



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βελτιστοποίηση μετάδοσης video πάνω από
ασύρματα δίκτυα 5G**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗ ΣΤΑΥΡΟΥ

(ΑΕΜ: 2698)

Επιβλέπων : ΒΕΡΓΑΔΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

Καστοριά, Ιανουάριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βελτιστοποίηση μετάδοσης video πάνω από
ασύρματα δίκτυα 5G**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗ ΣΤΑΥΡΟΥ

(ΑΕΜ: 2698)

Επιβλέπων : ΒΕΡΓΑΔΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Ον/μο Μέλους
Ιδιότητα Μέλους

.....
Ον/μο Μέλους
Ιδιότητα Μέλους

.....
Ον/μο Μέλους
Ιδιότητα Μέλους

Καστοριά, Ιανουάριος 2024

Copyright © 2024 – ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

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

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

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Βέργαδο Δημήτριο για την ανάθεση αυτής της πτυχιακής εργασίας, την καθοδήγηση και την στήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας όπως και την άμεση απόκριση του ανά πάσα ώρα και στιγμή που χρειάστηκα την συνδρομή του.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιαστεί η συνεισφορά των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς στην καθημερινότητα των ανθρώπων, καθώς υπόσχονται απίστευτα υψηλές ταχύτητες που θα αλλάξουν οριστικά και αμετάκλητα τις ζωές τους προς το καλύτερο. Επίσης, έμφαση δίνεται στη βελτιστοποίηση των προσφερόμενων υπηρεσιών που παρέχουν τα δίκτυα 5G και μελετάται η απόδοση των πρωτοκόλλων μετάδοσης πολυμεσικού περιεχομένου βίντεο μέσω δικτύων 5G.

Στα πλαίσια της εργασίας γίνεται γίνει ιστορική αναδρομή όλων των προηγούμενων τεχνολογιών ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, έτσι ώστε να γίνει κατανοητό σε τι πλεονεκτεί η καινούργια αυτή τεχνολογική γενιά δικτύων 5G σε σχέση με τις παλαιότερες. Προς ενίσχυση της συγκριτικής μελέτης μεταξύ των παλαιότερων τεχνολογικών γενεών σε σχέση με τη σύγχρονη γενιά 5G, η εργασία περιλαμβάνει και πειραματικό μέρος με μελέτη της απόδοσης αλγορίθμων DASH μετάδοσης πολυμεσικού περιεχομένου βίντεο μέσω δικτύων 5G.

Λέξεις Κλειδιά: Cellular networks, 3G, 4G, LTE, 5G, EPC, RAN, MIMO, video, mpeg, DASH, FDASH, QoE, ns3

Abstract

The main target of this thesis is to present the contribution of 5th generation wireless mobile telecommunication systems to people's everyday life, as they promise incredibly high speeds that will change their lives for the better. Emphasis is also placed on optimizing the services offered by 5G networks and studying the performance of protocols for the transmission of multimedia video content over 5G networks.

In the context of the paper, a historical review of all previous mobile wireless telecommunication network technologies is made in order to understand the advantages of this new generation of 5G networks compared to the older ones. To enhance the comparative study between the older technological generations with respect to the modern 5G generation, the paper includes an experimental part by studying the performance of DASH algorithms for transmitting multimedia video content over 5G networks.

Key Words: *Cellular networks, 3G, 4G, LTE, 5G, EPC, RAN, MIMO, video, mpeg, DASH, FDASH, QoE, ns3*

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΓΕΝΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ	2
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	2
1.1.1 Τεχνολογία 1 ^{ης} Γενιάς (1G).....	3
1.1.2 Τεχνολογία 2 ^{ης} Γενιάς (2G).....	3
1.1.3 Τεχνολογία 2,5 ^{ης} Γενιάς και 2,75 ^{ης} Γενιάς (2,5G & 2,75G).....	3
1.1.4 Τεχνολογία 3 ^{ης} Γενιάς (3G).....	4
1.1.5 Τεχνολογία 4 ^{ης} Γενιάς (4G).....	4
1.1.5.1 Δίκτυο Πρόσβασης LTE.....	5
1.1.6 Τεχνολογία 5ης Γενιάς (5G).....	7
1.1.6.1 Χαρακτηριστικά του 5G.....	8
1.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ 5G (MODULES)	8
2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G	11
2.1 ΔΙΚΤΥΟ ΚΟΡΜΟΥ 5G	11
2.1.1 Αρχιτεκτονικές Εικονικοποίησης Δικτύου	13
2.2 ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ 5G RAN	14
2.2.1 Massive MIMO	15
2.2.2 Μικροκυματική ζώνη (mm wave).....	16
2.2.3 Network MIMO – Cooperative MIMO	16
3. 5G ΚΑΙ INTERNET OF THINGS (IOT)	19
3.1 M2M (MACHINE TO MACHINE).....	19
3.2 D2D (DEVICE TO DEVICE).....	20
3.3 V2V (VEHICLE 2 VEHICLE)	22
4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΒΙΝΤΕΟ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 5G	24
4.1 ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΡΟΗΣ ΓΙΑ 5G.....	24
4.1.1 VR 360° Ροή βίντεο σε 5G	24
4.1.2 Περιεχόμενο πολυμέσων που δημιουργείται από τον χρήστη	26
4.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΔΟΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΒΙΝΤΕΟ ΜΕΣΩ 5G ΔΙΚΤΥΩΝ	26
4.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΡΟΗ ΒΙΝΤΕΟ ΜΕΣΩ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G.....	28
4.3.1 Πρότυπα κωδικοποίησης MPEG	28
4.3.2 Πρότυπα Κωδικοποίησης AOMEDIA	29
4.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ QoE ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΩΝ ΓΙΑ ΡΟΗ ΒΙΝΤΕΟ ΜΕΣΩ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G	30
4.5 DYNAMIC ADAPTIVE STREAMING OVER HTTP (DASH)	31
4.5.1 Αλγόριθμος Προσαρμογής F-DASH	32
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	34
5.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	34
5.2 ΧΑΜΗΛΗ ΛΑΘΑΝΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (LOW LATENCY)	40
5.3 ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (MS).....	41
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Ιστορική Αναδρομή όλων των δικτύων	2
Εικόνα 2. 3g technology και η συμβολή της στα παλαιότερα χρόνια	4
Εικόνα 3. 4g Τεχνολογία και η εξέλιξη της	5
Εικόνα 4. What is Evolved Packet Core (EPC)?.....	6
Εικόνα 5. Τι είναι το 5G;	7
Εικόνα 6. Διάφορα modules στην καθημερινότητα.....	9
Εικόνα 7. Management Control and Data Planes	13
Εικόνα 8. Δίκτυο Πρόσβασης RAN	14
Εικόνα 9. Massive MIMO Τεχνολογία	15
Εικόνα 10. Όσα πρέπει να γνωρίζεις σχετικά με το MIMO	17
Εικόνα 11. Machine to Machine Δίκτυα και η σημασιολογία τους.....	19
Εικόνα 12. Η συμβολή των επικοινωνιών D2D στο 5G.....	21
Εικόνα 13. Vehicle To Vehicle Δίκτυο	22
Εικόνα 14. Σύγκριση Πρωτοκόλλων μετάδοσης ροής βίντεο με το MPEG-DASH	31
Εικόνα 15. <code>dash-example command</code>	36
Εικόνα 16. <code>dash-wifi command</code>	37
Εικόνα 17. <code>lena-dash command</code>	39
Εικόνα 18. <code>link-example command</code>	40
Εικόνα 15. Πόσο σημαντική είναι το Latency στην τωρινή τεχνολογική χρήση	41

Εισαγωγή

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται η εξέλιξη των τεχνολογικών γενεών δικτύων κινητής τηλεφωνίας από την πρώτη γενιά 1G μέχρι και την πιο σύγχρονη γενιά δικτύων 5G. Εστιάζουμε στη βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου 5G και στην αρχιτεκτονική του, όπως επίσης και στις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Αναφέρονται διάφορα μοντέλα επικοινωνίας 5G μεταξύ συσκευών, μηχανών και οχημάτων. Επίσης, έμφαση δίνεται στη βελτιστοποίηση των προσφερόμενων υπηρεσιών που παρέχουν τα δίκτυα 5G και μελετάται η απόδοση των πρωτοκόλλων μετάδοσης πολυμεσικού περιεχομένου βίντεο μέσω δικτύων 5G. Προς ενίσχυση της συγκριτικής μελέτης μεταξύ των παλαιότερων τεχνολογικών γενεών σε σχέση με τη σύγχρονη γενιά 5G, η εργασία περιλαμβάνει και πειραματικό μέρος με μελέτη της απόδοσης αλγορίθμων DASH μετάδοσης πολυμεσικού περιεχομένου βίντεο μέσω δικτύων 5G.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των τεχνολογικών γενεών δικτύων κινητής τηλεφωνίας από την πρώτη γενιά 1G μέχρι και την πιο σύγχρονη γενιά δικτύων 5G.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός 5G δικτύου και τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών Massive MIMO, Microwave (mm wave) και Cooperative MIMO τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονες κατευθύνσεις της αξιοποίησης της υποδομής των δικτύων 5G και του Internet of Things (IoT), όπως οι τρόποι επικοινωνίας M2M, D2D, V2V.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η βελτιστοποιημένη μετάδοση περιεχομένου βίντεο μέσω δικτύων 5G με τη χρήση προτύπων κωδικοποίησης βίντεο και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της ποιότητας εμπειρίας χρήστη (QoE). Επίσης, παρουσιάζεται το πρότυπο υπηρεσίας συνεχούς ροής βίντεο DASH και τα οφέλη χρήσης του, με ιδιαίτερη έμφαση στον αλγόριθμο F-DASH. Τονίζεται η προσφορά του F-DASH στην επίτευξη καλύτερων συνθηκών βελτιστοποιημένης μετάδοσης περιεχομένου βίντεο που προσφέρει στον χρήστη δικτύου 5G.

Τέλος, στο πειραματικό μέρος παρουσιάζονται τα βήματα υλοποίησης των δοκιμών παραδειγμάτων εκτέλεσης του προτύπου υπηρεσίας συνεχούς ροής βίντεο DASH.

1. Γενιές Ασύρματων Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ξεκινώντας από το πρώτο εμπορικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στην Ιαπωνία το 1979 όπου χρησιμοποιήθηκε το πρώτο κινητό τηλέφωνο με τεχνολογία 1G και προχωρώντας στο 1991 όπου εμφανίζεται το κυψελωτό δίκτυο 2ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας φθάνουμε στο 1998. Το 1998 έφερε γρηγορότερες ταχύτητες στις μεταφορές δεδομένων ενισχύοντας τις λειτουργίες των κινητών τηλεφώνων και τον βίντεο ενώ ταυτόχρονα η 3G τεχνολογία άνοιξε τον δρόμο για την άνοδο των smartphones και τις ευρείες οθόνες τους. Σημειωτέων ότι η εισαγωγή του Iphone το 2007 ήρθε σε μια εποχή όπου η 3G τεχνολογία κέρδιζε όλο και περισσότερους αποδέκτες.



Εικόνα 1. Ιστορική Αναδρομή όλων των δικτύων

Πηγή: <https://www.tanea.gr/2020/12/17/opinions/to-5G-mpainei-sti-zoi-mas> [18]

Η εξέλιξη των δικτύων από τα κυψελωτά δίκτυα που χρονολογούνται στις αρχές του 1940 φθάνει έως σήμερα όπου τα δίκτυα παρέχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένα στο μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της γης δίνοντας πρόσβαση σε οποιονδήποτε χρήστη σε οποιαδήποτε στιγμή. Παρόλο που γίνονταν πολλές συζητήσεις περί κινητής τηλεφωνίας με σύνδεση δικτύων στις αρχές του 1920 ωστόσο η επικοινωνία γινόταν με πολύ αργούς ρυθμούς και μόνο επί τα τελευταία 20 έτη γίνεται με γρήγορους ρυθμούς. Γι' αυτό και ο διαχωρισμός της πορείας ανάπτυξης των δικτύων έγινε σε γενιές (generations) G.

Οι δύο πρώτες γενιές (1G, 2G) αποτελούν τεχνολογία κυψελωτών και ευρυζωνικών δικτύων όπου η απόσταση κάλυψης επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών είναι μικρή όπως και ο ρυθμός μετάδοσης και η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι χαμηλά. Στο πέρασμα των χρόνων και με την χρήση 3G και 4G δικτύων όλα αυτά αναβαθμίζονται προσφέροντας υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, καλύπτοντας μεγαλύτερη γεωγραφική απόσταση μεταξύ των χρηστών και υψηλό ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.

Με την εισαγωγή της 5ης γενιάς τεχνολογίας δικτύων στις προηγούμενες παροχές προστίθενται και το Internet of Things (IoT). Παρόλη την βελτίωση που παρέχουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς όσο αφορά την τεράστια γεωγραφική κάλυψη σήματος σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου, στην ταχύτητα και στις διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS), τα δίκτυα αυτής της γενιάς είναι απαραίτητο να παρέχουν πολλαπλάσια απόδοση σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, αλλά με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

1.1.1 Τεχνολογία 1^{ης} Γενιάς (1G)

Η τεχνολογία 1G βασίζεται στο αναλογικό σύστημα και προσφέρει στην χρήση ταχύτητας έως 2,4kbps. Πρόκειται για αναλογικές κυψελοειδείς τεχνολογίες όπου οι μεταδόσεις ήχου είναι αναλογικές χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας (AMPS), Σκανδιναβικό κινητό τηλέφωνο (NMT), σύστημα επικοινωνίας ολικής πρόσβασης (TACS) και δυνατότητες φωνητικής κλήσης χρήστη. Δυστυχώς τα προβλήματα κακής ποιότητας ήχου, μικρής κάλυψης περιοχών, μικρής ταχύτητας και το γεγονός ότι ο οποιοσδήποτε μπορούσε να ακούσει την κλήση λόγω μη ύπαρξης κρυπτογράφησης ήταν μερικά από τα προβλήματα που κατέστησαν απαραίτητη την εξέλιξη 1G τεχνολογίας.

1.1.2 Τεχνολογία 2^{ης} Γενιάς (2G)

Η μετάβαση από την 1G σε 2G τεχνολογία όπου οι αναλογικές μεταδόσεις ήχου έγιναν ψηφιακές και πραγματοποιήθηκε με την χρήση 2G δικτύων ήταν πλέον γεγονός. Οι Βελτιώσεις στο Δίκτυο 1G περιλάμβαναν την εισαγωγή κρυπτογράφησης, καλύτερης ποιότητας ήχου και την αύξηση την ταχύτητας λήψης δεδομένων. Στον χώρο κινητής τηλεφωνίας παρατηρείται η μεταφορά δεδομένων από την μια τηλεφωνική συσκευή στην άλλη αποτελώντας έτσι τον προάγγελο των σημερινών smartphones, ενώ τα γραπτά μηνύματα αποτελούν σημαντική εξέλιξη στην κοινωνία. Μάλιστα είναι άξιο αναφοράς το γεγονός ότι το 2G δίκτυο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

1.1.3 Τεχνολογία 2,5^{ης} Γενιάς και 2,75^{ης} Γενιάς (2,5G & 2,75G)

Η τεχνολογία 2,5G είναι η μη επίσημη τεχνολογία που δημιουργήθηκε μόνο για σκοπούς marketing και βρίσκεται ανάμεσα στις τεχνολογίες 2G και 3G. Πρόκειται για μία ασύρματη τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας και συνήθως περιγράφει ένα κυψελοειδές σύστημα 2G σε συνδυασμό με Γενικές Υπηρεσίες ραδιοφώνου πακέτων (GPRS) οι οποίες έχουν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 144kbps ή υψηλότερες και ταξινομούνται ως 2,5G λόγω χαμηλότερων ταχυτήτων δικτύου από τις υπηρεσίες 3G. Οι ρυθμοί δεδομένων βελτιώθηκαν με την εισαγωγή του EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) το οποίο εκκινεί μεταξύ GPRS και 3G και αναφέρεται ως 2,75G τεχνολογία. Πρόκειται για μια βελτίωση του GPRS για την παροχή ταχύτερου ρυθμού δεδομένων τόσο στην μεταγωγή κυκλώματος όσο και στην μεταγωγή πακέτων προσφέροντας τριπλάσια αύξηση στον ρυθμό μετάδοσης bit οδηγώντας σε μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων της τάξης 472kbps. Θα μπορούσαμε μάλιστα να χαρακτηρίσουμε το EDGE ως ένα σκαλοπάτι για τις ταχύτερες τεχνολογίες 3G και 4G.

1.1.4 Τεχνολογία 3^{ης} Γενιάς (3G)

Χρειάστηκε χρόνος για να αποκτήσει η 3G τεχνολογία παγκόσμια υιοθεσία λόγω του γεγονότος ότι κάποια 3G δίκτυα δεν χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα με την 2G τεχνολογία. Έτσι οι ασύρματοι χειριστές έπρεπε να εξασφαλίσουν νέες συχνότητες και να εγκαταστήσουν νέους χώρους μετάδοσης δεδομένων.



Εικόνα 2. 3g technology και η συμβολή της στα παλαιότερα χρόνια

Πηγή: <https://www.infocom.gr/2021/04/15/3g-dinei-stadiaka-thesi-tou-sto-5G/54128/> [4]

Οι βελτιωμένοι ρυθμοί δεδομένων των 3G συστημάτων έδωσαν ζωή σε εφαρμογές όπως κινητή τηλεόραση, βίντεο κατά παραγγελία, τηλεϊατρική, τηλεδιάσκεψη κ.α. Για παράδειγμα με το 3G μπορούσες να κάνεις βιντεοκλήσεις όπως και να έχεις δεδομένα για να σερφάρεις στο διαδίκτυο.

1.1.5 Τεχνολογία 4^{ης} Γενιάς (4G)

Η νέα επανάσταση στην τεχνολογία που προσφέρει νέες εμπειρίες στην επανάσταση του διαδικτύου και των επικοινωνιακών συστημάτων από το 2012 είναι η 4G

τεχνολογία δικτύου. Η κύρια διαφορά της με τη 3G τεχνολογία είναι ότι δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να έχει πρόσβαση στο INTERNET είτε με το κινητό τηλέφωνο του είτε με τον υπολογιστή του ακόμα και αν δεν είναι στο WIFI σημείο, αλλά σε απόσταση 35 χιλιομέτρων από το WI-MAX σημείο, ενώ οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται γίνονται ακόμα μεγαλύτερες. Αυτό γίνεται εξαιτίας των WI-MAX και LTE (Long Term Evolution) τεχνολογιών στις οποίες υποστηρίζεται η 4G τεχνολογία.



Εικόνα 3. 4g Τεχνολογία και η εξέλιξη της

Πηγή: <https://www.fusionconnect.com/blog/what-is-4g-network> [5]

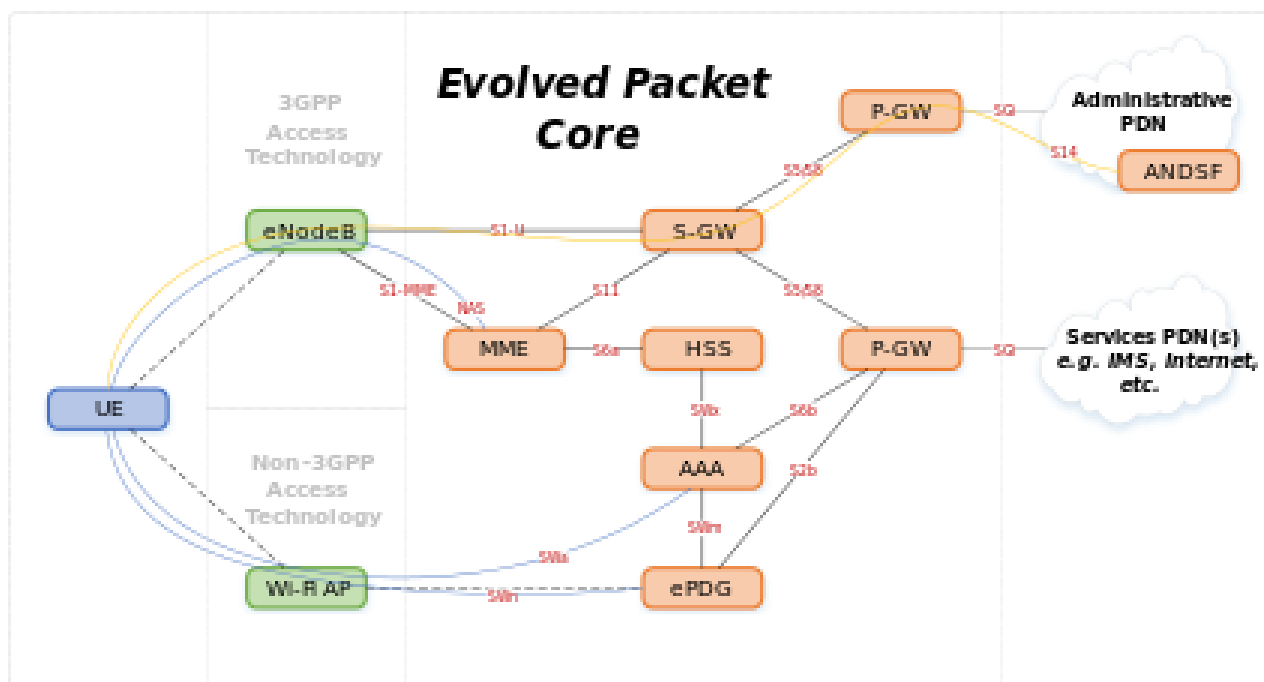
Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι στον πραγματικό κόσμο οι ταχύτητες δεν αναμένεται να είναι τόσο μεγάλες, καθώς στις επαρχιακές πόλεις οι κεραιές απέχουν μόλις 10 χιλιόμετρα μεταξύ τους. Επιπλέον οι LTE-advanced τεχνολογία χρησιμοποιώντας MIMO (Multiple Input Multiple Output) και OFDM (Orthogonal Frequency-division multiplexing) προσφέρει αυξημένες ταχύτητες για το κατέβασμα και ανέβασμα αρχείων όπως επίσης και 3 φορές μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα φάσματος σε σχέση με το LTE που χρησιμοποιείται σήμερα. Συγκρίνοντας έτσι ένα 4G σύστημα με τις προηγούμενες τεχνολογίες γίνεται κατανοητό ότι η επικοινωνία τεχνολογίας που παρέχεται στον χρήστη δεν στηρίζεται σε κυκλώματα μεταγωγής, αλλά στο IP INTERNET PROTOCOL ενώ ταυτόχρονα η ραδιοφωνική τεχνολογία εξάπλωσης φάσματος των 3G συστημάτων εγκαταλείπεται δίνοντας την θέση της σε άλλα συστήματα εξισορρόπησης τομέα συχνοτήτων FDE που προσδίδουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

1.1.5.1 Δίκτυο Πρόσβασης LTE

Το LTE (3GTP Long Term Evolution) δίκτυο που αναφέρεται και ως σύστημα 4ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας αποτελεί πρότυπο για την ασύρματη τηλεφωνία, καθώς έχει ως στόχο να αυξήσει την χωρητικότητα και την ταχύτητα των υφιστάμενων δικτύων. Είναι σχεδιασμένο να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 300Mbps (στην καθοδική ζεύξη) και των 75Mbps (στην καθοδική ζεύξη), ενώ το εύρος ζώνης του

σήματος του είναι μεταβλητό. Βασίζεται στην αρχιτεκτονική μιας απλοποιημένης μορφής IP για χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα όπως και την επίτευξη μετάβασης από τα ενοποιημένα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων (3G UMTS) που χρησιμοποιούνται σήμερα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τηλεφωνικές κλήσεις που πραγματοποιούνται με το LTE πρότυπό ορισμένες φορές για να καταστούν ομαλά και άμεσα οδηγούν τους παρόχους στην προσωρινή λύση της χρήσης των δικτύων 2G και 3G για όσο διαρκεί η κλήση.

Το Evolved Packet Core (EPC) είναι ένα πλαίσιο για την παροχή συγκλίνουσας φωνής και δεδομένων σε ένα δίκτυο 4G Long-Term Evolution (LTE). Οι αρχιτεκτονικές δικτύων 2G και 3G επεξεργάζονται και αλλάζουν φωνή και δεδομένα μέσω δύο χωριστών υποτομέων: μεταγωγής κυκλώματος (CS) για φωνή και μεταγωγής πακέτων (PS) για δεδομένα. Το Evolved Packet Core ενοποιεί φωνή και δεδομένα σε μια αρχιτεκτονική υπηρεσίας Πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP) και η φωνή αντιμετωπίζεται ως απλώς μια άλλη εφαρμογή IP. Αυτό επιτρέπει στους χειριστές να αναπτύξουν και να λειτουργήσουν ένα δίκτυο πακέτων για 2G, 3G, WLAN, WiMax, LTE και σταθερή πρόσβαση (Ethernet, DSL, καλώδιο και οπτική ίνα).



Εικόνα 4. What is Evolved Packet Core (EPC)?

Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/System_Architecture_Evolution [6]

Τα βασικά στοιχεία του EPC είναι:

- Mobility Management Entity (MME) - διαχειρίζεται καταστάσεις περιόδου λειτουργίας και επαληθεύει και παρακολουθεί έναν χρήστη σε όλο το δίκτυο.
- Πύλη εξυπηρέτησης (S-gateway) - δρομολογεί πακέτα δεδομένων μέσω του δικτύου πρόσβασης.

- Packet Data Node Gateway (PGW) - λειτουργεί ως η διεπαφή μεταξύ του δικτύου LTE και άλλων δικτύων δεδομένων πακέτων. διαχειρίζεται την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) και παρέχει βαθιά επιθεώρηση πακέτων (DPI).
- Λειτουργία κανόνων πολιτικής και χρέωσης (PCRF) - υποστηρίζει ανίχνευση ροής δεδομένων υπηρεσίας, επιβολή πολιτικής και χρέωση βάσει ροής.

1.1.6 Τεχνολογία 5ης Γενιάς (5G)

Η 5G τεχνολογία προβλέπεται να αλλάξει την καθημερινότητα των χρηστών φέρνοντας μια νέα εποχή στον κόσμο του διαδικτύου υποστηρίζοντας απίστευτα υψηλές ταχύτητες προσφέροντας έτσι μεγάλες αλλαγές στις ζωές των χρηστών προς το καλύτερο.



Εικόνα 5. Τι είναι το 5G;

Πηγή: <https://texnikos-ipologiston.gr/τι-είναι-το-5G-όλα-όσα-θέλετε-να-ξέρετε-γι/> [6]

Πρόκειται για μια τεχνολογία που σχεδιάζεται για την σύνδεση δεκάδων δισεκατομμυρίων συσκευών που θα εξαρτώνται από το διαδίκτυο, ενώ ταυτόχρονα θα επιτρέπει τους χρήστες να συνδέονται με συσκευές σε ταχύτητες κατά πολύ υψηλότερες από αυτές τις 4G τεχνολογίας. Ένα δίκτυο 5G περιλαμβάνει ένα κράμα διαφορετικών συχνοτήτων, τεχνολογιών και προσεγγίσεων απαιτώντας δραστικές αλλαγές στον υπάρχοντα εξοπλισμό. Ουσιαστικά αναφερόμαστε σε ένα πληροφοριακό πλέγμα που θα αλληλοεπιδρά και θα συνδέει αυτοκίνητα δίχως οδηγό, μεταφορικά drones, robot, θα προσφέρει καινοτόμες χειρουργικές επεμβάσεις εξασφαλίζοντας ασφαλέστερη μετακίνηση και πιο άμεση επικοινωνία. Επιπλέον, θα δίνετε η δυνατότητα στον χρήστη να κατεβάζει ταινίες σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το βίντεο θα υποβαθμίζεται ούτε στο θέμα ανάλυσης ούτε στο θέμα ποιότητας και χωρίς καθυστερήσεις. Μάλιστα εκτιμάται ότι στο 2025 1 στις 3 συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας θα χρησιμοποιεί δίκτυα 5G όπως και το 31% της Ευρώπης θα έχει την δυνατότητα σύνδεσης με αυτά τα δίκτυα.

1.1.6.1 Χαρακτηριστικά του 5G

Η ιστορική αναδρομή μας έδωσε μια εικόνα της εξέλιξης των τεχνολογιών δικτύων από το δίκτυο της 1ης γενιάς (1G) μέχρι το δίκτυο της 5ης γενιάς (5G). Μέσα στο πέρασμα των χρόνων η ανάπτυξη της ανθρωπότητας στον τομέα της επικοινωνίας και της διαμόρφωσης της εικόνας – σε περίπτωση βίντεο – ήταν ραγδαία προσφέροντας τεράστιες δυνατότητες σε όλους αυτούς τους τομείς.

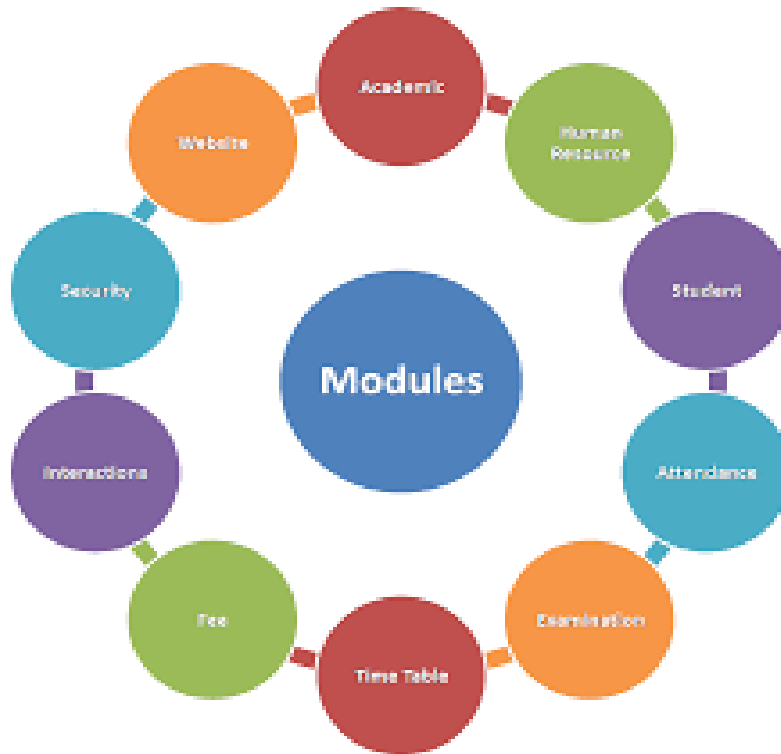
Έτσι αναφερόμενοι στα 5G δίκτυα μιλάμε για την προσφορά ασύλληπτων δυνατοτήτων όσον αφορά την απόδοση πολύ υψηλότερων ταχυτήτων δικτύων σχεδόν πάνω από 1Gbps. Έπειτα προσφέρουν εξαιρετικά χαμηλό χρόνο απόκρισης (latency) καθώς και αυξημένη χωρητικότητα δικτύου δίνοντας δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν υψηλότερες ταχύτητες και αξιοπιστία δικτύου. Σχετικά με την παροχή υπηρεσιών φωνής και την αξιοποίηση δυνατοτήτων VoLTE προσφέρεται στον χρήστη η ευχέρεια να μπορεί να κάνει και να δέχεται κλήσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα ταυτόχρονα χωρίς διακοπή στην ταχύτητα download. Επιπλέον οι φωνητικές κλήσεις έχουν καλύτερη ποιότητα και καθαρότητα ενώ οι video calls παρέχονται χωρίς καθυστερήσεις ή rixelation. Η υποστήριξη σύνδεσης εκατομμύριων “έξυπνων” συσκευών στο διαδίκτυο (IoT) καθώς και η δημιουργία μεγάλων δικτύων είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G δικτύου. Η προώθηση του IOT και η επέκταση των Gigabit δικτύων υποστηρίζουν δυναμικά σημαντικούς κλάδους των πόλεων όπως βιομηχανία, γεωργία και άλλες υπηρεσίες. Ταυτόχρονα εξασφαλίζεται ευκολότερη πρόσβαση στους τομείς εκπαίδευσης και υγείας προσφέροντας καλύτερη ζωή σε όλους ,ενώ ταυτόχρονα γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας καθώς το δίκτυο 5G είναι πιο αποδοτικό από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με το 4g. Έτσι με βάση τα χαρακτηριστικά της εκπομπής του 5G και των νέων δυνατοτήτων της μιλάμε ουσιαστικά για μία τεχνολογική επανάσταση που άλλαξε ριζικά τον επικοινωνιακό χάρτη σε όλες τις χώρες του πλανήτη με τελική κατάκτηση την ενοποίηση των δικτύων και προσφορά χρήσης videoondemand, ασύρματων καμερών, συστημάτων ανίχνευσης και εποπτείας.

1.2 Μοντέλα επικοινωνίας 5G (modules)

Τα μοντέλα επικοινωνίας 5G όπως προδίδει και το όνομα τους είναι μοντέλα που χρησιμοποιούν 5G τεχνολογία προσφέροντας ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων από τα 4G. Αναπτύσσονται εδώ και ένα χρόνο από το 2022 κυρίως σε μεγαλουπόλεις με μειονέκτημα τους την αποκλειστική λειτουργία τους μόνο με 5G δίκτυα προσδίδοντας περιορισμένη κάλυψη. Όμως η τεχνολογία τους είναι προηγμένη με αναβαθμισμένα δίκτυα και τερματικά που προσφέρουν νέες εμπειρίες στον κόσμο του Διαδικτύου. Ταυτόχρονα οι πάροχοι υπηρεσιών από την πλευρά τους ευνοούνται από την προηγμένη τεχνολογία προσφέροντας υπηρεσίες μεγαλύτερης αξίας.

Επιπλέον οι μονάδες 5G συνδέουν έξυπνες συσκευές Iot όπως κινητά τηλέφωνα με εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και με εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο

εξυπηρετώντας αφάνταστα εφαρμογές όπως η απομακρυσμένη χειρουργική η ρομποτική και τα παιχνίδια εικονικής πραγματικότητας. Η αποτελεσματικότητα και η καινοτομία τους προσφέρεται στα έξυπνα εργοστάσια δίνοντας τους την δυνατότητα εγκατάστασης καμερών υψηλής ανάλυσης και βίντεο ώστε να παρακολουθείτε η επιχείρηση ανά πάσα στιγμή ενώ η χρήση 5G μοντέλων αυξάνει τις ταχύτητες λήψης και προσφέρει άμεση ανάκτηση δεδομένων.



Εικόνα 6. Διάφορα modules στην καθημερινότητα

Πηγή: https://www.pngitem.com/middle/hmTmxib_stakeholders-of-a-project-hd-png-download/ [10]

Τον Μάρτιο του 2019, η Παγκόσμια Ένωση Προμηθευτών Κινητής Τηλεφωνίας κυκλοφόρησε τις πρώτες παγκόσμιες κυκλοφορίες συσκευών 5G για παρακολούθηση βάσεων δεδομένων του κλάδου. Σε αυτό, η GSA εντόπισε 23 προμηθευτές που έχουν επιβεβαιώσει τη διαθεσιμότητα των επερχόμενων συσκευών 5G με 33 διαφορετικές συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών παραλλαγών. Ανακοινώθηκαν επτά παράγοντες μορφής συσκευής 5G: (τηλέφωνα συσκευές), hotspots, εξοπλισμός εσωτερικού και εξωτερικού χώρου πελατών, μονάδες, Snap-on dongles και προσαρμογείς, και ακροδέκτες USB. Μέχρι τον Οκτώβριο του 2019, ο αριθμός των ανακοινωθέντων συσκευών 5G είχε αυξηθεί σε 129, σε 15 παράγοντες μορφής, από 56 προμηθευτές.

Τα δίκτυα 5G αποτελούν λοιπόν την επόμενη τεχνολογία σύνδεσης ηλεκτρονικών συσκευών στο διαδίκτυο, πιο καλές και πιο αξιόπιστες συνδέσεις. Οι τελευταίες έρευνες υποστηρίζουν ότι το 5G δίκτυο θα προσφέρει πιο γρήγορες συνδέσεις από τις τρέχουσες με μέσες ταχύτητες λήψης (περίπου 1GBps). Το 5G δημιουργήθηκε για να

εξυπηρετεί τον κόσμο του μέλλοντος όπου δισεκατομμύρια συσκευές θα απαιτούν συνεχή σύνδεση τους στο διαδίκτυο.

Καταλυτική χρονιά-στόχος των περισσότερων παρόχων, για την εφαρμογή της τεχνολογίας 5G θεωρείται το 2020. Στις ΗΠΑ, Ευρώπη και ανατολική Ασία, οι τεχνικές διαδικασίες κινούνται με γοργούς ρυθμούς, γεγονός που έχει επηρεάσει και την ιδιαίτερη προσοχή της Ελλάδας στο 5G. Έτσι και για τη χώρα μας, σύμφωνα με τον σχεδιασμό της Γενικής Γραμματείας Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων του υπουργείου Ψηφιακής Διακυβέρνησης, η ημερομηνία κλειδί βρίσκεται κάπου στο τελευταίο τρίμηνο του 2020 με τη δημοπράτηση φάσματος συχνοτήτων για το 5G στα 3,5 GHz.

Μέσα στο α' εξάμηνο του 2019, η Cosmote υλοποίησε το πρώτο δοκιμαστικό δίκτυο 5G στην Ελλάδα, με live ταχύτητες πάνω από 12Gbps, 60 φορές μεγαλύτερες από τις σημερινές ταχύτητες 4G. Vodafone και Wind έχουν ήδη ξεκινήσει διαδικασίες υποδομών, αν και έχουμε ακόμη αρκετό δρόμο μέχρι να ξεκινήσει η εμπορική εκμετάλλευση υπηρεσιών 5G στην Ελλάδα.

2. Αρχιτεκτονική Δικτύων 5G

Με αφητηρία την 1G τεχνολογία και την εξέλιξη της σε 5G τεχνολογία παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στον κόσμο των κινητών, των οικονομικών συναλλαγών και την αλληλεπίδραση γενικότερα μεταξύ των λειτουργιών δικτύου. Πρόκειται για ένα σύστημα βασισμένο σε ένα μοντέλο IP σχεδιασμένο για ασύρματα και κινητά δίκτυα που περιλαμβάνει έναν κύριο τερματικό χρήστη και έναν αριθμό αυτόνομων τεχνολογιών ραδιο-πρόσβασης. Ο σχεδιασμός αυτός διευκολύνεται από το Mastercore όπου σε συνεργασία με το δίκτυο IP και το δίκτυο 5G ελέγχουν όλες τις τεχνολογίες δικτύου του RAN και των διαφορετικών δικτύων πρόσβασης (ADT) επιτυγχάνοντας μια πιο αποτελεσματική, λιγότερο πολύπλοκη και πιο ισχυρή τεχνολογία για τους χρήστες. Επιπλέον η χρήση του WCSM (Λειτουργία Συνδυασμού Παγκόσμιας Υπηρεσίας) από την 5G τεχνολογία προσφέρει την δυνατότητα στον χρήστη εκτός από τις συνομιλίες και τα βίντεο να στέλνει γραπτά μηνύματα τα οποία μπορούν να μεταφερθούν και να εγγραφούν σε οποιοδήποτε άλλο μέρος του κόσμου.

Στον χώρο της κινητής τηλεφωνίας το 5G σύστημα ορίζεται από το 3GPP το οποίο προσφέρει λειτουργίες όπως έλεγχο κλήσεων, συνεδριών, παροχή υπηρεσιών, ενώ η έκδοση 15 της φάσης 1 5G προσφέρει στον χώρο του ραδιοφώνου μια νέα τεχνική μετάδοση προσθέτοντας έτσι αξιοπιστία ταχύτητας και υπηρεσίες υψηλού επιπέδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η “εικονοποίηση λειτουργιών δικτύου”, “Τεμαχισμός”, “Υπολογισμός EDGE” για ταχύτερο χρόνο απόκρισης και τα “Μη επίγεια δίκτυα” είναι κάποιες τεχνικές που χρησιμοποιεί ένα 5G δίκτυο για να προσφέρει μια βελτιωμένη και εξελιγμένη εμπειρία στον χρήστη.

2.1 Δίκτυο Κορμού 5G

Η τεχνολογία 5G προσφέρει στα δίκτυα και τα διάφορα τερματικά τους αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά, καθώς η αρχιτεκτονική τους είναι πολύ προηγμένη. Για αυτό και οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να προσφέρουν αντιβαθμισμένες υπηρεσίες εφαρμόζοντας αυτήν την προηγμένη τεχνολογία. Βασικό ρόλο στην αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού υπηρεσιών 5G διαδραματίζει το 5G core. Χωρίς αυτό δεν μπορούν να αποκτηθούν πλήρεις υπηρεσίες NK, ενώ εισάγεται στο 5Gc ένας εγγενής σχεδιασμός cloud επιτρέποντας ευελικτικότητα κλιμάκωση και αντιβαθμίσεως.

Το δίκτυο κορμού είναι η καρδιά του 5G δικτύου, καθώς συγκεντρώνει την κίνηση δεδομένων, επικοινωνεί με την ΥΕ παρέχοντας βασικές υπηρεσίες δικτύου και ασφαλείας. Επιπλέον ένας 5G πυρήνας είναι υπεύθυνος για την καλύτερη δυνατή επικοινωνία σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Οι υπηρεσίες που προσφέρει είναι ο έλεγχος ταυτότητας, η εξουσιοδότηση και διαχείριση δεδομένων.

Σήμερα πολλοί εμπορικοί φορείς αναπτύσσουν 5G στην διαμόρφωση μη αυτόνομης CNSA που είναι το πρώτο στάδιο του 5G που χρησιμοποιεί ένα νέο δίκτυο πρόσβασης ραδιοφώνου 5G NK. Σε μία αυτόνομη διαμόρφωση (SA) τα σημεία 5G που διαδίδονται χρησιμοποιούν νέα τεχνολογία ραδιο-πρόσβασης 5G που επιτρέπει στον πυρήνα να αποδίδει σε υψηλότερα πρότυπα προσφέροντας απλούστερη διαχείριση δικτύου. Τα στοιχεία ενός δικτύου κορμού 5G, καθώς διαχειρίζεται πολλά διαφορετικά αιτήματα και υπηρεσίες είναι:

- Λειτουργία διαχείρισης πρόσβασης και κινητικότητας (AMF). Η συγκεκριμένη χειρίζεται όλες τις συνεδρίες εξοπλισμού χρηστών και τις εργασίες διαχείρισης κινητικότητας. Αποτελεί ενιαίο σημείο εισόδου εισερχόμενων και εξερχόμενων συνδέσεων.
- Λειτουργία διακομιστή ελέγχου ταυτότητας (AUSF). Ελέγχει την ταυτότητα SIM προσφέροντας ασφαλή πρόσβαση στο δίκτυο.
- Λειτουργία αποθετηρίου (NF) όπου παρέχει μια εγγραφή όλων των λειτουργιών του δικτύου και τις λεπτομέρειες με τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν.
- Πλαίσιο ελέγχου με υπηρεσίες λειτουργίες διαχείρισης περιόδου λειτουργίας (SMF), λειτουργία ελέγχου πολιτικής (PCF), λειτουργία εφαρμογής (AF) και ενοποιημένη διαχείριση δεδομένων. (UDM)
- Λειτουργία επιλογής τμημάτων δικτύου NSSF όπου παρέχονται πληροφορίες βοήθειας για την επιλογή τμημάτων δικτύου και ρυθμίζει τα slices έτσι ώστε το AMF να μπορεί να εξυπηρετεί τον εξοπλισμό του χρήστη.

Τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου δικτύου είναι ότι μεταφορτώνει τις λειτουργίες δικτύου σε λογισμικό από που ο χρήστης μπορεί να διαχειρίζεται οπουδήποτε και αν βρίσκεται μειώνοντας την ανάγκη για ανάπτυξη και διαχείριση δικτύων. Ουσιαστικά σε ένα 5G δίκτυο το NFV επιτρέπει τον τεμαχισμό του δικτύου με την δημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων πάνω από μία κοινή φυσική υποδομή. Επίσης συνυπάρχει σε ένα υβριδικό περιβάλλον ενσωματωμένο στο cloud με φυσικές συσκευές με τη διαφορά ότι το cloud computing υποστηρίζει εφαρμογές λογισμικού, ενώ το NFV εικονοποιεί το υλικό του δικτύου μειώνοντας έτσι το κόστος, καθώς επιτρέπει στο δίκτυο να εκτελείται από κοινόχρηστε εικονικές μηχανές.

Τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου δικτύου, σε αντίθεση με τα άλλα συμβατικά περιβάλλοντα πληροφορικής, το NFV απαιτεί αφηρημένη διαχείριση του IT και καθώς είναι πιο δυναμικό δίκτυο από τα παραδοσιακά ενδέχεται να απαιτεί κλιμάκωση με πρόσθετες λειτουργίες για να αντιμετωπίζουν τις εκάστοτε καταστάσεις.

Συνοψίζοντας, ενώ το NFV και SDM χρησιμοποιούν στοιχεία λογισμικού ταυτόχρονα έχουν και θεμελιώδης διαφορές, καθώς το NFV μετατρέπει τις ίδιες τις διεργασίες δικτύου σε εφαρμογές λογισμικού με μειωμένες τις λειτουργικές δαπάνες των παρόχων προσφέροντας έξυπνη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων τόσο υλικού όσο και λογισμικού, το SDN από την άλλη εικονοποιεί την διαχείριση ενός δικτύου προσαρμοσμένο στο συνεχές μεταβαλλόμενο επιχειρηματικό σενάριο, είναι απευθείας

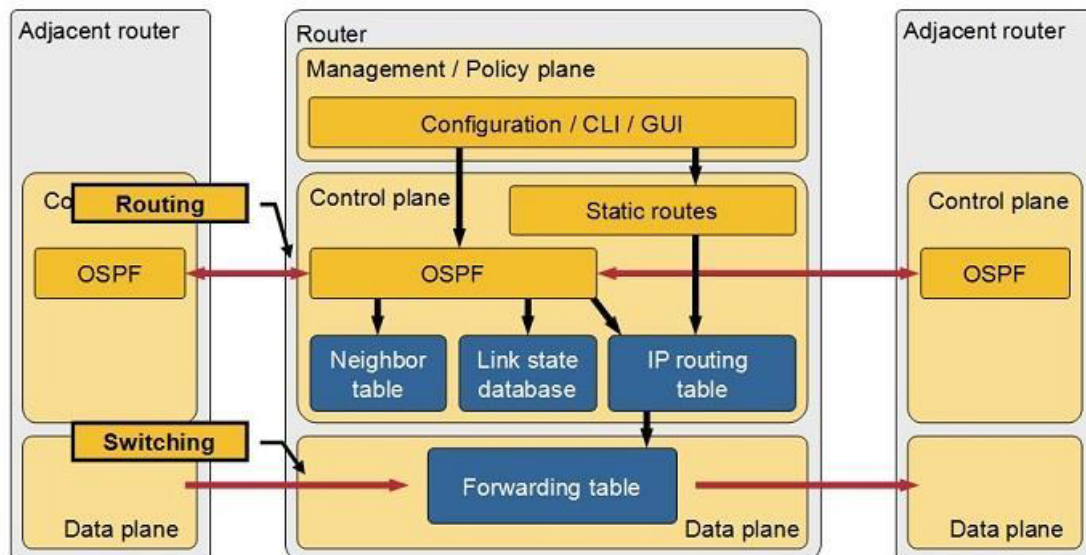
προγραμματισμένο, ενώ αποσυνδέει τις λειτουργίες προώθησης και ελέγχου του δικτύου. Παρά το γεγονός ότι διαχωρίζονται, ο συνδυασμός τους δημιουργεί επιπλέον αξία.

2.1.1 Αρχιτεκτονικές Εικονικοποίησης Δικτύου

Οι ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και αξιόπιστη επεξεργασία δεδομένων οδήγησαν στο cloud computing. Έτσι οι δύο βασικές τεχνολογίες που αποτελούν και βασικές αρχιτεκτονικές αρχές στην εικονικοποίηση δικτύου είναι οι SDN (Software Define Networking) που σημαίνει δικτύωση καθορισμένη από το λογισμικό και NFV (Network Functions Virtualization) που σημαίνει εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου.

Όσο αφορά το SDN πρόκειται για μία προσέγγιση δικτύωσης που χρησιμοποιεί ελεγκτές (κυρίως 3) βασισμένους σε διεπαφές προγραμματισμού (API) για την επικοινωνία με την υποκείμενη υποδομή υλικού και την άμεση κίνηση σε ένα δίκτυο προσφέροντας αντίγραφο ασφαλείας για πλεονασμό. Ουσιαστικά ο ρόλος ενός τέτοιου εικονικού δικτύου είναι να μετακινεί το επίπεδο ελέγχου δεδομένων από το λογισμικό στο υλικό επιτρέποντας τους χρήστες να χρησιμοποιούν δικτύωση καθορισμένη από το λογισμικό, να προγραμματίζουν και να ελέγχουν ολόκληρο το δίκτυο μέσω υαλοπίνακα αντί συσκευής. Έτσι αφαιρεί διαφορετικά, διακριτά επίπεδα ενός δικτύου για να τα κάνει πιο ευέλικτα.

Management, Control and Data Planes



Εικόνα 7. Management Control and Data Planes

Πηγή: <http://ip-mpls.com/software-defined-networking-sdn/> [14]

Περιλαμβάνει τρία επίπεδα: το επίπεδο εφαρμογής, ελέγχου και υποδομής. Έχει σχεδιαστεί για να υπολογίζει την στατική αρχιτεκτονική των παραδοσιακών δικτύων

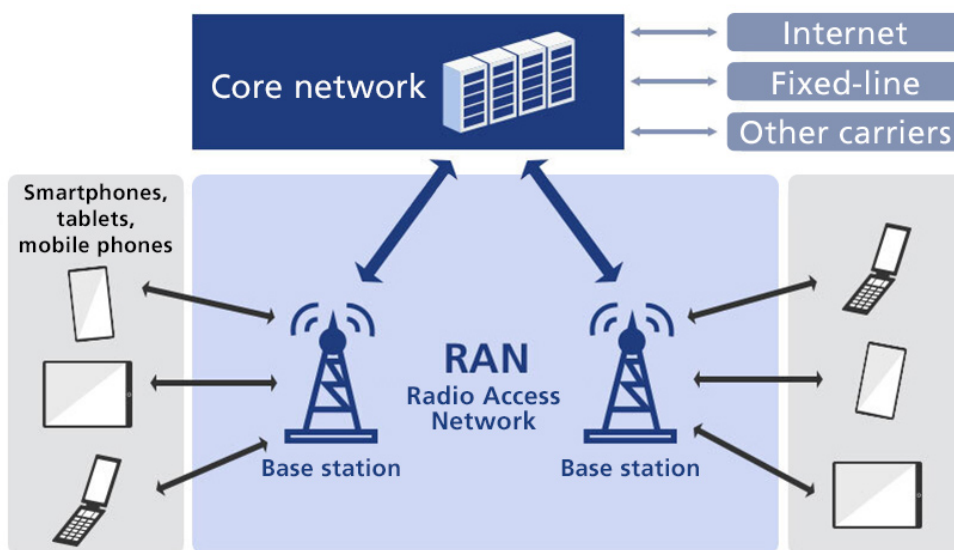
καθιστώντας τα ως υπηρεσίες cloud δίνοντας την δυνατότητα στο δίκτυο να αποσυνδέει την διαδικασία προώθησης πακέτων από την διαδικασία δρομολόγησης.

Το σημαντικότερο που προσφέρει ένα SDN δίκτυο είναι ότι οι χρήστες με την βοήθεια του σχεδιάζουν νέους τρόπους για τη δημιουργία, λειτουργία και γενικότερη χρήση των δικτύων. Από την άλλη το μειονέκτημα του είναι το κόστος της αλλαγής ενός δικτύου σε SDN, καθώς η υποδομή δικτύου για την εφαρμογή του είναι αυξημένο και το προσωπικό που θα το χρησιμοποιήσει κατάλληλα εκπαιδευμένο. Για να λάβει κάποιος τα πλήρη πλεονεκτήματα της τεχνολογίας 5G θα πρέπει να εκμεταλλεύεται τα δίκτυα SDN και NFV ώστε να γίνεται ο τεμαχισμός του δικτύου για την καλύτερη λειτουργικότητά του.

Όσο αφορά το NFV δίκτυο πρόκειται για την αντικατάσταση του υλικού συσκευών με εικονικές συσκευές που χρησιμοποιούν έναν hypervisor για να τρέξουν. Ο hypervisor δημιουργεί και εκτελεί VM που μοιράζονται το υποκείμενο υλικό. Ένα ή περισσότερα VM υλοποιούν ένα NFV όπου η διαχείριση και η ενορχήστρωση τους (MANO) χρησιμοποιούνται ώστε να προσδίδουν εφαρμογές υψηλότερου επιπέδου για την αυτοματοποίηση του κύκλου ζωής υπηρεσιών NFV. Ταυτόχρονα περιλαμβάνει και την υποδομή NFVI και τις εικονικές λειτουργίες δικτύου (VNFs).

2.2 Δίκτυο Πρόσβασης 5G RAN

Ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN – Radio Access Network) είναι ένα σημαντικό στοιχείο ενός ασύρματου συστήματος τηλεπικοινωνιών που συνδέει μεμονομένες συσκευές με άλλα μέρη ενός δικτύου μέσω μιας ραδιοζεύξης. Το RAN συνδέει τον εξοπλισμό χρήστη όπως ένα κινητό τηλέφωνο, ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή ή ένα οποιοδήποτε τηλεκατευθυνόμενο μηχάνημα μέσω οπτικών ινών ή μέσω bachaul.



Εικόνα 8. Δίκτυο Πρόσβασης RAN

Πηγή: https://www.softbank.jp/en/sbnews/entry/20220630_01 [15]

Ένα δίκτυο RAN περιλαμβάνει:

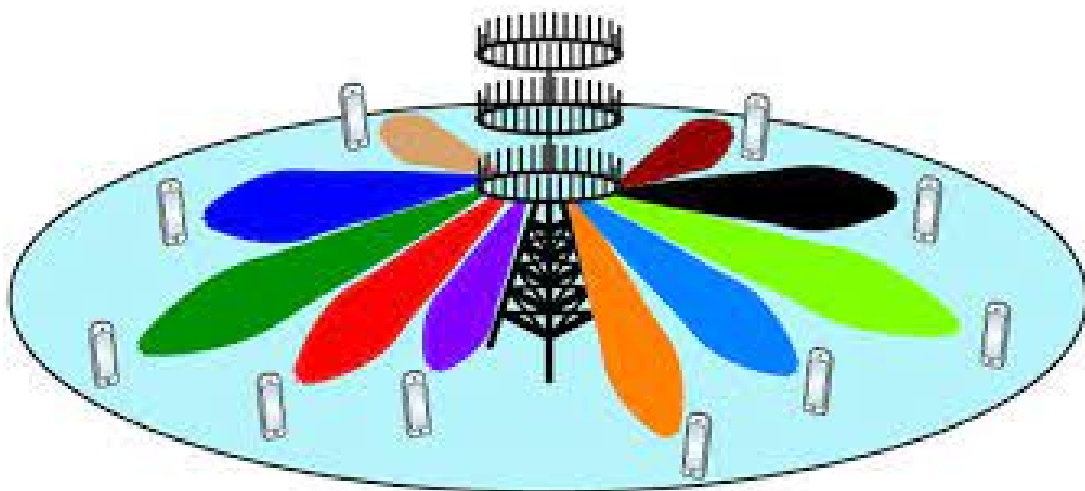
- Κεραίες οι οποίες μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε ραδιοκύματα.
- Ραδιόφωνα τα οποία μετατρέπουν τις ψηφιακές πληροφορίες σε ασύρματα σήματα, διασφαλίζοντας ότι οι εκπομπές βρίσκονται στις σωστές ζώνες συχνοτήτων και με τα σωστά επίπεδα ισχύος.
- Μονάδες βασικής ζώνης (BBU) οι οποίες παρέχουν ένα σύνολο λειτουργιών επεξεργασίας σήματος καθιστώντας δυνατή την ασύρματη τηλεπικοινωνία.

Με το LTE Advanced και το 5G έρχονται βελτιώσεις κεντρικής RAN (cloud RAN) και πολλαπλών συστοιχιών κεραιών όπως και πολλαπλών εισόδων και εξόδων (MIMO). Περιλαμβάνουν φωνητικές κλήσεις, μηνύματα κειμένου, ροή video και ήχου.

Συγκρίνοντας τις τεχνολογίες 3G, 4G με τις βασικές λειτουργίες μιας 5G τεχνολογίας διαπιστώνουμε την ανάπτυξη που έχει επέλθει. Αρχικά οι κεραίες 5G είναι ενσωματωμένες στα ραδιόφωνα όπως και τμήματα βασικής ζώνης hardware και software με τις τελευταίες να επιτρέπουν εξαιρετικές υλοποιήσεις μαζικού MIMO. Επίσης ορισμένες λειτουργίες RAN μπορούν να υλοποιηθούν στην ίδια υποδομή cloud, ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως μια βελτιστοποιημένη ανάπτυξη κόστους αξιοποιώντας τις δυνατότητες χαμηλού λανθάνοντος χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι το λογισμικό RAN μπορεί να αναπτυχθεί στην ήδη υπάρχουσα υποδομή λογισμικού core.

2.2.1 Massive MIMO

Το Massive MIMO είναι η νέα τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης στο 5G, σε ζώνες κάτω των 6 GHz και mmWave. Από την έναρξή του πριν από περίπου μια δεκαετία, έχει εξελιχθεί από μια άγρια «ακαδημαϊκή» ιδέα για να γίνει η βασική τεχνολογία που πιθανότατα θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις μελλοντικές ασύρματες τεχνολογίες.



Εικόνα 9. Massive MIMO Τεχνολογία

Πηγή: <https://www.4g-lte.net/technology/massive-mimo-technology/> [16]

Το Massive MIMO είναι μια τεχνολογία MIMO πολλών χρηστών (multiple-input multiple-output) που μπορεί να παρέχει ομοιόμορφα καλές υπηρεσίες σε ασύρματα τερματικά σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας. Η βασική ιδέα είναι να εξοπλιστούν οι σταθμοί βάσης με συστοιχίες πολλών κεραιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση πολλών τερματικών ταυτόχρονα, στον ίδιο πόρο χρόνου-συχνότητας. Η λέξη "masive" αναφέρεται στον αριθμό των κεραιών και όχι στο φυσικό μέγεθος.

Οι συστοιχίες κεραιών έχουν ελκυστικούς παράγοντες μορφής: στη ζώνη των 2 GHz, μια ορθογώνια διάταξη σε απόσταση μισού μήκους κύματος με 200 στοιχεία διπλής πόλωσης είναι περίπου 1,5 x 0,75 μέτρα. Το Massive MIMO λειτουργεί σε λειτουργία TDD και η μορφοποίηση δέσμης κατερχόμενης ζεύξης εκμεταλλεύεται την αμοιβαιότητα ανερχόμενης ζεύξης-κάτω ζεύξης της ραδιοδιάδοσης. Συγκεκριμένα, η συστοιχία σταθμών βάσης χρησιμοποιεί εκτιμήσεις καναλιών που λαμβάνονται από πιλότους άνω ζεύξης που μεταδίδονται από τα τερματικά για να μάθουν το κανάλι και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό καθιστά το Massive MIMO πλήρως επεκτάσιμο σε σχέση με τον αριθμό των κεραιών του σταθμού βάσης. Οι σταθμοί βάσης στο Massive MIMO λειτουργούν αυτόνομα, χωρίς κοινή χρήση δεδομένων ωφέλιμου φορτίου ή πληροφοριών κατάστασης καναλιού με άλλες κυψέλες.

2.2.2 Μικροκυματική ζώνη (mm wave)

Η μικροκυματική ζώνη είναι περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με μήκος κύματος μεταξύ 0,1 και 100 εκατοστών, που αντιστοιχεί σε συχνότητες μεταξύ 0,3-300 GHz. Ωστόσο, δεν υπάρχουν ακριβή όρια που διαχωρίζουν τα μικροκύματα από τις γειτονικές περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, των υπερβραχέων και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Τα μικροκύματα χωρίζονται σε τρεις επιμέρους ζώνες :

- Στα δεκατομετρικά μικροκύματα (Ultra high frequency, συντ. UHF) (0.3-3 GHz),
- Στα εκατοστομετρικά μικροκύματα (Super high frequency συντ.SHF) (3-30 GHz),
- Στα χιλιοστομετρικά μικροκύματα (Extremely high frequency συντ.EHF) (30-300 GHz)

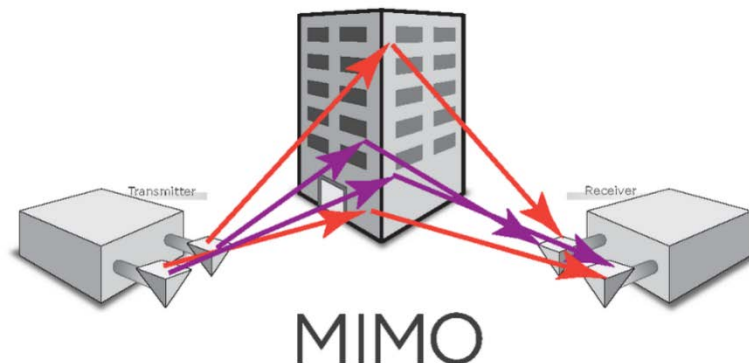
Οι μικροκυματικές ζώνες έχουν πολύ περισσότερες εφαρμογές σε σχέση με τις άλλες ζώνες ραδιοκυμάτων λόγω του πλούσιου φάσματός τους. Χρησιμοποιούνται για εκπομπή επίγειου [τηλεοπτικού σήματος](#) (UHF), στην εκπομπή δορυφορικού τηλεοπτικού σήματος αλλά και στις [δορυφορικές επικοινωνίες](#) γενικότερα. Εφαρμόζονται επίσης στην [κινητή τηλεφωνία](#), στην εφαρμογή [Wi-Fi](#), στο πρότυπο ανταλλαγής αρχείων [Bluetooth](#), στα [Ραντάρ](#) αλλά και στους [φούρνους μικροκυμάτων](#) καθώς οι μικροκυματικές συχνότητες αλληλοεπιδρούν με την ύλη.

2.2.3 Network MIMO – Cooperative MIMO

Η ανάγκη ενίσχυσης απόδοσης του δικτύου όπως και εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση κάλυψης του δικτύου οδήγησε σε μια μορφή συνεργατικής επικοινωνίας την

Cooperative MIMO. Πρόκειται για πολλαπλές Κεραίες μετάδοσης και λήψης που προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Στο ραδιόφωνο, η πολλαπλή είσοδος και η πολλαπλή έξοδος ή MIMO (/ˈmaɪmoʊ, ˈmiːmoʊ/), είναι μια μέθοδος πολλαπλασιασμού της χωρητικότητας μιας ραδιοζεύξης χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες μετάδοσης και λήψης για την εκμετάλλευση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. [1][2] Το MIMO έχει γίνει βασικό στοιχείο των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των IEEE 802.11n (Wi-Fi 4), IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), HSPA+ (3G), WiMAX και Long Term Evolution (LTE). Πιο πρόσφατα, το MIMO έχει εφαρμοστεί στην επικοινωνία μέσω γραμμής ισχύος για εγκαταστάσεις τριών συρμάτων ως μέρος του προτύπου ITU G.hn και της προδιαγραφής HomePlug AV2.

Κάποτε, στα ασύρματα, ο όρος «MIMO» αναφερόταν στη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στον δέκτη. Στη σύγχρονη χρήση, το "MIMO" αναφέρεται συγκεκριμένα σε μια κατηγορία τεχνικών για την αποστολή και λήψη περισσότερων του ενός σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού με εκμετάλλευση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Επιπλέον, η σύγχρονη χρήση MIMO αναφέρεται συχνά σε πολλαπλά σήματα δεδομένων που αποστέλλονται σε διαφορετικούς δέκτες (με μία ή περισσότερες κεραίες λήψης), αν και αυτό ονομάζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια πολλαπλών χρηστών πολλαπλών εισόδων μονής εξόδου (MU-MISO).



Εικόνα 10. Όσα πρέπει να γνωρίζεις σχετικά με το MIMO

Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO> [17]

Η τρίτη γενιά (3G) (CDMA και UMTS) επιτρέπει την εφαρμογή σχημάτων διαφοροποίησης μετάδοσης χωροχρόνου, σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση δέσμης μετάδοσης σε σταθμούς βάσης. Η τέταρτη γενιά (4G) LTE και LTE Advanced ορίζουν πολύ προηγμένες διεπαφές αέρα που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στις τεχνικές MIMO. Το LTE εστιάζει κυρίως στο MIMO μιας σύνδεσης που βασίζεται στη χωρική πολυπλεξία

και τη χωροχρονική κωδικοποίηση, ενώ το LTE-Advanced επεκτείνει περαιτέρω τη σχεδίαση σε MIMO πολλών χρηστών. Στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), το IEEE 802.11n (Wi-Fi), η τεχνολογία MIMO υλοποιείται στο πρότυπο χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές τεχνικές: επιλογή κεραιάς, κωδικοποίηση χωροχρόνου και πιθανώς διαμόρφωση δέσμης.

Οι τεχνικές χωρικής πολυπλεξίας καθιστούν τους δέκτες πολύ περίπλοκους και ως εκ τούτου συνήθως συνδυάζονται με ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) ή με διαμόρφωση πολλαπλής πρόσβασης ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA), όπου τα προβλήματα που δημιουργούνται από ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά. Το πρότυπο IEEE 802.16e ενσωματώνει το MIMO-OFDMA. Το πρότυπο IEEE 802.11n, που κυκλοφόρησε τον Οκτώβριο του 2009, συνιστά το MIMO-OFDM.

Το MIMO σχεδιάζεται επίσης να χρησιμοποιηθεί σε πρότυπα κινητής τηλεφωνίας ραδιοφώνου όπως τα πρόσφατα 3GPP και 3GPP2. Στο 3GPP, τα πρότυπα High-Speed Packet Access plus (HSPA+) και Long Term Evolution (LTE) λαμβάνουν υπόψη το MIMO. Επιπλέον, για να υποστηρίξουν πλήρως τα κυψελωτά περιβάλλοντα, οι ερευνητικές κοινοπραξίες MIMO, συμπεριλαμβανομένου του IST-MASCOT, προτείνουν την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών MIMO, π.χ. MIMO πολλών χρηστών (MU-MIMO).

Οι αρχιτεκτονικές και οι τεχνικές επεξεργασίας ασύρματων επικοινωνιών MIMO μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα ανίχνευσης. Αυτό μελετάται σε έναν υποεπιστημονικό κλάδο που ονομάζεται ραντάρ MIMO.

Η τεχνολογία MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα μη ασύρματων επικοινωνιών. Ένα παράδειγμα είναι το πρότυπο οικιακής δικτύωσης ITU-T G.9963, το οποίο ορίζει ένα σύστημα επικοινωνιών με γραμμή ισχύος που χρησιμοποιεί τεχνικές MIMO για τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσω πολλαπλών καλωδίων AC (φάση, ουδέτερο και γείωση).

3. 5G και Internet of Things (IoT)

3.1 M2M (Machine to Machine)

Η επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή (M2M) είναι ένας τρόπος επικοινωνίας μεταξύ μηχανών ή συσκευών χωρίς ανθρώπινη αλληλεπίδραση ή έλεγχο. Αυτές οι συσκευές μπορούν να συνομιλούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας είτε ενσύρματη είτε ασύρματη μετάδοση δεδομένων, με το ασύρματο M2M να γίνεται ιδιαίτερα ένα αναπτυσσόμενο πεδίο με την προσθήκη πολλών εφαρμογών Internet of Things (IoT). Το M2M είναι σε θέση να χρησιμοποιεί μια ποικιλία ασύρματων πρωτοκόλλων, τεχνολογιών και προτύπων όπως: Bluetooth, 2G, 3G, 802.15.4, 6LoWPAN, LoRA και LTE μεταξύ άλλων. Τα πρότυπα ασύρματης δικτύωσης στο M2M θα πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές της συσκευής και το περιβάλλον στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί.

Η έλευση του IoT έχει επιταχύνει την ανάπτυξη της νέας και εξειδικευμένης μονάδας M2M με τις συνοδευτικές ασύρματες πύλες, τους δρομολογητές και τις σταθερές διευθύνσεις IP. Αυτό σημαίνει ότι το M2M χρησιμοποιεί πλέον μια ποικιλία ασύρματων δικτύων για μετάδοση δεδομένων και πολλές συσκευές μπορούν να συνδεθούν για ταυτόχρονη επικοινωνία αντί για την αρχική μεταφορά από σημείο σε σημείο. Η προσαρμογή και η ενσωμάτωση του αυτοματισμού σε εφαρμογές M2M οδήγησε σε ακόμη πιο αποτελεσματική ανταλλαγή πληροφοριών.



Εικόνα 11. Machine to Machine Δίκτυα και η σημασιολογία τους

Πηγή: <https://www.researchdive.com/blog/what-are-the-five-fascinating-applications-of-cellular-m2m> [19]

Μια εφαρμογή από μηχανή σε μηχανή του 5G αναφέρεται συχνά ως μαζικό IoT. Αυτές οι επικοινωνίες τύπου μηχανής θα απαιτούν δυνατότητες χαμηλής ισχύος και χαμηλής ταχύτητας δεδομένων, υποστηρίζοντας μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Η ανάπτυξη του 5G

στον κρίσιμο για την αποστολή αρένα, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων βιομηχανικών, ρομποτικών, ιατρικών και αυτοκινητιστικών εφαρμογών που απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστες και εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης δυνατότητες, είναι πιθανό να διαρκέσει περισσότερο. Οι κρίσιμες περιπτώσεις χρήσης εξαρτώνται από σημαντικές τεχνικές καινοτομίες, οι περισσότερες από τις τηλεπικοινωνίες του κόσμου βρίσκονται σε πρόχειρη ευθυγράμμιση σχετικά με τον τρόπο χρήσης του διαθέσιμου φάσματος για δίκτυα 5G και οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες το χρειάζονται για να αναπτύξουν νέες αγορές στη βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία, την έξυπνη πόλη και εμπορικούς χώρους.

Οι επικοινωνίες τύπου μηχανής (MTC) αναμένεται να διαδραματίσουν ουσιαστικό ρόλο στα συστήματα 5G. Το MTC έχει ταξινομηθεί περαιτέρω σε "μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής" (mMTC) και "υπεραξιόπιστη επικοινωνία τύπου μηχανής" (uMTC). Ενώ το mMTC αφορά την ασύρματη συνδεσιμότητα με δεκάδες δισεκατομμύρια τερματικά τύπου μηχανής, το uMTC αφορά τη διαθεσιμότητα, τη χαμηλή καθυστέρηση και την υψηλή αξιοπιστία. Η κύρια πρόκληση στο mMTC είναι η επεκτάσιμη και αποτελεσματική συνδεσιμότητα για έναν τεράστιο αριθμό συσκευών που στέλνουν πολύ σύντομα πακέτα, κάτι που δεν γίνεται επαρκώς σε κυψελωτά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για επικοινωνίες ανθρώπινου τύπου. Επιπλέον, οι λύσεις mMTC πρέπει να επιτρέπουν κάλυψη ευρείας περιοχής και βαθιά διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους, ενώ έχουν χαμηλό κόστος και ενεργειακά αποδοτικές.

Αυτός ο ιστός συνδεσιμότητας θα επιτρέψει τη συντήρηση της υποδομής και των συστημάτων κατασκευής, καθώς και ισχυρό έλεγχο ροής, προσαρμογή και λεπτομέρεια των λειτουργικών παραμέτρων ώστε να ανταποκρίνονται σε διακυμάνσεις σε πραγματικό χρόνο στο περιβάλλον και τις διαδικασίες, όπως αυτές συμβαίνουν. Λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα ανάπτυξη του Διαδικτύου και την άφιξη της Ενισχυμένης Ευρυζωνικής κινητής τηλεφωνίας (eMBB) στο 5G, η μετάδοση αυτών των δεδομένων IoT θα απαιτήσει ασύρματη χωρητικότητα 5G που είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τα υπάρχοντα δίκτυα 4G για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του δικτύου.

3.2 D2D (Device to Device)

Η επικοινωνία συσκευής με συσκευή (D2D) είναι η μέθοδος δημιουργίας άμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ των συσκευών με δυνατότητα 5G. Σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G, οι αναπτυγμένες συσκευές συνδέονται μεταξύ τους μέσω αποκλειστικών συνδέσεων για γρήγορη κοινή χρήση δεδομένων από τη μια συσκευή στην άλλη.

Λόγω της αξιοπιστίας της επικοινωνίας D2D, μετατρέπεται σε μια ενθαρρυντική τεχνική στις τρέχουσες εξελισσόμενες τεχνολογίες δικτύων κινητής τηλεφωνίας (δηλαδή, 5G). Στην πραγματικότητα, οι άμεσες κινητές συσκευές θα δημιουργήσουν την

αλληλεπίδραση χωρίς τη χρήση σταθμών βάσης (BS) / βασικών στοιχείων δικτύου. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα δεν θα μεταδίδονται μέσω των σημείων πρόσβασης σε σταθερή υποδομή. Επιπλέον, σας δώσαμε τις δύο κύριες ταξινομήσεις της επικοινωνίας D2D: out-band και in-band ως εξής:

- Outband D2D
Αυτόνομη και Ελεγχόμενη
- Inband D2D
Επικαλύψεις και υποστρώματα

Από το ίδιο το όνομα Direct D2D networks. μπορούμε να καταλάβουμε ότι οι χρήστες/συσκευές επικοινωνούνται απευθείας. Σε αυτό, εξάλειψε την κίνηση λόγω του περιβάλλοντος χωρίς υποδομή και αποδείχθηκε ότι ήταν ο βασικός παράγοντας για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος και την υποστήριξη μελλοντικών τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας. Πέρα από αυτό, έχουμε πιο σημαντικούς ερευνητικούς τομείς της Επικοινωνίας από συσκευή σε συσκευή στο 5G.

Συνήθως, τα έργα επικοινωνίας D2D δεν έχουν σημασία η χρήση υποδομών / περιβαλλόντων χωρίς υποδομή. Εστιάζει κυρίως στην ανάπτυξη συσκευών μεγάλης κλίμακας με χαρακτηριστικά χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού ρυθμού δεδομένων. Επιπλέον, είναι επίσης σε θέση να αντιμετωπίσει τεχνικά ζητήματα δικτύου 5G σε βιομηχανικούς τομείς.



Εικόνα 12. Η συμβολή των επικοινωνιών D2D στο 5G

Πηγή: <https://spectrum.ieee.org/applications-of-devicetodevice-communication-in-5g-networks> [20]

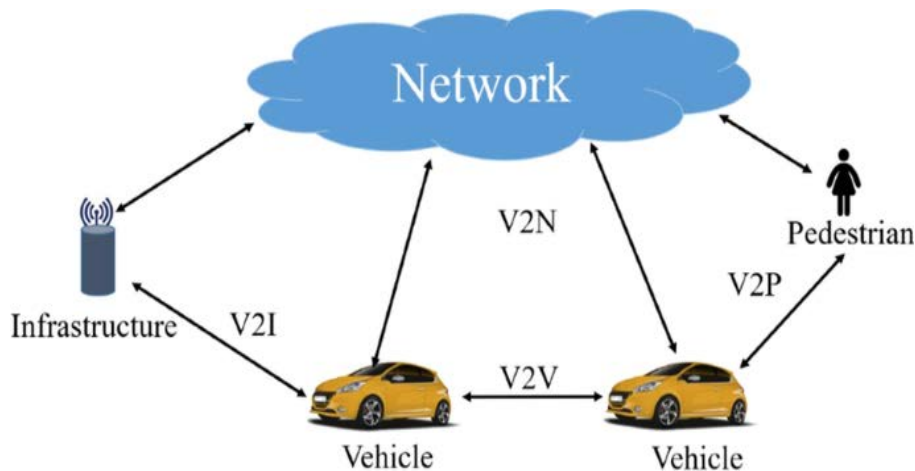
Και αυτή η επικοινωνία έντασης συσκευών διαμορφώνεται από τις ίδιες τις κοντινές συσκευές για να σχηματίσουν το δίκτυο. Επιπλέον, γίνεται ο πυρήνας του τρέχοντος κυψελοειδούς δικτύου προκειμένου να βελτιωθούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- υψηλή απόδοση
- Υψηλή φασματική απόδοση
- χαμηλή καθυστέρηση
- Βελτιωμένη ένταση του συστήματος

3.3 V2V (Vehicle 2 Vehicle)

Οι υπηρεσίες V2V έχουν καθοριστεί από τον οργανισμό προτύπων 3GPP για την υποστήριξη εφαρμογών οδικής ασφάλειας και μη ασφάλειας στα κυψελωτά δίκτυα 5G. Αναμένεται να χρησιμοποιήσει την άμεση σύνδεση (γνωστή ως διεπαφή PC5), καθώς και τη νέα ραδιοεπικοινωνία στο 5G, για να παρέχει μια πλατφόρμα συνδεσιμότητας μεταξύ των οχημάτων.

Ειδικότερα, τα οχήματα θα χρησιμοποιούν τη διεπαφή PC5 για να μεταδίδουν μηνύματα ασφαλείας για να ενημερώνονται μεταξύ τους για πιθανούς κινδύνους στο δρόμο. Προκειμένου να λειτουργήσει με ασφάλεια, απαιτούνται ισχυροί μηχανισμοί ασφαλείας για τη διασφάλιση της αυθεντικότητας των ληφθέντων μηνυμάτων και της αξιοπιστίας των αποστολέων μηνυμάτων. Αυτοί οι μηχανισμοί δεν πρέπει ούτε να προσθέτουν σημαντικά την καθυστέρηση του μηνύματος ούτε να επηρεάζουν την απόδοση των εφαρμογών ασφαλείας.



Εικόνα 13. Vehicle To Vehicle Δίκτυο

Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/346491035_A_novel_automobile_antenna_for_vehicles_communication_of_5G_network [21]

Το υπάρχον πρότυπο 5G-V2V επιτρέπει τη διαχείριση της προστασίας των μηνυμάτων V2V από λύσεις ασφαλείας υψηλότερου επιπέδου που ορίζονται από άλλα πρότυπα στον τομέα ITS. Ωστόσο, η ύπαρξη μιας λύσης ασφαλείας στο επίπεδο πρόσβασης 5G είναι πιθανώς προτιμότερη προκειμένου να διασφαλιστεί η συμβατότητα του συστήματος και να μειωθεί το κόστος ανάπτυξης. Συνεπώς, ο κύριος στόχος αυτού του

άρθρου είναι να επανεξετάσει τις επιλογές για την ασφάλεια του επιπέδου πρόσβασης 3GPP σε μελλοντικές εκδόσεις 5G-V2V. Αρχικά, παρουσιάζεται μια περίληψη των επικοινωνιών 5G-V2V και των αντίστοιχων απαιτήσεων υπηρεσιών. Δίνεται επίσης μια επισκόπηση των προτύπων ασφαλείας επιπέδου εφαρμογής, ακολουθούμενη από μια ανασκόπηση των επικείμενων επιλογών για την ασφάλεια των μηνυμάτων εκπομπής V2V στο επίπεδο πρόσβασης 5G.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΒΙΝΤΕΟ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 5G

Τα δίκτυα 5G παρέχουν αναβαθμισμένες υπηρεσίες μετάδοσης περιεχομένου πολυμέσων (π.χ. βίντεο). Συγκεκριμένα, καλύπτονται οι υπηρεσίες μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο ροής βίντεο υψηλής ευκρίνειας, όπως και οι υπηρεσίες επικοινωνίας Virtual Reality (VR) με ροή βίντεο 360°, καθώς και μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου που δημιουργείται από τους χρήστες.

4.1 Εξελίξεις υπηρεσιών ροής για 5G

Οι υπηρεσίες 3GPP Packet Switching Streaming (PSS) έχουν καθοριστεί και διατηρούνται από το 3GPP από την κυκλοφορία του 4 (Rel-4) αναπτύσσοντας αρχικά οπτικοακουστικές υπηρεσίες ενός διαχειριστή και στη συνέχεια εξελίσσονται σε ένα σύνολο ενεργοποιητών για εφαρμογή ροής, δίκτυο και εξοπλισμό με UE δυνατότητες για τον χρήστη.

Η πιο πρόσφατη αρχιτεκτονική PSS αντιστοιχίζεται σε 3G,4G,5G με PSS που χρησιμοποιεί την εφαρμογή (AF) και τον πελάτη PSS στο UE. Το PSS client υποστηρίζει την 3GPP ροή HTTP (3GP-Dash) πρωτοκόλλου όπως και την απόκτηση παρουσίασης μέσων, περιγραφή λίστας αναπαραγωγής (MPD) και τμημάτων πολυμέσων. Ενώ το UE υποστηρίζει ένα σύνολο αποκωδικοποιητών ήχου και βίντεο. Το TS υποστηρίζει την μορφή περιγραφής σκηνής καθώς ο διακομιστής PSS χειρίζεται την απόκτηση και παράδοση περιεχομένου με τους ίδιους κωδικοποιητές. Το πρωτόκολλο dash (SAND) καθορίζεται από το TS παρέχοντας βοήθεια στο δίκτυο ως προς την ποιότητα και την προσωρινή αποθήκευση μεσολάβησης.

Αξιοποιώντας τα 5G συστήματα οι πάροχοι περιεχομένου, οι ραδιοτηλεοπτικοί φορείς και οι φορείς εκμετάλλευσης χρησιμοποιούν slices EMBB για παράδοση και ζωντανή μετάδοση στους συνδρομητές τους, ενώ το 3GPP επί του παρόντος μελετά τις προδιαγραφές των υπηρεσιών πολυμέσων βαθμολογώντας την ροή με HTTP 1.1 για προβολή βίντεο. Έτσι με την εξέλιξη και συνδρομή των 5G συστημάτων ολοκληρώνεται τον Ιούνιο του 2018 η “5G βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή διανομή μέσων” που θα γίνει και η τάση για τις κανονιστικές εργασίες Rel-16 σχετικά με την ροή 3GPP.

4.1.1 VR 360° Ροή βίντεο σε 5G

Η εικονική πραγματικότητα είναι η πιο δυναμική εφαρμογή στο θέμα των οπτικοακουστικών μέσων, καθώς μιμείται τα ερεθίσματα του πραγματικού κόσμου τόσο φυσικά στον παρατηρητή. Απαιτεί ο χρήστης να χρησιμοποιεί μία κεφαλή με τοποθετημένη οθόνη (HMD) για να έχει πρόσβαση στο οπτικό πεδίο ενώ και ακουστικά για να ακούει τον συνοδευτικό ήχο. Ταυτόχρονα επιτρέπει στον χρήστη να κάνει και κάποιες κινήσεις. Η τεχνολογία 5G προσφέρει διασφάλιση της ποιότητας θέασης στον

εκάστοτε χρήστη με ένα σύνολο αναπαραστάσεων βίντεο 360 μοιρών για τις οποίες κάθε πίξελ αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο προσανατολισμό θέασης. Οι πιο δημοφιλείς προβολές είναι οι EquiRectangular Projection (ERP) ενώ σε θέματα ήχου ο ήχος προέρχεται από τη σκηνή 360 μοίρες και πρέπει να αποδίδεται ανάλογα με τον στιγμιαίο προσανατολισμό του θεατή.

Οι περιπτώσεις χρήσεων των VR 360 είναι οι εξής:

- Μετάδοση εκδήλωσης: Η κάλυψη μιας ζωντανής εκδήλωσης όπου ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει διάφορες θέσεις θέασης, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που δεν είναι προσβάσιμες στο κοινό (π.χ. μια συναυλία).
- VR Streaming: Η καθηλωτική εμπειρία που παρέχεται σε unicast ενός live ή περιεχόμενο 360° κατ' απαίτηση.
- Social VR: Αυτός είναι ο συνδυασμός της θήκης ροής VR με την υπηρεσία συνομιλίας πολλαπλών σημείων με την οποία ο θεατής μπορεί να συνομιλήσει με φίλους που βρίσκονται φυσικά σε διαφορετικές τοποθεσίες.
- E-Learning: Ένας τομέας εφαρμογής του VR 360° είναι η εκπαίδευση. Με την απομακρυσμένη συμμετοχή στην τάξη, ένας θεατής μπορεί να είναι ουσιαστικά παρών σε μια τάξη για ζωντανή ή κατ' απαίτηση συνεδρία.
- Κλήσεις εικονικής πραγματικότητας: Παρόλο που είναι δύσκολο να λυθεί το πρόβλημα του θεατή στον εικονικό κόσμο, αυτές οι περιπτώσεις τηλεδιάσκεψης αντιμετωπίζουν τις διαφορετικές δυνατότητες συνομιλίας από σημείο σε σημείο και πολλαπλά σημεία υπηρεσίες σε VR.

Η 3GPP κυκλοφόρησε το νέο αντικείμενο εργασίας για την επέκταση κωδικοποιητή EVS για το Immersive. Υπηρεσίες φωνής και ήχου (IVAS Codec) στο TSG-SA. Το IVAS είναι ο κωδικοποιητής επόμενης γενιάς 3GPP για 4G/5G, βασισμένος στην επιτυχία του κωδικοποιητή EVS. Ο κωδικοποιητής βελτιωμένων φωνητικών υπηρεσιών (EVS) 3GPP σε πραγματικό χρόνο έχει προσφέρει μια εξαιρετικά σημαντική βελτίωση στην εμπειρία χρήστη με την εισαγωγή της υπερ-ευρείας ζώνης (SWB) και της πλήρους ζώνης (FB) ομιλίας και ήχου κωδικοποίηση, μαζί με βελτιωμένη ανθεκτικότητα στην απώλεια πακέτων.

Η βασική ιδέα πίσω από το αντικείμενο εργασίας κωδικοποιητή IVAS είναι να καλύπτει περιπτώσεις χρήσης σε συνομιλητική φωνή σε πραγματικό χρόνο, τηλεδιάσκεψη πολλαπλών ροών, μετατροπή VR ζωντανό και μη ζωντανό περιεχόμενο και ροή περιεχομένου που δημιουργείται από χρήστες. Επιπλέον για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ζήτησης για πλούσιες υπηρεσίες πολυμέσων, τηλεδιάσκεψη. Η εφαρμογή υπηρεσιών μέσω 4G/5G θα επωφεληθεί από αυτόν τον κωδικοποιητή επόμενης γενιάς ο οποίος χρησιμοποιείται ως βελτιωμένος κωδικοποιητής συνομιλίας και υποστηρίζει κωδικοποίηση πολλαπλών ροών.

Καθηλωτικές υπηρεσίες και εφαρμογές, όπως οραματίζονται στο 3GPP TR 22.891 και ειδικά υπηρεσίες και εφαρμογές VR που περιγράφονται στο TR 26.918, αναμένεται να

παρέχουν μια καθηλωτική εμπειρία χρήστη που σε σύγκριση με τις υπάρχουσες υπηρεσίες πολυμέσων θα προσφέρει ένα μεγάλο άλμα στην ποιότητα της εμπειρίας. Μια καθηλωτική οπτικοακουστική εμπειρία προσφέρεται καθώς το στοιχείο ήχου με την χωρική ηχητική του εντύπωση συνδυάζεται με την παρουσιαζόμενη οπτική σκηνή. Επιπλέον, ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να μετακινούνται, εντός ορισμένων ορίων που ορίζονται από την εφαρμογή, σε όλη τη σκηνή, και το στοιχείο ήχου θα προσαρμοστεί ώστε να αντικατοπτρίζει τον χωρικό προσανατολισμό/θέση.

Ο τρέχων στόχος για τον κωδικοποιητή IVAS είναι να γίνεται μέρος του Rel-16, ενώ ο γενικός στόχος του IVAS είναι η ανάπτυξη ενός ενιαίου γενικού κωδικοποιητή ήχου για καθηλωτικές υπηρεσίες και εφαρμογές 4G και 5G συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων χρήσης VR που προβλέπονται στο 3GPP TR 26.918 .

4.1.2 Περιεχόμενο πολυμέσων που δημιουργείται από τον χρήστη

Τα τελευταία χρόνια, το περιεχόμενο που δημιουργείται από χρήστες, ειδικά το βίντεο, ξεπερνά σε δημοτικότητα ταινίες όπως και βίντεο επωνύμων. Ενώ η αύξηση επισκεψιμότητας σε ένα βίντεο είναι ιδιαίτερα ταχεία, με έρευνες να δείχνουν ότι οι περισσότεροι χρήστες ανεβάζουν ή μοιράζονται τουλάχιστον ένα βίντεο μια φορά τον μήνα επιπλέον τα τελευταία στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι ένα περιεχόμενο βίντεο μεταφορτώνεται σε 30 ημέρες σε αντίθεση με το αντίστοιχο των μεγάλων τηλεοπτικών δικτύων των ΗΠΑ που χρειάζεται 30 χρόνια.

Μετά την φωνή υπάρχει και μία παλαιότερη μορφή περιεχομένου που δημιουργείται από χρήστες όπου είναι η Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων (SMS) με το όριο των 140 χαρακτήρων. Το SMS εξελίχθηκε σε Υπηρεσία μηνυμάτων (MMS) που αναβάθμισε τις μορφές πολυμέσων για να συμπεριληφθούν ομιλία, ήχος, συνθετικός ήχος, ακίνητες εικόνες, γραφικά bitmap, βίντεο, διάνυσμα γραφικά κ.λπ. Επιπλέον η προσωπική και ημιαπαγγελματική «Ζωντανή» μετάδοση περιεχομένου που δημιουργείται από χρήστες έχει γίνει πιο δημοφιλής, ειδικά μεταξύ των χρηστών των κοινωνικών δικτύων και υπηρεσίες ροής.

Είναι κατανοητό από όλα αυτά ότι ο τομέας τεχνολογίας πολυμέσων 5G έχει ξεκινήσει και θα συνεχίσει να υποστηρίζεται τα επόμενα χρόνια από νέες προηγμένες, καθηλωτικές και διαδραστικές υπηρεσίες που προσφέρονται από φορείς και τρίτους στους συνδρομητές τους.

4.2 Βελτιστοποιημένη παράδοση περιεχομένου βίντεο μέσω 5G δικτύων

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για την αποτελεσματική παροχή υπηρεσιών από τα πολυμέσα στα δίκτυα 5G σχετικά με την κατανάλωση βίντεο και την υψηλή επισκεψιμότητα στον πυρήνα του δικτύου κυρίως στην κινητή τηλεφωνία έχει ως αποτέλεσμα την προσπάθεια εύρεσης λύσης βελτιστοποίησης κυκλοφορίας βίντεο για

την βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας (Quality of Experience – QoE) του τελικού χρήστη.

Μερικές από τις τεχνικές που ενισχύουν της ποιότητας εμπειρίας (QoE) του τελικού χρήστη είναι οι εξής:

- **Ροή βίντεο προσαρμοσμένη στον χρήστη:** Το πρωτόκολλο Adaptive Streaming είναι μια κατηγορία παράδοσης βίντεο που ολοένα και κερδίζει αυξημένη δημοτικότητα. Μερικές από τις παραδοσιακές μεθόδους παράδοσης βίντεο όπως η μετάδοση μέσω των μέθοδων προοδευτικής λήψης δίνουν ώθηση του περιεχομένου βίντεο στην συσκευή. Προσδίδουν στον χρήστη προσαρμοστικές τεχνικές ροής πολυμέσων, καθώς προσαρμόζουν το βίντεο σε διαφορετικά χαρακτηριστικά προβολής όπως υψηλή ικανότητα στην συσκευή και συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος. Επιπλέον επιλέγει αυτόματα ένα σύστημα κωδικοποίησης χρησιμοποιώντας λιγότερο εύρος ζώνης και έτσι γίνεται φιλικό προς τον χρήστη. Αυτή η τεχνολογία αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας προσαρμοστικά πρωτόκολλα ροής όπως τα DASH και HLS, τα οποία ανοίγουν το δρόμο για κωδικοποίηση πολλαπλών ρυθμών και αποτελεσματικότητας στο εύρος ζώνης.
- **Κωδικοποιητές Βίντεο:** Ο βασικός ρόλος της ενεργοποίησης των κωδικοποιητών βίντεο είναι η μείωση της συμπίεσης και αποσυμπίεσης ψηφιακών αρχείων βίντεο. Λόγω της εκθετικά αυξανόμενης ζήτησης για VoD υπηρεσίες, υπάρχει μετάβαση από την υψηλή ευκρίνεια (HD)βίντεο σε βίντεο Ultra High Definition (UHD), με υψηλή ανάλυση 4K-8K και υψηλό δυναμικό εύρος και ακρίβεια περίπου 10-bit. Το H.264 είναι ένα από τις πιο δημοφιλείς μορφές συμπίεσης που χρησιμοποιείται κυρίως τηλεοράσεις, στα έξυπνα τηλέφωνα και ταμπλέτες, ενώ το HEVC/H.265 (High efficiency video encoding) είναι ένα από τις νεότερες τεχνικές συμπίεσης που μπορούν να προσφέρουν την ίδια ποιότητα με αυτό του H.264 αλλά στο μισό bitrate. Η αποκωδικοποίηση HEVC υποστηρίζεται συνήθως από Ultra HD (UHD ή 4K)τηλεοράσεις που πωλούνται σήμερα. Ο άλλος κωδικοποιητής κλειδιού σχεδιάστηκε κυρίως για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο και υψηλότερες αναλύσεις Τα βίντεο (UHD, υψηλός ρυθμός καρέ) περιλαμβάνουν τον κωδικοποιητή που κυκλοφόρησε από την Alliance for Open Media, το Google VP9, τους κωδικοποιητές DXV και VIDVOX har codec.
- **Προσωρινή αποθήκευση δικτύου:** Παραδοσιακά θεωρείται ως μία αποτελεσματική μέθοδος βελτιστοποίησης προβολής βίντεο, καθώς βελτιώνει την εμπειρία του τελικού χρήστη μειώνοντας τον χρόνο αναπαραγωγής, το κόστος του δικτύου όπως και την κατανάλωση εύρους ζώνης. Βασίζεται στην προσωρινή αποθήκευση του τεράστιου αριθμού αρχείων βίντεο αρκεί να αποφασίσετε από τα αρχεία βίντεο ποιο ρυθμό κωδικοποίησης θα χρησιμοποιήσετε για αυτό. Ωστόσο, στα δίκτυα 5G, η προσωρινή αποθήκευση βίντεο είναι ουσιαστικά διαφορετική λόγω της αρχιτεκτονικής δικτύου, καθώς

υπάρχει υψηλή ζήτηση για τις υπηρεσίες βίντεο και τα αιτήματα των χρηστών έχουν υψηλή ελαστικότητα ως προς την ποιότητα. Εδώ συνδράμει αποτελεσματικά η δικτύωση (SDN) όπου σχετίζεται με την αποτελεσματική αποθήκευση προσωρινής μνήμης και παράδοσης πολυμέσων σύμφωνα με τον χρήστη απαίτηση.

- **Βελτιστοποίηση ροής βίντεο (end to end):** Βασικές τεχνικές βελτιστοποίησης βίντεο αποτελούν η βηματοδότηση- trans-rating transcoding, προσαρμοστικές τεχνικές bitrate και το cloud οι οποίες εστιάζουν στην διανομή και διάθεση πόρων όπως χρόνο, ισχύ και φάσμα. Η βηματοδότηση που συνάγεται ως ρυθμός παρέχει μια έγκαιρη παράδοση μέσων, καθώς γίνεται για αποτελεσματική χρήση των ρυθμιστών αποφεύγοντας μεγάλα κομμάτια κυκλοφορίας. Η διαβαθμολόγηση σχετίζεται με ποσοτικοποίηση του περιεχομένου βίντεο που παρέχεται ως ροή εισόδου. Η διακωδικοποίηση σχετίζεται με την τυπική μορφή κωδικοποίησης / συμπίεσης και αποκωδικοποίησης / αποσυμπίεσης εξοικονομώντας έτσι εύρος ζώνης. Υπάρχουν πολλές λύσεις που βασίζονται στο σύννεφο διαθέσιμες για διακωδικοποίηση, όπως η λύση Sky-fire, η οποία αλλάζει την αρχιτεκτονική του δικτύου. Έτσι, η βελτιστοποίηση βίντεο γίνεται με τη μείωση της ανάλυσης διαφόρων τμημάτων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο DASH. Ωστόσο, τώρα οι τεχνολογίες έχουν ξεπεράσει τις παραδοσιακές μεθόδους. Τέλος η προσαρμοστική εγγυημένη μέθοδος bit rate (AGBR) είναι μια κοινή μέθοδος που εφαρμόζεται στους σταθμούς βάσης, για βελτιστοποίηση.

4.3 Πρότυπα κωδικοποίησης για ροή βίντεο μέσω δικτύων 5G

Στις μέρες μας παρατηρείται μεγάλη αύξηση των αλγορίθμων συμπίεσης λόγω της συνεχούς αύξησης του περιεχομένου βίντεο σε όλο και πιο υψηλές αναλύσεις. Γι' αυτό καθίσταται επιτακτική η ανάγκη εύρεσης τεχνολογιών συμπίεσης βίντεο που θα προσφέρουν ολοένα και πιο αποτελεσματικό περιεχόμενο βίντεο. Συνέπεια όλων αυτών είναι η εμφάνιση κωδικοποιητών βίντεο που αφορούν την μετάδοση βίντεο στα 5G δίκτυα. Συγκεκριμένα:

4.3.1 Πρότυπα κωδικοποίησης MPEG

- A. Advance video Coding (AVC).** Το πρότυπο AVC είναι το πιο διαδεδομένο πρότυπο κωδικοποίησης καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως τηλεδιάσκεψη, ροή βίντεο και βίντεο μετάδοση μέσω σταθερών και ασύρματων δικτύων με διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς μεταξύ άλλων, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να υποστηρίξει 4K ανάλυση, ενώ τα βίντεο 6K και 8K είναι προφανώς εκτός πεδίου εφαρμογής.
- B. High efficiency video coding (HEVC).** Το πρότυπο HEVC, ενώ δεν είναι ευρέως διαδεδομένο παρόλα αυτά προσδίδει καλύτερη απόδοση συμπίεσης με προβολή

βίντεο 4K και με περίπου λιγότερο από το μισό εύρος ζώνης και την ίδια ποιότητα βίντεο σε σχέση με τον προκάτοχό του. Οι αναλύσεις που υποστηρίζει είναι 6K και 8K, καθώς έχει περισσότερη ισχύ για κωδικοποίηση από το AVC, ενώ είναι άξιο αναφοράς ότι εάν ένας υπολογιστής μπορεί να χειριστεί το υπολογιστικό φορτίο, η επεξεργασία θα μπορούσε να γίνεται πολύ πιο γρήγορα και πιο ενεργειακά αποδοτικά.

- C. Versalite video coding (VVC).** Το πρότυπο VVC είναι η εξέλιξη HECV προσφέροντας περίπου το μισό εύρος ζώνης από αυτό, ενώ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε δίκτυα χαμηλού εύρους ζώνης όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Προσδίδει αναλύσεις από 4K έως 16K και έχει εφαρμογές όπως 360 μοιρών πολυκατευθυντικά καθηλωτικά πολυμέσα και High Βίντεο Δυναμικού Εύρους (HDR)
- D. Essential Video Coding (EVC).** Το πρότυπο EVC αποτελεί την εναλλακτική των AVC και HEVC, αλλά με παρόμοια απόδοση με το HEVC. Με πρωτοβουλία της MPEG ξεκίνησε για να παρέχει τυποποιημένη λύση κωδικοποίησης βίντεο προς αντιμετώπιση επιχειρηματικών αναγκών σε ορισμένες περιπτώσεις χρήσης, όπως ροή βίντεο, όπου τα υπάρχοντα πρότυπα κωδικοποίησης βίντεο ISO δεν ήταν όπως είθισται ευρέως διαδεδομένο.
- E. Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC).** Το πρότυπο LCEVC είναι ένα πρόσθετο πρότυπο με τον υπάρχοντα κωδικοποιητή που βελτιώνει την συνολική του απόδοση. Ο στόχος του είναι να αναπτύξει μια δομή ροής δεδομένων με 2 ροές ένα βασικό ρεύμα που μπορεί να αποκωδικοποιηθεί από έναν αποκωδικοποιητή υλικού και μια ροή βελτίωσης κατάλληλη για επεξεργασία λογισμικού υλοποίηση με βιώσιμη κατανάλωση ενέργειας το οποίο προσφέρει δυνατότητες επέκτασης συμπίεσης σε υπάρχοντες αποκωδικοποιητές ενώ ταυτόχρονα προσδίδει χαμηλή απόδοση.

4.3.2 Πρότυπα Κωδικοποίησης AOMEDIA

Το 2010 το WebM Project κυκλοφόρησε το VP8 ως τελευταίας τεχνολογίας κωδικοποιητής βίντεο χωρίς δικαιώματα, ενώ 3 χρόνια αργότερα το VP8 και VP9 κυκλοφόρησαν ως εναλλακτική λύση του HEVC με το VP9 να έχει ικανοποιητική απόδοση. Το 2018 κυκλοφόρησε το AOMEDIA τον κωδικοποιητή AOMEDIA VIDEO1 με προοπτική να κυκλοφορεί καινούργιους κωδικοποιητές κάθε 5 χρόνια, έτσι το έτος 2023 κυκλοφόρησε και το AV2.

Το **VP9** χρησιμοποιείται πλέον στην πλατφόρμα βίντεο της Google στο YouTube και εξυπηρετεί δισεκατομμύρια προβολές κάθε μέρα. Το VP9 υποστηρίζει HDR βίντεο και επιτρέπει τη συμπίεση χωρίς απώλειες. Επιπλέον, η ροή bit VP9 είναι ανθεκτική σε σφάλματα και η διαδικασία αποκωδικοποίησης μπορεί διεξάγεται σε παράλληλη λειτουργία. Ο κωδικοποιητής VP9 έχει ρυθμό δύο περασμάτων- επιλογή κωδικοποίησης ελέγχου, η οποία οδηγεί σε βελτιωμένο ρυθμό απόδοσης

παραμόρφωσης δίνοντας την δυνατότητα στο VP9, καθώς και στον απόγονό του AV1 τον έλεγχο ρυθμού πολλαπλών διελεύσεων υπόθεση δοκιμής.

Το **AV1** είναι μια ανοιχτή μορφή κωδικοποίησης βίντεο χωρίς δικαιώματα σχεδιασμένο για μετάδοση βίντεο μέσω Διαδικτύου και θεωρείται ο διάδοχος του VP9. Στόχος του είναι να συνδυάζει την τεχνολογία και την τεχνογνωσία των μελών του για να αναπτύξει μορφή βίντεο χωρίς δικαιώματα με υψηλή απόδοση συμπίεσης και κατάλληλο για χρήση σε προγράμματα περιήγησης και στο διαδίκτυο.

4.4 Αξιολόγηση QoE κωδικοποιητών για ροή βίντεο μέσω δικτύων 5G

Στα πλαίσια ενός τεστ για βίντεο με χρήση πειραμάτων που έγιναν υπό κοινές συνθήκες δοκιμής JVET και με τον ανοιχτό πάγκο δοκιμών της AOMEDIA AWCY σχετικά με το λογισμικό των προτύπων αξιολόγησης νέων εργαλείων κωδικοποίησης με υλοποίηση στο αντίστοιχο πρότυπο προέκυψαν κάποια συμπεράσματα. Αρχικά για την αξιολόγηση αποτελεσματικότητας κωδικοποίησης έγιναν μετρήσεις στο QoE, PSNR (PEAK SIGNAL NOISE RATIO). Σχετικά με τις BR τιμές όλες αποκαλύπτουν τιμές, μέση εξοικονόμηση bitrate για τον ίδιο στόχο ποιότητας για πολλαπλά σημεία. Αυτό σημαίνει ότι αρνητικό BD-Rate χρησιμοποιώντας λιγότερα Bit επιτυγχάνεται η ίδια ποιότητα. Ενώ συγκρίνοντας το VVC με το AVC και HEVC κάτω από τις κοινές συνθήκες δοκιμής JVET ότι έχουν απόδοση σε υψηλές αναλύσεις όπως 1080P και 4K για την υποστήριξη των οποίων έχουν αναπτυχθεί οι πρόσφατοι αλγόριθμοι κωδικοποίησης. Το VVC εμφανίζει μέση εξοικονόμηση ρυθμού bit που φτάνει το 65% έναντι AVC και στις δύο κατηγορίες, ενώ έχει καλύτερη απόδοση έναντι του HEVC.

Ο στόχος του πρόσφατα αναπτυγμένου κωδικοποιητή βίντεο EVC είναι να αντικαταστήσει τα AVC και HEVC διατηρώντας τα θετικά στοιχεία του κάθε αλγόριθμου και εξαλείφοντας τα μειονεκτήματά τους. Το EVC έχει σχετικά καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους προηγούμενους κωδικοποιητές τόσο σε FHD όσο και σε Ανάλυση UHD. Σε ανάλυση 4K το EVC φτάνει το 38% λιγότερο bitrate από το AVC και σχεδόν 30% λιγότερο από το HEVC. Το VVC έχει καλύτερη απόδοση από αυτό, ενώ χρησιμοποιεί πολύπλοκους αλγόριθμους για να επιτύχει τόση συμπίεση όσο δυνατόν και αναμένεται ότι θα είναι ο διάδοχος της HEVC.

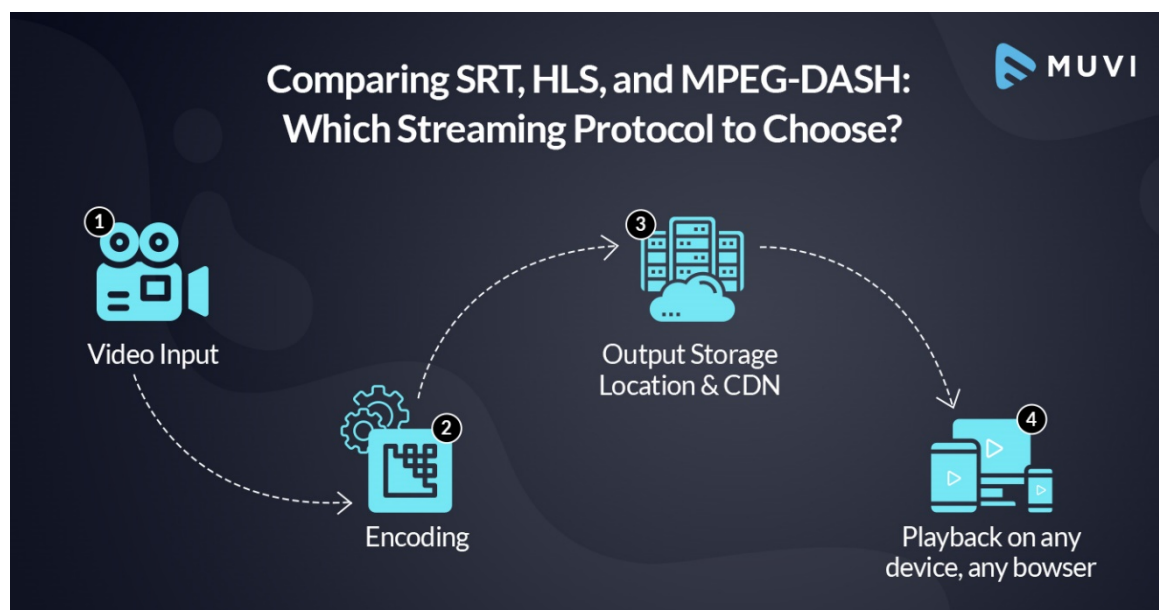
Το LCEVC με κύριο πεδίο εφαρμογής του να είναι η μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του αλγόριθμου κωδικοποίησης, η μείωση του bitrate με την μέση εξοικονόμηση εύρους ζώνης να είναι 45%,34% και περισσότερο από 16% αντίστοιχα σε σύγκριση με AVC, HEVC και VVC. Η διαφορά της απόδοσης κωδικοποίησης μεταξύ VP9 και AV1 που αντιπροσωπεύεται από το BD-Rate, χρησιμοποιώντας τον ανοιχτό πάγκο δοκιμών AWCY της AOMedia, προκύπτει ότι το AV1 ξεπερνά ουσιαστικά το VP9 σχεδόν σε κέρδος κωδικοποίησης 30%, όταν ο κύριος παράγοντας ποιότητας PSNR-Y θεωρείται ότι είναι σε ανάλυση HD και UHD. Ολοκληρώνοντας συγκρίνονται το VVC της MPEG με

το AV1 της AOM γίνεται κατανοητό ότι το VVC είχε απόδοση σχεδόν 23% καλύτερη από το AV1 για HD αλληλουχίες και 34% για τις αλληλουχίες UHD.

4.5 Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH)

Το project 3GPP έχει προσφέρει πολλά πρωτόκολλα για παράδοση περιεχομένου πολυμέσων με κωδικοποίηση MPEG, όπως το MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP). Το MPEG DASH τυποποιήθηκε από το 3GPP ως πρότυπο προσαρμοστικής ροής βίντεο το 2012 από την επιτροπή ISO/IEC. Το πρότυπο ορίζει κατευθυντήριες γραμμές για την παρουσίαση μέσων και μια συλλογή τυπικών μορφών XML, ενώ δεν έχει πελάτη που προσαρμόζει τεχνικές προσαρμογής και ρυθμού. Το DASH εφαρμόζει τις δικές του τεχνικές εκπροσώπησης μέσων ενημέρωσης και προσαρμογής πελάτη. Πρόκειται για ένα πρότυπο υπηρεσίας μετάδοσης συνεχούς ροής βίντεο που προσφέρει δυναμικές συνθήκες δικτύου και ετερογενείς συσκευές, με τη βοήθεια του αλγορίθμου Adaptive Bitrate (ABR) 1 στο επίπεδο εφαρμογής, με κύριο στόχο την αποτροπή του buffer under-run, μεγιστοποιώντας την αντιληπτή ποιότητα εμπειρίας του πελάτη.

Το Dash Industry Forum είναι το πρότυπο που (DASHIF) περιέχει κορυφαίες εταιρίες ροής εξειδικευμένες σε έρευνα σύγχρονων τεχνολογιών προσαρμοστικής ροής. Επιπλέον παρέχει συγκεκριμένες οδηγίες εφαρμογής, πρόγραμμα αναπαραγωγής βίντεο που βασίζεται στο WEB/HTML για δοκιμές και έρευνα. Τέλος μεταγλωττίζει μια αναλυτική λίστα δημοσίων διαθέσιμων συνόλων δεδομένων δοκιμής που εμπεριέχεται σε αυτό το πρότυπο, βίντεο που περιλαμβάνει τους παίκτες/πελάτες και λογισμικό για προετοιμασία περιεχομένου και επικύρωσης.



Εικόνα 14. Σύγκριση Πρωτοκόλλων μετάδοσης ροής βίντεο με το MPEG-DASH

Πηγή: <https://www.muvi.com/blogs/srt-hls-and-dash-streaming-protocol/>

Τα παρακάτω πλεονεκτήματα-οφέλη χρήσης του DASH είναι σημαντικά, καθώς επιτρέπουν στους παρόχους υπηρεσιών να αξιοποιήσουν υπάρχουσες, αλλά και ταυτόχρονα φθηνότερες υποδομές ATTP. Έτσι με το DASH

- Οι πελάτες χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο HTTP που μπορεί να βρεθεί παντού, ενώ η κίνηση HTTP μπορεί να διασχίσει NAT και τείχη προστασίας.
- Οι διακομιστές DASH μειώνουν δυναμικά το λειτουργικό κόστος, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την ανάπτυξη κρυφής μνήμης που βοηθά στην βελτίωση της απόδοσης και μειώνει το φόρτο του δικαίου.
- Ο πελάτης ζητά κάθε κομμάτι βίντεο ανεξάρτητα από την κατάσταση λειτουργίας αναπαραγωγής, οπότε οι διακομιστές πρέπει να παρακολουθούν την κατάσταση της συνεδρίας που σημαίνει που οι πελάτες μπορούν να ανακτήσουν κομμάτια βίντεο από πολλαπλούς διακομιστές.
- Το HTTP πρωτόκολλο με την αξιοπιστία και τη φιλικότητα μεταξύ των ροών βελτιώνει την πιθανότητα κατανάλωσης ροής και προσφέρει ένα δίκαιο κλάσμα εύρους ζώνης του δικτύου όταν γίνεται κοινή της χρήσης, αλλά με άλλη επισκεψιμότητα.

4.5.1 Αλγόριθμος Προσαρμογής F-DASH

Στα πλαίσια του αλγορίθμου προσαρμογής ου χρησιμοποιεί το M-PEG DASH με στόχο την προσαρμογή του ρυθμού bit μέσω που προσδίδει στον πελάτη τις τρέχουσες συνθήκες δικτύου δημιουργήθηκε το F-DASH. Πρόκειται για ένα σύστημα προσαρμογής υπεύθυνο για τον έλεγχο του χρόνου προσωρινής αποθήκευσης και ανάλυσης βίντεο που προσδίδεται στον πελάτη έτσι ώστε να τον διανεμηθούν βίντεο καλύτερης ποιότητας και απρόσκοπτης αναπαραγωγής βίντεο χωρίς συχνές αλλαγές ανάλυσης βίντεο.

Υποθέτουμε ότι μια ροή βίντεο αποτελείται από n τμήματα διάρκειας t διαθέσιμα στον διακομιστή. Κάθε τμήμα αναλογεί σε πολλαπλές αναλύσεις, ενώ η απόδοση του τμήματος i που εκτιμάται στον πελάτη έχει τύπο $r_i = (b_i * t) / (d_i - r_i)$ όπου d_i, r_i ρυθμός μετάδοσης bit. Κάθε πελάτης ζητά να καθοριστεί το επόμενο τμήμα ανάλυσης βίντεο μέσω FLC. Η έξοδος (F) είναι ο παράγοντας που αναφέρεται στον ρυθμό bit και τελικά στην ανάλυση του επόμενου τμήματος bit1. Έτσι έχουμε τον τύπο $bit1 = F * rd$, όπου rd είναι η διαθέσιμη παροχή σύνδεσης που ορίζεται ως η μέση απόδοση του τελευταίου τμήματος k και σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο d .

Έτσι προκύπτει $rd = 1/k * k$ για $i=1$ r_i .

Σημειωτέων ότι το $bit1$ είναι υψηλότερο στην διαθέσιμη ανάλυση b_n και χαμηλότερο από $bit1$. Έτσι για να αποφευχθούν οι περιττές διακυμάνσεις του ρυθμού bit έχουμε τις εξής περιπτώσεις :

- Αν $b_n > b_i$ με ρυθμό μετάδοσης $bit1$ το buffer είναι μικρότερο από T (περίοδο) για τα επόμενα 60sec.

- Αν $b_n < b_i$ με παλιό ρυθμό bit που παράγει επίπεδο προσωρινής μνήμης για τα επόμενα 60sec και μεγαλύτερη από περίοδο (T), τότε ο ρυθμός παραμένει αμετάβλητος.
- Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση προκύπτει ότι ο ρυθμός bit ορίζεται σε b_n .

5. Πειραματικό Μέρος

5.1 Υλοποίηση Πειραματικών Δοκιμών

Το πρώτο βήμα για την υλοποίηση του πειραματικού μέρους της εργασίας ήταν η εγκατάσταση virtual machine με το λογισμικό **ns-3** με δικαιώματα admin.

Αυτό έγινε με την εντολή `usermod -aG sudo 'username'`.

Το δεύτερο βήμα ήταν η που έκανα ήταν η εγκατάσταση του `gitclient` με την εντολή `sudo apt install git`. Δημιούργησα ένα directory repos με την εντολή `mkdir` κάναμε `cd` για να μπούμε στο directory και στη συνέχεια ακολούθησα τις οδηγίες που από το github (<https://github.com/divergad/dash.git>)

Έπειτα εκτελέστηκε η εντολή `sudo apt install cmake`. Όταν εγκαταστάθηκε το `cmake` μπορέσαμε και τρέξαμε την εντολή: `./ns3 configure --enable-examples`.

Τέλος εκτελέστηκε η εντολή:

```
./ns3 run 'dash-example --users=3 --algorithms=ns3::FdashClient --linkRate=1000Kbps -  
-bufferSpace=1000000'
```

Μετά την εκτέλεση της εντολής `./ns3 run dash-example` έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

```
Activities Terminal 18 nov 12:32
stevethebeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39
stevethebeast@Ubuntu:~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$ ./ns3 run dash-example
0.515392 Node: 0 newBitRate: 178000 oldBitRate: 45000 estBitRate: 429982 interTime: 0 T: 1.46461 dT: 0 del: 0
1.36034 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 178000 estBitRate: 438637 interTime: 0 T: 3.904 dT: 2.43939 del: 0
2.38707 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 442108 interTime: 0 T: 4.87726 dT: 0.973264 del: 0
3.44982 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 443767 interTime: 0 T: 5.81451 dT: 0.937248 del: 0
4.39614 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 444688 interTime: 0 T: 6.86819 dT: 1.05368 del: 0
5.40083 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 445372 interTime: 0 T: 7.8635 dT: 0.995312 del: 0
6.39392 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 445837 interTime: 0 T: 8.87042 dT: 1.00691 del: 0
7.4493 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 446207 interTime: 0 T: 9.81504 dT: 0.944624 del: 0
8.5137 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 446543 interTime: 0 T: 10.7506 dT: 0.9356 del: 0
9.46398 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 446702 interTime: 0 T: 11.8004 dT: 1.04971 del: 0
10.4592 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 446848 interTime: 0 T: 12.8051 dT: 1.00474 del: 0
11.5766 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448355 interTime: 0 T: 13.6877 dT: 0.882656 del: 0
12.6604 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448344 interTime: 0 T: 14.604 dT: 0.916208 del: 0
13.7532 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448366 interTime: 0 T: 15.5111 dT: 0.907136 del: 0
14.7478 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448400 interTime: 0 T: 16.5165 dT: 1.00544 del: 0
15.7629 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448410 interTime: 0 T: 17.5014 dT: 0.984912 del: 0
16.8456 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448476 interTime: 0 T: 18.4188 dT: 0.917312 del: 0
17.9134 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448495 interTime: 0 T: 19.351 dT: 0.932224 del: 0
18.9573 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448436 interTime: 0 T: 20.3071 dT: 0.95608 del: 0
20.0796 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448538 interTime: 0 T: 21.1848 dT: 0.877728 del: 0
21.061 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448554 interTime: 0 T: 22.2033 dT: 1.01854 del: 0
22.0989 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448923 interTime: 0 T: 23.1654 dT: 0.96208 del: 0
23.1568 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448961 interTime: 0 T: 24.1075 dT: 0.942112 del: 0
24.0537 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448906 interTime: 0 T: 25.2106 dT: 1.1031 del: 0
25.1811 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448935 interTime: 0 T: 26.0832 dT: 0.872608 del: 0
26.2993 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448771 interTime: 0 T: 26.965 dT: 0.881792 del: 0
27.329 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448719 interTime: 0 T: 27.9353 dT: 0.970304 del: 0
28.3643 Node: 0 newBitRate: 221000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448685 interTime: 0 T: 28.9 dT: 0.964672 del: 0
29.4159 Node: 0 newBitRate: 263000 oldBitRate: 221000 estBitRate: 448722 interTime: 0 T: 29.8485 dT: 0.948464 del: 0
30.6102 Node: 0 newBitRate: 263000 oldBitRate: 263000 estBitRate: 448775 interTime: 0 T: 30.6542 dT: 0.805696 del: 0
31.9314 Node: 0 newBitRate: 263000 oldBitRate: 263000 estBitRate: 444371 interTime: 0 T: 31.3329 dT: 0.678752 del: 0
33.2711 Node: 0 newBitRate: 263000 oldBitRate: 263000 estBitRate: 442347 interTime: 0 T: 31.9933 dT: 0.660352 del: 0
34.5188 Node: 0 newBitRate: 334000 oldBitRate: 263000 estBitRate: 442536 interTime: 0 T: 32.7455 dT: 0.752272 del: 0
36.0741 Node: 0 newBitRate: 334000 oldBitRate: 334000 estBitRate: 442737 interTime: 0 T: 33.1902 dT: 0.444704 del: 0
37.5209 Node: 0 newBitRate: 334000 oldBitRate: 334000 estBitRate: 442377 interTime: 0 T: 33.7435 dT: 0.553216 del: 0
39.0283 Node: 0 newBitRate: 334000 oldBitRate: 334000 estBitRate: 442596 interTime: 0 T: 34.2361 dT: 0.492608 del: 0
40.984 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 334000 estBitRate: 432124 interTime: 0 T: 34.3603 dT: 0.124256 del: 0
42.6304 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 436912 interTime: 0 T: 34.6339 dT: 0.273616 del: 0
45.1479 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 422079 interTime: 0 T: 34.1164 dT: -0.517536 del: 0
47.0096 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 417845 interTime: 0 T: 34.2547 dT: 0.138288 del: 0
48.8992 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 418029 interTime: 0 T: 34.3651 dT: 0.110432 del: 0
50.5388 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 418125 interTime: 0 T: 34.7255 dT: 0.3604 del: 0
52.4581 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 429551 interTime: 0 T: 34.8062 dT: 0.080688 del: 0
54.6764 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 418989 interTime: 0 T: 34.588 dT: -0.21824 del: 0
56.641 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 429271 interTime: 0 T: 34.6233 dT: 0.03536 del: 0
58.5564 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 422387 interTime: 0 T: 34.708 dT: 0.084624 del: 0
60.5135 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 418956 interTime: 0 T: 34.7508 dT: 0.042896 del: 0
62.2654 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 418986 interTime: 0 T: 34.999 dT: 0.248112 del: 0
64.0944 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 418980 interTime: 0 T: 35.17 dT: 0.171024 del: 0
65.8271 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 431739 interTime: 0 T: 35.4373 dT: 0.26728 del: 0
67.9775 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 422771 interTime: 0 T: 35.2868 dT: -0.150416 del: 0
69.8594 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 433844 interTime: 0 T: 35.4049 dT: 0.118064 del: 0
72.0987 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 421996 interTime: 0 T: 35.1656 dT: -0.239312 del: 0
74.1235 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 413796 interTime: 0 T: 35.1409 dT: -0.02472 del: 0
75.8938 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 413760 interTime: 0 T: 35.3706 dT: 0.229696 del: 0
77.7155 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 420027 interTime: 0 T: 35.5488 dT: 0.178224 del: 0
79.5337 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 433863 interTime: 0 T: 35.7306 dT: 0.18184 del: 0
81.8718 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 419395 interTime: 0 T: 35.3925 dT: -0.338112 del: 0
83.8232 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 433861 interTime: 0 T: 35.4412 dT: 0.048624 del: 0
86.1662 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 413891 interTime: 0 T: 35.0981 dT: -0.34304 del: 0
88.0411 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 413576 interTime: 0 T: 35.2232 dT: 0.125136 del: 0
89.7812 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 413584 interTime: 0 T: 35.4831 dT: 0.259856 del: 0
91.6776 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 419858 interTime: 0 T: 35.5867 dT: 0.103584 del: 0
93.4824 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 434428 interTime: 0 T: 35.7819 dT: 0.1952 del: 0
95.5281 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 434327 interTime: 0 T: 35.7362 dT: -0.045648 del: 0
97.2424 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 450059 interTime: 0 T: 36.0219 dT: 0.285696 del: 0
99.2231 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 441695 interTime: 0 T: 36.0412 dT: 0.019296 del: 0
ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 272945 minRate: 178000 AvgDt: 36.0562 changes: 5
stevethebeast@Ubuntu:~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$
```

Εικόνα 15. dash-example command

Μετά την εκτέλεση της εντολής `./ns3 run dash-wifi` έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

```

ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 272945 minRate: 178000 AvgDt: 36.0562 changes: 5
stevehbeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$ ./ns3 run dash-wifi
nWifi= 8
0.320737 Node: 0 newBitRate: 2134000 oldBitRate: 45000 estBitRate: 4.89095e+06 interTime: 0 T: 1.65926 dT: 0 del: 0
0.4842 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 2134000 estBitRate: 1.59176e+07 interTime: 0 T: 3.4958 dT: 1.83654 del: 0
0.741342 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 2.18663e+07 interTime: 0 T: 5.23866 dT: 1.74286 del: 0
1.30267 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 2.49014e+07 interTime: 0 T: 6.67733 dT: 1.43867 del: 0
1.82862 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 2.70961e+07 interTime: 0 T: 9.46368 dT: 2.78636 del: 0
2.39489 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 2.81437e+07 interTime: 0 T: 10.8974 dT: 1.43373 del: 0
2.96044 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 2.89521e+07 interTime: 0 T: 12.3319 dT: 1.43445 del: 0
3.57229 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 2.97217e+07 interTime: 0 T: 13.72 dT: 1.38815 del: 0
4.47649 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 3.01723e+07 interTime: 0 T: 14.8158 dT: 1.09581 del: 0
5.3265 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 3.06585e+07 interTime: 0 T: 15.9658 dT: 1.14998 del: 0
6.17462 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 3.10791e+07 interTime: 0 T: 17.1177 dT: 1.15189 del: 0
6.9332 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 3.15188e+07 interTime: 0 T: 18.3591 dT: 1.24141 del: 0
8.1759 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 3.11461e+07 interTime: 0 T: 19.1164 dT: 0.757303 del: 0
11.0123 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 3.17616e+07 interTime: 0 T: 18.28 dT: -0.836402 del: 0
14.0323 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 2.66832e+07 interTime: 0 T: 17.26 dT: -1.02 del: 0
17.4323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 1.40377e+07 interTime: 0 T: 15.86 dT: -1.4 del: 0
17.9323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.46774e+07 interTime: 0 T: 17.36 dT: 1.5 del: 0
18.5923 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.1996e+07 interTime: 0 T: 18.7 dT: 1.34 del: 0
19.0523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.29142e+07 interTime: 0 T: 20.24 dT: 1.54 del: 0
19.5923 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.32419e+07 interTime: 0 T: 21.7 dT: 1.46 del: 0
20.1723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.3533e+07 interTime: 0 T: 23.12 dT: 1.42 del: 0
20.7923 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.36322e+07 interTime: 0 T: 24.5 dT: 1.38 del: 0
21.2523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.42751e+07 interTime: 0 T: 26.04 dT: 1.54 del: 0
21.8523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.42226e+07 interTime: 0 T: 27.44 dT: 1.4 del: 0
22.4123 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.43025e+07 interTime: 0 T: 28.88 dT: 1.44 del: 0
22.9523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.43397e+07 interTime: 0 T: 30.34 dT: 1.46 del: 0
23.5723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.43444e+07 interTime: 0 T: 31.72 dT: 1.38 del: 0
24.2123 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.45531e+07 interTime: 0 T: 33.08 dT: 1.36 del: 0
24.7723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.46001e+07 interTime: 0 T: 34.52 dT: 1.44 del: 0
25.4723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.45107e+07 interTime: 0 T: 35.82 dT: 1.3 del: 0
26.0123 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 1.45835e+07 interTime: 0 T: 37.28 dT: 1.46 del: 0
27.0923 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.4708e+07 interTime: 0 T: 38.2 dT: 0.92 del: 0
28.3323 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.48918e+07 interTime: 0 T: 38.96 dT: 0.76 del: 0
29.7123 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.46914e+07 interTime: 0 T: 39.58 dT: 0.62 del: 0
31.1323 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.46083e+07 interTime: 0 T: 40.16 dT: 0.58 del: 0
32.3523 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.46312e+07 interTime: 0 T: 40.94 dT: 0.78 del: 0
33.2923 Node: 0 newBitRate: 15000000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.49722e+07 interTime: 0 T: 42 dT: 1.06 del: 0
40.5523 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 15000000 estBitRate: 1.3177e+07 interTime: 0 T: 36.74 dT: -5.26 del: 0
44.5523 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 4.33645e+06 interTime: 0 T: 34.74 dT: -2 del: 0
46.3723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.29441e+06 interTime: 0 T: 34.92 dT: 0.18 del: 0
48.5523 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 4.19448e+06 interTime: 0 T: 34.74 dT: -0.18 del: 0
50.2523 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.19339e+06 interTime: 0 T: 35.04 dT: 0.3 del: 0
52.2723 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.20593e+06 interTime: 0 T: 35.02 dT: -0.02 del: 0
54.2323 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.17756e+06 interTime: 0 T: 35.06 dT: 0.04 del: 0
56.0523 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.16716e+06 interTime: 0 T: 35.24 dT: 0.18 del: 0
57.9123 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.11627e+06 interTime: 0 T: 35.38 dT: 0.14 del: 0
59.7323 Node: 0 newBitRate: 3840000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.19147e+06 interTime: 0 T: 35.56 dT: 0.18 del: 0
61.5923 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 3840000 estBitRate: 4.22633e+06 interTime: 0 T: 35.7 dT: 0.14 del: 0
63.4723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 4.30653e+06 interTime: 0 T: 35.82 dT: 0.12 del: 0
64.4523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 5.09418e+06 interTime: 0 T: 36.84 dT: 1.02 del: 0
65.3323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 5.73749e+06 interTime: 0 T: 37.96 dT: 1.12 del: 0
66.3123 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 6.41026e+06 interTime: 0 T: 38.98 dT: 1.02 del: 0
67.1523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 6.77456e+06 interTime: 0 T: 40.14 dT: 1.16 del: 0
68.0523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 7.3902e+06 interTime: 0 T: 41.24 dT: 1.1 del: 0
68.9323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 7.65671e+06 interTime: 0 T: 42.36 dT: 1.12 del: 0
69.7323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 7.92377e+06 interTime: 0 T: 43.56 dT: 1.2 del: 0
70.5723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 8.43767e+06 interTime: 0 T: 44.72 dT: 1.16 del: 0
71.3323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 8.63898e+06 interTime: 0 T: 45.96 dT: 1.24 del: 0
72.2523 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 9.09152e+06 interTime: 0 T: 47.04 dT: 1.08 del: 0
74.4123 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 9.4842e+06 interTime: 0 T: 46.88 dT: -0.16 del: 0
75.9523 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 9.756e+06 interTime: 0 T: 47.34 dT: 0.46 del: 0
77.1923 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.04364e+07 interTime: 0 T: 48.1 dT: 0.76 del: 0
78.9123 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 1.0522e+07 interTime: 0 T: 48.38 dT: 0.28 del: 0
83.1523 Node: 0 newBitRate: 9500000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 9.90099e+06 interTime: 0 T: 46.14 dT: -2.24 del: 0
87.8723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 9500000 estBitRate: 6.00408e+06 interTime: 0 T: 43.42 dT: -2.72 del: 0
89.8523 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 4.11452e+06 interTime: 0 T: 43.44 dT: 0.02 del: 0
92.2323 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 4.008e+06 interTime: 0 T: 43.06 dT: -0.38 del: 0
94.1923 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 3.88483e+06 interTime: 0 T: 43.1 dT: 0.04 del: 0
96.3723 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 3.89275e+06 interTime: 0 T: 42.92 dT: -0.18 del: 0
98.3923 Node: 0 newBitRate: 4220000 oldBitRate: 4220000 estBitRate: 3.98188e+06 interTime: 0 T: 42.9 dT: -0.02 del: 0
ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 7.28138e+06 minRate: 2134000 AvgDt: 44.395 changes: 14
stevehbeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$
    
```

Εικόνα 16. dash-wifi command

Μετά την εκτέλεση της εντολής `./ns3 run lena-dash` έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

```

Activities Terminal 18 nov 12:41
stevethbeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39
ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 7.28138e+06 minRate: 2134000 AvgDt: 44.395 changes: 14
stevethbeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$ ./ns3 run lena-dash
nMacroEnbSitesY = 2
allocated non overlapping block 468.548|588.548|470.745|540.745|0|0
nHomeEnbs = 4
nHomeUes = 4
nMacroUes = 19 (density=2e-05)
enabling EPC
node=0x555fdf146f260, mob=0x555fdf14884b0
node=0x555fdf146f330, mob=0x555fdf1489b10
node=0x555fdf146f450, mob=0x555fdf1489b70
node=0x555fdf146f570, mob=0x555fdf1489bd0
node=0x555fdf146f6a0, mob=0x555fdf1489c30
node=0x555fdf146f850, mob=0x555fdf1489c90
node=0x555fdf146f940, mob=0x555fdf1489cf0
node=0x555fdf146fa60, mob=0x555fdf1489d50
node=0x555fdf146fb80, mob=0x555fdf1489db0
node=0x555fdf1381350, mob=0x555fdf15b9080
node=0x555fdf13b55f0, mob=0x555fdf15bc1e0
node=0x555fdf146f000, mob=0x555fdf15bc240
node=0x555fdf146f130, mob=0x555fdf15bc450
node=0x555fdf146fd30, mob=0x555fdf15e9d50
node=0x555fdf146fe50, mob=0x555fdf15bbbd0
node=0x555fdf146ff90, mob=0x555fdf15bbc30
node=0x555fdf14700b0, mob=0x555fdf15bbe0
randomly allocating macro UEs in -250|750|-250|683.013|1.5|1.5 speedMin 0 speedMax 0
node=0x555fdf146f730, mob=0x555fdf15fae80
node=0x555fdf1470270, mob=0x555fdf15f6f60
node=0x555fdf14703b0, mob=0x555fdf15fb4d0
node=0x555fdf14704d0, mob=0x555fdf15fb530
node=0x555fdf1470600, mob=0x555fdf15fb590
node=0x555fdf1470720, mob=0x555fdf15fb5f0
node=0x555fdf1470810, mob=0x555fdf15fb650
node=0x555fdf1470930, mob=0x555fdf15fb6b0
node=0x555fdf1470a50, mob=0x555fdf15fb710
node=0x555fdf1470c00, mob=0x555fdf15fb770
node=0x555fdf1470d20, mob=0x555fdf15fb7d0
node=0x555fdf1470e40, mob=0x555fdf15fb830
node=0x555fdf1470f60, mob=0x555fdf15fb890
node=0x555fdf1471080, mob=0x555fdf15fb8f0

Activities Terminal 18 nov 12:57
stevethbeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39
24.302 Node: 11 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 1.34282e+06 interTime: 0 T: 27.861 dT: 1.013 del: 0
24.311 Node: 17 newBitRate: 396000 oldBitRate: 334000 estBitRate: 807977 interTime: 0 T: 21.876 dT: 1.245 del: 0
24.34 Node: 15 newBitRate: 1033000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.57608e+06 interTime: 0 T: 33.834 dT: 1.121 del: 0
24.345 Node: 2 newBitRate: 1033000 oldBitRate: 1033000 estBitRate: 1.81768e+06 interTime: 0 T: 31.807 dT: 0.877 del: 0
24.367 Node: 13 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 1.18998e+06 interTime: 0 T: 25.802 dT: 0.967 del: 0
24.406 Node: 16 newBitRate: 791000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 1.41885e+06 interTime: 0 T: 31.749 dT: 1.145 del: 0
24.438 Node: 9 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 1.3044e+06 interTime: 0 T: 27.736 dT: 1.061 del: 0
24.463 Node: 8 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.49346e+06 interTime: 0 T: 23.71 dT: 1.027 del: 0
24.68 Node: 12 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 1.23465e+06 interTime: 0 T: 27.49 dT: 1.014 del: 0
24.817 Node: 3 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.59453e+06 interTime: 0 T: 29.349 dT: 0.901 del: 0
24.821 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.70712e+06 interTime: 0 T: 27.345 dT: 1.061 del: 0
24.824 Node: 4 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 1.18643e+06 interTime: 0 T: 29.354 dT: 1.036 del: 0
24.896 Node: 18 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.5129e+06 interTime: 0 T: 23.284 dT: 0.831 del: 0
24.942 Node: 19 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.6296e+06 interTime: 0 T: 25.217 dT: 0.936 del: 0
24.978 Node: 10 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 1.66772e+06 interTime: 0 T: 27.188 dT: 0.929 del: 0
24.99 Node: 1 newBitRate: 1245000 oldBitRate: 1033000 estBitRate: 1.65725e+06 interTime: 0 T: 33.163 dT: 0.784 del: 0
ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 700510 minRate: 595000 AvgDt: 33.6216 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 1 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 363810 minRate: 45000 AvgDt: 47.9385 changes: 8
ns3::FdashClient-Node: 2 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 542217 minRate: 595000 AvgDt: 43.3688 changes: 3
ns3::FdashClient-Node: 3 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 542166 minRate: 595000 AvgDt: 37.9719 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 4 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 379349 minRate: 396000 AvgDt: 38.6807 changes: 3
ns3::FdashClient-Node: 5 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 535154 minRate: 522000 AvgDt: 36.802 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 6 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: -nan minRate: 100000000 AvgDt: -nan changes: 0
ns3::FdashClient-Node: 7 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 237635 minRate: 131000 AvgDt: 6.40186 changes: 3
ns3::FdashClient-Node: 8 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 693498 minRate: 522000 AvgDt: 28.5277 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 9 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 528141 minRate: 522000 AvgDt: 35.1251 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 10 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 700510 minRate: 595000 AvgDt: 33.0914 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 11 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 479054 minRate: 522000 AvgDt: 35.979 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 12 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 535154 minRate: 522000 AvgDt: 34.7366 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 13 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 439867 minRate: 396000 AvgDt: 32.6563 changes: 3
ns3::FdashClient-Node: 14 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 542217 minRate: 595000 AvgDt: 39.3915 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 15 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 542166 minRate: 595000 AvgDt: 46.8285 changes: 3
ns3::FdashClient-Node: 16 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 490010 minRate: 396000 AvgDt: 43.2537 changes: 4
ns3::FdashClient-Node: 17 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 305423 minRate: 221000 AvgDt: 20.4925 changes: 6
ns3::FdashClient-Node: 18 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 681394 minRate: 396000 AvgDt: 26.9612 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 19 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 681787 minRate: 595000 AvgDt: 29.5329 changes: 2
ns3::FdashClient-Node: 20 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 45000 minRate: 45000 AvgDt: 4.91042 changes: 0
ns3::FdashClient-Node: 21 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 362250 minRate: 396000 AvgDt: 31.4171 changes: 1
ns3::FdashClient-Node: 22 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 404030 minRate: 45000 AvgDt: 45.6362 changes: 6
stevethbeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$
    
```

Εικόνα 17.lena-dash command

Μετά την εκτέλεση της εντολής `./ns3 run link-example` έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

```

stevebeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39
ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 1.16109e+06 minRate: 396000 AvgDt: 46.6087 changes: 13
stevebeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.39$ ./ns3 run link-example
0.392696 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 45000 estBitRate: 827333 interTime: 0 T: 1.5873 dT: 0 del: 0
1.29764 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 862189 interTime: 0 T: 3.95953 dT: 2.37222 del: 0
2.1983 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 873805 interTime: 0 T: 5.05887 dT: 1.09934 del: 0
3.13077 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 879796 interTime: 0 T: 6.1264 dT: 1.06753 del: 0
3.95702 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 883062 interTime: 0 T: 7.30015 dT: 1.17375 del: 0
4.83684 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 885394 interTime: 0 T: 8.42033 dT: 1.12018 del: 0
5.70548 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 887083 interTime: 0 T: 9.55169 dT: 1.13136 del: 0
6.81074 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 870181 interTime: 0 T: 10.4464 dT: 0.894736 del: 0
7.79063 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 868679 interTime: 0 T: 11.4665 dT: 1.02011 del: 0
8.62014 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 871413 interTime: 0 T: 12.637 dT: 1.17049 del: 0
9.61838 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 863287 interTime: 0 T: 13.6388 dT: 1.00177 del: 0
10.6443 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865641 interTime: 0 T: 14.6129 dT: 0.974072 del: 0
11.5963 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865732 interTime: 0 T: 15.6609 dT: 1.04799 del: 0
12.5571 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865787 interTime: 0 T: 16.7001 dT: 1.03921 del: 0
13.4281 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865671 interTime: 0 T: 17.8291 dT: 1.12905 del: 0
14.3175 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865769 interTime: 0 T: 18.9396 dT: 1.11051 del: 0
15.2692 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865856 interTime: 0 T: 19.9879 dT: 1.04832 del: 0
16.2073 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 865878 interTime: 0 T: 21.0499 dT: 1.06196 del: 0
17.1223 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 879136 interTime: 0 T: 22.1349 dT: 1.08501 del: 0
18.1252 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 881666 interTime: 0 T: 23.132 dT: 0.997104 del: 0
18.9832 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 881751 interTime: 0 T: 24.274 dT: 1.14198 del: 0
19.8942 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 892226 interTime: 0 T: 25.363 dT: 1.08896 del: 0
21.0499 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 880284 interTime: 0 T: 26.2072 dT: 0.84428 del: 0
21.8658 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 876610 interTime: 0 T: 27.3914 dT: 1.18414 del: 0
22.8577 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 876664 interTime: 0 T: 28.3995 dT: 1.00814 del: 0
23.8376 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 876788 interTime: 0 T: 29.4196 dT: 1.0201 del: 0
24.7402 Node: 0 newBitRate: 396000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 876794 interTime: 0 T: 30.5169 dT: 1.09731 del: 0
25.6473 Node: 0 newBitRate: 522000 oldBitRate: 396000 estBitRate: 876771 interTime: 0 T: 31.6099 dT: 1.09296 del: 0
26.8523 Node: 0 newBitRate: 595000 oldBitRate: 522000 estBitRate: 877011 interTime: 0 T: 32.4049 dT: 0.795024 del: 0
28.1675 Node: 0 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 876584 interTime: 0 T: 33.0897 dT: 0.684752 del: 0
29.6172 Node: 0 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 868191 interTime: 0 T: 33.64 dT: 0.550304 del: 0
31.2159 Node: 0 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 874699 interTime: 0 T: 34.0413 dT: 0.401344 del: 0
32.8445 Node: 0 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 864148 interTime: 0 T: 34.4126 dT: 0.371336 del: 0
34.292 Node: 0 newBitRate: 595000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 853914 interTime: 0 T: 34.9652 dT: 0.552568 del: 0
35.5588 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 595000 estBitRate: 854323 interTime: 0 T: 35.6984 dT: 0.733192 del: 0
37.3029 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 848496 interTime: 0 T: 35.9543 dT: 0.255888 del: 0
39.1515 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 848774 interTime: 0 T: 36.1056 dT: 0.151352 del: 0
    
```



```

428.91 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 874314 interTime: 0 T: 42.3477 dT: -2.4e-05 del: 0
430.852 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 874376 interTime: 0 T: 42.4055 dT: 0.0578 del: 0
432.654 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 874405 interTime: 0 T: 42.6028 dT: 0.19732 del: 0
434.476 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 874465 interTime: 0 T: 42.7814 dT: 0.178648 del: 0
436.164 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 874485 interTime: 0 T: 43.0936 dT: 0.312208 del: 0
438.063 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 874481 interTime: 0 T: 43.1939 dT: 0.100296 del: 0
440.289 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 877341 interTime: 0 T: 42.9685 dT: -0.225448 del: 0
441.986 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 877178 interTime: 0 T: 43.2713 dT: 0.302808 del: 0
443.723 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 877143 interTime: 0 T: 43.5346 dT: 0.263328 del: 0
445.594 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 877157 interTime: 0 T: 43.6627 dT: 0.12808 del: 0
447.463 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 877310 interTime: 0 T: 43.7937 dT: 0.131 del: 0
449.303 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 877293 interTime: 0 T: 43.9539 dT: 0.1602 del: 0
451.417 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876388 interTime: 0 T: 43.8401 dT: -0.113768 del: 0
452.99 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876384 interTime: 0 T: 44.2672 dT: 0.427032 del: 0
454.748 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876416 interTime: 0 T: 44.5093 dT: 0.242176 del: 0
456.44 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876355 interTime: 0 T: 44.8173 dT: 0.307984 del: 0
458.203 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876286 interTime: 0 T: 45.0541 dT: 0.236768 del: 0
460.085 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 868330 interTime: 0 T: 45.1721 dT: 0.117976 del: 0
462.192 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 879599 interTime: 0 T: 45.0654 dT: -0.106624 del: 0
463.903 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 879648 interTime: 0 T: 45.3546 dT: 0.2892 del: 0
465.619 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 879633 interTime: 0 T: 45.6384 dT: 0.283768 del: 0
467.618 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 879751 interTime: 0 T: 45.6393 dT: 0.000928 del: 0
469.317 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 879671 interTime: 0 T: 45.9466 dT: 0.307272 del: 0
471.051 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 887610 interTime: 0 T: 46.2065 dT: 0.259848 del: 0
473.139 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876360 interTime: 0 T: 46.1177 dT: -0.08872 del: 0
474.979 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876436 interTime: 0 T: 46.2785 dT: 0.160776 del: 0
476.749 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876441 interTime: 0 T: 46.5085 dT: 0.229992 del: 0
478.697 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876464 interTime: 0 T: 46.5603 dT: 0.0518 del: 0
480.573 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876593 interTime: 0 T: 46.6845 dT: 0.124208 del: 0
482.304 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 876548 interTime: 0 T: 46.9537 dT: 0.269152 del: 0
484.547 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 878906 interTime: 0 T: 46.7106 dT: -0.243072 del: 0
486.512 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 878956 interTime: 0 T: 46.7449 dT: 0.034352 del: 0
488.242 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 878952 interTime: 0 T: 47.0153 dT: 0.27036 del: 0
489.983 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 878853 interTime: 0 T: 47.2746 dT: 0.259296 del: 0
491.743 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 878815 interTime: 0 T: 47.5144 dT: 0.239824 del: 0
493.939 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 841247 interTime: 0 T: 47.3179 dT: -0.19656 del: 0
496.007 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 849144 interTime: 0 T: 47.2504 dT: -0.06744 del: 0
497.826 Node: 0 newBitRate: 791000 oldBitRate: 791000 estBitRate: 849072 interTime: 0 T: 47.4316 dT: 0.181152 del: 0
ns3::FdashClient-Node: 0 InterruptionTime: 0 interruptions: 0 avgRate: 1.16109e+06 minRate: 396000 AvgDt: 46.6087 changes: 13
stevethebeast@Ubuntu: ~/repos/ns-3-allinone/ns-3.34$

```

Εικόνα 18. link-example command

5.2 Χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση (low latency)

Χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση σε ένα δίκτυο υπολογιστών θεωρείται ο χρόνος όπου το δίκτυο αυτό επεξεργάζεται πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων με ελάχιστη καθυστέρηση. Ενώ πρόκειται για εξελιγμένα δίκτυα στην πραγματικότητα καλούνται να βγάλουν εις πέρας λειτουργίες που απαιτούν πρόσβαση σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, ενώ ταυτόχρονα τα δεδομένα μεταβάλλονται συνεχώς και ραγδαία.



Latency



Time it takes for a request to go from the client to the server and back to the client

Εικόνα 19. Πόσο σημαντική είναι το Latency στην τωρινή τεχνολογική χρήση

Πηγή: <https://akfpartners.com/growth-blog/what-is-latency> [11]

Η μέτρηση του λανθάνοντος χρόνου μετριέται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Μόλις 50 χιλιοστά του δευτερολέπτου καθυστέρησης — χρόνος μικρότερος από το ένα δέκατο του δευτερολέπτου — μπορεί να οδηγήσει σε κακή απόδοση δικτύου και εφαρμογών. Μια καλή καθυστέρηση είναι ένας ρυθμός ping κάτω από 150 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Τα 20 ms θεωρούνται υπέροχα. Τι προκαλεί την καθυστέρηση; Όπως και το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση εξαρτάται από περισσότερα από την ευρυζωνική σύνδεση.

Η χαμηλή καθυστέρηση είναι επιθυμητή σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης. Σε γενικές γραμμές, η χαμηλότερη καθυστέρηση είναι σχεδόν πάντα μια βελτίωση σε σχέση με την πιο αργή μεταφορά πακέτων. Η χαμηλή καθυστέρηση είναι επιθυμητή στα διαδικτυακά παιχνίδια, καθώς συμβάλλει σε ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον παιχνιδιού. Η χαμηλή καθυστέρηση είναι ιδανική, καθώς αυτό σημαίνει ότι αντιμετωπίζετε πιο ομαλό παιχνίδι. Γενικά, μια αποδεκτή καθυστέρηση (ή ping) είναι περίπου 40 – 60 χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) ή χαμηλότερη, ενώ μια ταχύτητα άνω των 100 ms συνήθως σημαίνει μια αξιοσημείωτη καθυστέρηση στο παιχνίδι. Ωστόσο, ο όρος χαμηλή καθυστέρηση χρησιμοποιείται συχνότερα για να περιγράψει συγκεκριμένες περιπτώσεις επιχειρηματικής χρήσης, ιδίως συναλλαγών υψηλής συχνότητας σε κεφαλαιαγορές. Τα προγράμματα περιήγησης Ιστού στέλνουν αιτήματα σε διακομιστές ιστότοπου κάθε φορά που φορτώνετε μια σελίδα και ο διακομιστής ανεβάζει τη σελίδα στην προσωρινή μνήμη του προγράμματος περιήγησης σας. Όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση, τόσο λιγότερο ανταποκρίνεται η ιστοσελίδα.

5.3 Χρόνος απόκρισης (ms)

Ο χρόνος απόκρισης (ms) παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως στα βιντεοπαιχνίδια. Όσο χαμηλότερο είναι το ms τόσο πιο ομαλό είναι το παιχνίδι επειδή έχει μικρότερο λανθάνοντα χρόνο και έτσι έχει λιγότερη καθυστέρηση. Είναι κυρίως βασικό σε παιχνίδια όπου οι πιο γρήγορες ενέργειες θα ήταν ωφέλιμες, για παράδειγμα, παιχνίδια FPS, MOBA, παιχνίδια μάχης κ.λπ.

Ουσιαστικά, θα χρειαστούν x χιλιοστά του δευτερολέπτου για να σταλεί το μήνυμά στον διακομιστή. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν παίζει κάποιος ένα παιχνίδι για πολλούς παίκτες, χρειάζεται χρόνος για να σταλεί το μήνυμά του.

Οι διακομιστές δεν λαμβάνουν τα μηνύματα αμέσως (εκτός αν είστε πολύ κοντά τους), επομένως το ms αναφέρεται απλώς στο πόσο περίπου χρόνο θα χρειαζόταν για να λάβουν οι διακομιστές ένα μήνυμα από εσάς ανά πάσα στιγμή.

Σε παιχνίδια όπου ο συγχρονισμός είναι βασικός, όπως τα παιχνίδια στρατηγικής πρώτου προσώπου και τα παιχνίδια στρατηγικής σε πραγματικό χρόνο, το χαμηλό ping

είναι πάντα επιθυμητό, καθώς το χαμηλό ping σημαίνει πιο ομαλό παιχνίδι, επιτρέποντας ταχύτερες ενημερώσεις των δεδομένων του παιχνιδιού μεταξύ των πελατών των παικτών και του διακομιστή παιχνιδιών.

Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας προκύπτει αβίαστα το συμπέρασμα ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας δικτύων με την εμφάνιση των 5G δικτύων, τα αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά τους και τις εφαρμογές του που έχουν πλέον διεισδύσει στην καθημερινότητα των χρηστών βελτιώνοντας την ολοένα και περισσότερο.

Αναλυτικότερα τα μοντέλα επικοινωνίας 5G, η χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και ο χρόνος απόκρισης ms διευκολύνουν τον χρήστη για τις εκάστοτε υπηρεσίες που επιθυμεί να του προσφέρονται. Ενώ οι τρόποι επικοινωνίας όπως μηχανή προς μηχανή που λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση εξυπηρετούν σε μέγιστο βαθμό τον χώρο των επιχειρήσεων, η συσκευή προς συσκευή που με την αλληλεπίδραση των συσκευών αντιμετωπίζοντας τεχνικά θέματα στο χώρο της βιομηχανίας και το όχημα προς όχημα που μέσω μιας διεπαφής αποτρέπουν πιθανούς κινδύνους στους δρόμους.

Ολοκληρώνοντας γίνεται κατανοητή, αλλά ταυτόχρονα τεκμηριωμένη με αξιολογήσεις η πολύτιμη προσφορά των υπηρεσιών ροής πολυμέσων των κωδικοποιητών και των προτύπων υπηρεσιών συνεχούς ροής βίντεο DASH(και επιμέρους του αλγορίθμου F-DASH) στην ύπαρξη βελτιστοποιημένης παράδοσης περιεχομένου βίντεο που παρέχουν σε όλους τους χρήστες τα δίκτυα 5G.

Βιβλιογραφία

- [1] «Δίκτυο Υπολογιστών II,» Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων - Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://ds.uth.gr/4th-semester/computer-networks-ii/>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [2] D. Ramel, "AI-Powered 'Data Wrangler' VS Code Tool Eases Prep Work for Data Scientists," Visual Studio Magazine, 20 02 2023. [Online]. Available: <https://visualstudiomagazine.com/articles/2023/03/20/data-wrangler.aspx>. [Accessed 2024 January 20].
- [3] "Artec Ασύρματο Σύστημα Συναγερμού Fine-2G Black," Big Sale, [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://www.bigsale.gr/brand/39-artec>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [4] Τ. Ηγουμενίδη, «Το 3G δίνει σταδιακά τη θέση του στο 5G,» infocom.gr, 15 Απρίλιος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://www.infocom.gr/2021/04/15/3g-dinei-stadiaka-thesi-tou-sto-5G/54128/>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [5] "What is 4G?," Fusion Connect, 30 September 2019. [Online]. Available: <https://www.fusionconnect.com/blog/what-is-4g-network>. [Accessed 20 January 2024].
- [6] J. Deu-Ngoc, "EPC nodes and interfaces," Wikipedia, 4 December 2014. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/System_Architecture_Evolution#/media/File:Evolved_Packet_Core.svg. [Accessed 20 January 2024].
- [7] S. Savic, "4G Switcher - Force LTE Only," Google Play, 3 March 2023. [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.argus.sava.networkmode&hl=el&pli=1>. [Accessed 20 January 2024].
- [8] «Τι είναι το 5G; Όλα όσα θέλετε να ξέρετε για το 5G,» Τεχνικός Υπολογιστών, 2 Δεκέμβριος 2020. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://texnikos-ipologiston.gr/τι-είναι-το-5G-όλα-όσα-θέλετε-να-ξέρετε-γι/>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [9] «Ψηφιακή αναβάθμιση των επιχειρήσεων με επιδότηση 90%,» Thinx, 23 Ιούλιος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://www.thinx.gr/ψηφιακή-αναβάθμιση-των-επιχειρήσεων/>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [10] "Stakeholders Of A Project, HD Png Download," pngitem, [Online]. Available: https://www.pngitem.com/middle/hmTmxib_stakeholders-of-a-project-hd-png-download/. [Accessed 20 January 2024].
- [11] E. Arrington, "What is Latency and How Much Is It Costing You," AKF Partners Growth Blog, 19 April 2019. [Online]. Available: <https://akfpartners.com/growth-blog/what-is-latency>. [Accessed 20 January 2024].

- [12] D. Davis, "5 Big Cyberattacks in Oil and Gas," Oil & Gas iQ, 01 November 2022. [Online]. Available: <https://www.oilandgasiq.com/digital-transformation/articles/5-big-cyber-security-attacks-in-oil-and-gas>. [Accessed 20 January 2024].
- [13] «Ομιλία για Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς (5G),» Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών - Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, 6 Ιούνιος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://www.ece.uop.gr/announcement/omilia-gia-diktya-kiniton-epikoinonion-remptis-genias-5G/>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [14] "Software Defined Network," ip-mpls.com, [Online]. Available: <http://ip-mpls.com/software-defined-networking-sdn/>. [Accessed 20 January 2024].
- [15] "Keywords Explained: RAN (Radio Access Network)," SoftBank News, 30 June 2022. [Online]. Available: https://www.softbank.jp/en/sbnews/entry/20220630_01. [Accessed 20 January 2024].
- [16] "Introducing Massive MIMO Technology," 4G LTE Networks, 8 May 2018. [Online]. Available: <https://www.4g-lte.net/technology/massive-mimo-technology/>. [Accessed 20 January 2024].
- [17] "MIMO exploits multipath propagation to multiply link capacity.," Wikipedia, 25 February 2015. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>. [Accessed 20 January 2024].
- [18] Κ. Τσαούσης, «Το 5G μπαίνει στη ζωή μας,» Τα νέα, 17 Δεκέμβριος 2020. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <https://www.tanea.gr/2020/12/17/opinions/to-5G-mpainei-sti-zoi-mas/>. [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2024].
- [19] P. A.J, "What are the Five Fascinating Applications of Cellular M2M?," Research Dive, 26 February 2021. [Online]. Available: <https://www.researchdive.com/blog/what-are-the-five-fascinating-applications-of-cellular-m2m>. [Accessed 20 January 2024].
- [20] National Instruments, "Applications of Device-to-Device Communication in 5G Networks," IEEE Spectrum, 13 June 2018. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/applications-of-devicetodevice-communication-in-5g-networks>. [Accessed 20 January 2024].
- [21] W. Luo, W. Chen, Y. Feng and Y. Yang, "A novel automobile antenna for vehicles communication of IoT systems in 5G network," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 1-19, October 2020.
- [22] Κωσταντίνος Μάρης "polimesa -Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής" 2015 [Online]. Available: <http://iwm.teikav.edu.gr/iinew/Mathimata/polimesa/polimesa/>[Accessed 18/02/2024].

- [23] Sreejata Basu "Σύγκριση Πρωτοκόλλων με το MPEG-DASH" 28/07/2020
[Online].Available: <https://www.muvi.com/blogs/srt-hls-and-dash-streaming-protocol/>
[Accessed] 18/02/2024].