεκριμένων μηνυμάτων σηματοδότησης. Μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται για εξοικονόμηση μπαταρίας στον κινητό σταθμό. Υποστηρίζουν τα κανάλια PDCCH, PDSCH και PUSCH.

Προτυποποίηση LTE-Advanced

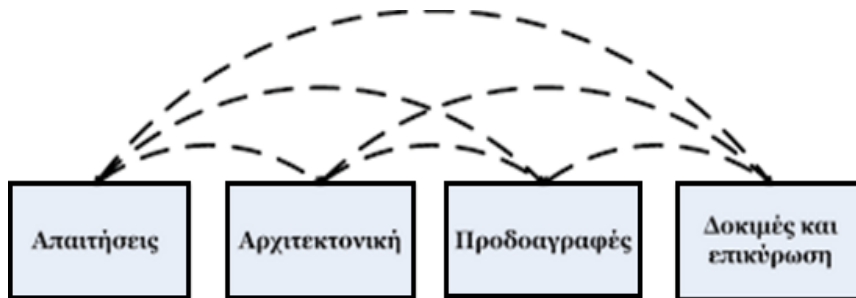
Ο οργανισμός 3GPP (3rd Generation Partnership Project) είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των προδιαγραφών του LTE-A. Ιδρύθηκε το 1998 από πέντε υπάρχοντες οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων (SDOs, Standards Development Organizations) με σκοπό να εξασφαλιστεί η δημιουργία ενός προτύπου, εφαρμόσιμου από τα δίκτυα 3G, το οποίο θα υιοθετηθεί από όλους τους οργανισμούς. Ο οργανισμός αυτός παράγει προδιαγραφές όχι μόνο για το LTE αλλά και για κινητά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς. Για το λόγο αυτό έχει θεσπίσει κανονισμούς για τη διαδικασία της προτυποποίησης όπως και αυστηρή δομή στην ανάθεση των αρμοδιοτήτων.

Τα μέρη της διαδικασίας που ακολουθούνται για την διαδικασία της προτυποποίησης αποτελούνται από:

- τον αρχικό καθορισμό των απαιτήσεων,
- την αρχιτεκτονική, όπου αποφασίζονται οι δομικές μονάδες και οι διασυνδέσεις,
- τον λεπτομερή καθορισμό όλων των στοιχείων και
- τη δοκιμαστική περίοδο και επαλήθευση

Τα στάδια αυτά μπορεί να είναι διαδοχικά αλλά κάποιες φορές υπάρχει πιθανότητα να

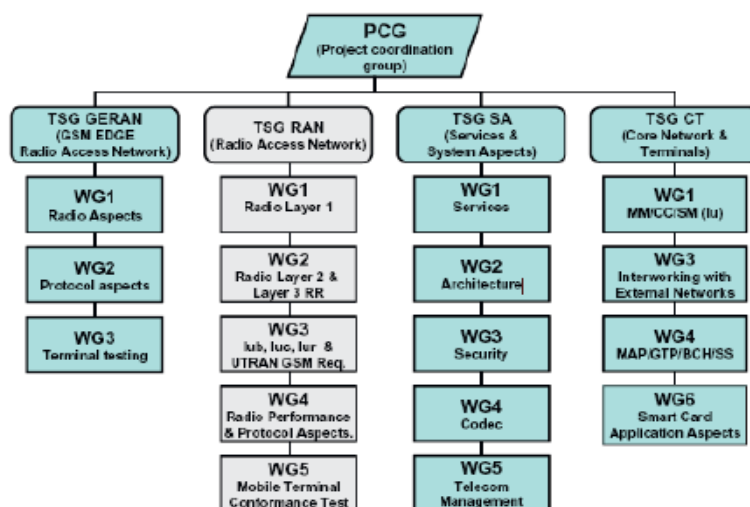
εμφανίζεται και επικάλυψη. Ο χρόνος που απαιτείται από την ολοκλήρωση του προτύπου μέχρι την εμπορική εκμετάλλευσή του είναι περίπου ένα με δύο χρόνια, ανάλογα με το αν είναι νέο πρότυπο ή αποτελεί επέκταση προϋπάρχοντος.



Εικόνα 12: Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE/LTE-A

Το 3GPP αποτελείται από τέσσερις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification Groups-TSGs). Κάθε μια από αυτές, έχει διαφορετικές αρμοδιότητες πάνω σε διαφορετικά στοιχεία του δικτύου. Το TSG RAN είναι υπεύθυνο για το LTE/LTE-A και χωρίζεται σε πέντε ομάδες εργασίας (Working Groups - WGs):

- ο RAN WG1, υπεύθυνο για τις προδιαγραφές του φυσικού στρώματος
- ο RAN WG2, υπεύθυνο για την ανάπτυξη προδιαγραφών της ασύρματης διασύνδεσης των στρωμάτων 2 και 3
- ο RAN WG3, υπεύθυνο για τις διασυνδέσεις μεταξύ σταθερών κόμβων στο RAN και μεταξύ του RAN και του CN
- ο RAN WG4, υπεύθυνο για τις προδιαγραφές επίδοσης των ραδιοσυχνοτήτων (RF) και της διαχείρισης των πόρων (Radio Resource Management - RRM)
- ο RAN WG5, υπεύθυνο για τη συμμόρφωση των τερματικών με τις προδιαγραφές.



Εικόνα 13: Η οργανωτική δομή του 3GPP

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Οι ασύρματες επικοινωνίες των 5G

Εισαγωγή

Το επόμενο βήμα στις κινητές τηλεπικοινωνίες είναι η τεχνολογία 5G, που αναμένεται να διαφοροποιήσει τα πράγματα που ισχύουν έως τώρα. Τα ασύρματα δίκτυα 5 γενιάς αναμένεται να προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και χαμηλού κόστους αποδοτικότητα καθώς και πολυάριθμους καινούργιους εξυπηρετητές. Επιπροσθέτως, η νέα αυτή τεχνολογία θα προσφέρει απεριόριστη πρόσβαση σε κάθε είδους πληροφορία, ενώ η διανομή δεδομένων θα πραγματοποιείται ανά πάσα στιγμή, από οποιονδήποτε και οπουδήποτε. Έτσι, θα δημιουργηθεί ένα οικοσύστημα τεχνολογικής και βιομηχανικής καινοτομίας.

Σχεδιασμός και διαχείριση δικτύων



Εικόνα 14: Δυνατότητες τεχνολογίας 5G

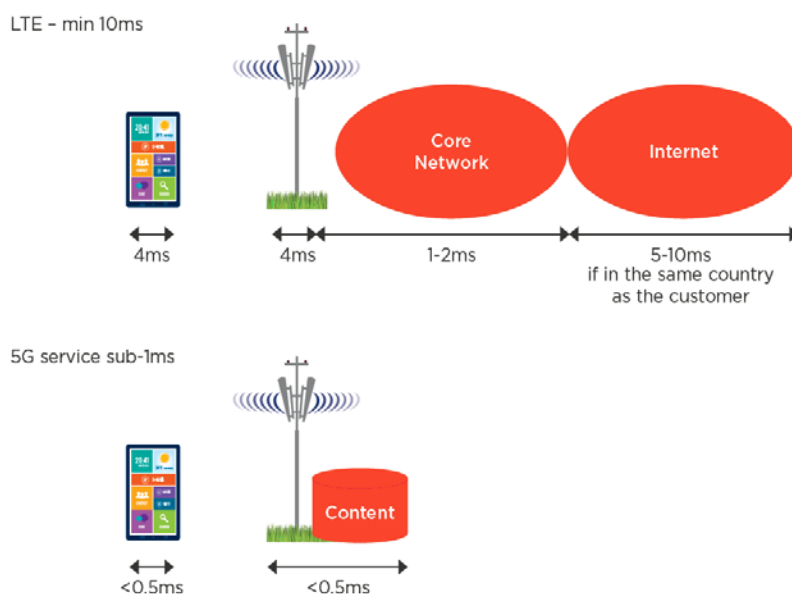
Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Νέες Τεχνολογίες

Το 5GPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) είναι ένας οργανισμός ο οποίος αποτελεί μια ευρωπαϊκή προσπάθεια της ICT βιομηχανίας για να συνεισφέρει στην έρευνα για τη νέα εποχή των ICT υποδομών, με σκοπό να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην παγκόσμια αγορά [8]. Σύμφωνα άρα με το 5GPP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5^{ης} γενιάς αναμένεται να είναι τα ακόλουθα:

- Αύξηση του όγκου των δεδομένων, που διακινούνται μέσω των κινητών δικτύων ανά γεωγραφική περιοχή. Πλέον δίνεται έμφαση στον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης και όχι στον ρυθμό που μπορεί να επιτευχθεί κάτω από ιδανικές συνθήκες. Εκτιμάται, πως ο ρυθμός μετάδοσης θα είναι 10Gbps σε συγκεκριμένες συνθήκες, εσωτερικών χώρων ή πυκνοκατοικημένων περιοχών. Ενώ θα φτάνουν τα εκατοντάδες Mbps σε αστικές και προαστιακές περιοχές και τα τουλάχιστον 10Mbps σε οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη.
- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, με ταχύτητες από 1 έως 10Gbps και χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης από 5 έως 1ms. Πρέπει να αναφέρουμε πως ορισμένες εφαρμογές απαιτούν πακέτα πληροφοριών που πρέπει να παραδοθούν με επιτυχία και με πολύ μεγάλη πιθανότητα, μέσα σε κάποιο καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η αποτυχία παράδοσης των πακέτων μπορεί να επιφέρει σημαντικές βλάβες. Συνεπώς είναι απαραίτητος ο προσεκτικός σχεδιασμός του επιπέδου εφαρμογής και της ασύρματης συνδεσης, με παράλληλη τη διατήρηση του αποδεκτού κόστους. Στην εικόνα 15, παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των προηγούμενων τεχνολογιών συγκριτικά με το 5G [9]. Ενώ στην εικόνα 16, παρουσιάζεται ένα σχήμα που απεικονίζει τις διαφορές στο peak rate μεταξύ των γενιών καθώς και τη σημαντική μείωση του latency σε τιμές από 5 έως 1 ms.



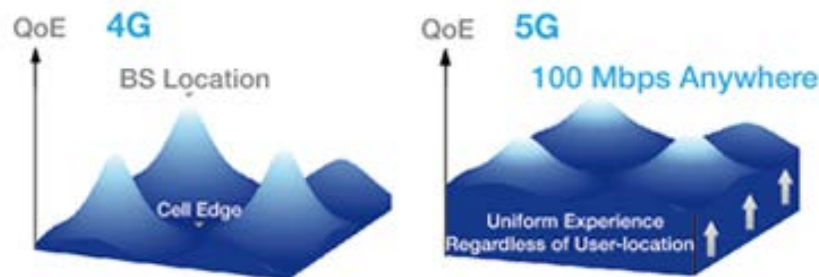
Εικόνα 15: Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps



Εικόνα 16: Σύγκριση Peak Data Rate και latency μεταξύ 4G και των προβλέψεων του 5G

- Κινητικότητα, η οποία αναφέρεται στη συνεχή παροχή υπηρεσιών στον χρήστη ενώ αυτός βρίσκεται σε κίνηση. Τα δίκτυα 5G πρέπει να έχουν την ικανότητα να καλύπτουν τις ανάγκες ενός αυξανόμενου αριθμού χρηστών και κατ' επέκταση συσκευών. Συνεπώς, η εξυπηρέτηση των χρηστών θα πρέπει να γίνεται μόνο κατ' απαίτηση και όχι να είναι δεδομένη για όλες τις συσκευές, με σκοπό την αποδοτικότερη αξιοποίηση του συστήματος.
- Βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας, που παρέχεται σε έναν χρήστη ανεξαρτήτως της γεωγραφικής του θέσης. Στα δίκτυα που υπάρχουν έως τώρα, υπάρχουν περιπτώσεις που η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται σε ένα χρήστη, εξαρτάται άμεσα από το πόσο

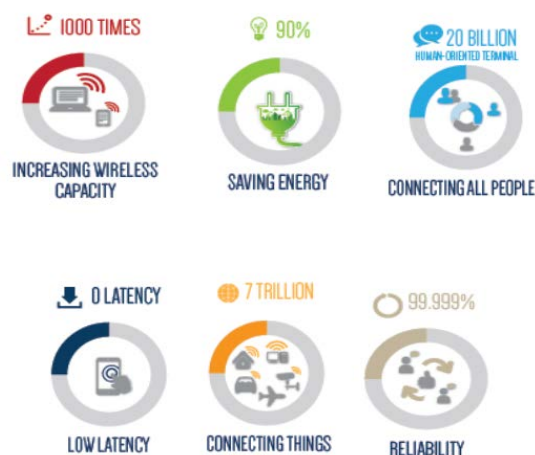
κοντά βρίσκεται στο σταθμό βάσης. Στην εικόνα 17, απεικονίζεται ο ρόλος της γεωγραφικής τοποθεσίας του χρήστη. Ωστόσο, αυτό απαιτεί το δίκτυο να έχει ανθεκτικότητα, διαθεσιμότητα και καλή κάλυψη.



Εικόνα 17: Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G για την ποιότητα υπηρεσιών σε σχέση με τη γεωγραφική θέση του χρήστη

- Πυκνότητα συνδέσεων συσκευών (1000 φορές υψηλότερο εύρος ζώνης ανά περιοχή, 10-100*πλάσιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών). Η νέα γενιά 5G θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίζει μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιάδων ταυτόχρονες συνδέσεις. Στις περιοχές με μεγάλη κίνηση δεδομένων θα πρέπει ο μεγάλος αυτός αριθμός συσκευών να ανταλλάσσει πληροφορίες με το δίκτυο. Στο σύνολο των απαιτήσεων αυτών πρέπει να υπάρχει συνεχής υποστήριξη για τις προηγούμενες γενιές. Η υποστήριξη του 10-100*πλάσιου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών εξαρτάται από τις τεχνολογίες που λειτουργούν παράλληλα, συμπεριλαμβανομένων των 2G, 3G, 4G, WiFi, Bluetooth καθώς και άλλων συμπληρωματικών τεχνολογιών. Η προσθήκη του 5G στην τεχνολογία δεν μπορεί να είναι η τελική λύση, αλλά ένα επιπλέον κομμάτι στην παγκόσμια εξέλιξη για την ικανότητα συνδεσιμότητας των συσκευών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι το IoT είναι έτοιμο να ξεκινήσει να κερδίζει αξιόλογη δυναμική. Όμοια, η απαίτηση για 1000 φορές υψηλότερο εύρος ζώνης ανά περιοχή δεν εξαρτάται από το 5G, αλλά είναι το αποτέλεσμα από τη σύνδεση περισσότερων συσκευών με υψηλότερο εύρος ζώνης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ενώ το δίκτυο 5G ίσως προσθέσει μια νέα ώθηση στην εξέλιξη σε αυτή την περιοχή, η εξέλιξη του LTE μεταβάλλει το ποσό του εύρους ζώνης που καταναλώνεται σε κάθε περιοχή και αυτό θα αυξηθεί μέχρι την έλευση του 5G. Επιπλέον, τα παραπάνω συμβάλουν στη μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου έως 80% (OPEX).

- Ευέλικτη αξιοποίηση του φάσματος. Το δίκτυο 5G πρέπει να έχει την ικανότητα της δυναμικής εκχώρησης φασματικών πόρων εκεί που κάθε φορά οι ανάγκες είναι μεγαλύτερες.
- Ενίσχυση της αποδοτικότητας της σηματοδοσίας, καθώς η χρήση των σημάτων σηματοδοσίας και ελέγχου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όπου αυτό είναι απαραίτητο ώστε να μη γίνεται άσκοπη χρήση ραδιοπόρων και ενέργειας.
- Δυναμικός έλεγχος των συσκευών μέσω του δικτύου. Τα τερματικά των 5G δικτύων πρέπει να έχουν την ευελιξία να προγραμματίζονται και να παραμετροποιούνται από το δίκτυο. Το δίκτυο θα έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται με ευέλικτο και δυναμικό τρόπο τον εξοπλισμό. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα επιλογής του κατάλληλου προφίλ σύνδεσης ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε σύνδεσης. Οι διαχειριστές των δικτύων πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν το software και το hardware του δικτύου καθώς και να ανανεώνουν το λειτουργικό σύστημα των συσκευών του δικτύου ασύρματα. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να δίνεται η δυνατότητα διάγνωσης και διόρθωσης οποιουδήποτε προβλήματος και αν προκύψει καθώς και να συλλέγονται πληροφορίες από τον εξοπλισμό των χρηστών με στόχο την βελτιστοποίηση του συστήματος.



Εικόνα 18: Ο κύριος στόχος των 5G δικτύων

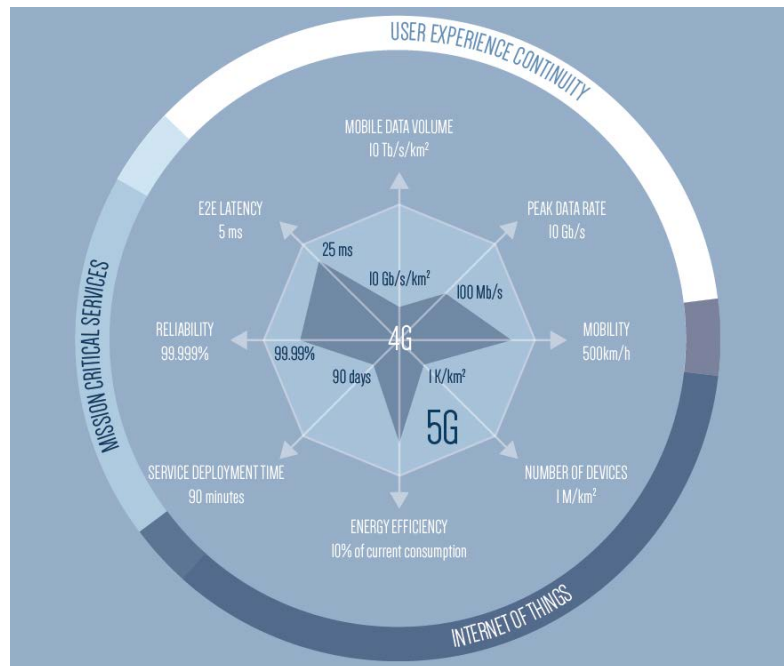
- Μείωση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο δίκτυο και αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Η ελάττωση της ενεργειακής κατανάλωσης από τα δίκτυα και τις συσκευές συμβάλλει στην οικονομική και στην οικολογική βιωσιμότητα της βιομηχανίας. Η γενική αρχή για τη βιομηχανία είναι η ελαχιστοποίηση την ενεργειακής

κατανάλωσης στο δίκτυο ενώ παράλληλα θα πρέπει όλες οι συσκευές να περιλαμβάνουν τις τεχνολογικές αλλαγές. Αυτό θα έχει ως επακόλουθο την βελτίωση του OPEX του δικτύου.

- Πολλαπλές συχνότητες και είδη πολυπλεξίας. Οι συσκευές θα μπορούν να υποστηρίξουν σήματα διαφορετικών συχνοτήτων αλλά και με διαφορετική πολυπλεξία (TDD/FDD/Mixed). Οι κινητές συσκευές σε αντιδιαστολή με τις στατικές συσκευές θα πρέπει να έχουν την ευελιξία να χειρίζονται ένα σύνολο δεδομένων από διαφορετικές τεχνολογίες και διαφορετικά φέροντα καθώς θα συναντήσουν κάποια από αυτά στα διαφορετικά περιβάλλοντα στα οποία θα βρεθούν.
- Βελτίωση της διαθεσιμότητας δικτύου και της κάλυψης. Επιτυγχάνεται 99,99% διαθεσιμότητα δικτύου και 100% κάλυψη. Το ζήτημα αυτό έγκειται κυρίως σε οικονομικές και επιχειρηματικές συζητήσεις. 99,99% διαθεσιμότητα δικτύου και 100% κάλυψη επιτυγχάνονται με τη χρήση κάθε υφιστάμενης τεχνολογίας και μπορούν να επιτευχθούν από κάθε χειριστή δικτύου. Οι χειριστές αποφασίζουν που θα τοποθετήσουν τις κυψέλες βασιζόμενοι στο κόστος του δικτύου. Οι απαιτήσεις των δικτύων 5^{ης} γενιάς για μεγαλύτερη χωρητικότητα, καθιστούν απαραίτητη τη βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Βέβαια, όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κυψελών, δημιουργείται το φαινόμενο των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών. Αυτό οδηγεί στη μείωση της απόδοσης του συστήματος. Ο έλεγχος αυτών των παρεμβολών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση CoMP, είτε με συντονισμένη κωδικοποίηση πριν την αποστολή ή με άλλους αλγόριθμους συντονισμού των κυψελών που έχουν προταθεί [10].
- Ασφάλεια. Τα δίκτυα 5G θα έχουν την ικανότητα διαχείρισης τεράστιων όγκων δεδομένων, που θα ανταλλάσσονται μεταξύ ανθρώπων αλλά και μηχανών. Πρέπει να λάβουμε επίσης σαν παράμετρο την μεταφορά ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων, τα οποία πρέπει να προστατευτούν από ανεπιθύμητη πρόσβαση, τροποποίηση ή και από πιθανή καταστροφή αυτών. Ακόμα η τεχνολογία αυτή θα χρησιμοποιηθεί σε υπηρεσίες υγείας καθώς και δημόσιας ασφάλειας, οι οποίες χρήζουν τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια.
- Υποστήριξη των προγενέστερων γενεών δικτύων (backward-compatibility): Το 5G θα συναθροίσει τις νέες τεχνολογίες κινητών δικτύων και ασύρματης πρόσβασης με τα δίκτυα προηγούμενων γενεών, προκειμένου να επιτυγχάνει την εκ νέου εκμετάλλευσή τους. Στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία Network

Virtualization, καθώς νεότερες και προηγούμενες εκδόσεις μπορούν να συνυπάρξουν, βλέποντας τις προηγούμενες εκδόσεις ως ιδεατά δίκτυα μέσα στο δίκτυο αυτό [11].

Στο σχήμα 1, παρουσιάζεται ένα radar chart που απεικονίζει τις δυνατότητες του 5G σε θεωρητικό επίπεδο, συγκριτικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G [12].



Εικόνα 19: Radar Chart θεωρητικών δυνατοτήτων των 5G δικτύων

Σχεδιαστικές Αρχές Δικτύου 5G

Βάσει των απαιτήσεων για την ανάπτυξη των 5G δικτύων καθώς και των τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν έχουν αναπτυχθεί κάποιες σχεδιαστικές αρχές για την ανάπτυξη των δικτύων 5G.

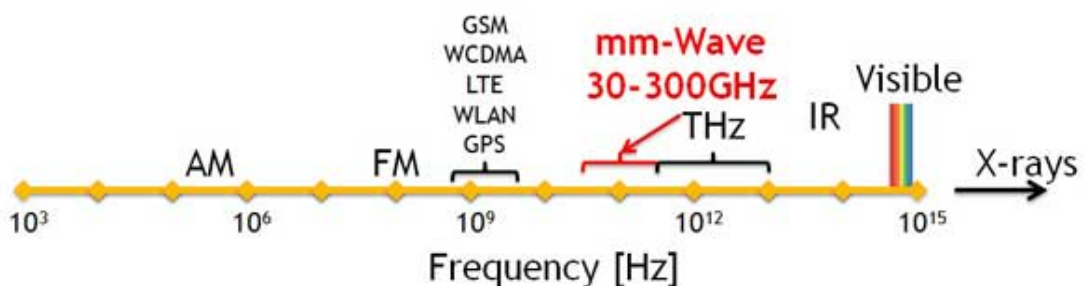
Για να ικανοποιηθούν όλες οι προηγούμενες δυνατότητες, τα πιο πιθανά καινούργια παραδείγματα και υποκινητές που πρέπει να ακολουθηθούν και να υποστηριχθούν είναι τα SDN και NFV. Για αυτό ένα υπερβολικά ευέλικτο περιβάλλον, είναι απαραίτητο για να οδηγήσει σε λύσεις, όπως είναι ο διαμοιρασμός του χρήστη και ο έλεγχος και πολύ πιθανόν τον επαναπροσδιορισμό των ορίων μεταξύ των δομών του δικτύου (radio access network, core network). Αν και η βελτίωση της ευελιξίας των μελλοντικών δικτύων είναι απαίτηση, η επιπρόσθετη πολυπλοκότητα που θα εισαχθεί (π.χ αριθμός των νέων διεπαφών, λειτουργίες διαχείρισης δικτύου, ασφάλεια), πρέπει να μελετηθεί και να αξιολογηθεί. Πιθανότερα,

διαφορετικές δομές των δικτύων 5G θα προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα ευελιξίας. Επιπροσθέτως, τα 5G δίκτυα θα πρέπει να προσφέρουν λύσεις για την υποστήριξη διαφορετικών διεπαφών με αποδοτικό τρόπο.

Έτσι, το 5G θα σχεδιαστεί με γνώμονα την ευελιξία και την επεκτασιμότητα. Για αυτό το λόγο, οι πάροχοι υπηρεσιών στρέφονται στην ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το Ultra Dense Deployments, το Software Defined Networking (SDN), το Network Function Virtualization (NFV) και το Cloud Computing.

Ultra Dense Deployments

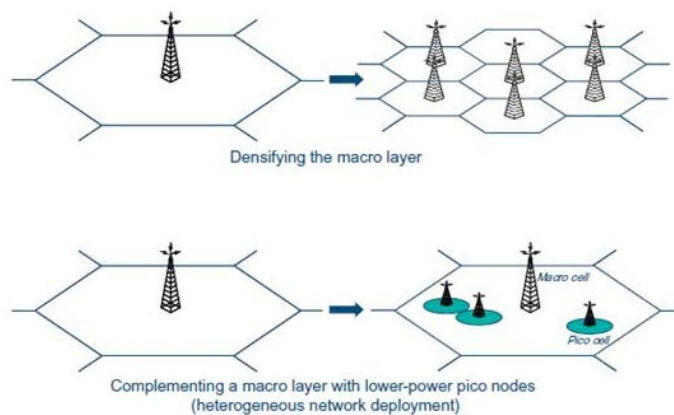
Το διαθέσιμο φάσμα είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία για την υποστήριξη των απαιτήσεων της κίνησης στα δίκτυα. Αποτελεί την κύρια πηγή πόρων για τις ραδιοεπικοινωνίες. Στις μέρες μας, το τρέχων φάσμα έχει ήδη εξαντληθεί. Παρά του ότι η τεχνολογία εξελίσσεται προς την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του φάσματος (π.χ χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, επαναχρησιμοποίηση φάσματος), ωστόσο η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος παραμένει αμετάβλητη. Ειδικότερα, στις πιο πυκνές περιοχές, κρίνεται απαραίτητη η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων καθώς γίνεται χρήση και τμημάτων φάσματος από τις ελεύθερες μπάντες, όπως είναι αυτή στην mmWave μπάντα συχνοτήτων, η οποία μπορεί να προσφέρει μέχρι και 110 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με τα 4G δίκτυα. Οι mmWave μπάντα συχνοτήτων αρχικά είχε απορριφθεί για τη χρήση σε cellular δίκτυα, κυρίως για τη μικρή ακτίνα τους και λόγω των προβλημάτων NLOS. Ωστόσο πρόσφατες μελέτες έδειξαν πως η μπάντα αυτή των συχνοτήτων θα αποτελέσει μέρος των 5G δικτύων.



Εικόνα 20: mmWave Σήματα

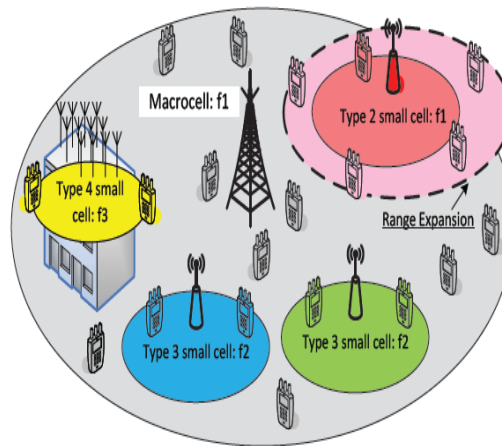
Αυτό σημαίνει ότι τα 5G δίκτυα θα λειτουργούν σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως είναι το εύρος ζώνης και οι συνθήκες διάδοσης. Έτσι, χρειάζονται κατάλληλοι μηχανισμοί στα 5G δίκτυα, οι οποίοι δεν απαιτούνταν στα 4G δίκτυα. Στα 4G

δίκτυα, η ανάγκη αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου πραγματοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό με τη βοήθεια της επαναχρησιμοποίησης του φάσματος. Τα μελλοντικά δίκτυα όμως σχεδιάζονται πολύ πιο πυκνά. Ένα κομμάτι των 5G δικτύων θα είναι η πυκνή τοποθέτηση Small Cells, τα οποία θα συνυπάρχουν με Microcells και Macrocells αλλά και με άλλα συστήματα όπως WiFi, LTE/A και HSPA, δημιουργώντας έτσι ετερογενή δίκτυα (HetNets). Η τακτική network densification δημιουργεί πολύ πυκνά cells εγκαθιστώντας πολλούς σταθμούς βάσης επιτυγχάνοντας υψηλό εύρος ζώνης, μικρή καθυστέρηση κ.α. Μια άλλη ιδανική λύση είναι η υιοθέτηση μερικών κατάλληλων τεχνικών διαμοιρασμού φάσματος. Αυτό σημαίνει πως η αρχιτεκτονική των 5G δικτύων θα επιτρέπει το φάσμα να είναι περισσότερο διαχειρίσιμο.



Εικόνα 21: Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης μέσω της τεχνολογίας Network Densification

Έτσι, για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων από τα οφέλη που παρέχονται από την ορθογωνικότητα και τις ομοκαναλικές παρατάξεις του δικτύου- μείωση των παρεμβολών και επαναχρησιμοποίηση του φάσματος, αντίστοιχα- καθώς και επιπλέον βελτίωση της χωρητικότητας των μελλοντικών δικτύων, προσδοκούμε ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα αποτελούνται από διαφορετικές μικρές κυψέλες με διαφορετικούς τύπους από small cell BSs. Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι των small cell BSs θα στοχεύουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και κίνηση. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 22, όπου παρουσιάζονται οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων cells.



Cell Type No.	Cell Type	Spectrum	Relationship with the Macrocell Tier	Typical Use Case
1	low-frequency macrocell tier	around 1~2GHz, licensed	-	umbrella coverage
2	low-frequency small cell tier	around 1~2GHz, licensed	co-channel deployment, CRE & ABS	capacity enhancement in hotspots
3	mid-frequency small cell tier	around 5GHz, unlicensed	non-co-channel deployment, dual connectivity	high traffic offloading
4	high-frequency small cell tier	>10GHz, unlicensed	non-co-channel deployment, dual connectivity	very high traffic offloading

Εικόνα 22: Τύποι κυψελών καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών

Η πυκνωση λοιπόν, των δικτύων θα παίξει σημαντικό ρόλο καθώς δίνει την δυνατότητα άμεσων και αποτελεσματικών επικοινωνιών, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν στην:

- Μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης μέσω της κατάτμησης του χώρου σε μικρές κυψέλες, μέχρι το σημείο όπου κάθε χρήστης με τον εξοπλισμό του θα έχει πρόσβαση σε ξεχωριστό κόμβο του access δικτύου (AN-Access Node).
- Μείωση των απωλειών μετάδοσης με την τοποθέτηση της υποδομής του δικτύου πρόσβασης σε μικρότερη απόσταση από τον χρήστη.

Software Defined Networking

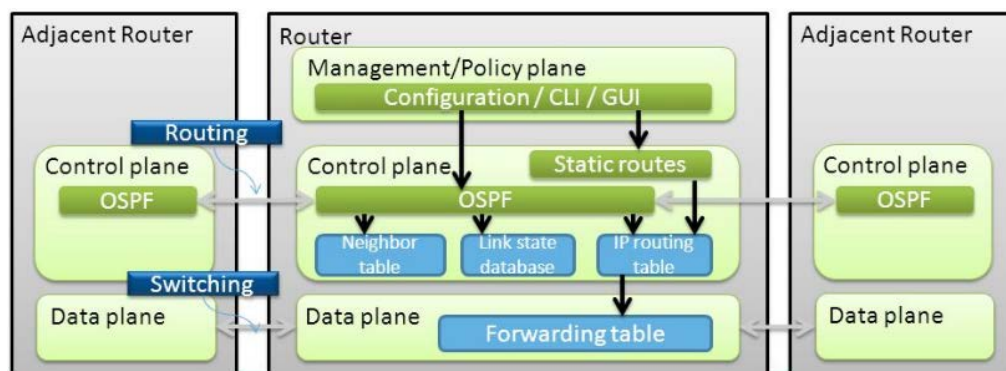
Το Software Defined Networking (SDN) αποτελεί μία δικτυακή αρχιτεκτονική κατά την οποία η διαχείριση των αποφάσεων για την δρομολόγηση λαμβάνεται από ένα κεντρικό σημείο διαχείρισης, τον controller. Πρόκειται για μία προσέγγιση για τα ασύρματα δίκτυα, η οποία επιτρέπει στους διαχειριστές (controller) να διαχειρίζονται τους εξυπηρετητές δικτύου διαμέσου οδηγιών από το χαμηλότερο επίπεδο λειτουργικότητας. Στο SDN ισχύει ότι η στατική αρχιτεκτονική των παραδοσιακών δικτύων δεν υποστηρίζει τη δυναμική, ο υπολογισμός και η

αποθήκευση χρειάζεται περισσότερα μοντέρνα υπολογιστικά περιβάλλοντα όπως είναι τα data centers. Αυτό γίνεται με την αποσύνδεση ή την σύνδεση του συστήματος που αναλαμβάνει τη διαχείριση σχετικά με την κίνηση που στέλνεται (το control plane) από τα υποσυστήματα τα οποία ακολουθούν την κίνηση από τον επιλεγμένο προορισμό (το data plan). Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο softwarization εννοείται ο εμπλουτισμός του δικτύου με εργαλεία λογισμικού με σκοπό την αποτελεσματικότερη διαχείρισή τους. Αποσκοπεί στην αύξηση της ικανότητας του δικτύου να προσαρμόζεται δυναμικά στις ανάγκες των εφαρμογών και υπηρεσιών που εξυπηρετεί.

Τα μελλοντικά δίκτυα και οι υπηρεσίες, θα πρέπει όχι μόνο να ορίζονται με τη χρήση software αλλά να μπορούν να προγραμματίζονται και να μπορούν να υποστηρίζουν διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών στους οποίους θα ανατίθενται δυναμικά πόροι, ενώ ταυτόχρονα θα απλοποιείται η διαχείριση της ετερογενούς υποδομής του δικτύου. Έτσι με τη βοήθεια της τεχνολογίας SDN, με την οποία αναφερόμαστε σε μια αρχιτεκτονική όπου οι σταθμοί βάσης του δικτύου θα είναι άμεσα προγραμματιζόμενοι και θα ελέγχονται από έναν κεντρικοποιημένο ελεγκτή, αντιμετώπιστηκαν τα παραπάνω προβλήματα αλλά επίσης έγινε αποδοτικότερη και η εφαρμογή των Small Cells.

Σε όλα τα δίκτυα που στηρίζονται στις βασικές αρχές των κλασικών δικτύων, υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ των λειτουργιών τους, που φαίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Management Plane: Πρόκειται για το επίπεδο υπηρεσιών που προσφέρουν διαχείριση και επίβλεψη στην λειτουργία του εξοπλισμού από την πρόσβαση με ένα Command Line Interface (CLI) μέχρι την χρήση εξειδικευμένων εφαρμογών όπως το Netflow.
- Data Plane: Είναι οι διεπαφές ή οι πόρτες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και τη λήψη πακέτων. Για την επεξεργασία αυτών χρησιμοποιούνται οι ανάλογοι πίνακες (routing πίνακες, TCAM πίνακες, Forwarding Information Base (FIB))
- Control Plane: Αναφέρεται στη λήψη αποφάσεων για την επεξεργασία των πακέτων αλλά και στη δημιουργία των απαραίτητων πινάκων στους οποίους θα βασιστεί το Data Plane για τη δρομολόγησή τους.



Εικόνα 23: Βασικές αρχές κλασσικών δικτύων

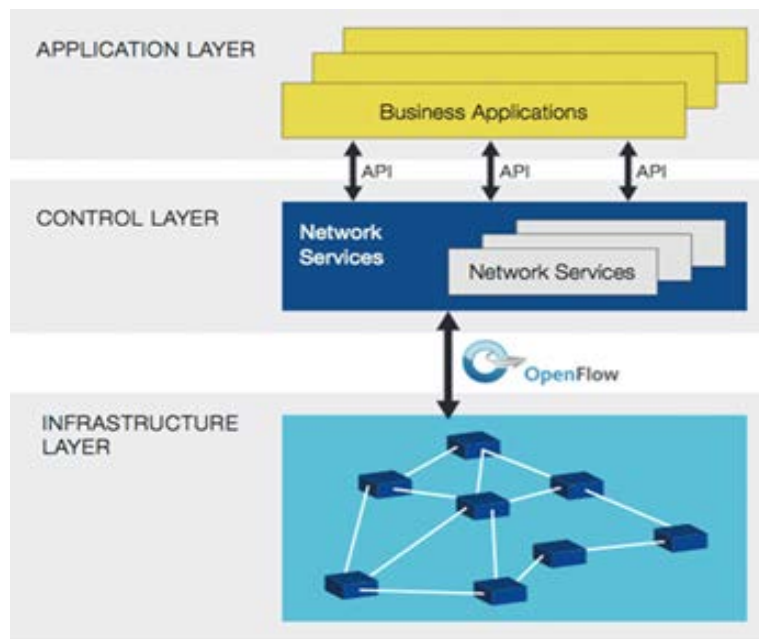
Η εικόνα 24 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του SDN. Η βασική αρχιτεκτονική, όπως φαίνεται, αποτελείται από 3 δομικά στοιχεία:

- **SDN εφαρμογών:** Το στρώμα εφαρμογών περιλαμβάνει συνδέσμους με άλλες εφαρμογές ή συστήματα. Οι SDN εφαρμογές επικοινωνούν απευθείας με τους SDN controllers με τη βοήθεια ενός application programming interface (APIs) με σκοπό να λάβουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη δομή και τη συμπεριφορά ενός δικτύου. Μέσω αυτών, έχουν εικόνα για την τοπολογία του δικτύου και μπορούν να ενεργήσουν ανάλογα. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι εφαρμογές ασφάλειας, διαχείρισης και ανάλυσης δικτύων καθώς και εμπορικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται με μεγάλα data center.
- **SDN controller:** Το στρώμα ελέγχου περιλαμβάνει το λογισμικό που είναι απαραίτητο για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων από τις εφαρμογές που είναι διαθέσιμες στο στρώμα εφαρμογών (SDN εφαρμογές). Πρόκειται για μία λογική οντότητα που υπάρχει ανάμεσα στις εφαρμογές και τις δικτυακές συσκευές. Παίρνει ως είσοδο τις εντολές από τις εφαρμογές και τις προωθεί στις συσκευές. Επιπροσθέτως, λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου και των συσκευών και ενημερώνει τις εφαρμογές.
- **SDN υποδομές:** Το στρώμα υποδομών περιλαμβάνει τις συσκευές και τον εξοπλισμό του δικτύου. Οι δικτυακές συσκευές ενεργούν ως το μέσο αυτό που προωθεί τα πακέτα στο δίκτυο ανάλογα με τις πληροφορίες και τις εντολές που λαμβάνει από τον SDN controller.

Η βασική ιδέα είναι ο διαχωρισμός των λειτουργιών προώθησης από το στρώμα ελέγχου. Η δικτυακή αυτή ευφυΐα, είναι κεντριοποιημένη στους SDN controllers βασισμένους σε λογισμικό, οι οποίοι διατηρούν μια συνολική εικόνα του δικτύου. Κατά

συνέπεια, το δίκτυο εμφανίζεται στις εφαρμογές ως μοναδικό. Με τα SDN, οι εταιρείες και οι πάροχοι κερδίζουν τον έλεγχο όλου του δικτύου ανεξαρτήτως κατασκευαστή από ένα μοναδικό λογικό σημείο, το οποίο απλουστεύει σημαντικά το σχεδιασμό του δικτύου και τη λειτουργία του. Το SDN επίσης απλουστεύει σημαντικά τις ίδιες στις δικτυακές συσκευές, αφού δεν χρειάζεται πλέον να κατανοούν και να επεξεργάζονται χιλιάδες πρωτόκολλα αλλά απλά να δέχονται εντολές από τους SDN controllers. Επιπλέον, το SDN μειώνει το CAPEX και το OPEX. Το υψηλότερο κόστος μίας δικτυακής συσκευής υψηλής απόδοσης έχει άμεση συνάφεια με το control plane καθώς και με το λογισμικό που διαθέτει. Με τον διαχωρισμό αυτόν, το κόστος μεταφέρεται στον controller με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά το κόστος του δικτυακού εξοπλισμού. Αντιστοίχως, μειώνεται και το κόστος του ανθρώπινου δυναμικού καθώς μειώνεται το κόστος των συσκευών που θα πρέπει να ρυθμιστεί. Η ρύθμιση και η προσθήκη λειτουργιών μεταφέρεται σε ένα μοναδικό σημείο από την κάθε συσκευή χωριστά.

Ακόμα, υπάρχει αύξηση στην αξιοπιστία του SDN, καθώς μειώνεται η ανθρώπινη παρέμβαση στον εξοπλισμό και έτσι αυξάνεται η αυτοματοποίηση των διαδικασιών. Ένα πλεονέκτημα του SDN επίσης είναι η υψηλή διαθεσιμότητα. Η δυνατότητα επίβλεψης και της ρύθμισης της τοπολογίας από ένα κεντρικό σημείο οδηγεί στην βελτίωση της πρόβλεψης σφαλμάτων, μειώνοντας έτσι την απώλεια της τοπολογίας. Συνάμα, το SDN οδηγεί στην καινοτομία. Δηλαδή, προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων υπηρεσιών και την χρήση αυτών χωρίς την παρεμβολή και παρεμπόδιση τους από των ήδη ενεργών. Τέλος, οδηγεί στην εικονοποίηση των δικτύων. Με τη μείωση της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού γίνεται ευκολότερη η μετάβαση σε εικονοποιημένο εξοπλισμό χωρίς μεγάλες δυνατότητες και απαιτήσεις.



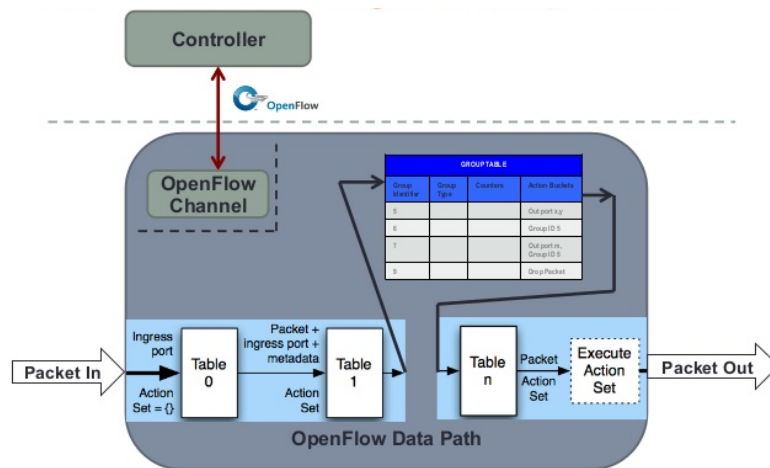
Εικόνα 24: Αρχιτεκτονική SDN

Για την επικοινωνία μεταξύ controller και εξοπλισμού απαιτείται η χρήση ενός πρωτοκόλλου, το οποίο θα μεταφέρει μηνύματα χωρίς να νοιάζεται για το λογισμικό που διαθέτει και τον κατασκευαστή του, αλλά θα ενδιαφέρεται μόνο για την υποστήριξη του στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο Openflow, είναι το επικρατέστερο πρωτόκολλο για τη συγκεκριμένη διαδικασία.

Το πρωτόκολλο OpenFlow αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Stanford στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2008. Είναι ένα έργο ανοικτού κώδικα (open source), το οποίο αποσκοπεί στο να προσφέρει ένα εύκολα προγραμματιζόμενο και ανοικτό περιβάλλον δικτύωσης για τη δοκιμή και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών, μεθόδων και αλγορίθμων δρομολόγησης και ασφάλειας δικτύου [14]. Η βασική ιδέα είναι ότι μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός πως οι περισσότεροι Ethernet μεταγωγείς (switches) πλέον περιέχουν πίνακες εγγραφών ροών δεδομένων (flow-tables), ώστε να υλοποιούνται υπηρεσίες Network Address Translation (NAT), Quality of Service (QoS), Firewall και για συλλογή στατιστικών. Το SDN συνδέθηκε με το OpenFlow πρωτόκολλο, για απομακρισμένη επικοινωνία με τα στοιχεία του network plane με σκοπό τον καθορισμό της δρομολόγησης των πακέτων του δικτύου μέσω των network switches. Από το 2012, ωστόσο, πολλές εταιρείες άρχισαν να χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές όπως είναι το Cisco Systems' Open Network Environment και το Nicira's network virtualization platform [15].

Τα βασικά δομικά μέρη του OpenFlow πρωτοκόλλου αποτελούν:

- Ο OpenFlow controller, που αποτελεί το μέσο επικοινωνίας μεταξύ ενός controller και του δικτυακού εξοπλισμού μέσω ενός καναλιού
- Οι OpenFlow μεταγωγείς, που είναι ο εξοπλισμός ο οποίος έχει τη δυνατότητα να προσπελάσει τα μηνύματα που του αποστέλλονται από τον controller που αφορούν την διαχείριση των πακέτων. Αποτελούνται από:
 - ✓ Πόρτες. Τα πακέτα εισέρχονται σε μία πόρτα εισόδου, επεξεργάζονται από τον μεταγωγέα και μεταφέρονται σε μία πόρτα εξόδου. Μία πόρτα μπορεί να προστεθεί, να αλλάξει ή να αφαιρεθεί. Σε αυτή την περίπτωση κάθε φορά που γίνεται κάποια αλλαγή πρέπει να ενημερώνεται ο controller ώστε αντίστοιχα να ενημερώνονται και οι πίνακες. Το OpenFlow ορίζει τρία είδη πορτών, οι οποίες υποστηρίζονται από έναν openflow μεταγωγέα:
 - ο Φυσική πόρτα: Αναφέρεται σε μία πόρτα του δικτυακού εξοπλισμού.
 - ο Λογική πόρτα: Αναφέρονται σε tunnel, loopback κλπ. διεπαφές. Η αντιστοίχιση σε φυσικές πόρτες είναι ανεξάρτητη από το OpenFlow. Το OpenFlow κάνει την αντιστοίχιση με τις φυσικές.
 - ο Κλειστές πόρτες: Αναφέρονται σε ειδικές κατηγορίες πορτών όπου χρησιμοποιούνται για εσωτερική διαχείριση πακέτων.
 - ✓ Το ασφαλές κανάλι OpenFlow. Η επικοινωνία μεταξύ controller και εξοπλισμού γίνεται διαμέσου ενός καναλιού όπου θα μεταφέρονται όλα τα μηνύματα και τα πακέτα που αφορούν την λειτουργία του δικτύου. Το κανάλι δημιουργείται μέσω TCP σύνδεσης. Με την δημιουργία της TCP επικοινωνίας, ο controller και ο μεταγωγέας διαπραγματεύονται την έκδοση του openflow που θα χρησιμοποιήσουν. Κάθε φορά χρησιμοποιείται η νεότερη έκδοση που υποστηρίζουν και οι δύο πλευρές.
 - ✓ Πίνακες Ροών. Στόχος της ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ Controller και μεταγωγέα είναι η κατασκευή openflow πινάκων , βάσει των οποίων θα διαχειρίζονται τα πακέτα οι μεταγωγείς.



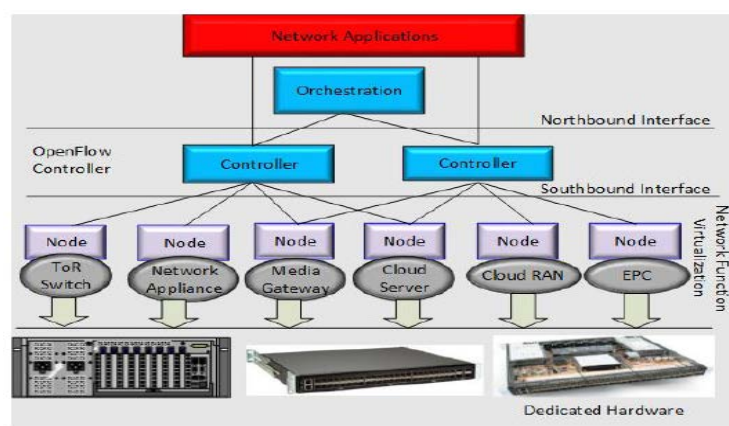
Εικόνα 25: Δομικά Μέρη του OpenFlow

Network Function Virtualization

Μια από τις πιο σημαντικές και συμπληρωματικές τεχνολογίες του SDN, η οποία έχει τη δυνατότητα επίδρασης στα μελλοντικά 5G δίκτυα αλλά και στο πως θα παίζει ρόλο στα κληρονομούμενα δίκτυα, η οποία εικονοποιεί τις περισσότερες λειτουργίες ενός δικτύου, ονομάζεται Network Function Virtualization (NFV). Ο σκοπός του NFV είναι να εικονοποιεί ένα σύνολο από λειτουργίες του δικτύου χρησιμοποιώντας αυτές στα software packages, τα οποία μπορούν να συγκεντρωθούν και να συνδεθούν για τη δημιουργία των ίδιων υπηρεσιών που παρέχονται από τα προγενέστερα δίκτυα. Το NFV διαδέχεται τον κλασσικό sever virtualization , που μπορεί με την εγκατάσταση πολλαπλών εικονικών μηχανών να προγραμματίσει διάφορα λειτουργικά συστήματα, software και processes. Πιο συγκεκριμένα, το NFV αποσκοπεί στη μεταφορά δικτυακών ή τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, οι οποίες λειτουργούν σε εξειδικευμένες πλατφόρμες, σε εικονικές υποδομές.

Παραδοσιακά, οι διαχειριστές δικτύου πάντα προτιμούσαν τη χρήση υψηλά διαθέσιμου εξοπλισμού δικτύου για να σχεδιάσουν τα δίκτυά τους. Ωστόσο, αυτή η παλιά προσέγγιση αναπόφευκτα οδηγεί σε αύξηση του CAPEX και απαιτεί έτσι μία αύξηση στο προσωπικό (OPEX) για να χρησιμοποιήσει και να τρέξει αυτά. Όπως φαίνεται στην εικόνα 26, η τεχνολογία NFV βοηθάει στη δημιουργία μιας end-to-end αρχιτεκτονικής και είναι ικανή για την συνένωση ετερογενών εξοπλισμών δικτύου με τη μετακίνηση λειτουργιών δικτύου από το hardware στις γενικού σκοπού πλατφόρμες αποθήκευσης όπως είναι οι servers. Οι λειτουργίες δικτύου εφαρμόζονται στα software packages τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εικονική αρχιτεκτονική (virtualized infrastructure) και αυτές θα επιτρέπουν την ευελιξία της λειτουργίας και της διαχείρισης των δικτύων.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα στα 5G δίκτυα, τα οποία μπορούν να βελτιωθούν με την εφαρμογή NFV στις αρχιτεκτονικές cloud, είναι η αντοχή. Η εφαρμογή λειτουργιών δικτύου στα data centers επιτρέπει τη μετακίνηση είτε μεταξύ εικονικών μηχανών είτε μεταξύ πραγματικών μηχανών. Επιπροσθέτως, η εφαρμογή λειτουργιών δικτύων στα data centers θα παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία υπό τον όρο της διαχείρισης πόρων, της εκχώρησης και του scaling. Αυτό επηρεάζει την ανάπτυξη των συστημάτων και της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων, όπως το over-provisioning που μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο από τη χρήση του κατάλληλου ποσού πόρων.



Εικόνα 26: Network Function Virtualization

Το NFV είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου, η οποία παρέχει τη δυνατότητα του διαμοιρασμού του hardware από το software ή και λειτουργιών και έγινε στην πραγματικότητα για την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών εξαιτίας της αύξησης της απόδοσης των “common, off-the-shelf” IT συστημάτων. Το SDN είναι software που μπορεί να εκτελέσει δυναμικά την επαναδιαμόρφωση της δικτυακής τοπολογίας του διαχειριστή για τη ρύθμιση, τη φόρτωση και την ρύθμιση των απαιτήσεων, π.χ με την ρύθμιση επιπρόσθετης χωρητικότητας στο δίκτυο όπου αυτό χρειάζεται για την διατήρησης της ποιότητας του πελάτη στο υψηλότερο επίπεδο κατανάλωσης.

Παρόλο που και οι δύο τεχνολογίες έχουν ως βάση την διαχείριση των δικτύων, βασίζονται σε διαφορετικές αρχές [13]. Το SDN στηρίζεται στο διαχωρισμό του control plane και του data plane δίνοντας μία κεντριοποιημένη άποψη του δικτύου. Ενώ το NFV στηρίζεται στην βελτιστοποίηση των παρεχόμενων υπηρεσιών μέσω της εικονοποίησης τους. Οπότε οι δύο τεχνικές αυτές είναι συμπληρωματικές καθώς μπορούν να συνεργαστούν.

Οι τεχνολογίες αυτές σε συνδυασμό μπορούν να μειώσουν το λειτουργικό CAPEX καθώς αυτές προσφέρουν μια φθηνότερη και απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου η οποία είναι εύκολο να αναβαθμιστεί, ενώ το OPEX επίσης μειώνεται μέσω της εξοικονόμησης ισχύος καθώς η χωρητικότητα του δικτύου παρέχεται όποτε και όταν χρειάζεται.

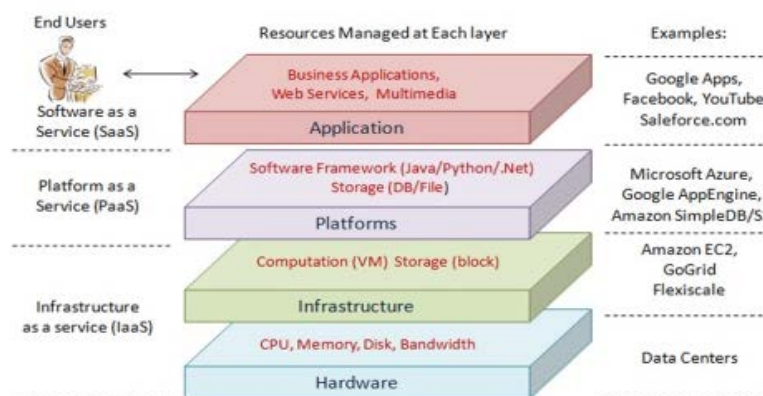
Cloud Computing

Το Cloud Computing αποτελεί το μέσο που προσφέρει μηχανισμούς στους παρόχους με τους οποίους μπορούν να δίνουν πρόσβαση στους χρήστες σε έναν απεριόριστο αριθμό εικονικών πόρων. Τα κύρια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με αυτό το επιχειρηματικό μοντέλο, η κοστολόγηση που γίνεται βάσει τον αριθμό των πόρων που χρησιμοποιούνται από το χρήστη, αλλά και η δυνατότητα παροχή εγγυήσεων από τον πάροχο της υποδομής και η συμφωνία για το QoS των υπηρεσιών μεταξύ χρήστη και παρόχου.

Το Cloud Computing, αποτελείται από τα παρακάτω επίπεδα :

- Infrastructure as a Service (IaaS): Ο απαραίτητος εξοπλισμός υποδομών παρέχεται στη μορφή Virtual Machines. Ο πάροχος είναι υπεύθυνος για το Cloud Virtualization, για τους servers, τη μνήμη και άλλες δικτυακές συσκευές. Η δυνατότητα που παρέχεται στον καταναλωτή είναι να μπορεί να δεσμεύσει προς χρήση επεξεργαστική ισχύ, αποθηκευτικά μέσα, δίκτυα και άλλους υπολογιστικούς πόρους, όπου ο καταναλωτής είναι σε θέση να αναπτύξει και να εκτελέσει αυθαίρετο λογισμικό, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει λειτουργικά συστήματα και εφαρμογές. Ο καταναλωτής έχει τον έλεγχο των λειτουργικών συστημάτων, των αποθηκευτικών μέσων, των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί και πιθανόν περιορισμένο έλεγχο επιλεγμένου εξοπλισμού δικτύωσης.
- Platform as a Service (PaaS): Η δυνατότητα που παραχωρείται στον καταναλωτή είναι να αναπτύσσει πάνω στην cloud υποδομή εφαρμογές που έχει δημιουργήσει ή εφαρμογές που έχει αποκτήσει, οι οποίες έχουν με χρήση γλωσσών προγραμματισμού που υποστηρίζονται από τον πάροχο. Ο καταναλωτής δεν διαχειρίζεται ούτε ελέγχει τη σχετική cloud υποδομή που περιλαμβάνει τα δίκτυα, τους servers, τα λειτουργικά συστήματα ή τα αποθηκευτικά μέσα, αλλά έχει τον έλεγχο των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί.
- Software as a Service (SaaS): Η δυνατότητα που παρέχεται στον καταναλωτή είναι να χρησιμοποιεί τις εφαρμογές του παρόχου που τρέχουν σε μια cloud υποδομή. Οι εφαρμογές είναι προσβάσιμες από διάφορες client συσκευές. Ο καταναλωτής δεν έχει τη διαχείριση ή

τον έλεγχο της χρησιμοποιούμενης cloud υποδομής συμπεριλαμβανομένων των δικτύων, των servers, των λειτουργικών συστημάτων, των αποθηκευτικών μονάδων ή ακόμα και μεμονομένων δυνατοτήτων της εφαρμογής.



Εικόνα 27: Επίπεδα αρχιτεκτονικής Cloud Computing

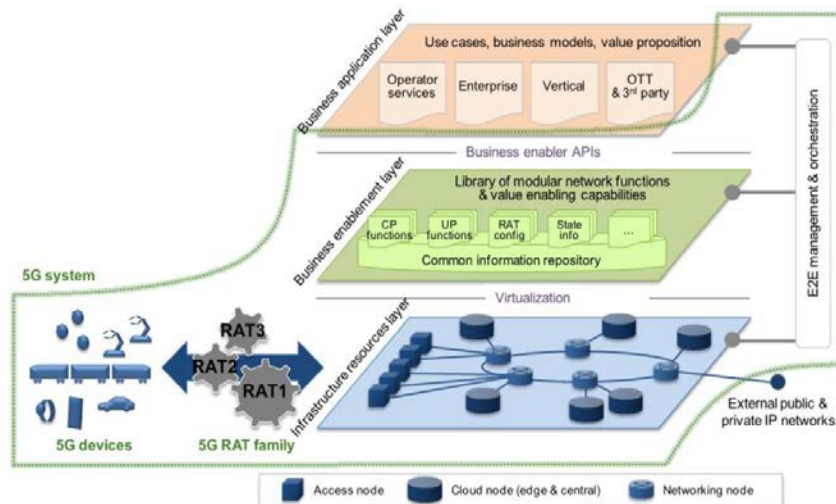
Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G

Βάσει των σχεδιαστικών αρχών που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, θα αναπτυχθεί για τα δίκτυα 5G μια αρχιτεκτονική που θα διαχωρίζει το software από το hardware ενώ ταυτόχρονα θα αξιοποιεί όλες τις δυνατότητες των τεχνολογιών SDN και NFV. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές προγραμματιζόμενων εφαρμογών (Application Programming Interfaces-APIs) ικανών να υποστηρίξουν το σύνολο των διαφορετικών χρηστών που αναμένεται να έχει η τεχνολογία 5G. Τα 5G συνεπάγονται την διασύνδεση όλων των οντοτήτων που βρίσκονται στον ψηφιακό κόσμο, ο οποίος περιλαμβάνει τις επικοινωνίες man-to-man, man-to-machine και machine-to-machine. Στην εικόνα 28 απεικονίζεται σχηματικά η αρχιτεκτονική ενός 5G δικτύου.

Τα είδη των κόμβων που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι:

- Access node: Πρόκειται για το σημείο εκκίνησης της σύνδεσης που οδηγεί σε έναν χρήστη. Ο κόμβος αυτός περιλαμβάνει τον ενεργό εξοπλισμό μετάδοσης, τη διαχείριση του τερματισμού της σύνδεσης καθώς και την διευκόλυνση της σύνδεσης.

- Cloud node: Οι κόμβοι αυτοί λειτουργούν ως αποθηκευτικό μέσο στο οποίο μπορεί να υπάρχει μεγάλος όγκος πληροφορίας.
- Networking node: Οι κόμβοι αυτοί είναι υπεύθυνοι για τη σύνδεση των access nodes με τους cloud nodes αλλά και με το εξωτερικό δίκτυο.



Εικόνα 28: Αρχιτεκτονική προγραμματιζόμενων δικτύων

Στην εικόνα 28 απεικονίζεται το μοντέλο του συστήματος που προτείνεται για το σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής δικτύου για τα 5G συστήματα, τα οποία είναι βασισμένα στο IP μοντέλο. Το σύστημα αποτελείται από το τερματικό του χρήστη- user terminal (το οποίο έχει καίρια σημασία στην καινούργια αρχιτεκτονική) και από έναν αριθμό ανεξάρτητων και αυτόνομων radio access τεχνολογιών (RATs), όπου με τη σειρά τους μπορούν να είναι συνδεδεμένες με διάφορους servers ή στο ευρύτερο internet. Σε κάθε ένα από αυτά τα τερματικά, κάθε μια από τις radio access τεχνολογίες φαίνεται σαν μια IP σύνδεση στο εξωτερικό δίκτυο (Internet). Οποσδήποτε, υπάρχουν διαφορετικές διασυνδέσεις για κάθε Radio Access Technology (RAT) στο τερματικό. Ένα παράδειγμα είναι ότι, εάν θέλουμε να έχουμε πρόσβαση σε τέσσερα διαφορετικά RATs, χρειαζόμαστε να έχουμε τέσσερεις διαφορετικές διεπαφές στο τερματικό και να έχουμε όλες αυτές τις διεπαφές ενεργές στην ίδια στιγμή, με σκοπό να έχουμε σε λειτουργία αυτή την αρχιτεκτονική.

Όταν ένας χρήστης θέλει να επικοινωνήσει με έναν server χρησιμοποιώντας το IP protocol, πρέπει να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ αυτών. Σε ένα κινητό χρήστη, ο οποίος αλλάζει RATs, χρειάζεται για κάθε αλλαγή να δημιουργείται και μία καινούργια σύνδεση. Ωστόσο αυτό δεν είναι εφικτό στα 5G συστήματα αλλά εφαρμόζεται στα τωρινά συστήματα για την

πρόσβασή τους στο διαδίκτυο. Για τη βελτίωση αυτής της λειτουργίας προτείνεται η δημιουργία ενός επιπλέον network level που θα διαχειρίζεται το network access από τα διαφορετικά RATs και θα τα μεταφέρει σε ανώτερα layers. Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιείται και η μονάδα ελέγχου όπου συνεργάζεται με το τερματικό, διαχειρίζεται τις διεργασίες, δρομολογεί τα πακέτα βάσει συγκεκριμένων κανόνων (policies). Βρίσκεται μεταξύ χρήστη και διαδικτύου και αποτελεί ένα ιδανικό σύστημα. Το νέο network level παρέχεται μέσα από τα IP tunnel. Στην πραγματικότητα σε μία σύνδεση μεταξύ χρήστη και τερματικού θα δημιουργούνται tunnels μεταξύ τερματικού και της μονάδας ελέγχου, τον Policy Router, ο οποίος αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των πακέτων κάτω από συγκεκριμένες πολιτικές, που ορίζει το πρωτόκολλο. Ο χρήστης θα θέτει μία IP address από την πλευρά του και θα δημιουργούνται τόσα tunnels, όσες είναι και οι RATs που συνδέεται. Έπειτα θα αναλαμβάνει το πρωτόκολλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εξέλιξη των 5G ασύρματων δικτύων

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής αναφορά στις προδιαγραφές των 5G δικτύων καθώς επίσης και στις τρέχων έρευνες. Στη συνέχεια γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών των 5G δικτύων και των 4G δικτύων. Ενώ στο τέλος παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των 5G δικτύων.

Προδιαγραφές 5G

Αν και τα πρότυπα δεν έχουν ορίσει ακόμα τις παραμέτρους που χρειάζονται για τα 5G δίκτυα, κάποιοι οργανισμοί έχουν ορίσει τους δικούς τους στόχους. Αυτό έχει ως απώτερο σκοπό να επηρεάσουν τις τελικές προδιαγραφές.

Τυπικές παράμετροι για το πρότυπο για τα 5G δίκτυα περιλαμβάνουν:

SUGGESTED 5G WIRELESS PERFORMANCE	
PARAMETER	SUGGESTED PERFORMANCE
Network capacity	10 000 times capacity of current network
Peak data rate	10 Gbps
Cell edge data rate	100 Mbps
Latency	< 1 ms

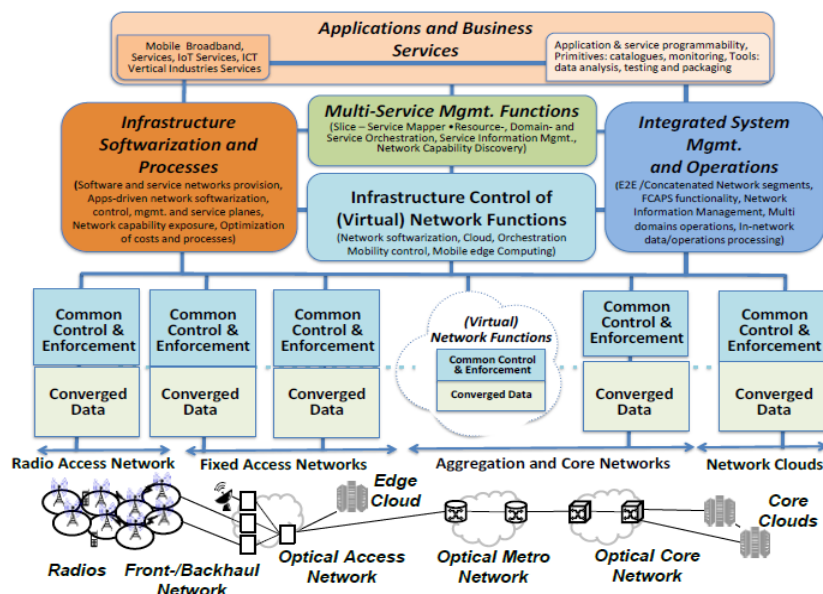
Πίνακας 2: Βασικές παράμετροι των 5G δικτύων

Ο παραπάνω πίνακας απεικονίζει μερικές ιδέες που προτείνονται στο πρότυπο 5G, αλλά δεν έχουν γίνει αποδεκτές από όλους ακόμα.

Network Softwarization and Programmability

Η προτεινόμενη πλατφόρμα στοχεύει σε όλα τα τμήματα του 5G δικτύου, τα οποία είναι:

- Radio Networks
- Fronthaul & Backhaul Networks
- Aggregation and Core Networks
- Networks Clouds
- Mobile Network
- Τεχνολογίες Mobile Edge Networks, Service/Software Networks
- Τεχνολογίες Software-Defined Cloud Networks, Satellite Networks, IoT Networks



Εικόνα 29: Τα τμήματα του software και του προγραμματιστικού δικτύου

Η προοπτική αυτή της προσέγγισης περιγράφεται ως ξεχωριστά τμήματα (planes). Αν και ορίστηκαν χωριστά, τα τμήματα δεν είναι ολοκληρωτικά ανεξάρτητα. Ωστόσο, είναι αρκετά

ανεξάρτητα για τη λογική απλοποίησης σχετικά με τις ολοκληρωμένες απαιτήσεις του συστήματος. Η εσωτερική εργασία μεταξύ των τμημάτων οργανώνεται από ομάδες διεπαφών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή πληροφοριών και / ή για τον έλεγχο μεταξύ των γειτονικών συστημάτων. Ο διαχωρισμός του δικτύου σε τμήματα είναι ο ακόλουθος:

- Application and Business Service Plane
- Multi-Service Management Plane
- Integrated Network Management & Operations Plane
- Infrastructure Softwarization Plane
- Control Plane
- Forwarding/ Data Plane

Τα προτεινόμενα πλαίσια για το software δίκτυο και το δίκτυο προγραμματισμού απεικονίζονται στην εικόνα 29.

Οι λειτουργίες των Softwarization και Programmability δομικών στοιχείων του δικτύου είναι οι ακόλουθες:

- 5G Converged Data Plane Functions: περιγράφονται στις άκρες του πυρήνα δικτύου, καταλήγοντας στη δημιουργία ενός flat δικτύου. Το control plane λειτουργεί (το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση κινητικότητας, τον QoS έλεγχο, αλλά και για άλλα) κατευθύνοντας την κίνηση του χρήστη να εξυπηρετείται στα δίκτυα πρόσβασης στα οποία είναι συνδεδεμένα. Επίσης περιλαμβάνουν ετερογενείς τεχνολογίες.
- 5G Infrastructure Softwarization Plane functions: τα οποία είναι υπεύθυνα για το software κομμάτι του δικτύου (network virtualization, functions virtualization, programmability) στα 5G δίκτυα και επιτρέποντας αποτελεσματική ενοποίηση των επικοινωνιών.
- Network of (virtual) function: υποστηρίζεται ως την μονάδα δικτύωσης στα 5G δίκτυα
- Network architecture εξελίσσεται και τροποποιείται

Το network softwarization and programmability framework βασίζεται στον ακόλουθο διαχωρισμό μέσα στα ξεχωριστά τμήματα:

- Application and Business Service Plane: Περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες που απαιτείται να διαθέτει ένα δίκτυο πολλαπλών υπηρεσιών. Η εξυπηρέτηση στο πλαίσιο του 5G είναι ένα τμήμα software όπου εκτελεί μία ή περισσότερες λειτουργίες. Παρέχει

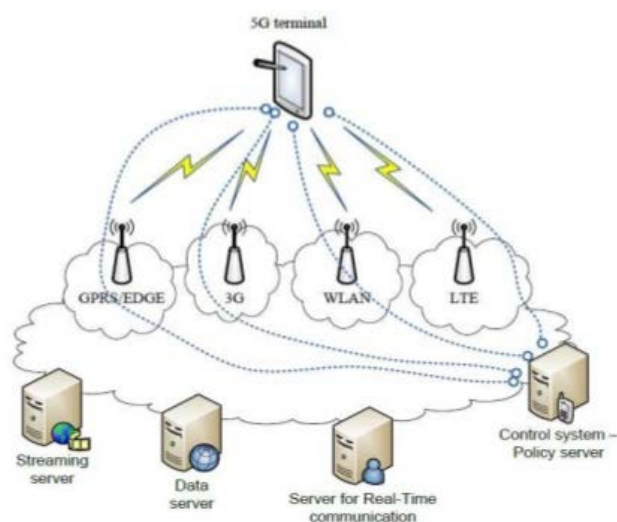
μία ή περισσότερες APIs στις εφαρμογές ή στις υπόλοιπες υπηρεσίες του ίδιου ή διαφορετικών τμημάτων για να γίνει χρήση των λειτουργιών και να επιστρέψει ένα ή περισσότερα αποτελέσματα. Οι υπηρεσίες μπορούν να συνδυαστούν με άλλες υπηρεσίες ώστε να δημιουργήσουν άλλη νέα υπηρεσία. Μια εφαρμογή στα 5G αποτελεί ένα κομμάτι του software το οποίο χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες υπηρεσίες για να αποδώσει μια λειτουργία.

- **Multi-Service Management Plane:** Οι λειτουργίες και οι διεπαφές σε αυτό το τμήμα χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία και τη διαχείριση ομάδων δικτύων και / ή κόμβων. Ειδικότερα, η λειτουργία εδώ, αποτελείται από τη δημιουργία/ την εγκατάσταση NFs καθώς και διεπαφών σύμφωνα με τις φυσικές και εικονικές πηγές. Επίσης, αποτελείται από ένα σύνολο λειτουργιών που συσχετίζονται με τις λειτουργίες δικτύου, όπως είναι σφάλμα διαχείρισης, απόδοση διαχείρισης και διαμόρφωση διαχείρισης.
- **Integrated Network Management & Operations Plane(Ενσωμάτωση Διαχείρισης Δικτύου και Λειτουργιών):** Ενεργοποιεί τη δημιουργία, τη λειτουργία και τον έλεγχο ειδικών λειτουργιών διαχείρισης δικτύου στην κορυφή της υποδομής 5G E2E και η συλλογή πηγών απαιτήθηκε για τη διαχείριση της συνολικής λειτουργίας των μεμονωμένων συσκευών δικτύου. Επίσης, περιλαμβάνει το E2E Network segments management, FCAPS functionality, Monitoring operations, Network Information Management, In-network data and operations processing and Multi domains management operations.
- **Infrastructure Softwarization Plane(Υποδομές τμήματος software):** Παρέχει την παροχή και την λειτουργία του software και της εξυπηρέτησης των δικτύων. Διευκολύνει την λειτουργία από άκρο σε άκρο των ετερογενών δικτύων και των distributed cloud platforms, περιλαμβάνοντας φυσικές και λογικές πηγές και συσκευές. Περιλαμβάνει software για σχεδιασμό, ανάπτυξη, διαχείριση και συντήρηση του εξοπλισμού δικτύου, των συστατικών του δικτύου και/ ή network services από προγραμματισμό. Τα χαρακτηριστικά του software όπως είναι η ευελιξία και η ταχύτητα που διαθέτουν όλα τα στοιχεία του δικτύου εξοπλισμός/δομικά στοιχεία/services, με σκοπό τη δημιουργία καταστάσεων που είναι ικανές τον επανασχεδιασμό του δικτύου και των αρχιτεκτονικών του services, χρησιμοποιούν το κόστος και τις υλοποιήσεις, επιτρέποντας την αυτό-διαχείριση και φέρνοντας επιπρόσθετη τιμή στις υποδομές δικτύου. Επιπλέον περιλαμβάνει παροχή δικτύων software και services, application driven network softwarization, S/W Programmability of Software Networks, δυναμική ανάπτυξη για νέο δίκτυο και management services, network capability exposure, E2E slice provisioning and control.

- Infrastructure Control Plane (Υποδομές τμήματος ελέγχου): Εδώ ανήκουν οι λειτουργίες που είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο μίας ή περισσότερων συσκευών δικτύου. Το τμήμα ελέγχου πληροφορεί τις συσκευές δικτύου, τα στοιχεία δικτύου και τις λειτουργίες δικτύου για την επεξεργασία βασικών μονάδων δεδομένων του χρήστη/ των δεδομένων/forwarding plane. Οι έλεγχοι (των εικονικών) λειτουργιών δικτύου περιλαμβάνουν
 - ο Control of Network Softwarization functions
 - ο Control of Orchestration functions
 - ο Control of Mobility control functions
 - ο Cloud Control functions
 - ο Mobile Edge Computing Control functions και υιοθέτηση σε διάφορες λειτουργίες εφαρμογών

Ο έλεγχος των (εικονικών) λειτουργιών δικτύου είναι γενικά 5G-εφαρμόσιμος και αυτές χωρίζονται από τον έλεγχο και της εφαρμογής λειτουργιών, οι οποίες είναι τμήμα του δικτύου. Το τμήμα ελέγχου αλληλεπιδρά αρχικά με το προωθημένο τμήμα, και με το λιγότερης έκτασης, με το τμήμα διαχείρισης.

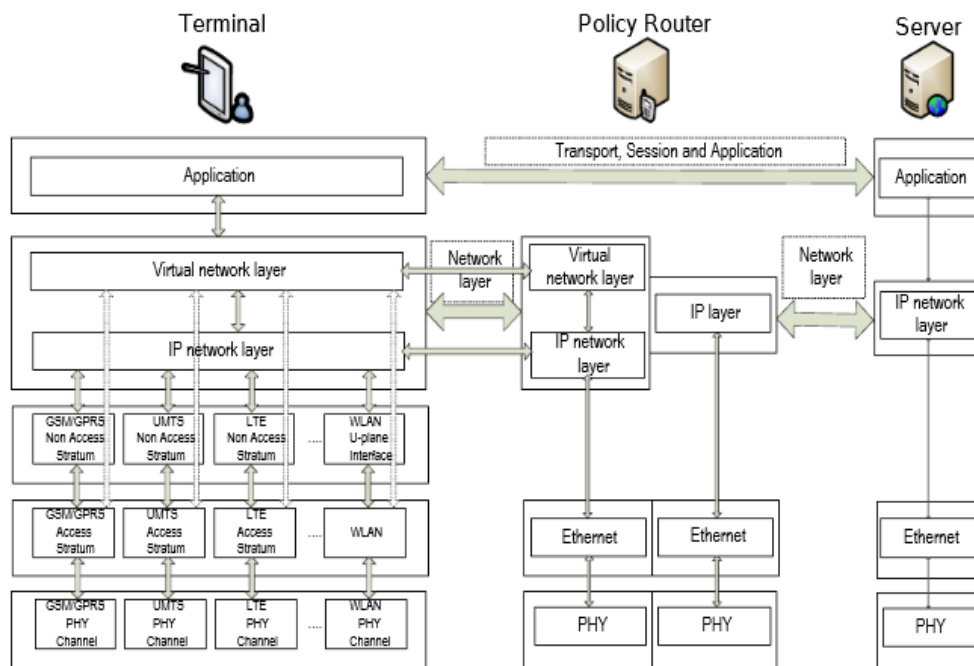
- Forwarding Plane/Data Plane: Η συλλογή πηγών μέσα σε όλες τις συσκευές του δικτύου που είναι υπεύθυνες για την προώθηση της κίνησης.



Εικόνα 30: Αρχιτεκτονική 5G Δικτύων

Τα πρώτα δύο OSI επίπεδα (data link και physical levels) ορίζονται ως τις radio access τεχνολογίες διαμέσου των οποίων παρέχεται πρόσβαση στο Internet με περισσότερους ή λιγότερους QoS μηχανισμούς, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι ως προς τις τεχνολογίες πρόσβασης

(π.χ 3G και WiMAX παρέχουν QoS υποστήριξη, ενώ το WLAN δεν παρέχει). Έτσι, το OSI-1 και το OSI-2 επίπεδο είναι το επίπεδο δικτύου. Αυτό το επίπεδο είναι το IP (Internet Protocol) στις σημερινές επικοινωνίες, είτε το IPv4 ή το IPv6, ανεξάρτητα από τη radio access τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Ο σκοπός του IP είναι να διασφαλίσει αρκετό έλεγχο δεδομένων (στο IP header) για μεγαλύτερη δρομολόγηση των πακέτων IP μεταξύ clients και servers.



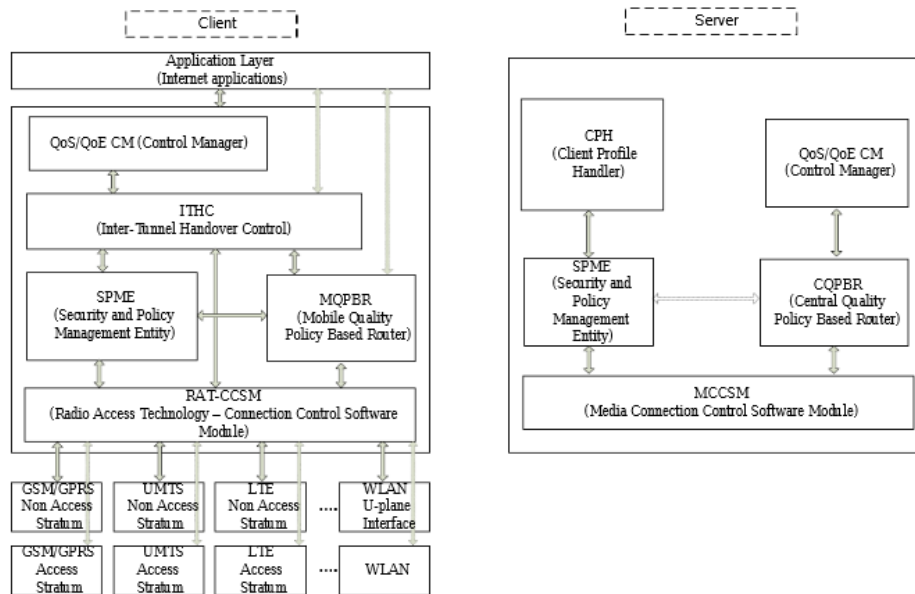
Εικόνα 31: Protocol Layout για τα στοιχεία της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Οι συνδέσεις πραγματοποιούνται μεταξύ των clients και των servers στο Internet μέσω των sockets. Τα Internet sockets υλοποιούνται από άκρο σε άκρο με data communication flows. Υποθέτοντας ότι, η εγκαθίδρυση της επικοινωνίας από άκρο σε άκρο μεταξύ του client και του server χρησιμοποιεί το Internet protocol, το οποίο είναι απαραίτητο για την αύξηση του απαραίτητου Internet socket αποκλειστικά για τις εφαρμογές client – server. Κάθε τεχνολογία πρόσβασης, η οποία είναι διαθέσιμη στον χρήστη για να επιτύχει την συνδεσιμότητα με τη συναφή radio access, παρουσιάζεται με την κατάλληλη IP διεπαφή. Κάθε IP διεπαφή στο τερματικό χαρακτηρίζεται από την IP address και netmask καθώς και από παραμέτρους οι οποίες σχετίζονται με τη δρομολόγηση των IP πακέτων στο δίκτυο. Σε ένα inter-system handover, η αλλαγή της τεχνολογίας πρόσβασης σημαίνει την αλλαγή στην τοπική IP address. Έτσι, κάθε αλλαγή σε οποιαδήποτε παράμετρο του socket, σημαίνει και αλλαγή του socket, κλείσιμο του socket και άνοιγμα ενός καινούργιου. Αυτό συνεπάγεται τον τερματισμό της σύνδεσης αυτής και άνοιγμα μιας νέας σύνδεσης. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι ευέλικτη και βασίζεται στην επικοινωνία του σήμερα.

Με σκοπό την επίλυση αυτού του μειονεκτήματος, προτείνεται ένα νέο επίπεδο, το οποίο θα φροντίζει τα γενικά επίπεδα των τεχνολογιών πρόσβασης του δικτύου σε υψηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Αυτό το επίπεδο είναι σημαντικό στη νέα αρχιτεκτονική. Για την ικανοποίηση των λειτουργιών της διαφάνειας και του ελέγχου ή της δρομολόγησης των πακέτων διαμέσου της τεχνολογίας πρόσβασης, στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, δημιουργήθηκε ένα σύστημα ελέγχου στην λειτουργία της αρχιτεκτονικής των δικτύων, το οποίο δουλεύει με μια ολοκληρωμένη συνεργασία με το τερματικό του χρήστη και παρέχει λειτουργίες δικτύου καθώς και δρομολόγηση πακέτων. Την ίδια στιγμή, αυτό το σύστημα ελέγχου είναι ένα στοιχείο διαμέσου του οποίου μπορεί να προσδιοριστεί η ποιότητα εξυπηρέτησης για κάθε τεχνολογία εκπομπής. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 31.

Το επίπεδο δικτύου μπορεί να παρέχεται δημιουργώντας IP tunnels πάνω από τις IP διεπαφές που αποκτήθηκαν από τη σύνδεση του τερματικού μέσω των τεχνολογιών πρόσβασης στα διαθέσιμα τερματικά. Στην πραγματικότητα, τα tunnels δημιουργήθηκαν μεταξύ του τερματικού του χρήστη και του συστήματος ελέγχου και ονομάζονται Policy Router. Μέσω αυτού ο client δημιουργεί έναν αριθμό από tunnels που συνδέονται σε έναν αριθμό από τεχνολογίες ελέγχου. Ο τρόπος με τον οποίο δρομολογούνται τα πακέτα IP μέσω των tunnels ή για την επιλογή του σωστού tunnel, βασίζεται στους κανόνες, οι οποίοι αλλάζουν μέσω του πρωτοκόλλου του εικονικού δικτύου.

Θεωρώντας ότι οι λειτουργίες του εικονικού δικτύου στην προτεινόμενη νέα αρχιτεκτονική περιλαμβάνουν λειτουργίες σχετιζόμενες με την συνδεσιμότητα, την ασφάλεια καθώς και με την ολοκλήρωση των sessions, το εικονικό δίκτυο διαιρείται σε μερικές συνεργαζόμενες software μονάδες, που ασχολούνται με διάφορες λειτουργίες. Στην εικόνα 32 δίνεται το block-diagram των software μονάδων στο εικονικό δίκτυο.



Εικόνα 32: Software Diagram του προτεινόμενου εικονικού δικτύου

Υπάρχουν διαφορές μεταξύ των λειτουργιών του client και του server στο εικονικό δίκτυο. Στην πλευρά του client υπάρχουν 5 software μονάδες:

1. RAT-CCSM(Radio Access Technology-Connection Control Software Module)
2. MQPBR(Mobile Quality Policy Management Entity)
3. ITHC(Inter Tunnel Handover Control)
4. QoS/QoE CM(QoS and QoE Control Manager)

Από την άλλη πλευρά, το Policy Router περιλαμβάνει 4 software μονάδες:

1. MCCSM(Media Connection Control Software Module)
2. CQPBR(Central Quality Policy Based Router)
3. SPME(Security and Policy Management Entity)
4. CPH(Client Profile Handler) και
5. QoS/QoE CM(QoS and QoE Control Manager)

Για κάθε μονάδα software έχει αποφασιστεί η θέση της μέσα στην αρχιτεκτονική για να δώσει την ιδανική λειτουργικότητα, η οποία παρέχεται στην διαλειτουργικότητα των 5G ετερογενών συστημάτων. Η παροχή λειτουργικότητας μεταξύ των μονάδων software γίνεται διαμέσου καθορισμένων διεπαφών σε άλλες μονάδες και με links μεταξύ peer protocol μονάδων μεταξύ των πλευρών της αρχιτεκτονικής.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 32 υπάρχουν τέσσερις κοινές μονάδες μεταξύ client και server, οι οποίες είναι διασυνδεδεμένες. Συνεπώς, ξεχωρίζουμε μεταξύ των τεσσάρων βασικών λειτουργιών αυτές που εκτελούνται στο φυσικό επίπεδο δικτύου.

Αρχικά βασική λειτουργία του εικονικού επιπέδου του δικτύου είναι να παρέχει ένα γενικό δίκτυο. Αυτή η λειτουργικότητα σχετίζεται με τη διασυνεργασία των RAT-CCSM και του MCCSM, οι οποίες μονάδες αυτές φτιάχτηκαν για το masking του IP level από κάθε τεχνολογία πρόσβασης. Επιπλέον, αυτή η βασική λειτουργικότητα, το RAT-CCSM στον client χρησιμοποιεί API διεπαφές για πρόσβαση στις software μονάδες από τα χαμηλότερα επίπεδα των τεχνολογιών πρόσβασης με σκοπό την παροχή επιπρόσθετης πληροφορίας. Αυτό το link είναι ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται πληροφορία για την βελτίωση της σύνδεσης των διαφόρων τεχνολογιών πρόσβασης και το επίπεδο του λαμβανόμενου σήματος του για την σχετική τεχνολογία πρόσβασης. Με αυτόν τον τρόπο η software μονάδα έχει πληροφορίες για το δίκτυο και για την κατάσταση της σύνδεσης για κάθε τεχνολογία πρόσβασης. Τα tunnels δημιουργούνται μεταξύ RAT-CCSM στην πλευρά του client και MCCSM στην πλευρά του Policy Router. Το RAT-CCSM, δημιουργεί μια διαδικασία για την εγκατάσταση του tunnel μεταξύ του client και του Policy Router. Το tunnel δημιουργείται δια μέσου την εγκαθίδρυσης της IP σύνδεσης της τεχνολογίας πρόσβασης. Η IP address του tunnel είναι η IP address που παρέχεται από την εγκαθίδρυση της IP σύνδεσης μέσω της δοθείσας τεχνολογίας πρόσβασης, ενώ ο προορισμός της IP address του tunnel φαίνεται στην uplink κατεύθυνση από την πλευρά του κινητού, που είναι η loopback address της μονάδας του MCCSM Policy Router.

Το δεύτερο link της μονάδας αναφέρεται στην μονάδα δρομολόγησης, όπου η δρομολόγηση βασίζεται στις αναφερόμενες πολιτικές που προσφέρονται στο Quality of Service. Η μέθοδος εγκαθίδρυσης της διαδικασίας tunnel ξεκινάει με την αυθεντικοποίηση και ταυτοποίηση μεταξύ του client και του Policy Router, έτσι η μονάδα software έχει μια απευθείας σύνδεση με την SPME μονάδα για τη διαχείριση των μηχανισμών ασφάλειας.

Η δεύτερη λειτουργία σχετίζεται με τις πολιτικές δρομολόγησης που βασίζονται στο καθορισμένο Quality of Service που προσφέρεται από τις τεχνολογίες πρόσβασης. Αυτή η λειτουργικότητα επιτυγχάνεται από την συνεργασία μεταξύ των MQPBR και CQPBR components στην πλευρά του client και του server. Η κοινή αυτή συνεργασία μεταξύ των μονάδων αναγνωρίζονται δια μέσου του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

Η τρίτη λειτουργία σχετίζεται με τη διαχείριση των διαδικασιών ασφάλειας ή των μηχανισμών ασφάλειας και των κανόνων που εφαρμόζονται στους χρήστες. Η RAT-CCSM μονάδα προκαλεί την αντίστοιχη μονάδα στην πλευρά του client (SPME) με σκοπό να διενεργήσει την

αυθεντικοποίηση και την ταυτοποίηση του κατάλληλου χρήστη για την ίδια υποστήριξη της δημιουργίας tunnel δια μέσου της κατάλληλης τεχνολογίας. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται δια μέσου κάθε ελεύθερης IP address.

Η τέταρτη λειτουργία σχετίζεται με τους μηχανισμούς διαχείρισης για τη μέτρηση των παραμέτρων τις οποίες ορίζει το Quality of Service and Experience όσον αφορά τις εφαρμογές του χρήστη. Αυτή η λειτουργικότητα επιτυγχάνεται από την συνεργασία μεταξύ του QoS/QoE στην πλευρά του client και του QoS/QoE στην πλευρά του server. Ο σκοπός του μοντέλου αυτού είναι η συνεχής μέτρηση των βασικών ποιοτικών παραμέτρων των τεχνολογιών πρόσβασης. Συνεπώς, οι μετρήσιμοι παράμετροι δίνουν μια ρεαλιστική εικόνα για το Quality of Service το οποίο μπορεί να αναμένουμε από τις τεχνολογίες πρόσβασης. Οι μετρήσεις διεξάγονται ξεχωριστά από κάθε τεχνολογία πρόσβασης.

Η πέμπτη λειτουργία της αρχιτεκτονικής δικτύου αφιερώνεται μόνο στο χρήστη και στη θέση του μέσα στο ετερογενή δίκτυο. Αυτή η λειτουργικότητα σκοπεύει στη διασφάλιση της συνεχόμενης εξυπηρέτησης πελατών ενώ λαμβάνει υπόψη τις ποιοτικές παραμέτρους των εφαρμογών, του χρήστη και του δικτύου, κερδίζοντας γνώση για τους user services. Η μονάδα αυτή στην πλευρά του χρήστη παρουσιάζεται ως το ITHC software και έχει μια αλληλεπίδραση με τις υπόλοιπες software μονάδες στο εικονικό δίκτυο.

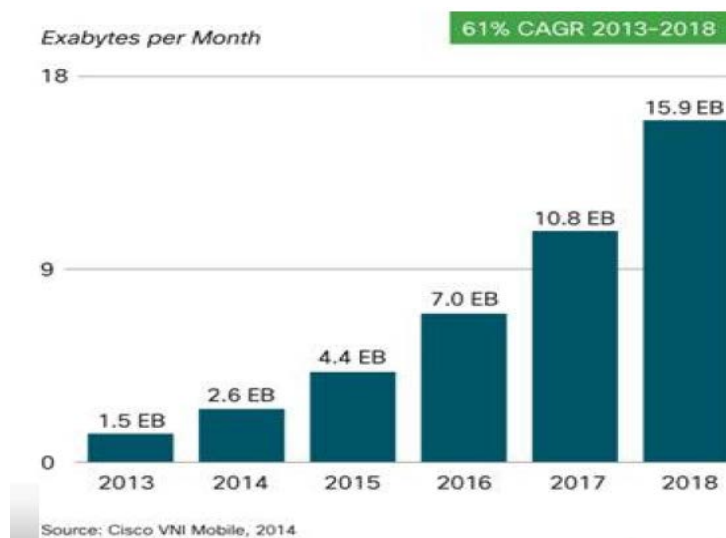
Κινητικότητα στα 5G δίκτυα

Distributed Mobility Management

Τα 5G πρέπει να είναι ικανά να μπορούν να διαχειριστούν την ενδεχόμενη αύξηση της κίνησης του δικτύου. Οι τρεις τάσεις που κυριαρχούν στην αντιμετώπιση της κίνησης των δικτύων είναι οι ακόλουθες:

- 1) Βελτίωση των δικτύων πρόσβασης
- 2) Υιοθέτηση εξυπνότερων και οικονομικότερων δικτύων διαχείρισης
- 3) Flatter networks – Δίκτυα που προσπαθούν να μειώσουν το κόστος διαχείρισης και συντήρησης και για να το κάνουν αυτό γίνονται περισσότερο centralized παρά distributed.

Η κινητικότητα (mobility) αποτελεί το κλειδί για τα κυψελωτά δίκτυα. Τα 5G δίκτυα θα εξυπηρετούν περισσότερους ετερογενείς χρήστες και υπηρεσίες. Αυτό θα οδηγήσει όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στη χρήση μικρότερων κυψελών καθώς και στη μείωση του OPEX και του CAPEX. Στην εικόνα 33 φαίνεται η αύξηση του ρυθμού επένδυσης για ένα συγκεκριμένο διάστημα μεγαλύτερο του ενός έτους.



Εικόνα 33: CAGR 2013-2018

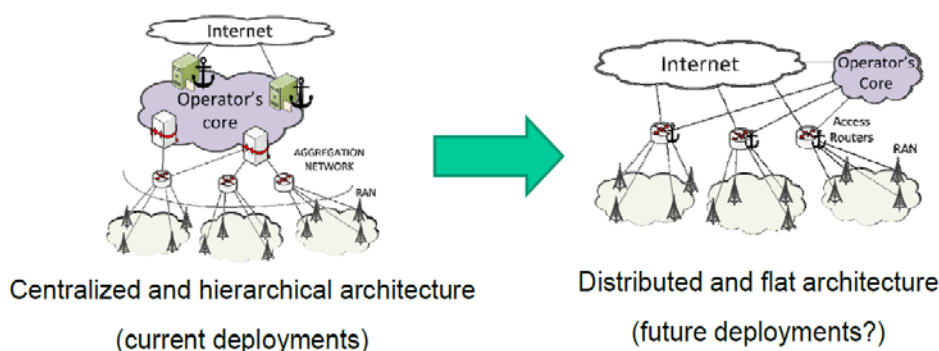
Οι διαχειριστές δικτύου, μαζί με τις βιομηχανίες και τις ερευνητικές κοινότητες, ψάχνουν για οικονομικότερες και πιο αποδοτικές λύσεις για να αντιμετωπίσουν την τεράστια αυτή ανάπτυξη. Υπάρχουν τρία βασικά θέματα να αντιμετωπιστούν:

- A) Βελτίωση των δικτύων πρόσβασης για υψηλότερους βαθμούς απόδοσης
- B) Μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην αρχιτεκτονική δικτύου
- Γ) Εξυπνότερη πρόσβαση στα δίκτυα

Η μια λύση για τα παραπάνω θέματα είναι η μείωση του μεγέθους των κυψελών, η οποία είναι η πιο εφικτή προσέγγιση παρέχοντας έτσι αύξηση στο εύρος ζώνης. Για την αντιμετώπιση του δεύτερου θέματος, η εφαρμογή του Distributed Mobility Management (DMM) είναι η βέλτιστη λύση η οποία οδηγεί στην αύξηση της αποδοτικότητας στην αρχιτεκτονική δικτύου.

Οι τρέχων αρχιτεκτονικές για τα κυψελωτά δίκτυα κεντριοποιούνται και ιεραρχούνται, αναγκάζοντας την κίνηση του χρήστη να διασχίσει όλα τα τμήματα του δικτύου μέχρι τον πυρήνα, όπου το κλειδί των οντοτήτων χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των IP gateways. Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση, το GPRS Tunneling Protocol (GTP), το Proxy Mobile

IPv6 (PMIPv6), Mobile IPv4 (MIPv4) και το Mobile IPv6 (MIPv6) έχουν υιοθετηθεί ως πιθανές λύσεις για να λειτουργήσει το Evolved Packet Core (EPC) των 4G δικτύων. Το πλεονέκτημα από την κεντριοποιημένη αυτή προσέγγιση είναι η απλοποίηση, διότι το κεντρικό στήριγμα μπορεί να ακολουθήσει τις κινήσεις του χρήστη με την επαναρδρομολόγηση των πακέτων από τα tunnels που δημιουργούνται από τα access router που το mobile node (MN) συνδέεται.



Εικόνα 34: Centralized and hierarchical architecture vs Distributed and flat architecture

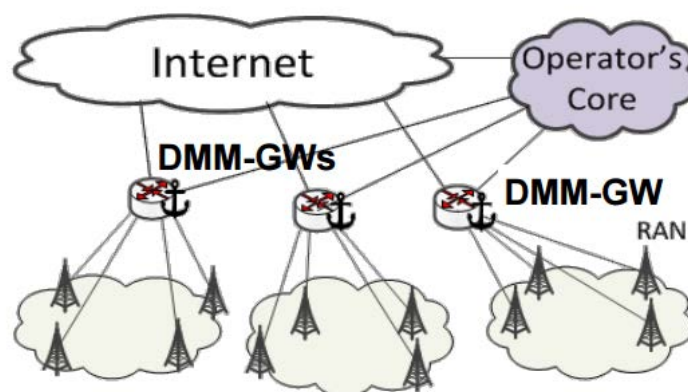
Συνεπώς, τα μελλοντικά 5G δίκτυα αναμένεται να είναι πιο ευέλικτα και θα επιτρέπουν το Internet services να τοποθετείται πιο κοντά στους χρήστες. Η μεγάλη πυκνότητα στα δίκτυα θα αυξήσει τα οφέλη από τη μείωση της συμφόρησης στην αρχιτεκτονική του πυρήνα και θα παρέχει μια βελτίωση στην εξυπηρέτηση των χρηστών. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των μελλοντικών δικτύων είναι ότι η αρχιτεκτονική, η οποία αναμένεται να απλοποιήσει την εξυπηρέτηση των χρηστών και των εφαρμογών. Για παράδειγμα, τα 5G δίκτυα προβλέπουν τον διαμοιρασμό των πόρων για να αντιμετωπιστούν τόσο οι υψηλές απαιτήσεις των βίντεο εφαρμογών μερικών χρηστών καθώς και το μικρό bit-rate κίνησης από μια μεγάλη ομάδα αισθητήρων (Internet-of-Things, IoT). Με αυτούς τους σκοπούς, το Distributed Mobility Management (DMM) εμφανίστηκε ως ένα νέο παράδειγμα για το σχεδιασμό μιας flat και ευέλικτης αρχιτεκτονικής, η οποία οδηγεί σε ένα ευέλικτο σχεδιασμό (data plane) επιτρέποντας στην κίνηση να περάσει από τα IP networks στους access routers, όπως φαίνεται και στην εικόνα 34, αλλά ακόμα οδηγεί τις λειτουργίες από τον πυρήνα στις άκρες του δικτύου.

Στο [23] αναφέρεται ότι οι προσεγγίσεις του DMM είναι κατάλληλες για τη διαχείριση κινητικότητας στα πολύ πυκνά μελλοντικά 5G δίκτυα. Έτσι, οι τρεις κύριες DMM προσεγγίσεις, που προτείνονται είναι:

- 1) Πρωτόκολλο προερχόμενο από την κλασσική προσέγγιση διαχείρισης κινητικότητας IP, PMIPv6
- 2) Μηχανισμό βασισμένο στο Software Defined Networking (SDN)
- 3) Λύση βασισμένη στη δρομολόγηση

Η πρώτη οικογένεια λύσεων βασίζεται στις τροποποιήσεις των πρωτοκόλλων κινητικότητας IP, συγκεκριμένα το γνωστό PMIPv6, έτσι ακολούθως αναφέρουμε τη λύση ότι ανήκει σε αυτή την οικογένεια ως PMIPv6-based DMM solution, η δεύτερη κατηγορία ακολουθεί ένα Software Defined Networking παράδειγμα, έτσι ονομάζουμε το πρωτόκολλο από αυτή την κατηγορία SDN-based DMM solution, και η τρίτη κατηγορία αξιοποιεί τα IP πρωτόκολλα δρομολόγησης, έτσι επικράτησε το όνομα Routing-based DMM solution για το μηχανισμό μέσα σε αυτή την οικογένεια.

Το MN οργανώνει την δική του κινητικότητα με τους access routers τους οποίους επισκέπτεται ενώ κινείται μεταξύ διάφορων δικτύων πρόσβασης. Επιπλέον, οι access routers παρέχονται με τις λειτουργίες κινητικότητας που χρειάζονται για να ερμηνεύσουν την σηματοδοσία κινητικότητας με το MN και για να ερμηνεύσουν τις απαραίτητες ενέργειες. Με τον όρο λοιπόν, DMM Gateway (DMM-GW) εννοούμε τους ενεργούς access routers. Το DMM-GW είναι το πρώτο hop του MN και η default gateway. Κάθε DMM-GW, επίσης έχει ένα μοναδικό IPv6 prefix pool, σύμφωνα με τα οποία κάθε ενεργός router τα χρησιμοποιεί και αναθέτει τις global IPv6 addresses σε συσκευές των διεπαφών του. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ χρήσιμη όταν ο router δεν έχει πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία των δικτύων στην οποία ανήκει ο router στον οποίο πρέπει να περάσουν τα πακέτα.



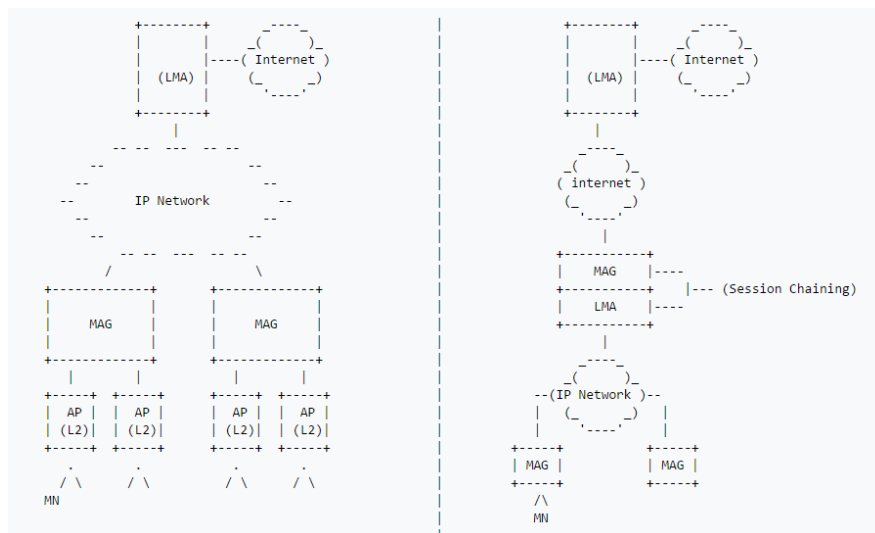
Εικόνα 35: Απεικόνιση των DMM-GWs

Ανάλυση των DMM προσεγγίσεων

Πρωτόκολλο προερχόμενο από την προσέγγιση διαχείρισης κινητικότητας IP, PMIPv6

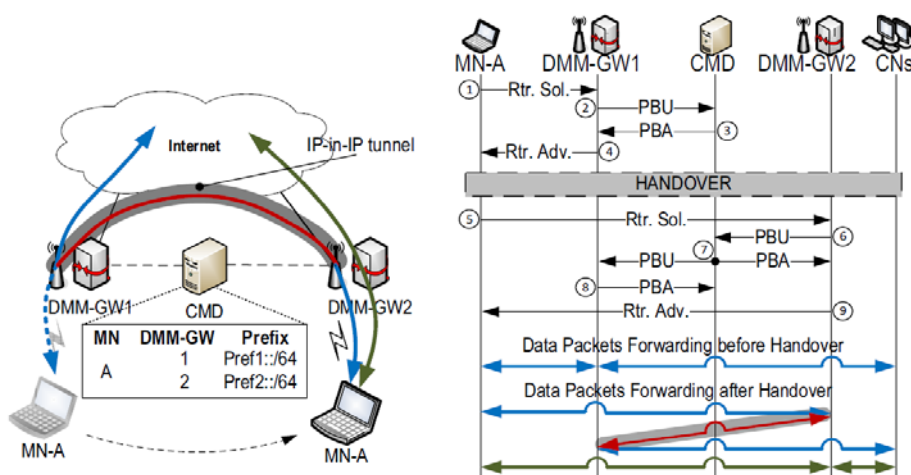
Στην ενότητα αυτή, θα γίνει αναφορά στο πρωτόκολλο PMIPv6, το οποίο βασίζεται στο Proxy Mobile IPv6. Το Proxy Mobile IPv6 πρόκειται για ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κινητικότητας, το οποίο προτυποποιήθηκε από την IETF και προσδιορίζεται στο RFC 5213. Είναι ένα πρωτόκολλο για τη δημιουργία μιας κοινής και προσβάσιμης τεχνολογίας ανεξάρτητη από τον πυρήνα δικτύων και εξυπηρετώντας ποικίλες τεχνολογίες πρόσβασης όπως WiMAX, 3GPP, 3GPP2 και το WLAN βασιζόμενο στις τεχνολογίες πρόσβασης. Είναι το μοναδικό πρωτόκολλο διαχείρισης κινητικότητας που προτυποποιήθηκε από την IETF.

Ο πυρήνας του δικτύου ονομάζεται Local Mobility Anchor (LMA) δημιουργώντας tunnels δύο κατευθύνσεων με τα Mobility Access Gateways (MAGs) και είναι τοποθετημένος στα δίκτυα πρόσβασης. Τα upstream πακέτα δεδομένων των χρηστών συγκεντρώνονται από το υπεύθυνο MAG και αποστέλλονται διαμέσου του tunnel στο LMA, ο οποίος εκ περιτροπής προωθεί αυτά στο Internet. Όμοια, τα downstream πακέτα πρώτα λαμβάνονται από το LMA, ο οποίος αποστέλλει αυτά διαμέσου του τερματικού tunnel στο MAG, όπου το MN είναι προσωρινά συνδεδεμένο. Χρησιμοποιώντας μηνύματα ειδικής σηματοδότησης, που λέγονται Proxy Binding Update (PBU) και Proxy Binding Acknowledgement (PBA), μεταξύ του MAG και του LMA, το PMIPv6 πρωτόκολλο συντονίζει τα status του δικτύου, ενημερώνοντας το LMA να γνωρίζει σε ποιο MAG το MN είναι διασυνδεδεμένο στην κατάλληλη διαδρομή της κίνησής του. Πράγματι, αφού το LMA διασχίστηκε από τα data flows των χρηστών, είναι ξεκάθαρο για αυτό να στρέψει τα πακέτα στο κατάλληλο tunnel σαν handover, βασιζόμενο στις ενδείξεις που λαμβάνονται από τα MAGs. Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο, το LMA πρέπει να διαθέτει υψηλή ταχύτητα και περιττές συνδέσεις στα MAGs, με σκοπό να μεταφέρει την κίνηση για όλους τους συνδρομητές.



Εικόνα 36: Proxy Mobile IPv6, Flat Domain Model and Proxy Mobile IPv6, Domain Chaining

Στην περίπτωση του PMIPv6-based DMM solution, ο ρόλος του MAG αντικαθίστανται από το DMM-Gateway. Το DMM-GW αναπτύσσεται από το MAG καθώς αυτό παρέχεται με συνδέσεις στο Internet το οποίο δε συνεπάγεται μονοπάτια τα οποία διασχίζουν το LMA. Έτσι, το DMM-GW ενεργεί ως access router για να στείλει τα πακέτα από και προς το Internet. Επιπλέον, το LMA του PMIPv6 αναφέρεται ως μοναδική οντότητα ελέγχου και αναφέρεται ως Control Mobility Database (CMD). Το CMD αποθηκεύει, για κάθε MN, όλες τις επιπρόσθετες πληροφορίες για το MN, με το οποίο συνδέεται το DMM-GW. Επιπλέον, υπό τον όρο της PBU/PBA σηματοδότησης, το CMD στέλνει οδηγίες για την ανάκτηση των IP flows του MN μετά το handover. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να βελτιωθεί με το PMIPv6, καθώς τα DMM-GWs μπορούν να απελευθερώσουν ένα μέρος της κίνησης, χωρίς να χρειάζεται να διασχίσει τον πυρήνα του δικτύου.



Εικόνα 37: PMIPv6-based DMM

Στην εικόνα 37, απεικονίζονται οι λειτουργίες του PMIP6-based DMM solution.

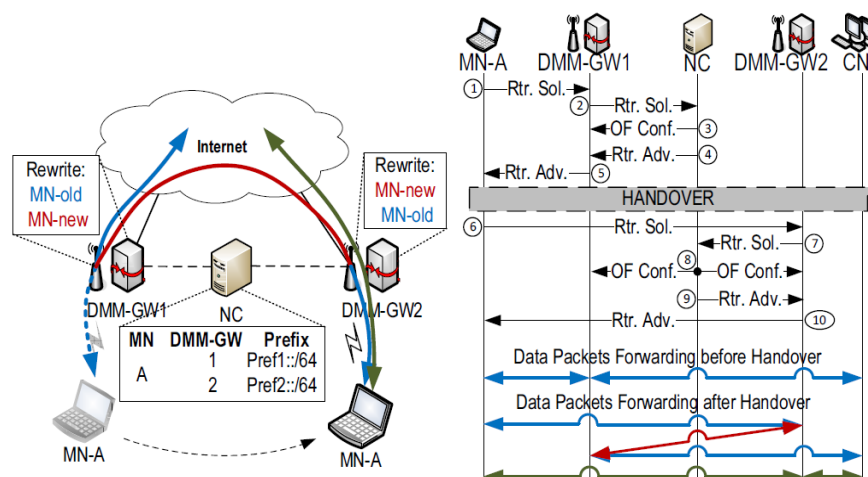
- 1) Αρχικά το DMM-GW ανιχνεύει το MN τυπικά μετά από την λήψη του Router Solicitation message από το MN (1)
- 2) Έπειτα, το DMM-GW ενημερώνει το CMD σχετικά με το MN μέσω μιας PBU/PBA σηματοδοσίας, που περιέχει επίσης το IPv6 prefix στο οποίο το DMM-GW διατίθεται για το MN. (2,3). Αφού αυτή είναι μια νέα εγγραφή, το CMD δημιουργεί μια νέα είσοδο για το MN, αποθηκεύοντας έναν δείκτη στην τρέχων τοποθεσία του MN, αυτό είναι, το DMM-GW το οποίο δημιουργεί τη σηματοδοσία και το πεδίο για το ανατηθέμενο prefix.
- 3) Τα DMM-GWs γνωστοποιούν το prefix στο MN με το Router Advertisement message (RA) (4)
- 4) Μετά το handover, (5), όταν το CMD λάβει το PBU σήμα σηματοδοσίας από το νέο DMM-GW(6), η βάση δεδομένων εισόδου για το MN ανανεώνεται, συνδέοντας την τοποθεσία του MN με τους νέους εξυπηρετητές DMM-GWs.
- 5) Επιπλέον, το CMD οδηγεί με τη χρήση της PBU/PBA σηματοδοσίας τους νέους εξυπηρετητές DMM-GWs και τους παλιούς DMM-GWs να εγκαθιδρύσουν ένα tunnel μεταξύ αυτών (7,8). Το tunnel είναι χρήσιμο να ανακατευθύνει τα IP flows anchored στο παλιό DMM-GW από και προς το νέο GMM-GW. Ωστόσο, το tunnel μεταφέρει τα πακέτα μόνο για εκείνα τα flows τα οποία ξεκίνησαν πριν το MN μεταβιβαστεί από το προηγούμενο DMM-GW, ενώ οι νέες επικοινωνίες αντιμετωπίζονται από το νέο DMM-GW ως ένα plain router, αυτό είναι, χωρίς τη χρήση κανενός tunnels. Αυτά τα δυναμικά flows υλοποιούνται από τη κατανομή στο MN ενός νέου IPv6 prefix από κάθε DMM-GW που αυτό συνδέεται.
- 6) Το prefix ενημερώνεται από τα DMM-GWs με ένα RA, (4,9), το οποίο αναγκάζει το MN να χρησιμοποιήσει το νέο prefix για τις επικοινωνίες. Συνεπώς, κάθε DMM-GW είναι υπεύθυνο για το σύνολο των IPv6 prefixes, από τα οποία αναθέτει ένα σε κάθε MN για κάθε σύνδεση. Συνεπώς, ένα MN διαμορφώνει μερικές IPv6 διευθύνσεις, μια για κάθε επισκεπτόμενο DMM-GW.

Το πρωτόκολλο ανήκει στην μερικώς distributed κατηγορία. Πράγματι, το data plane είναι διαμοιρασμένο μεταξύ των DMM-GWs και το control plane είναι κεντρικοποιημένο και άμεσα συνδεδεμένο με το ρόλο του CMD.

Μηχανισμός βασιζόμενος στο Software Defined Networking (SDN)

Το Software Defined Networking είναι ένα παράδειγμα το οποίο μοιράζει τον έλεγχο και τα δεδομένα σε προωθημένα σχέδια. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει γρηγορότερες προβλέψεις και ρυθμίσεις για τις συνδέσεις δικτύου. Με το SDN, οι διαχειριστές δικτύων μπορούν να προγραμματίσουν τη συμπεριφορά και της κίνησης και του δικτύου με έναν κεντριοποιημένο τρόπο. Αυτή η προσέγγιση διαχωρίζει το σύστημα το οποίο ασχολείται με το που είναι η κίνηση (π.χ control plane) από το υποσύστημα το οποίο έστειλε την κίνηση στον επιλεγμένο προορισμό (π.χ data plane). Μεταξύ των άλλων πλεονεκτημάτων, αυτή η λύση απλοποιεί το δίκτυο καθώς και την ανάπτυξη των νέων πρωτοκόλλων και εφαρμογών. Επιπλέον, μέσω του προγραμματισμού της κίνησης και των συσκευών, το SDN δίκτυο γίνεται πιο ευέλικτο και αποδοτικό από κάποιο παραδοσιακό.

Στα SDN περιβάλλοντα, ο controller του δικτύου είναι η πιο σημαντική οντότητα και είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση των κόμβων στο δίκτυο μέσω των application programming interface (API), που ονομάζονται Southbound API. Το OpenFlow είναι ένα από τα APIs και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μια software εφαρμογή για να προγραμματίσει το σχέδιο των συσκευών του δικτύου.



Εικόνα 38: SDN-based DMM

Στην εικόνα 38 απεικονίζεται η SDN-based DMM solution. Σε αυτή τη λύση, ο πυρήνας δικτύου, ο οποίο ονομάζεται Network Controller (NC), διαμορφώνει τους κανόνες των access routers (DMM-GWs) χρησιμοποιώντας το OpenFlow 1.3 API.

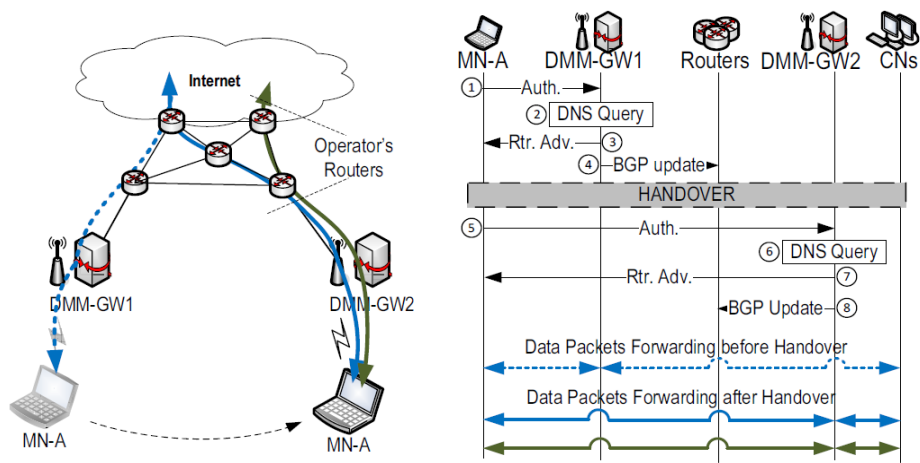
1. Μετά την προσάρτηση του MN στο access point (1)
2. Το DMM-GW πληροφορεί το NC (2,7)
3. Το οποίο αναθέτει ένα network prefix στο MN (4,5,9,10)
4. Το network prefix εγγυάται να είναι μοναδικό με τη χρήση μιας περιοριστικής cache που ο controller αποθηκεύει, όμοια με την PMIPv6-based solution, όπου οι πληροφορίες σχετικά με τα MNs συνδέονται στο δίκτυο.
5. Έπειτα, το NC ρυθμίζει τους OpenFlow κανόνες σε κάθε DMM-GW επισκεπτόμενο από το MN (3,8)

Η κινητικότητα επιτυγχάνεται από τους συνδυαζόμενους κανόνες μεταφοράς και προώθησης των DMM-GWs. Όταν το πακέτο του anchored flow ερευνήσει ένα επισκεπτόμενο DMM-GW, πρώτα το anchor ξαναγράφει τον προορισμό της IP διεύθυνσης με την τελευταία γνωστή IP διεύθυνση του MN και δεύτερον επανακατευθύνει την κίνηση στην νέα τοποθεσία του MN. Όταν η κίνηση ερευνήσει τον τελευταίο DMM-GW, το DMM-GW εκτελεί την αντίστροφη μετάφραση της IP διεύθυνσης πρώτα, αποθηκεύοντας τον παλιό προορισμό της IP διεύθυνσης και μετά προωθεί την κίνηση στον MN.

Πρέπει να αναφέρουμε πως αυτή η λύση δεν διαθέτει tunnels. Επίσης η λύση αυτή είναι εν μέρει distributed. Ενώ όμως το data plane είναι distributed, πράγματι η κίνηση δεν περνάει διαμέσου κάποιας κεντρικοποιημένης εισόδου, το control plane κεντρικοποιείται στον network controller.

Λύση βασισμένη στη δρομολόγηση

Η βασική ιδέα σε αυτήν την λύση είναι η αφαίρεση κάθε anchor από την αρχιτεκτονική, αφήνοντας όλους τους κόμβους του δικτύου να επανα-ιδρύσουν ένα καινούργιο χάρτη δρομολόγησης όταν τα τερματικά μετακινηθούν, μέσω του IP routing πρωτοκόλλου.



Εικόνα 39: Routing-based DMM

Στην εικόνα 39 παρουσιάζεται σχηματικά η αρχιτεκτονική αυτής της λύσης.

1. Μετά την προσάρτηση του MN στο access link του DMM-GW (1,5)
2. Το access router μαθαίνει το όνομα του DNS του MN μετά την αυθεντικοποίηση (2,6)
3. Έπειτα, το DMM-GW ανακτά την IP διεύθυνση και συνεπώς το IPv6 prefix, συνδέοντας στο DNS record του MN και αυτό ενημερώνει τον εαυτό του για το επόμενο βήμα για να φτάσει το prefix του MN (3,7)
4. Για να γίνει αυτό, το DMM-GW οδηγεί σε μια ενημέρωση της BGP δρομολόγησης στο υπόλοιπο δίκτυο (4,8)
5. Όταν η BGP διαδικασία συγκλίνει, το MN είναι προσβάσιμος σε μια νέα τοποθεσία χρησιμοποιώντας ένα νέο μονοπάτι μέσα στο δίκτυο.

Το πρωτόκολλο αυτό είναι distributed καθώς και το data plane και το control plane δεν είναι αναπόσπαστα κομμάτια ενός κεντρικοποιημένου κόμβου.

Στον πίνακα 3 απεικονίζονται συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των DMM προσεγγίσεων, μέσω μίας ποιοτικής σύγκρισης που γίνεται μεταξύ αυτών.

	PMIPv6-based DMM	SDN-based DMM	Routing-based DMM
Type of DMM	partially distributed (Central Mobility Database)	partially distributed (SDN controller)	fully distributed
MN's multiple IP addresses	mandatory	mandatory	supported
Mobility Anchors	multiple (depends on IP flows generation)	multiple (depends on IP flows generation)	none
IPv6 in IPv6 tunneling	yes	no	no
Route optimization	no support for anchored IP flows	no support for anchored IP flows	yes for all IP flows
Handover latency	low	low	high
Signaling overhead	low (depends on no. of active anchors)	low (depends on no. of active anchors)	high (depends on no. of routers)

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των τριών DMM προσεγγίσεων

Τρέχων Έρευνες

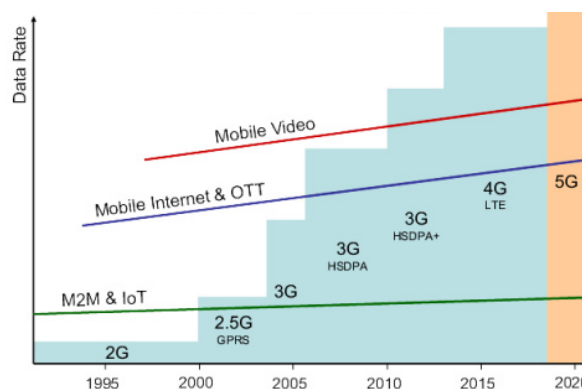
Υπάρχουν μερικές περιοχές που ερευνούνται από τους ερευνητικούς οργανισμούς. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Millimetre-Wave technologies: Χρησιμοποιώντας συχνότητες υψηλότερες από τη ζώνη συχνοτήτων γίνεται διαθέσιμο περισσότερο φάσμα και ακόμα παρέχεται η πιθανότητα μεγαλύτερου channel bandwidth- πιθανόν 1-2 GHz. Ωστόσο, αυτό θέτει νέες προκλήσεις για την handset ανάπτυξη όπου οι μέγιστες συχνότητες είναι μεταξύ 2GHz και τα εύρη ζώνης από 10 έως 20 MHz που χρησιμοποιούνται τώρα.
- Future PHY/MAC: Το νέο physical layer και το MAC παρουσιάζουν μερικές νέες πιθανότητες σε έναν αριθμό περιοχών:
 - ✓ Waveforms: Το πεδίο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι αυτό με τα νέα waveforms, δηλαδή με τις εξελιγμένες τεχνικές διαμόρφωσης κυματομορφής. Κάθε νέα γενιά δικτύων έκανε χρήση όλο και πιο εξελιγμένων τεχνικών διαμόρφωσης του σήματος. Για παράδειγμα, μπορούμε να αναφέρουμε την PSK διαμόρφωση της δεύτερης γενιάς, τις QAM διαμορφώσεις της τρίτης γενιάς και την OFDM διαμόρφωσης της τέταρτης γενιάς. Η OFDM διαμόρφωση χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στα 4G LTE δίκτυα καθώς επίσης και από έναν αριθμό συστημάτων με υψηλό data rate, ωστόσο αυτό έχει κάποια όρια υπό κάποιες συνθήκες. Οι τύποι που προτείνονται για τα 5G δίκτυα περιλαμβάνουν: GFDM, Generalised Frequency Division Multiplexing, όπως ακόμα το FBMC, Filter Bank Multi-Carrier, UFMC, Universal Filtered Multicarrier. Κάθε μία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και όρια.

- ✓ Multiple Access Schemes: Μια ποικιλία από νέα σχήματα πρόσβασης ερευνήθηκαν για την 5G τεχνολογία. Οι τεχνικές που περιλαμβάνει είναι: OFDMA, SCMA, NOMA, PDMA, MUSA και IDMA.
- Network MIMO: Αν και τα MIMO έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές από τα LTE μέχρι και τα WiFi κλπ. αποτελούν μία από τις υποψήφιες 5G τεχνολογίες. Η τεχνική αυτή αποτελεί συνδυασμό της D2D επικοινωνίας, της επικοινωνίας τύπου μηχανής, του cloud computing αλλά και παλαιότερων MIMO τεχνικών. Μέσω της τεχνικής αυτής, κάποιος χρήστης θα μπορεί να χρησιμοποιεί τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου και πιο συγκεκριμένα τις κατανομημένες κεραίες που ανήκουν σε άλλους χρήστες ή γενικά σε συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ίδιο δίκτυο. Έτσι γίνεται άμεσα η επικοινωνία της συσκευής ενός χρήστη με τη συσκευή ενός άλλου (D2D) ή και με οποιαδήποτε συσκευή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο αυτό (IoT), μοιράζοντας σε παραπάνω από μία κεραίες τον όγκο δεδομένων προς μετάδοση, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης του ασύρματου δικτύου καθώς και της ποιότητας της επικοινωνίας.

Σύγκριση 5G δικτύων με 4G δίκτυα

Είναι πολύ σημαντικό να γίνει μια αναφορά για τις διαφορές μεταξύ των 5G και 4G δικτύων. Ο όγκος της κίνησης στο δίκτυο αυξάνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς ενώ ταυτόχρονα και η αύξηση των χρηστών στα ασύρματα δίκτυα δημιουργεί περισσότερες διακοπές στη ζώνη συχνοτήτων. Τα 5G δίκτυα θα κάνουν χρήση της ζώνης συχνοτήτων 5 GHz, όπου εκεί υπάρχουν λιγότερες παρεμβολές. Οι χρήστες θα χρησιμοποιούν περισσότερες εφαρμογές που θα δημιουργούν παρεμβολές στο εύρος ζώνης συχνοτήτων, υπηρεσίες συγχρονισμού ραδιοεπαφής, διαδικτυακές συσκέψεις, εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης κ.λ.π, τα οποία καταναλώνουν μεγαλύτερο μέρος από τη διαθέσιμη χωρητικότητα.



Εικόνα 40: Σύγκριση κινητών δικτύων επικοινωνίας

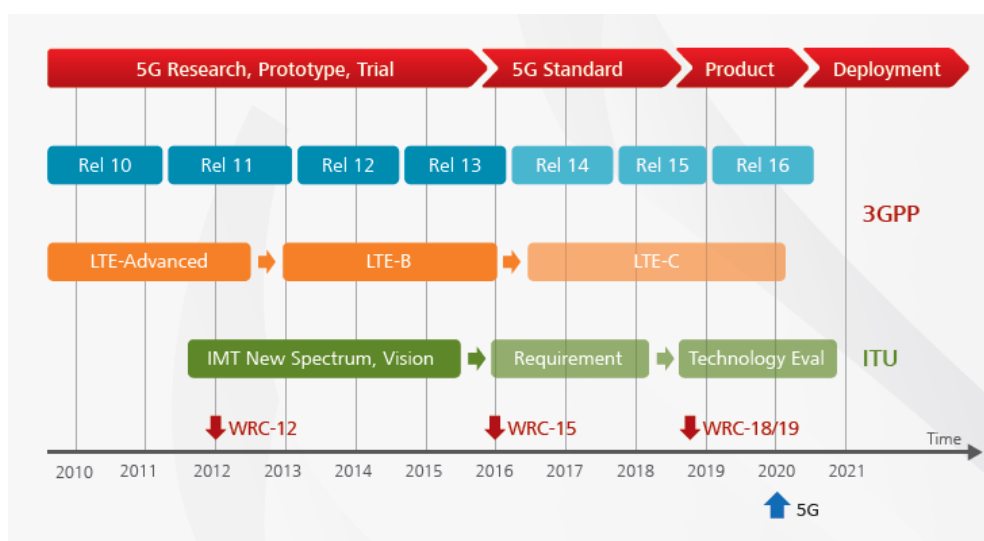
Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο αυτών γενιών συστημάτων.

- Χρήση υψηλότερων ταχυτήτων και μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων από τα 4G δίκτυα. Με τη χρήση των 5G δικτύων θα υπάρχουν γρηγορότερες ροές βίντεο και λιγότερες νεκρές ζώνες. Η πλήρης ταχύτητα και τα πλεονεκτήματα των 5G δικτύων απαιτούν δρομολόγηση οικιακού δικτύου, που υποστηρίζουν τα 5G δίκτυα.
- Τα 5G δίκτυα θα λειτουργούν στη ζώνη των 5GHz. Με την συνεχόμενη αύξηση των συσκευών κάθε χρήστη μέσα σε κάθε σπίτι ή γραφείο, η ζώνη της συχνότητας των 2,4GHz παρουσιάζει όλο και μεγαλύτερη αύξηση στη χρήση της.
- Μείωση των παρεμβολών. Η ζώνη των 5GHz έχει σημαντικά περισσότερο χώρο για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την χρήση καλύτερης ποιότητας, που ουσιαστικά μέσα από αυτό εξαλείφονται οι κακές συνδέσεις. Τα 5G ελαχιστοποιούν τα νεκρά σημεία, με σκοπό να γίνεται χρήση των τηλεφώνων σε περιοχές όπου μέχρι τώρα είναι αδύνατον.
- Μείωση των προβληματικών εικόνων. Η ροή βίντεο απαιτεί πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Έτσι, η παρακολούθηση βίντεο στα σημερινά δίκτυα μπορεί να δημιουργεί προβλήματα. Οι παγωμένες εικόνες δημιουργούνται καθώς το ασύρματο δίκτυο μπορεί να μην έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει με ακρίβεια. Για αυτό το λόγο, τα 5G δίκτυα αποθηκεύουν τα βίντεο στην προσωρινή μνήμη buffer, ώστε να μειώσουν τις προβληματικές εικόνες.
- Βελτίωση του χρόνου που απαιτείται για τη μεταφορά αρχείων καθώς και για τον συγχρονισμό δεδομένων. Ακόμα η δημιουργία αντίγραφου ασφαλείας κινητών συσκευών θα είναι ταχύτερη. Παρά το γεγονός ότι η νέα τεχνολογία θα είναι έως και 1000 φορές γρηγορότερη από τον προκάτοχό της 4G, αλλά και πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τα 1,2 και 3G δίκτυα το κόστος της υποδομής για την ανάπτυξη και χρήση της τεχνολογίας θα είναι τεράστιο. Ενδεικτικά, για τη Νότια Κορέα αναμένεται να κυμανθεί στα 1.5 δισεκατομμύρια δολάρια, οπότε γίνεται αντιληπτό πως τα ποσά αυτά είναι πολύ μεγάλα για να βρεθούν και να δαπανηθούν στην περίοδο που διανύουμε καθώς η οικονομική κρίση μαστίζει σχεδόν όλο τον πλανήτη.

Χρονοδιάγραμμα 5G δικτύων

Τα 5G δίκτυα είναι προς το παρόν, στα πρώτα στάδια της έρευνας και της εξέλιξης τους. Το νέο φάσμα IMT αναμένεται να συμφωνηθεί για την Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (WRC) το 2015. Η ITU συμμετέχει αυτό το διάστημα, στην εργασία σχετικά με τις απαιτήσεις του φάσματος IMT για το 2020 και μετά. Μετά την WRC-15, η ITU θα παρέχει μια πιο ξεκάθαρη διαδρομή για τον προσδιορισμό του δικτύου, αλλά και για τις απαιτήσεις του συστήματος και την τεχνολογία.

Για την υλοποίηση όλων των παραπάνω, αλλά και για τη σταδιακή αντικατάσταση των υποδομών των δικτύων, με σκοπό να μπορούν να συμβαδίσουν με την τελευταία τεχνολογία και να αντιμετωπίσουν όλες τις αλλαγές, αλλά και την ανάπτυξη συσκευών σύγχρονης τεχνολογίας, ο ερευνητικός κόσμος θεωρεί πως θα ολοκληρωθούν οι διαδικασίες αυτές περίπου το 2020. Αυτό βέβαια δεν είναι απόλυτο, από τη στιγμή που είναι πολύ πιθανό να καθυστερήσει πολύ περισσότερο, αφού τα έργα αυτά είναι μεγάλης έκτασης και χρειάζονται πολλά χρόνια για τη μελέτη και την υλοποίηση τους.



Εικόνα 41: Διαγραμματική απεικόνιση των τεχνολογιών με το πέρασμα των ετών

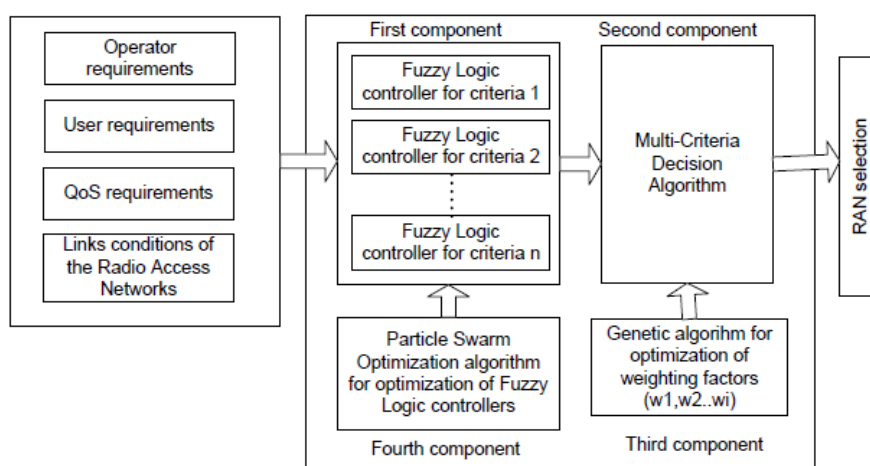
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Radio Access Technology Selector

Εισαγωγή

Σε αυτό το τμήμα θα παρουσιάσουμε μία περιγραφή ενός καινοτόμου αλγορίθμου για radio networks selection σε ετερογενές περιβάλλον. Έπειτα θα κάνουμε μία σύγκριση αυτού με τους υπόλοιπους αλγορίθμους, ενώ τέλος θα παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν με τη βοήθεια ενός γραφήματος.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελείται από τέσσερα συστατικά μέρη, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 42 : Σχήμα Radio Access Network selection

Το πρώτο συστατικό ή μονάδα είναι ένα σύνολο από παράλληλους Fuzzy Logic (FL) controllers, το οποίο έχει ως είσοδο τις μετρήσεις δεδομένων για διαφορετικά επιλεγμένα κριτήρια, περιλαμβάνοντας τις απαιτήσεις χρηστών, τις απαιτήσεις ποιότητας (QoS) , τους κανόνες εξυπηρέτησης, καθώς επίσης και τις συνθήκες της πρόσβασης σε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες που διατίθενται για τον χρήστη. Το δεύτερο συστατικό είναι ένας

μηχανισμός που περιλαμβάνει έναν αλγόριθμο πολλαπλών κριτηρίων, ο οποίος χρησιμοποιεί ως εισόδους τις εξόδους των FL controllers από το πρώτο συστατικό. Το τρίτο συστατικό είναι ένας Genetic Algorithm, δηλαδή πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος βελτιστοποιεί τους συντελεστές βαρών για τα διαφορετικά κριτήρια εισόδου. Το τέταρτο συστατικό είναι το Particle Swarm Optimization (PSO), που πρόκειται για μηχανισμό ο οποίος δυναμικά τροποποιεί τις συναρτήσεις των FL controllers στο πρώτο συστατικό όπως φαίνεται στην εικόνα 42.

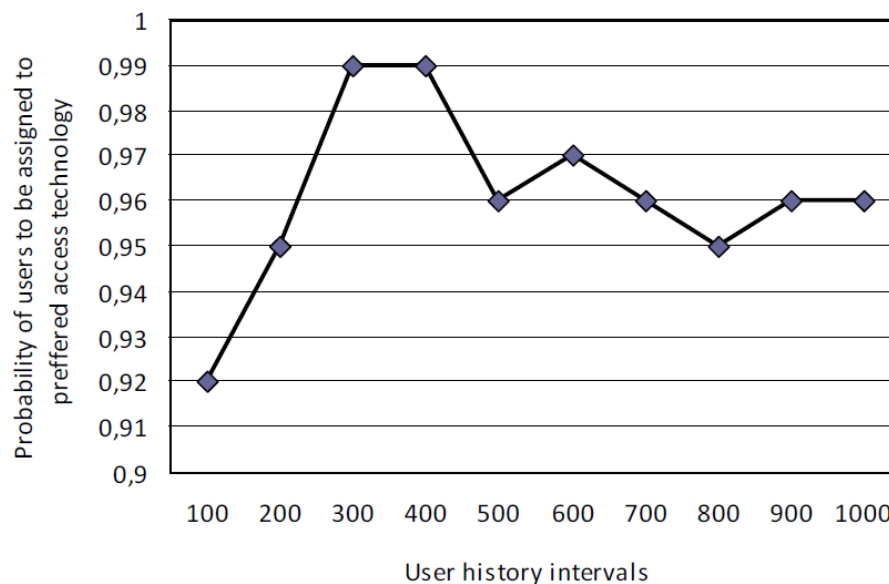
Το σύστημα αυτό δεν περιορίζεται μόνο στο access network selection, αλλά αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση και άλλων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το προτεινόμενο αυτό σχήμα στοχεύει στους wireless networks selection σε ετερογενή περιβάλλοντα, έτσι η απόφαση για την έξοδο θα επιλέξει το καλύτερο ασύρματο δίκτυο μεταξύ όλων αυτών που παρέχονται προς το παρόν στο χρήστη ή για την καλύτερη κατάταξη των δικτύων πρόσβασης.

Το αρχικό στάδιο του σχήματος είναι η επιλογή δεδομένων, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους των Radio Access Networks (RAN). Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τις προτιμήσεις του χρήστη και του λειτουργικού συστήματος. Για παράδειγμα, τέτοιες παράμετροι μετρήσεων είναι η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος και ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) από κάθε δίκτυο στο επίπεδο ζεύξης. Έπειτα, επιπρόσθετες αναφορές μπορεί να είναι το κόστος εξυπηρέτησης στο δοθέν RAN, το οποίο εξαρτάται από το Service Level Agreements (SLA) μεταξύ χρήστη και κάθε ένα από τα ασύρματα δίκτυα. Το προτεινόμενο σχήμα θεωρεί ότι το κινητό τερματικό έχει αρκετή processing power, χωρητικότητα μνήμης και μπαταρία, έτσι μπορεί να παρέχει τις λειτουργίες που περιγράφηκαν.

Θεωρώντας το νόμο του Moore για τους υπολογιστές, όπου αναφέρεται στην πρόβλεψη που αφορά την αύξηση των επιδόσεων των ηλεκτρονικών υπολογιστών μέσα στο χρόνο- και πιο συγκεκριμένα στους ρυθμούς βελτίωσης των μικροεπεξεργαστών, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το 2020 τα κινητά τηλέφωνα θα επιτύχουν ικανότητες των σημερινών υπολογιστών. Έτσι, το κινητό τηλέφωνο μπορεί να λειτουργεί μία βάση δεδομένων, μπορεί να κάνει διαδικασίες στο δοσμένο χρόνο άφιξης των χρησιμοποιούμενων μετρήσεων δεδομένων από ένα δοσμένο χρονικό πλαίσιο του παρελθόντος [35].

Κρίσιμο τμήμα του επιλεγμένου μηχανισμού σε αυτό το τερματικό-σενάριο ελέγχου- παρέχει ικανοποιητικά δεδομένα ως αρχική ακολουθία στους Artificial Intelligence (AI) αλγορίθμους στο σχήμα. Υπάρχουν αρκετές πιθανότητες για την επίτευξη αυτού του στόχου. Η ποιότητα των δεδομένων που μπορούν να περιλαμβάνονται στο αρχικό τμήμα των AI αλγορίθμων πρέπει να αποφασιστούν.

Ο ορισμός του αρχικού buffer size αρκετών προσομοιώσεων εξαρτάται από το διαφορετικό μέγεθος του αρχικού buffer. Όπως φαίνεται στο σχήμα 43, το καλύτερο buffer size μπορεί να οριστεί μεταξύ των 300-400 αρχικών αφίξεων.



Εικόνα 43: Αρχικό μέγεθος buffer

Οι αφίξεις, όπως φαίνονται στην εικόνα 43 είναι οι χρονικοί περίοδοι μεταξύ των μεταγενέστερων αφίξεων των RATs παραμέτρων των κινητών τερματικών καθώς επίσης και το στιγμιότυπο του χρήστη και των απαιτήσεων του δικτύου εξυπηρέτησης την χρονική περίοδο αυτή. Αυτά παρουσιάζουν την πιο σημαντική δραστηριότητα του χρήστη καθώς και τις απαιτήσεις του χρήστη και των απαιτήσεων εξυπηρέτησης του χρήστη από το δίκτυο.

Μοντέλο Προσομοίωσης

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι το MATLAB, επίσης στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο συναρτήσεων που ονομάζονται RUNE. Το μοντέλο συστήματος θεωρεί ένα δίκτυο με επτά μακροκυψέλες με ακτίνα $R=1000m$.

Ανάλυση Προσομοίωσης

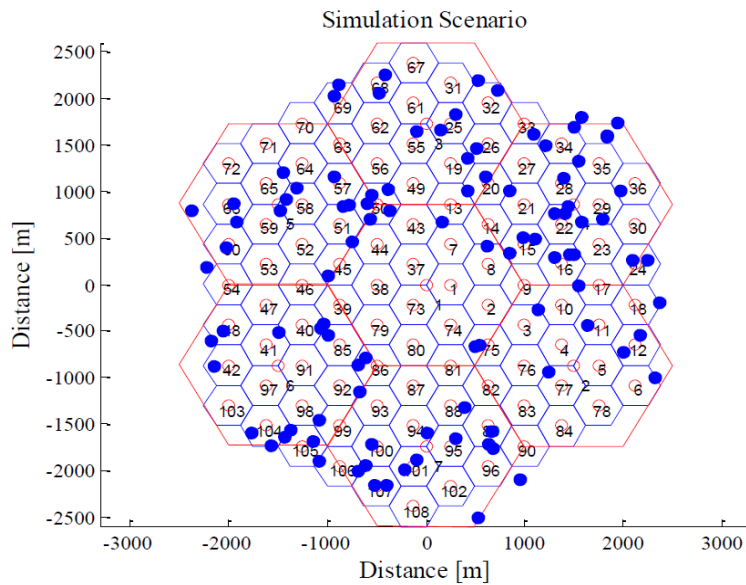
Για το σκοπό της ανάλυσης της προσομοίωσης θα χρησιμοποιήσουμε το ακόλουθο μοντέλο, το οποίο παρέχει τυχαιότητα για τον χρήστη, κάθε τερματικό έχει ταχύτητα που υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$v_i = v_{i-1} * C_v + \sqrt{1 - C_v^2} * v_{mean} * N$$

Όπου v_i είναι η ταχύτητα του χρήστη [m/s]. C_v είναι η ταχύτητα συσχέτισης μεταξύ των χρονικών στιγμών. Αυτό εξαρτάται τόσο από το a_{mean} , το οποίο είναι η μέση επιτάχυνση του χρήστη και το v_{mean} , το οποίο είναι η μέση ταχύτητα του χρήστη. Το C_v υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$C_v = \left(\frac{-dt * a_{mean}}{v_{mean}} \right)$$

Όπου N είναι η Rayleigh κατανομή μεγέθους. Η παράμετρος v_{mean} είναι η μέση ταχύτητα των κινητών και η v_{mean} ορίστηκε σε 10 km/h, η a_{mean} ορίστηκε σε 1 km/h², οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις τυπικές τιμές σε αστικό περιβάλλον. Η εικόνα 44 απεικονίζει τους χρήστες με τα μπλε σημεία, στο περιβάλλον προσομοίωσης. Τέσσερις τύποι υπηρεσιών περιλαμβάνονται στην προσομοίωση και αυτοί κατανέμονται ισότιμα μεταξύ των χρηστών, οι τηλεφωνικές κλήσεις, ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων real-time βιντεοκλήσεων, ο υψηλός ρυθμός δεδομένων βίντεο και η non-real-time κίνηση δεδομένων.



Εικόνα 44: Σενάριο προσομοίωσης

Έπειτα χρειαζόμαστε να μοντελοποιήσουμε τους 4 τύπους υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της προσομοίωσης. Κάθε ένας από αυτούς τους τύπους περιγράφεται και ορίζεται από το ζητούμενο εύρος ζώνης και καθυστέρηση. Ο πρώτος τύπος υπηρεσίας ορίζεται με το χαμηλότερο εύρος ζώνης και τη χαμηλότερη καθυστέρηση, διότι περιλαμβάνει την

τηλεφωνική εξυπηρέτηση. Ο δεύτερος τύπος υπηρεσίας ορίζεται με το υψηλότερο μέσο ρυθμό δεδομένων και με την σχετικά μικρότερη καθυστέρηση και αυτός στοχεύει στην εξυπηρέτηση της τηλεδιάσκεψης. Η τρίτη υπηρεσία είναι το video streaming, το οποίο απαιτεί υψηλότερο εύρος ζώνης ανά σύνδεση, αλλά μπορεί να διαθέτει υψηλότερες καθυστερήσεις συγκριτικά με την τηλεφωνία. Ο τελευταίος τύπος υπηρεσίας, ο τέταρτος δηλαδή τύπος, μοντελοποιεί τις non-real time υπηρεσίες, όπως είναι το web και το email και το οποίο απαιτεί υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Όλοι οι τύποι υπηρεσιών, για το σκοπό της ανάλυσης της προσομοίωσης, ορίστηκαν με τα ακόλουθα ζεύγη τιμών (εύρος ζώνης, καθυστέρηση) αντιστοίχως:

[service_latency (ms), service_bandwidth (kbps)]

{[100,64];[200,128];[400,256];[800,512]}

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης κάθε χρήστης από τους N τυχαίους χρήστες αναθέτει τυχαία έναν από τους τέσσερις τύπους υπηρεσιών όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Για κάθε εξυπηρέτηση, η διάρκεια της σύνδεσης τροποποιείται σύμφωνα με την Poisson κατανομή. Ο μέσος χρόνος είναι συνολικά 30 δευτερόλεπτα, βασιζόμενα στις σχετικές μετρήσεις. Για το σκοπό της προσομοίωσης των Fuzzy logic controllers, που σχεδιάστηκαν για να ταιριάζει στο FL controller parallel, το σχήμα δίνεται στην εικόνα 42. Κατά τη διάρκεια της σχεδίασης αυτής ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO) χρησιμοποιείται με σκοπό την βέλτιστη χρήση του FLC, όπου οι συναρτήσεις που συμμετέχουν βελτιώνονται για τις μετρήσεις του σήματος και για τη συμπεριφορά του χρήστη. Υποθέτοντας ότι δύο RAT τεχνολογίες (3G δίκτυα και WLAN) αναλύονται στο σενάριο έχουμε δύο εξόδους από κάθε FL controller.

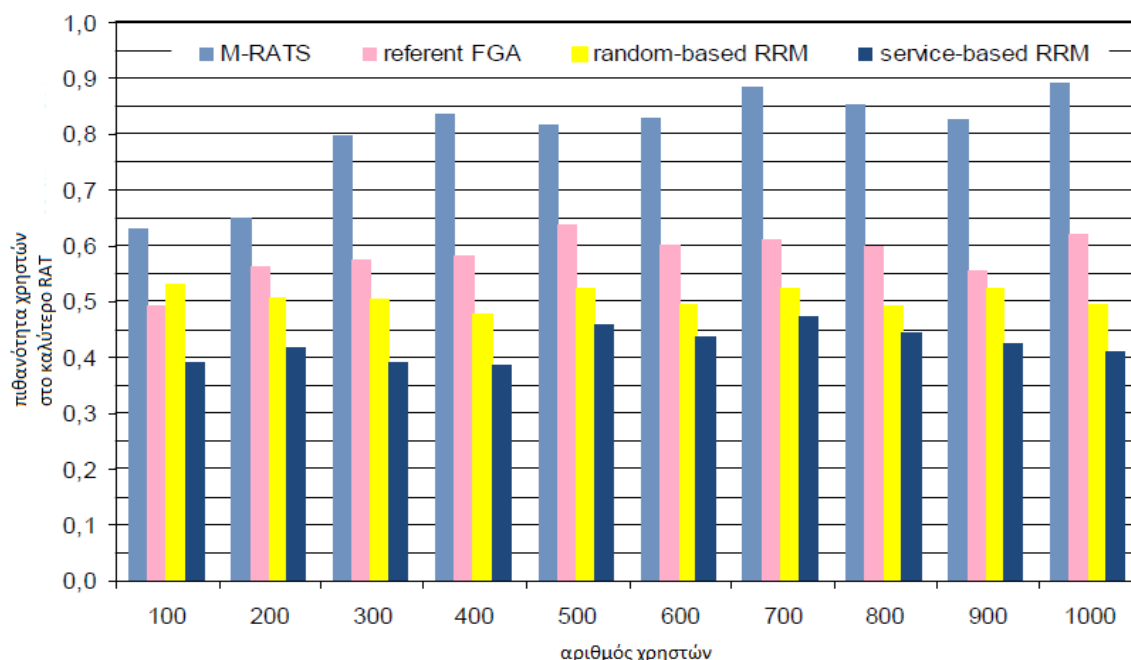
Στους προσομοιωτές μας, ο PSO αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια ομάδα από 50 χρήστες ενώ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων είναι ένα σύνολο από 50 επαναλήψεις. Η αξιολόγηση της συνάρτησης βασίζεται στο ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) ενώ συγκρίνουμε αυτό με τις αναμενόμενες τιμές. Οι αναμενόμενες τιμές ορίζονται ως οι τιμές που λαμβάνονται από τις ανθρώπινες αποφάσεις οι οποίες δημιουργούνται εάν η επιλογή του δικτύου πρόσβασης γίνεται από τους ανθρώπους για κάθε σημείο.

Χρησιμοποιήθηκαν λοιπόν 300 αφίξεις. Αυτό σημαίνει ότι στο σενάριο οι 300 αφίξεις φορτώνονται και τα αρχικά δεδομένα συλλέγονται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και αποθηκεύονται. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στον GA για την απόκτηση του πρώτου συνόλου από τα βάρη τα οποία θα φορτωθούν με την χρήση των πολλαπλών κριτηρίων. Έπειτα, σε κάθε επόμενο βήμα, τα δεδομένα από τον buffer ανανεώνονται από τις νέες μετρήσεις. Αυτό γίνεται μέσω του FIFO αλγορίθμου, τα πρώτα δηλαδή δεδομένα εξυπηρετούνται πρώτα και την

θέση τους την παίρνουν τα νέα δεδομένα στον buffer. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το μέγεθος του buffer παραμένει στις ίδιες 300 μετρήσεις δεδομένων, έτσι έχουμε ένα time window για τα δεδομένα του τερματικού, παίρνοντας διάφορα RATs (στην περίπτωση εδώ υπάρχουν δύο RATs, π.χ 3G και WLAN).

Ο Genetic Algorithm (GA) χρησιμοποιείται σαν μέθοδος βελτιστοποίησης για την κατάλληλη απόφαση για τις τιμές βαρών για τα διαφορετικά κριτήρια. Ο στόχος του αλγορίθμου αυτού είναι να βελτιστοποιεί τα βάρη σχετικά με τις τοποθεσίες των χρηστών και των απαιτήσεων του δικτύου. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, ο GA μπορεί να αναθέτει τους συντελεστές βαρύτητας για να παρέχει την καλύτερη ικανοποίηση του χρήστη. Στην συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 200 επαναλήψεις, οι οποίες βασίζονται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει βελτίωση μετά τα 100 διαδοχικά αποτελέσματα στην καλύτερη περίπτωση.

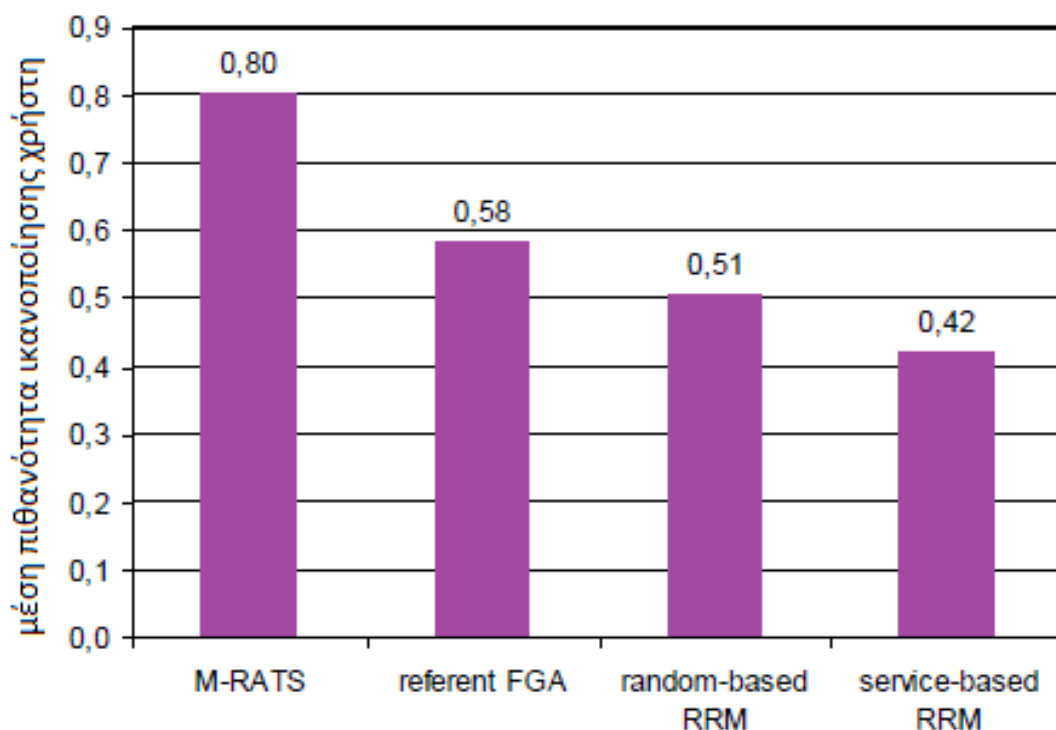
Σε αυτό το σημείο θα γίνει σύγκριση στο σχήμα των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν με όλους τους υπόλοιπους συναφείς αλγορίθμους. Τα χειρότερα αποτελέσματα κυριάρχησαν με το mobility based Radio Resource Management (RRM), ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα κυριάρχησαν με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, που περιλαμβάνει την βελτιστοποίηση του FL με το PSO και το GA για το Multi-Criteria Decision Making (MCDM).



Εικόνα 45: Πιθανότητα ικανοποιημένων χρηστών

Συμπεράσματα

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι ύστερα από την επανάληψη του ίδιου σεναρίου για διαφορετικό αριθμό χρηστών από 100 έως 1000 χρήστες τα αποτελέσματα δείχνουν την πιθανότητα με την οποία ο χρήστης συνδέεται με το RAT το οποίο παρέχει την βέλτιστη ικανοποίηση του χρήστη σύμφωνα με το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση για κάθε τύπο υπηρεσίας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος πετυχαίνει 40% βελτίωση συγκριτικά με τους αλγορίθμους που βασίζονται στην εξυπηρέτηση και με τους αλγορίθμους που βασίζονται στην τυχαιότητα. Επίσης, το διάγραμμα απεικονίζει τα καλύτερα αποτελέσματα από όλους τους άλλους αλγορίθμους ασύρματων δικτύων, είναι τέλος αξιοσημείωτο πως ο αριθμός των δειγμάτων των χρηστών είναι υψηλότερο.



Εικόνα 46: Μέση ικανοποίηση του χρήστη βάσει τον αριθμό των χρηστών

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική κινήθηκε στα πλαίσια των φάσεων σχεδιασμού και διαχείρισης των δικτύων σε συστήματα 5 γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε σενάριο προσομοίωσης το οποίο αφορά τους αλγορίθμους που συμβάλουν στην λήψη απόφασης σχετικά με την επιλογή του δικτύου πρόσβασης σε ένα ετερογενές περιβάλλον. Υπό το πρίσμα αυτό παρουσιάστηκαν αρχικά οι σημερινές και μελλοντικές τάσεις στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και στον τρόπο που ο κόσμος των ασύρματων επικοινωνιών θα καταφέρει την υλοποίησή του.

Η μελλοντική χρήση των 5G δικτύων αναμένεται να αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας των σύγχρονων δικτύων, καθώς παρουσιάζει σημαντικά οφέλη σε σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Θα βελτιώσει οποιαδήποτε συσκευή διατηρείται σε σύνδεση με τους servers από τους οποίους λαμβάνει δεδομένα. Αυτό θα έχει ως απόρροια την βελτίωση όλων των διαδικτυακών εφαρμογών, βιντεοκλήσεις, αναπαραγωγή βίντεο κατευθείαν από το διαδίκτυο. Άξιο ενδιαφέροντος είναι και η αύξηση της χωρητικότητας που θα λάβει χώρα σε σύγκριση με τα σημερινά δίκτυα. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό στην περίπτωση των πυκνοκατοικημένων περιοχών, αφού δεν είναι δυνατή η κάλυψη πολλών ταυτόχρονα χρηστών από τα σημερινά δίκτυα.

Συνεχίζοντας, θα πρέπει να αναφερθεί η βελτίωση της ασφάλειας που παρέχεται από τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μη μεταφορά της πραγματικής ταυτότητας του χρήστη μέσω του διαδικτύου. Ακόμα η κωδικοποίηση από άκρο σε άκρο (end-to-end) οδηγεί στην προστασία από επιθέσεις υποκλοπών σε όλες τις πιθανές δικτυακές διαδρομές.

Στο κομμάτι της ενέργειας, η χρήση δυναμικών hotspots οδηγεί στην κατανομή του υπολογιστικού φόρτου μόνο σε περιοχές όπου αυξάνεται η απαίτηση για χωρητικότητα του δικτύου. Από την άλλη πλευρά στον τομέα της μείωσης καθυστέρησης, χρησιμοποιούνται Δίκτυα Παράδοσης Περιεχομένου (CDN) τα οποία αντιγράφουν το περιεχόμενο από το διακομιστή προέλευσης (source server) σε διακομιστές προσωρινής αποθήκευσης, με σκοπό οι τελευταίοι να παραδώσουν το περιεχόμενο σε τελικούς χρήστες με αξιόπιστο τρόπο. Τα CDN μπορούν να κατανεμηθούν σε όλο το δίκτυο με σκοπό της εξοικονόμησης πόρων και τη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης.

Αναφορικά με τις αρχιτεκτονικές της 5G δικτύωσης έχουν μελετηθεί αυτή που συνδυάζει την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου (NFV), τη δικτύωση που είναι βασισμένη στο λογισμικό (SDN) και αυτή που βασίζεται στην mm-wave band.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, έγινε μία αναφορά σε έναν καινοτόμο αλγόριθμο για radio networks selection σε ετερογενές περιβάλλον. Έπειτα έγινε μία σύγκριση αυτού με τους υπόλοιπους αλγορίθμους, ενώ τέλος παρουσιάστηκαν τα συμπεράσματα που προκύπτουν με τη βοήθεια ενός γραφήματος.

Με γνώμονα τα παραπάνω, κρίνεται αναγκαία η συνέχιση των ερευνών που αφορούν την εξέλιξη των δικτύων 5^{ης} γενιάς, με έμφαση στους ακόλουθους στόχους:

- Ανάπτυξη νέων και καινοτόμων αλγορίθμων, οι οποίοι θα παρέχουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στα ετερογενή περιβάλλοντα
- Την περαιτέρω ενασχόληση με θέματα αξιοποίησης της χωρητικότητας αυτών των δικτύων
- Την ενσωμάτωση τεχνικών που θα καθοδηγούν με τον καλύτερο τρόπο τη συμπεριφορά ενός δικτύου.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να τονίσουμε ότι η ευρύτητα που χαρακτηρίζει τον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών είναι μεγάλη. Με βάση αυτό, μπορούμε να πούμε ότι ο τομέας των ασύρματων επικοινωνιών στο μέλλον θα αναπτυχθεί ακόμα περισσότερο δίνοντας καλύτερες αποδόσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

Ακρωνύμιο	Πλήρης Όρος
1G	Πρώτης γενιάς συστήματα
2G	Δεύτερης γενιάς συστήματα
3G	Τρίτης γενιάς συστήματα
4G	Τέταρτης γενιάς συστήματα
5G	Πέμπτης γενιάς συστήματα
3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
AI	Artificial Intelligence Algorithm
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CC	Component Carrier
CLI	Command Line Interface
CMD	Control Mobility Database
CAPEX	Capital Expenditure- Έξοδα Υποδομής
D-AMPS	Digital AMPS
DMM	Distributed Mobility Management
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
EPC	Evolved Packet Core
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FL	Fuzzy Logic Controllers
FIB	Forwarding Information Base
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunneling Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IPv4/IPv6	Internet Protocol Version 4/6
ITU	International Telecommunications Union
IP	Internet Protocol
ITU-R	International Telecommunications Union- Radiocommunication sector
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
IaaS	Infrastructure as a Service
LTE	Long Term Evolution
LMA	Local Mobility Anchor
MAC	Medium Access Control
MAG	Mobility Access Gateways

M-CDM	Multi-Criteria Decision Making
MMS	Multimedia Messaging Service
MIPv4/MIPv6	Mobile IPv4/Mobile IPv6
NO	Network Operator (Πάροχος Δικτύου)
NMT	Nordic Mobile Telephone
NAT	Network Address Translation
NFV	Network Function Virtualization
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure-Λειτουργικά Έξοδα
PDC	Personal Digital Communication
PCC	Primary Component Carrier
Pcell	Primary serving cell
PaaS	Platform as a Service
PMIPv6	Proxy Mobile IPv6
PBU	Proxy Binding Update
PBA	Proxy Binding Acknowledgement
PSO	Particle Swarm Optimization
RAT	Radio Access Technology- Τεχνολογία Ασύρματης Πρόσβασης
RRM	Radio Resource Management
SDR	Software Defined Radio
SCC	Secondary Component Carrier
Scell	Secondary serving cell
SDN	Software Defined Networking
SaaS	Software as a Service
SLA	Service Level Agreements
TDMA	Time Division Multiple Access
TSGs	Technical Specification Groups
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WLAN	Wireless Local Area Network
WGs	Working Groups
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
EETT	Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Cosmote, Πιλοτικό δίκτυο ευρυζωνικών υπηρεσιών νέας γενιάς (LTE) της Cosmote. Διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο:
<https://www.cosmote.gr/mobile/cosmoportal/page/T25/section/Network>
2. Χαρακτηριστικά των LTE δικτύων. Διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο:
<https://el.wikipedia.org/wiki/LTE>
3. <https://www.flickr.com/photos/samchurchill/6734177121>
4. Δηλές Γεώργιος, «Διαχείριση Παρεμβολών σε Ετερογενή LTE-A Συστήματα», Πάτρα, 2013
5. <http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/5380/Gkoutziouli.pdf?sequence=2>
6. http://www.slideshare.net/Nidhi_Arora/carrier-aggregation-in-lteadvanced-17259749
7. A. Azcorra, and U. Carlos. NetWorld 2020 ETP, Network and Service Virtualization White Paper, 2014.
8. Understanding 5 G : Perspectivew on future technological advancements in mobile, December 2014
9. Huawei White Papper. 5G: A Technology Vision, 2013. Διαθέσιμο στο διαδικτυακό τόπο:
<http://www.huawei.com/5gwhitepaper/>
10. N. M. Mosharaf Kabir Chowdhury, and Raouf Boutaba. Network Virtualization: State of the art and research challenges. IEEE Communications Magazine, August 2009.
11. 5G Vision. The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services.
12. Pate P. “NFV and SDN: what’s the difference?”SDxCentral;March 30, 2013
13. “Leveraging SDN for the 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges”, Akram Hakiri and Pascal Berthou, *France*
14. Open Networking Foundation: *Openflow-enabled mobile and wireless networks*, 2013
15. “Towards 1Gbps/UE in Cellular Systems: Understanding Ultra-Dense Small Cell Deployments”, David Lopez-Perez, Ming Ding, Holger Claussen and Amir H. Jafari, 12Mar 2015
16. https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking
17. OpenFlow Specifications Sheet v1.3.3 2013
18. OpenFlow switch specification, Version 1.5.0. OpenFlow Switch Specification (Protocol Version 0x06), December 19, 2014
19. “SDN for 5G”, Maede Zolanvari, October 2015
20. http://www.zte.com.cn/endata/magazine/zte technologies/2016/no1/articles/201601/t20160115_447456.html
21. https://www.researchgate.net/publication/233862183_Functional_Architecture_for_5_G_Mobile_Networks
22. <http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecoms/5g-mobile-cellular/technology-basics.php>

23. Fabio Giust, Luca Cominardi, Carlos J. Bernardos, "Distributed Mobility Management for future 5G networks: overview and analysis of existing approaches"
24. <http://www.investopedia.com/terms/c/cagr.asp>
25. <http://www.ict-ijoin.eu/>
26. http://eprints.networks.imdea.org/1003/1/thesis_FG.pdf
27. <https://thenetworkway.wordpress.com/2015/06/23/ipv6-prefix-delegation-what-is-it-and-how-does-it-going-to-help-openstack/>
28. https://en.wikipedia.org/wiki/Proxy_Mobile_IPv6
29. http://www.ict-ijoin.eu/wp-content/uploads/2015/03/4c_Bernardos_DMM_5G.pdf
30. <http://researchpedia.info/difference-between-4g-and-5g/>
31. <http://www.differencebetween.com/difference-between-4g-and-5g-networks/>
32. http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_314849
33. <http://www.ns2project.com/5g-network-simulator-projects/>
34. Aleksandar Tudzarov, "Protocols and Algorithms for the Next Generation 5G Mobile Systems", Macrothink Institute, April 20, 2011
35. https://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law