



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ &
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Αρχιτεκτονική και Τεχνολογίες του Απτικού Διαδικτύου με Έμφαση σε Ιατρικές Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΒΑΛΑΚΙΤΣΗ ΑΘΑΝΑΣΙΑΣ

Επιβλέπων: Δημήτριος Σκούτας, μέλος Ε.ΔΙ.Π βαθμίδας Α'

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Σκούτας Δημήτριος

Σκιάνης Χαράλαμπος

Κορμέντζας Γεώργιος

Ε.ΔΙ.Π. Βαθμίδας Α'

Καθηγητής

Αναπληρωτής
Καθηγητής

Καρλόβασι, Σεπτέμβριος 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων.

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Πρώτο από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, Δημήτριο Σκούτα για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω και στους καθηγητές Σκιάνη Χαράλαμπο και Κορμέντζα Γεώργιο που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Μαριάννα, που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια με υπομονή και επιμονή και πρόσφερε την απαραίτητη ηθική και υλική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Τα δίκτυα 5G αποτελούν την επόμενη γενιά δικτύων και βρίσκονται ήδη σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης φέρνοντας επανάσταση στις νέες τεχνολογίες καθώς προσφέρουν πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και πιο αξιόπιστες συνδέσεις. Η 5^η γενιά κινητών επικοινωνιών 5G θα υποστηρίξει τη λειτουργία του Απτικού Διαδικτύου (Tactile Internet). Αναπόσπαστο κομμάτι αυτής της τεχνολογίας είναι η μετάδοση της αφής σε πραγματικό χρόνο. Αυτό πραγματοποιείται μέσω καταλλήλου ρομποτικού και απτικού εξοπλισμού σε συνδυασμό με ένα νέο δίκτυο επικοινωνιών.

Σ' αυτή τη διπλωματική θα παρουσιαστούν σημαντικές τεχνολογικές έννοιες τόσο της νέας γενιάς επικοινωνιών 5G όσο και του Απτικού Διαδικτύου. Επίσης περιγράφονται οι τεχνικές απαιτήσεις και διάφορες αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις για το Απτικό Διαδίκτυο που αφορούν την ασύρματη πρόσβαση, τα πρωτόκολλα, τη διαχείριση του ραδιοφάσματος καθώς και τις δυνατότητες cloud edge και edge - AI. Ακόμα θα δούμε εφαρμογές που μπορεί να φανεί χρήσιμη η συγκεκριμένη τεχνολογία με έμφαση στις εφαρμογές υγείας.

Λέξεις κλειδιά: Απτικό Διαδίκτυο, αφή, καθυστέρηση, 5G αρχιτεκτονική, massive MIMO

Abstract

5G Networks are the next generation of networks and they are already in an advanced development stage revolutionizing new technologies as they offer high data rates and more reliable connections. The 5th generation of mobile communications will also support the Tactile Internet service. An integral part of this technology is to be able to transmit touch in real time. This can be done by suitable robotic and haptic equipment in combination with a new communication network.

This thesis presents important technology concepts both for the 5th network generation as well as for Tactile Internet. Furthermore, this thesis outlines the technical requirements and architectural approaches for the Tactile Internet pertaining to wireless access protocols, radio resource management aspects, next generation core networking capabilities, edge-cloud and edge-AI capabilities. Moreover, it presents possible applications with emphasis at medical applications.

Keywords: Tactile Internet, haptic, latency, 5G architecture, massive MIMO

Περιεχόμενα

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:	1
Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Περιεχόμενα.....	5
Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
Επισκόπηση υπαρχουσών τεχνολογιών.....	15
1 ΑΠΤΙΚΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	17
1.1 Το όραμα του	17
1.2 Τρέχουσα πρόοδος	18
1.3 Προκλήσεις.....	19
2 ΑΠΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	20
2.1 Λειτουργία απτικής τεχνολογίας.....	22
2.1.1 Απτική τεχνολογία χωρίς επαφές	24
2.2 Απτική επικοινωνία	24
2.2.1 Δονήσεις	25
2.2.2 Ανατροφοδότηση δυνάμεων	25
2.3 Απτική αντίληψη.....	26
2.4 Απτικές συσκευές.....	26
2.4.1 Απτικές Συσκευές Μονού Σημείου αλληλεπίδρασης	27
2.4.2 Απτικές συσκευές πολλαπλών σημείων αλληλεπίδρασης.....	28
2.5 Αρχιτεκτονική απτικής απόδοσης	29

2.6	Αρχιτεκτονική απτικού διαδικτύου.....	30
2.6.1	Master Domain	31
2.6.2	Network Domain.....	32
2.6.3	Controlled Domain.....	34
3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ.....	34
3.1	Αυτοματοποίηση στη βιομηχανία	35
3.2	Αυτόνομη οδήγηση	35
3.3	Ρομποτική	36
3.4	Πραγματική και επαυξημένη πραγματικότητα.....	36
3.5	Η συνεισφορά της απτικής τεχνολογίας στην ιατρική.....	37
3.6	Εκπαίδευση & Αθλητισμός	39
3.7	Άλλες εφαρμογές	39
4	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΥΓΕΙΑΣ.....	40
4.1	Υπάρχουσα κατάσταση.....	41
4.2	Απαιτήσεις απτικού διαδικτύου.....	43
4.2.1	Υπέρ - Ευαίσθητη συνδεσιμότητα.....	43
4.2.2	Αξιόπιστη συνδεσιμότητα.....	43
4.2.3	Ασφάλεια και ιδιωτικότητα.....	44
4.2.4	Απτικά δεδομένα.....	45
4.2.5	Edge Intelligence	45
4.3	Επίτευξη Υψηλής Διαθεσιμότητας στα Ασύρματα Δίκτυα με Χρήση Βέλτιστου Αριθμού Συνδέσεων.....	45
5	5G-PPP (Public Private Partnership)	46
5.1	Σύντομη περιγραφή των 5G-PPP projects.....	47

5.1.1	5G- XHAUL	47
5.1.2	COGNET	48
5.1.3	FANTASTIC - 5G.....	49
5.1.4	mm Magic	50
5.1.5	Selfnet	50
5.1.6	Sesame	51
5.1.7	5G - Crosshaul.....	52
5.1.8	METIS II	53
5.1.9	5GrEEen	53
6	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ / ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5 ^{ης} ΓΕΝΙΑΣ	54
6.1	Massive MIMO	55
6.2	Μικροκυματική ζώνη (mm-wave)	57
6.2.1	Mm-wave φυσικό επίπεδο.....	57
6.2.2	Mm wave Backhaul και Fronthaul	59
6.3	Fronthaul και Backhaul.....	59
6.4	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Συνδυασμός NFV - SDN	60
6.4.1	Εικονοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (NFV)	60
6.4.2	Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό (SDN)	61
6.4.3	Συνδυασμός αρχιτεκτονικών SDN και NFV.....	62
6.5	Mobile Edge Computing (MEC)	62
6.5.1	Αρχιτεκτονική προτεινόμενου συστήματος.....	65
6.5.2	Σύγκριση Συστήματος.....	66
6.6	Network Slicing.....	69
6.7	Ενεργειακή απόδοση.....	73

7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	74
7.1	Στοιχεία του φυσικού επιπέδου αρχιτεκτονικής 5G.....	74
7.2	Επανάσταση στο hardware.....	75
7.3	Σχεδιασμός Φυσικού Επιπέδου για Χαμηλή Καθυστέρηση.....	76
7.4	Μείωση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης.....	77
7.5	Επίτευξη μέγιστης αξιοπιστίας συνδεσιμότητας.....	78
7.6	Οικονομικός Αντίκτυπος.....	78
7.7	Τελικά συμπεράσματα.....	79
	Βιβλιογραφία.....	81
	Βιβλιογραφία εικόνων.....	83
	Λεξικό Χρήσιμων Όρων.....	85
	Συντμήσεις - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια.....	85

Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1- ΤΟ ΑΛΜΑ ΤΟΥ ΑΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ [1]	13
ΕΙΚΟΝΑ 2 – ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ, ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΙΟΤ, 5G, ΑΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ.....	14
ΕΙΚΟΝΑ 3 - Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G [3].....	17
ΕΙΚΟΝΑ 4 - ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΠΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ [7].....	22
ΕΙΚΟΝΑ 5 - ΑΠΤΙΚΑ ΠΗΔΑΛΙΑ [18]	27
ΕΙΚΟΝΑ 6 - Η ΑΠΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΙΑΘΕΤΕΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕ ΚΑΘΕ ΕΝΑ ΑΠΟ ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΔΑΚΤΥΛΑ. Ο ΧΡΗΣΤΗΣ ΦΟΡΑΕΙ ΓΑΝΤΙ ΜΕ ΚΛΙΠ ΓΙΑ ΝΑ ΣΥΝΔΕΞΕΙ ΤΕΣΣΕΡΑ ΔΑΚΤΥΛΑ ΣΤΟΥΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ [5].....	28
ΕΙΚΟΝΑ 7 - ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ [3].....	31
ΕΙΚΟΝΑ 8 - ΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ 5G ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΜΙΑ ΚΟΙΝΗ ΦΥΣΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ [9].....	33
ΕΙΚΟΝΑ 9 - ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΟΔΗΓΗΣΗ [17].....	35
ΕΙΚΟΝΑ 10 - ΣΥΣΤΗΜΑ CODEC ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ [10].....	42
ΕΙΚΟΝΑ 11 - ΣΤΟΧΟΙ ΤΟΥ 5G PPP [15].....	46
ΕΙΚΟΝΑ 12 - ΛΟΓΟΤΥΠΙΑ PROJECT 5G PPP [16].....	47
ΕΙΚΟΝΑ 13- ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G [9]	54
ΕΙΚΟΝΑ 14 - Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MASSIVE MIMO ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΕΤΑΙ ΤΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΓΙΑ ΝΑ ΕΠΙΤΥΧΕΙ ΧΩΡΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΠΟΛΛΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ [14].....	55
ΕΙΚΟΝΑ 15 - ΠΛΑΝΟ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗ [2]...	57
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΚΑΙ ΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ MM-WAVE [13]	58
ΕΙΚΟΝΑ 17 – ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΗ ΔΟΜΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΝΕΦΟΥΣ[11]	65
ΕΙΚΟΝΑ 18 - ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ENB2 ΣΤΟ ENB1 ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ [11]67	
ΕΙΚΟΝΑ 19 - ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ENB2 ΣΤΟ ENB1 ΜΕΣΩ ΤΟΥ MINI CLOUD A [11]	67

ΕΙΚΟΝΑ 20 - 5G ΔΙΚΤΥΟ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ NETWORK SLICING [8].....	71
ΕΙΚΟΝΑ 21-ΤΟ ΟΡΑΜΑ ΤΟΥ 5G ΓΙΑ ΜΙΑ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΜΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΚΙΝΗΣΗΣ [12]	74
ΕΙΚΟΝΑ 22 - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΙΑ ΣΤΟ ΑΠΤΙΚΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ [1].....	76

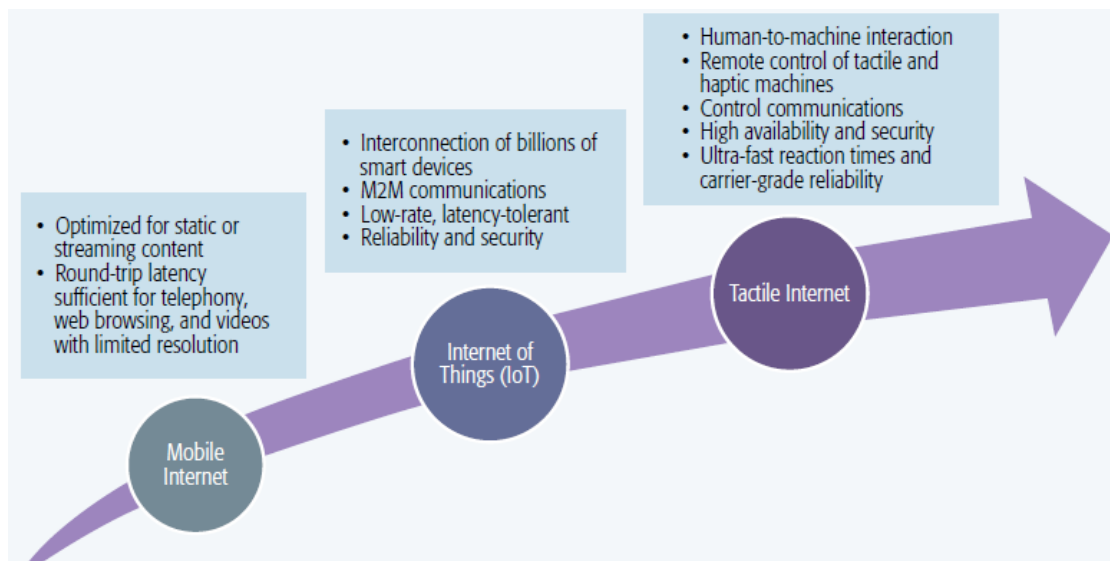
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κινητές επικοινωνίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη οικονομία, στην υγεία, στην εκπαίδευση καθώς και στην εφοδιαστική αλυσίδα των επιχειρήσεων και βιομηχανιών. Πλέον τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν συνδέσει τη πλειοψηφία του παγκόσμιου πληθυσμού με αυτά. Μετά τη δημιουργία του κινητού διαδικτύου, συνδέοντας δισεκατομμύρια τηλέφωνα καινούριας τεχνολογίας και υπολογιστές, οι κινητές επικοινωνίες εστιάζουν στη παροχή συνδεσιμότητας για μηχανές και συσκευές, οπουδήποτε, δημιουργώντας έτσι το Internet of Things (IoT - Διαδίκτυο των Αντικειμένων). Με τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις, το Απτικό Διαδίκτυο κάνει την εμφάνιση του με εξαιρετική αξιοπιστία και γρήγορη συνδεσιμότητα. Θα επιτρέπει απομακρυσμένο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και απομακρυσμένες απτικές εφαρμογές. Το Απτικό Διαδίκτυο θα παρέχει ένα πραγματικό παράδειγμα αλλαγής του τρόπου μεταφοράς των δεδομένων και θα προσθέσει μια νέα διάσταση στην αλληλεπίδραση ανθρώπου μηχανής παρέχοντας χαμηλή καθυστέρηση, αρκετή για να δημιουργήσει διαδραστικά συστήματα σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον το Απτικό Διαδίκτυο περιγράφεται ως δίκτυο επικοινωνίας που συνδυάζει χαμηλή καθυστέρηση, βέλτιστο χρόνο μεταφοράς των δεδομένων, υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία με υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Πράγματι, εξαιτίας του ότι το Απτικό Διαδίκτυο αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε πολλές κρίσιμες εφαρμογές, θα πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστο, χωρίς διακοπές, με ελάχιστες καθυστερήσεις και επαρκή χωρητικότητα ώστε να επικοινωνεί μεγάλος αριθμός χρηστών μεταξύ τους ταυτόχρονα και αυτόνομα. Οι χρήστες θα μπορούν να συνδέονται με το παραδοσιακό ενσύρματο και ασύρματο διαδίκτυο και IoT δημιουργώντας έτσι μια νέα διάσταση του διαδικτύου με νέες δυνατότητες υψηλής τεχνολογίας. Οι κινητές επικοινωνίες 4^{ης} γενιάς δεν θα εκπληρώσουν τις τεχνικές απαιτήσεις για το Απτικό Διαδίκτυο κάτι όμως που αναμένεται να κάνει η 5^η γενιά κινητών επικοινωνιών.

Η αναμενόμενη μαζική αύξηση του φορτίου σε αυτά τα δίκτυα, πρέπει να αντιμετωπιστεί προσθέτοντας επιπλέον φάσμα που θα κατανεμηθεί στις ασύρματες συνδέσεις και θα επιτρέψει την παροχή ευζωνικής κάλυψης. Όμως προκειμένου να καταστεί δυνατή η υψηλή χωρητικότητα και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί φάσμα πάνω από τα 10GHz. Ένα σημαντικό θέμα είναι ότι γύρω στο 2020 αναμένεται να υπάρξει μεγάλη ανάπτυξη των δικτύων 4ης γενιάς (Long-Term Evolution - LTE) που θα λειτουργεί σε φάσμα κάτω από 6.5GHz. Είναι επομένως σκόπιμο ότι οι ασύρματες εφαρμογές/συσκευές 5ης γενιάς που αναπτύσσονται να είναι συμβατές και με τα σύγχρονα συστήματα όπως το LTE έτσι ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα με τη λειτουργία τους.

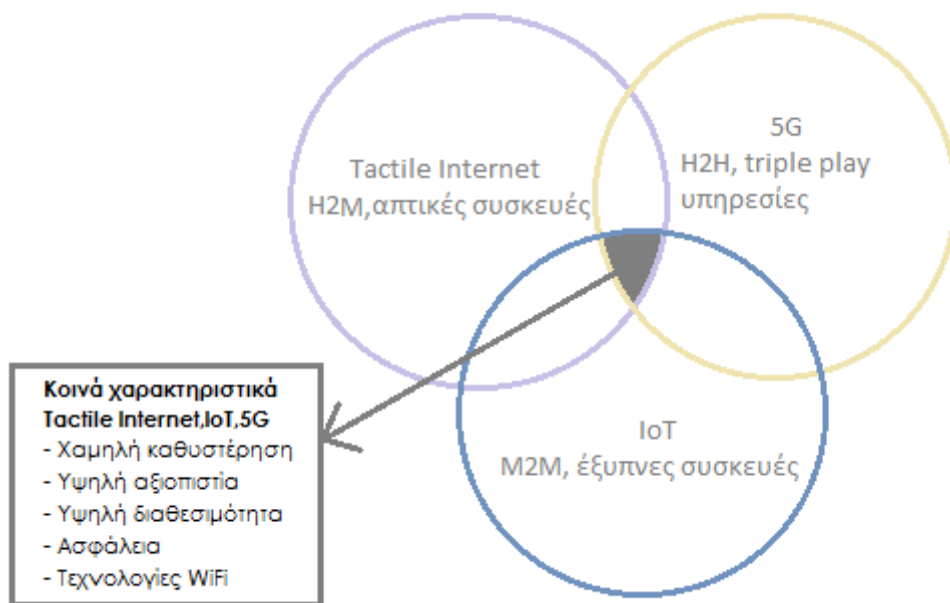
Για να καταλάβουμε καλύτερα τη λειτουργία του Απτικού Διαδικτύου θα ήταν χρήσιμο να το συγκρίνουμε με το Internet of Things και τα κινητά δίκτυα 5G, να επεξεργαστούμε και να αναλύσουμε τα κοινά τους στοιχεία καθώς και τις διαφορές. Για αρχή αξίζει να αναφερθεί ότι η έννοια του IoT, στη πραγματικότητα δεν είναι καθόλου καινοτόμα. Στην πραγματικότητα ο όρος «Internet of Things» επινοήθηκε από τον Kevin Ashton στο MIT πριν 22 χρόνια το 1995. Παρόλο αυτά, πρόσφατα είδαμε την τεράστια ανάπτυξη του IoT. Στην εικόνα 1 βλέπουμε την αλματώδη ανάπτυξη του Απτικού Διαδικτύου σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα του ITU-T[2]. Η υψηλή διαθεσιμότητα και ασφάλεια, οι μικρές καθυστερήσεις καθώς και οι εξαιρετικά γρήγοροι χρόνοι ανάδρασης του Απτικού Διαδικτύου θα βελτιώσουν σημαντικά την αλληλεπίδραση ανθρώπου μηχανής επιτρέποντας, μεταξύ άλλων, τη μετάδοση της αίσθησης της αφής. Από την άλλη πλευρά τα μελλοντικά δίκτυα 5ης γενιάς θα πρέπει να είναι ικανά να αντιμετωπίσουν την άνευ προηγουμένου αύξηση της κίνησης κινητών δεδομένων από τις έξυπνες συσκευές που θα τροφοδοτούν το IoT. Έτσι το όραμα της τεχνολογίας 5G είναι να προσφέρει 1000πλασια χωρητικότητα, με 10Gb/s ρυθμούς μετάδοσης και συνδέσεις για τουλάχιστον 100 δισεκατομμύρια συσκευές. Η βασική πρόκληση για το ασύρματο δίκτυο 5G και τη βασική αρχιτεκτονική του είναι να καταστήσει δυνατή τη νέα μηχανοκεντρική προσέγγιση που δεν υποστηρίζει η ήδη υπάρχουσα δικτυακή

αρχιτεκτονική. Πιθανές εφαρμογές, στο πλαίσιο του δικτύου 5^{ης} γενιάς, είναι στη βιομηχανία, στη ρομποτική, στην πραγματική και επαυξημένη πραγματικότητα, στην ρύθμιση της οδικής κυκλοφορίας και στην υγειονομική περίθαλψη. Οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές απαιτούν πολύ χαμηλή καθυστέρηση, της τάξης του 1 ms ή και λιγότερο, εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και εγγυημένη διαθεσιμότητα, απαιτήσεις σαφώς υψηλότερες από τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα. Επιπλέον, καθώς όλο και περισσότεροι χρήστες θα χρησιμοποιούν τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα 5G, οι κεντροποιημένες προσεγγίσεις ελέγχου και κατανομής πόρων στους χρήστες δεν είναι πλέον ιδανικές. Έτσι στρεφόμαστε σε προσεγγίσεις που έχουν ως επίκεντρο τον χρήστη, όπως άμεσες συνδέσεις επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών (Device To Device Communication - D2D) χωρίς να απαιτείται η σύνδεση με το σταθμό βάσης για την επικοινωνία τους.



Εικόνα 1- Το άλμα του Απτικού Διαδικτύου [18]

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι υπάρχει σημαντική αλληλοεπικάλυψη μεταξύ του IoT, του δικτύου 5G και του Απτικού Διαδικτύου, έχοντας βέβαια και το καθένα τα δικά του μοναδικά του χαρακτηριστικά. Στην εικόνα 2, παρακάτω εικονίζονται οι ομοιότητες και διαφορές των τριών.



Εικόνα 2 - Ομοιότητες, Διαφορές IoT, 5G, Απτικού Διαδικτύου

Το IoT βασίζεται στις επικοινωνίες M2M (machine to machine) εστιασμένο στις έξυπνες συσκευές. Το 5G θα διατηρήσει την H2H (human to human) επικοινωνία για συμβατικές triple-play υπηρεσίες, συνδυάζοντας δηλαδή φωνή, βίντεο και δεδομένα με όλο και μεγαλύτερη έμφαση στις ασύρματες τεχνολογίες (κυρίως WiFi). Αντίθετα το Απτικό Διαδίκτυο θα επικεντρωθεί σε H2M (Human to Machine) επικοινωνίες υποστηρίζοντας απτικές συσκευές. Παρόλο όμως τις διαφορές το IoT, το 5G και το Απτικό Διαδίκτυο έχουν κάποιους σημαντικούς κοινούς στόχους:

- Μικρή καθυστέρηση της τάξης του 1 ms
- Υψηλή και εγγυημένη αξιοπιστία
- Συνύπαρξη H2H M2M επικοινωνιών
- Ενσωμάτωση των δεδομένο-κεντρικών τεχνολογιών με βάση το WiFi
- Υψηλή ασφάλεια

Η έλευση των ρομπότ απομακρυσμένης παρουσίας, για εμπορική χρήση, έχουν αρχίσει να κάνουν αισθητή τη παρουσία τους. Όλο και περισσότερες δραστηριότητες της καθημερινότητας θα αυτοματοποιηθούν και θα γίνονται από

ρομπότ. Η πολύ μικρή καθυστέρηση ανατροφοδότησης σε συνδυασμό με την εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και εγγυημένη διαθεσιμότητα για επικοινωνία οδηγεί σε μια νέα εποχή ευρυζωνικότητας του Απτικού Διαδικτύου.

Επισκόπηση υπαρχουσών τεχνολογιών

Το 1991 έκανε την εμφάνιση της η 2^η γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων γνωστή ως GSM (Global System for Mobile communications). Το πρότυπο GSM είναι ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς. Κάθε κυψέλη έχει ένα σταθερό σταθμό βάσης με κατάλληλη κεραία. Ο σταθμός βάσης συνδέεται ενσύρματα με το κέντρο μεταγωγής του συστήματος και ασύρματα με τις κινητές συσκευές. Χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά σήματα και τη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων (FDMA - Frequency Division Multiple Access) σε ένα αριθμό καναλιών και την διαίρεση αυτών σε χρονοθυρίδες για τη μετάδοση των σημάτων. Ήταν η πρώτη γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων που χρησιμοποίησε πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDMA - Time Division Multiple Access) μαζί με διαίρεση συχνοτήτων. Βασικά χαρακτηριστικά αυτής της γενιάς ήταν η μετατροπή του σήματος φωνής σε ψηφιακό σήμα, η μετάδοση του σε συχνότητες UHF (Ultra High Frequency), η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, οι ασυνεχείς εκπομπές και η δυνατότητα διαπομπής (Handover).

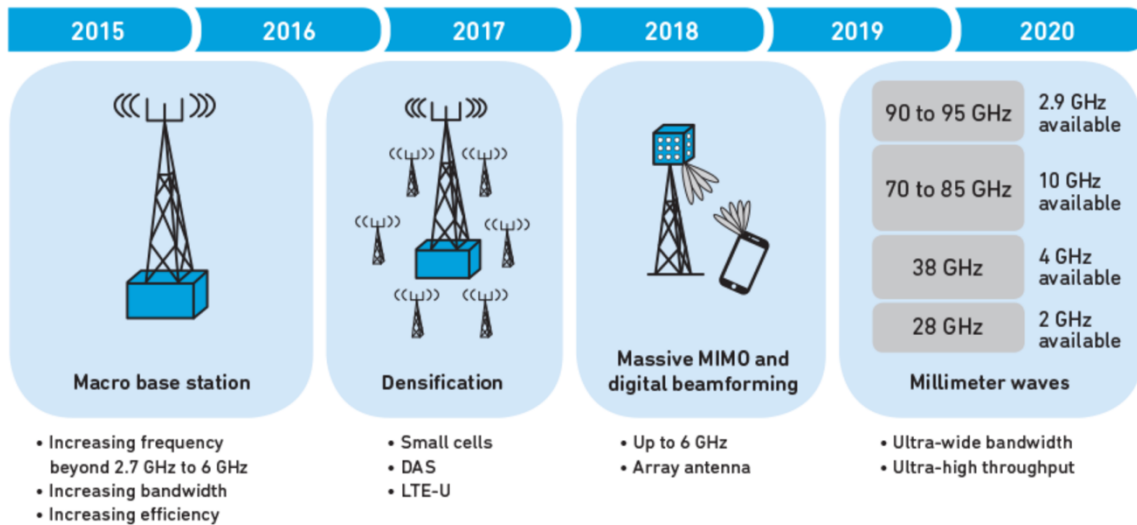
Έπειτα ακολούθησε η 3^η γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων (Universal Mobile Telecommunications System - UMTS) και στη συνέχεια μια επέκταση του το HSPA (High Speed Packet Access). Εδώ η κυψέλη καλείται να εξυπηρετήσει μια πληθώρα χρηστών με χρήση πολυπλεξίας κώδικα (CDMA - Code Division Multiple Access), ενώ γίνεται επίσης και το πρώτο βήμα για εξοικονόμηση ενέργειας.

	GSM	UMTS
Μέγεθος κυψέλης	Σταθερό μέγεθος	Μεταβλητό

Κανάλια	Κανάλια εύρους 200kHz	Ευρυζωνική επικοινωνία με λίγα κανάλια εύρους 5MHz
Συνδρομητές	Έως 8 συνδρομητές μιλούν διαδοχικά στο ίδιο κανάλι	Διαχωρισμός συνδρομητών με κώδικες
Διαχωρισμός κυψελών	Διαφορετικά κανάλια συχνότητας σε γειτονικές κυψέλες	Γειτονικές κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι
Μεταγωγή	Σταθερό	Μεταβλητό

Πίνακας 1 - Σύγκριση της 2ης και 3ης γενιάς, GSM/UMTS

Στη συνέχεια, και μέχρι σήμερα που μιλάμε, έχουμε τα δίκτυα τέταρτης γενιάς γνωστά ως LTE/LTE Advanced. Κάθε κυψέλη μπορεί να απαρτίζεται από πολλές μικρότερες. Χρησιμοποιείται ορθογώνια πολυπλεξία σήματος (OFDMA - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), προηγμένες τεχνολογίες πολλαπλών κεραίων (MIMO - Multiple-Input And Multiple-Output), καθώς και η τεχνική συντονισμένης μετάδοσης πολλαπλών σημείων (CoMP - Coordinated Multi-Point Transmission).



Εικόνα 3 - Η εξέλιξη των δικτύων 5G [3]

Ακολουθεί η πέμπτη γενιά κινητών επικοινωνιών η οποία θα φέρει την επανάσταση με τις ασύλληπτες ταχύτητες και τις υπηρεσίες που θα προσφέρει και την οποία θα δούμε αναλυτικά σ' αυτή τη διπλωματική εργασία.

1 ΑΠΤΙΚΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Περιλαμβάνει ένα σύνολο εφαρμογών πραγματικού χρόνου με υψηλές απαιτήσεις σε χαμηλή καθυστέρηση. Ενεργοποιείται από τις εντολές που παίρνει από το ανθρώπινο σώμα το οποίο μπορεί να διακρίνει καθυστερήσεις της τάξης του 1ms.

1.1 Το όραμα του

Το όραμα του Απτικού Διαδικτύου είναι να προσθέσει μία νέα διάσταση στην αλληλεπίδραση ανθρώπου - μηχανής σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών διαφόρων επιστημονικών πεδίων όπως της υγειονομικής περίθαλψης, της εκπαίδευσης και των έξυπνων δικτύων μεταφοράς ενέργειας (smart grids)[3]. Η υποδομή του επιτρέπει να ανταποκριθεί σε μια σειρά σχεδιαστικών απαιτήσεων. Πρώτα από όλα, πρέπει να προσφέρει πολύ μικρή από άκρο σε άκρο (end-to-end) καθυστέρηση της τάξης του 1ms και την υψηλότερη δυνατή αξιοπιστία σε πραγματικό χρόνο. Πρέπει ωστόσο ταυτόχρονα να διασφαλίσει την ασφάλεια και διαθεσιμότητα των

δεδομένων καθώς και την αξιοπιστία των συστημάτων χωρίς να επηρεάζεται η απαίτηση της καθυστέρησης λόγω των επιπρόσθετων καθυστερήσεων κρυπτογράφησης. Αυτοί οι σχεδιαστικοί στόχοι του Απτικού Διαδικτύου, μπορούν να επιτευχθούν μόνο εάν διατηρηθούν οι απτικές εφαρμογές σε τοπικό επίπεδο όπου θα υποστηρίζονται από μια καταναλωμένη πλατφόρμα βασισμένη σε υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους (cloud). Επιπλέον σε όλες τις διαδικασίες και τα επίπεδα πρέπει να μειωθεί σημαντικά η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση. Το Απτικό Διαδίκτυο θα έχει σημαντικές απαιτήσεις για τα μελλοντικά δίκτυα ως προς τη καθυστέρηση την αξιοπιστία και τη χωρητικότητα (π.χ. υψηλοί ρυθμοί δεδομένων για αισθητήρες βίντεο). Η ενσύρματη δικτυακή πρόσβαση ανταποκρίνεται εν μέρει σε αυτές τις απαιτήσεις ενώ η ασύρματη πρόσβαση δεν είναι ακόμα σχεδιασμένη για όλες τις παραπάνω απαιτήσεις.

1.2 Τρέχουσα πρόοδος

Όπως έχουμε δει παραπάνω το Απτικό Διαδίκτυο θα θέσει σημαντικές απαιτήσεις κυρίως στο σχεδιασμό των μελλοντικών ενσύρματων και ασύρματων δικτύων. Σήμερα [3] αναπτύσσεται η ιδέα των ετερογενών δικτύων (HetNets - Heterogeneous Networks), όπου τα όρια μεταξύ κλασσικών τηλεφωνικών δικτύων προσανατολισμένων στην κάλυψη και ευρυζωνικών δικτυακών συνδέσεων με συνδυασμό οπτικών ινών και των ασύρματων δικτύων (FiWi, Fiber-Wireless), έχουν αρχίσει να μην υφίστανται. Εξετάσαμε τις σύγχρονες τάσεις και εντοπίσαμε σημαντικές ανοιχτές προκλήσεις για να αξιοποιηθούν όλα τα εν δυνάμει οφέλη των FiWi, LTE-Advanced, και των HetNets. Στο μέλλον, τα ρομπότ αναμένεται να γίνουν μέλη της νέας ψηφιακής εποχής, ενώ ο ρυθμός υιοθέτησης τέτοιων ρομπότ όπως π.χ. αυτόματων συστημάτων καθαρισμού (Roomba, iRobot) αυξάνεται συνεχώς λόγω της επιθυμίας των καταναλωτών να εξοικονομήσουν χρόνο.

Με την εμφάνιση του Απτικού Διαδικτύου και των τηλεχειριζόμενων ρομπότ, αξίζει να μελετήσουμε τις ευκαιρίες ανάπτυξης ρομποτικών εφαρμογών και υπηρεσιών. Ωστόσο, οι περιορισμένοι υπολογιστικοί πόροι, η περιορισμένη

διαθέσιμη ενέργεια και οι περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων μπορούν να φανούν εμπόδιο στην επιτυχή ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών. Η εκφόρτωση των διαδικασιών σε συνεργατικούς κόμβους είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση του χρόνου εκτέλεσης των διεργασιών και της ενεργειακής απόδοσης των ρομπότ. Πιο συγκεκριμένα η προτεινόμενη, στην σχετική βιβλιογραφία, πολιτική για κατανομή των διεργασιών επιλέγει ένα κατάλληλο ρομπότ βασισμένο σε βασικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας του ρομπότ, της απομένουσας ενέργειας και του χρόνου εκτέλεσης των διεργασιών. Επιπλέον, η προτεινόμενη στρατηγική υπολογισμού εκφόρτωσης εξετάζει τη καταλληλότητα των συνεργατικών κόμβων όσον αφορά τον χρόνο απόκρισης των διεργασιών και την κατανάλωση ενέργειας και κατόπιν επιλέγει τον κατάλληλο συνεργατικό κόμβο για να διεξάγει τον ζητούμενο υπολογισμό. Ερευνητές παρουσίασαν ένα προσαρμοστικό μοντέλο κατανομής πόρων και ανέπτυξαν ένα αναλυτικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της καθυστέρησης κατανομής των διεργασιών, της κατανάλωσης ενέργειας και του χρόνου απόκρισης τόσο για το μη συνεργατικό όσο και για το συνεργατικό σχέδιο εκτέλεσης διεργασιών στα δίκτυα οπτικών ινών FiWi. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο σχέδιο συνεργατικών διεργασιών αποδίδει καλύτερα από το μη συνεργατικό σχέδιο από πλευράς χρόνου απόκρισης διεργασιών και αποδοτικότητα ενεργειακής κατανάλωσης.

1.3 Προκλήσεις

Τα συστήματα 4G (τέταρτης γενιάς) προσφέρουν μια μέση καθυστέρηση 10ms μεταξύ του τερματικού σταθμού και του σταθμού βάσης τα οποία χρησιμεύουν για τον προγραμματισμό των πόρων, την επεξεργασία των μεταδιδόμενων σημάτων, τις διαδικασίες αναμετάδοσης, κλπ. Ωστόσο τα μελλοντικά σενάρια εφαρμογής όπως το Απτικό Διαδίκτυο απαιτούν ελάχιστη καθυστέρηση της τάξεως του 1ms σε συνδυασμό με την αίσθηση της αφής.

Σε λιγότερο από μια δεκαετία από την ενσωμάτωση της ασύρματης τεχνολογίας το φάσμα συχνοτήτων έχει κορεστεί από τη πληθώρα δεδομένων των ηλεκτρονικών

συσκευών, έξυπνων τηλεφώνων (smartphones) κλπ. Οι πιθανές λύσεις για την μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της χρησιμοποίησής του ασύρματου φάσματος είναι η ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών. Στην κατεύθυνση αυτή μπορεί να συμβάλει και η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (MIMO – Multiple Input Multiple Output) που επιτρέπει εκμετάλλευση του χωρικού πεδίου, προκειμένου να επιτύχει υψηλή φασματική απόδοση. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών η φασματική απόδοση κλιμακώνεται γραμμικά με το πλήθος των κεραιών. Στα επόμενα κεφάλαια θα εξετάσουμε αναλυτικότερα τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας.

2 ΑΠΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η αφή είναι η αρχαιότερη έννοια που αναπτύσσεται στην ανθρώπινη εμβρυολογία και είναι απαραίτητη για μια πλήρη κλινική εξέταση. Η αίσθηση της αφής (απτική) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιούμε καθημερινά στις ζωές μας και είναι ύψιστης σημασίας.

Η αίσθηση της αφής σχετίζεται με τρεις παραμέτρους. Τη δερματική, τη κιναισθητική και την απτική. Όλες οι αντιλήψεις που σχετίζονται με τις παραπάνω αισθήσεις αναφέρονται σαν αληθινή αντίληψη. Η αίσθηση της αφής μπορεί να χαρακτηριστεί ως παθητική ή ενεργητική και ο όρος «απτική» συσχετίζεται συχνά με την ενεργητική επαφή για επικοινωνία και αναγνώριση πιθανών αντικειμένων.

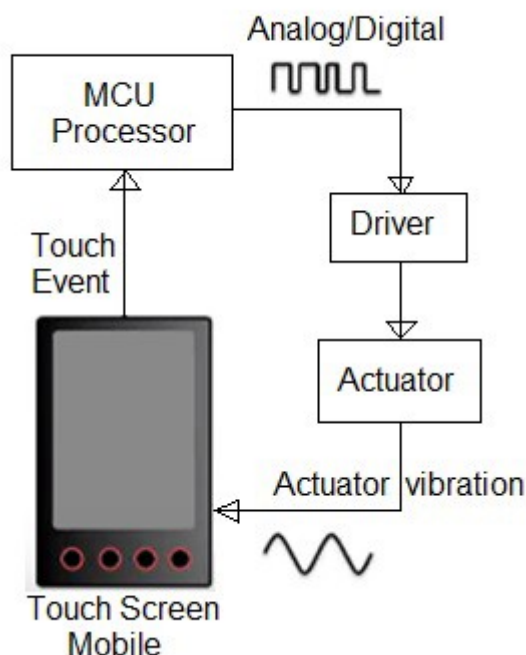
Είναι ευρέως γνωστό ότι τα ρομπότ είναι το μέλλον της υγειονομικής περίθαλψης και είναι γενικά αποδεκτό ότι ο αυξανόμενος αριθμός των ανθρώπων που χρειάζεται υγειονομική περίθαλψη έρχεται σε αντίθεση με τον αριθμό αυτών που μπορούν να την παρέχουν. Παρόλα αυτά δεν έχει γίνει ακόμα το άλμα για μαζική χρήση των ρομπότ στην ιατρική. Δύο παράγοντες που συμβάλλουν στην έλλειψη ρομπότ στον τομέα της υγείας είναι οι εξής:

- Λόγω του ότι οι στοχευμένες περιοχές είναι κρίσιμες, ακόμα και μέτρια προβλήματα θα ήταν καταστροφικά αν δεν λειτουργήσουν όλα σωστά.
- Οι αβεβαιότητες των ρομποτικών λύσεων ξεπερνούν τα πιθανά οφέλη.

Η απτική τεχνολογία αποτελεί σημαντική εξέλιξη στις ιατρικές και οδοντιατρικές επεμβάσεις. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η απτική αντίληψη είναι η διαδικασία αναγνώρισης αντικειμένων δια της αφής και η ιατρική από τότε που ξεκίνησε ως επιστήμη αφορούσε τη σύνδεση των ιατρών με τους ασθενείς μέσω της αφής. Τώρα, η τεχνολογία έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο οι ιατροί επικοινωνούν με τους ασθενείς τους. Όταν η γνώση της ανατομίας και της διάγνωσης συνδυάζεται με την αίσθηση της αφής δημιουργείται μια «επανάσταση» στο χώρο της ιατρικής εκπαίδευσης προσφέροντας στο χειρουργό την ικανότητα μιας ακριβούς ρομποτικής αφής. Η ανάπτυξη του υλικού και του λογισμικού οδήγησε στη δημιουργία εικονικών κόσμων μέσω της προσομοίωσης. Η εικονική πραγματικότητα επιτρέπει στους χρήστες να βρίσκονται και να κινούνται σ'έναν εικονικό κόσμο με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της πραγματικής ζωής. Η τρισδιάστατη απτική τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας έχει προταθεί ως ισχυρό εργαλείο για την εκπαίδευση των επαγγελματιών υγείας. Τα οφέλη για τον ιατρικό χώρο είναι σημαντικά και συμπεριλαμβάνουν τα παρακάτω:

- **Απτική γνώση:** η αφή προσφέρει στους χρήστες άμεση και διαισθητική γνώση.
- **Βελτίωση της απόδοσης:** η πληροφορία παρέχεται στο σωστό χρόνο, γεγονός που βοηθά στην αποφυγή απόσπασης της προσοχής και την ελαχιστοποίηση της ασάφειας.
- **Διαισθητικές ειδοποιήσεις:** βοηθούν το χρήστη στην ιεράρχηση σημαντικών πληροφοριών πράγμα που βοηθάει στην βελτίωση της κλινικής επάρκειας και τη μείωση των ιατρικών σφαλμάτων [15].

2.1 Λειτουργία απτικής τεχνολογίας



Εικόνα 4 - Λειτουργία απτικής τεχνολογίας [7]

Πλέον οι οθόνες αφής έχουν αντικαταστήσει τις παραδοσιακές διεπαφές χρήστη σε διάφορες συσκευές όπως έξυπνα κινητά τηλέφωνα, tablet κλπ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απτική τεχνολογία έχει πολλά οφέλη, όπως η πιο ρεαλιστική εμπειρία και επομένως η μεγαλύτερη ικανοποίηση από τους χρήστες, ενώ επίσης βελτιώνει και την απόδοση στο χώρο εργασίας.

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι ο ελεγκτής της οθόνης αφής στέλνει ένα σήμα στη μονάδα MCU (microcontroller) ή στον επεξεργαστή όταν ανιχνεύεται πίεση είτε με το δάχτυλο είτε με το χέρι. Το «συμβάν αφής» ενεργοποιεί την MCU ή τον επεξεργαστή έτσι ώστε να μπορεί να παράγει την κυματομορφή του σήματος δόνησης όπως φαίνεται παραπάνω.

Αυτή η κυματομορφή δίνεται ως είσοδος στο IC (integrated circuit) που χειρίζεται το σύστημα δόνησης και προκαλεί την κίνηση του ενεργοποιητή σε συγκεκριμένη κατεύθυνση προκειμένου να δημιουργηθεί η δόνηση την οποία ο χρήστης αισθάνεται την αίσθηση της αφής.

Με την ανάπτυξη της απτικής τεχνολογίας μπορεί να επωφεληθεί και η ιατρική, καθώς οι χειρουργοί θα έχουν τη δυνατότητα να αισθάνονται και να ψηλαφίζουν όγκους ακόμα και κατά τη διάρκεια λαπαροσκοπικών χειρουργικών επεμβάσεων χάρη στο «απτικό» νυστέρι.

Πλέον η λαπαροσκοπική μέθοδος προτιμάται καθώς ελαχιστοποιεί το πόνο και τη μετεγχειρητική αποκατάσταση. Στην εν λόγω μέθοδο πραγματοποιείται μια μικρή τομή στο σώμα του ασθενή, ενώ οι χειρουργοί έχουν εικόνα μέσω βίντεο από μικροσκοπικές κάμερες. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο γιατρός δεν έχει τη δυνατότητα να αισθανθεί τον όγκο πριν τον αφαιρέσει. Η υφή του ιστού βοηθάει τους γιατρούς για μια πιο σωστή διάγνωση και κατηγοριοποίηση του όγκου σε καλοήγη ή κακοήγη.

Μια επιστημονική ομάδα του πανεπιστημίου του Leeds[36] ανέπτυξε μια απτική συσκευή που μπορεί πλέον να πραγματοποιεί τέτοιου είδους επεμβάσεις παρέχοντας τόσο εικόνα όσο και αφή, χρησιμοποιώντας την απτική τεχνολογία. Έτσι αναδημιουργεί την αίσθηση πίεσης μεταξύ του χεριού του χειρουργού και ενός όγκου. Η συσκευή ονομάζεται Palpatronix και πρόκειται για μια συσκευή χεριός σε σχήμα στυλό, η οποία μετακινείται ακριβώς όπως ένα ποντίκι ηλεκτρονικού υπολογιστή πάνω από μία εικονική τρισδιάστατη επιφάνεια. Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής στέλνει σήματα στη συσκευή για να καταγράψει τη δύναμη που εφαρμόζεται από το χέρι και η πίεση που ανιχνεύει η συσκευή με τη σειρά της την «αντικατοπτρίζει» στο χέρι του χειρουργού. Αυτή η μέθοδος θα επιτρέψει στους γιατρούς να ανακτήσουν την χαμένη αίσθηση της ψηλάφησης, ενώ ταυτόχρονα θα συνεχίζουν να χρησιμοποιούν τη λαπαροσκοπική μέθοδο με όλα της τα οφέλη.

Επίσης ερευνητές του τμήματος πληροφορικής του πανεπιστημίου Μπρίστολ ανέπτυξαν μια άλλη τεχνολογία η οποία επαναφέρει την αίσθηση της αφής σε μη απτές επιφάνειες, και έτσι ο χρήστης νιώθει χωρίς να ακουμπάει πραγματικά. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στην προβολή ενός ολογράμματος με το οποίο, ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να αλληλεπιδράσει και να έχει απτικά ερεθίσματα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί υπερήχους, οι οποίοι εστιάζουν στα χέρια του

παρατηρητή έτσι ώστε να αισθανθεί το ολόγραμμα με τη μορφή απτικής ανάδρασης. Αυτή η τεχνολογία όπως αναφέραμε και προηγουμένως θα μπορούσε να προσφέρει στην ιατρική επιστήμη για παράδειγμα στους χειρουργούς τη δυνατότητα να εξετάσουν μια αξονική τομογραφία διά της αφής, δηλαδή να ψηλαφίσουν π.χ. έναν καρκινικό όγκο.

2.1.1 Απτική τεχνολογία χωρίς επαφές

Η απτική τεχνολογία χωρίς επαφή χρησιμοποιεί την αίσθηση της αφής χωρίς την ύπαρξη κάποιας φυσικής συσκευής εισόδου. Αυτός ο τύπος ανατροφοδότησης περιλαμβάνει αλληλεπιδράσεις με ένα σύστημα που βρίσκεται σε ένα τρισδιάστατο χώρο γύρω από τον χρήστη. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί με τη μορφή ολογράμματος και τη διαχείριση από το χρήστη μέσω υπερήχων όπως ακριβώς είδαμε και στο παράδειγμα με την ανακάλυψη των ερευνητών στο Πανεπιστήμιο του Μπρίστολ.

2.2 Απτική επικοινωνία

Η απτική επικοινωνία αναφέρεται στην αίσθηση της αφής και την αλληλεπίδραση μας με αυτή και αφορά την εξομοίωση των ασκούμενων δυνάμεων των δονήσεων και των κινήσεων διαφόρων εικονικών αντικειμένων. Αυτή η μηχανική διέγερση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δημιουργία εικονικών αντικειμένων προσομοιώνοντας τα, αλλά και να ελέγξει εικονικά αντικείμενα προκειμένου να ενισχύσει το τηλεχειρισμό μηχανών και συσκευών (telerobotics). Οι απτικές συσκευές μπορούν ακόμα να ενσωματώνουν αισθητήρες απτικής διαδρομής που μετρούν τις δυνάμεις που ασκεί ο χρήστης στη διεπαφή.

Η απτική τεχνολογία μπόρεσε να εξετάσει πως λειτουργεί η ανθρώπινη αίσθηση της αφής, επιτρέποντας τη δημιουργία ελεγχόμενων απτικών αντικειμένων. Για τη μεταφορά της απτικής πληροφορίας χρησιμοποιούνται απτικοί αισθητήρες (tactile sensors) και γάντια δεδομένων (data gloves). Παρόλο που η απτική ανατροφοδότηση είναι ένα νέο εξελισσόμενο επιστημονικό πεδίο αλληλεπιδραστικής δραστηριότητας, οι απτικές διεπαφές δίνουν εξαιρετικά

αποτελέσματα καθώς προσφέρουν μια νέα διάσταση στην επικοινωνία ανθρώπου μηχανής. Η απτική απόδοση (haptic rendering) είναι η διαδικασία η οποία συνθέτει τα επιθυμητά ερεθίσματα προς το χρήστη ώστε να του ανατροφοδοτηθούν οι φυσικές ιδιότητες ενός εικονικού αντικειμένου, όπως το σχήμα, η ελαστικότητα, η αφή του κλπ.

2.2.1 Δονήσεις

Η πλειοψηφία των ηλεκτρονικών συσκευών που προσφέρουν απτική ανατροφοδότηση, χρησιμοποιούν δονήσεις και οι περισσότεροι χρησιμοποιούν ένα τύπο έκκεντρου εκκινητή περιστρεφόμενης μάζας (ERM-Eccentric Rotating Mass), που αποτελείται από ένα μη ισορροπημένο βάρος, που συνδέεται με τον άξονα του κινητήρα. Καθώς ο άξονας περιστρέφεται, η περιστροφή αυτής της ακανόνιστης μάζας προκαλεί τον ενεργοποιητή, και με τη σειρά του, τη συνδεδεμένη συσκευή, να κινείται.

Ορισμένες νεότερες συσκευές, όπως οι φορητοί υπολογιστές της Apple και τα iPhones που διαθέτουν το "Taptic Engine", πραγματοποιούν τις δονήσεις τους με έναν γραμμικό συντονιστή (LRA - Linear Resonant Actuator), ο οποίος μετακινεί μια μάζα με ένα μαγνητικό πηνίο φωνής, και παρόμοια με την τεχνολογία των ηχείων μεταφράζει DC (Direct Current) ηλεκτρικά σήματα σε κίνηση του κώνου του ηχείου. Οι LRA είναι σε θέση να έχουν ταχύτερους χρόνους απόκρισης από τους ERM και έτσι είναι σε θέση να μεταδίδουν ακριβέστερες οπτικές εικόνες.

Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή κραδασμών και προσφέρουν ακόμα πιο ακριβή κίνηση με λιγότερο θόρυβο αλλά απαιτούν υψηλότερες τάσεις από τις υλοποιήσεις ERM και LRA και μπορεί να είναι πιο εύθραυστες.

2.2.2 Ανατροφοδότηση δυνάμεων

Η ανατροφοδότηση δύναμης είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει την απτική και / ή την κιναισθητική ανάδραση. Αν ένα άτομο πρόκειται να αισθανθεί ένα εικονικό αντικείμενο, η ανάδραση δύναμης είναι το είδος της πληροφορίας που πρέπει να λάβει ο χρήστης. Ερευνητές άρχισαν να

δουλεύουν σε απτικές συσκευές διασύνδεσης που θα επιτρέπουν στους χρήστες να αισθάνονται εικονικά αντικείμενα μέσω ανατροφοδότησης δύναμης.

2.3 Απτική αντίληψη

Σύμφωνα με την οικολογική προσέγγιση για την άμεση αντίληψη του Gibson, η αντίληψη αποτελεί μια αυτόματη διαδικασία η οποία βρίσκεται σε άμεση σύνδεση με το περιβάλλον και τα πλούσια ερεθίσματα που αυτό προσφέρει [14]. Σύμφωνα με τον Simmons [33], η αντίληψη φαίνεται να σχετίζεται με τα εξωτερικά ερεθίσματα, ενώ οι αισθήσεις με την εσωτερική εμπειρία η οποία συνδέεται με ένα εξωτερικό ερέθισμα.

Ο άνθρωπος έχει την ικανότητα, μέσω της αφής, να αντιλαμβάνεται και να αισθάνεται αντικείμενα και έτσι αυξάνεται η απτική του αντίληψη [16]. Η απτική αντίληψη αναφέρεται στο συνδυασμό δερματικής και κιναισθητικής αντίληψης και αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που συνδυάζει την επαφή του δέρματος με τη κίνηση, όταν πραγματοποιείται εξερεύνηση ενός αντικειμένου. Συνεπώς μέσω της απτικής αντίληψης δημιουργούνται μηχανικά σήματα που διεγείρουν τα απτικά και κιναισθητικά κανάλια του ανθρώπου, παρέχοντας πληροφορίες του αντικειμένου που έρχεται σε επαφή με το χρήστη, ως προς τη θέση του, το υλικό και άλλες επιπρόσθετες πληροφορίες[15]. Η απτική αντίληψη έχει βοηθήσει πολύ στην ανάπτυξη εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας. Κυρίως όταν μιλάμε για εφαρμογές υγείας, όπου απαιτείται η ύπαρξη απτικών εφαρμογών για την εκμάθηση ιατρών, νοσηλευτών και συναφών ειδικοτήτων που έχουν υψηλό ρίσκο.

2.4 Απτικές συσκευές

Οι απτικές συσκευές είναι μια καινοτομία στο χώρο της τεχνολογίας, που επιτρέπουν την επικοινωνία ανθρώπου μηχανής καθώς επίσης και στους χρήστες να αγγίζουν και να αισθάνονται αντικείμενα σε μεγάλο βαθμό ρεαλισμού.

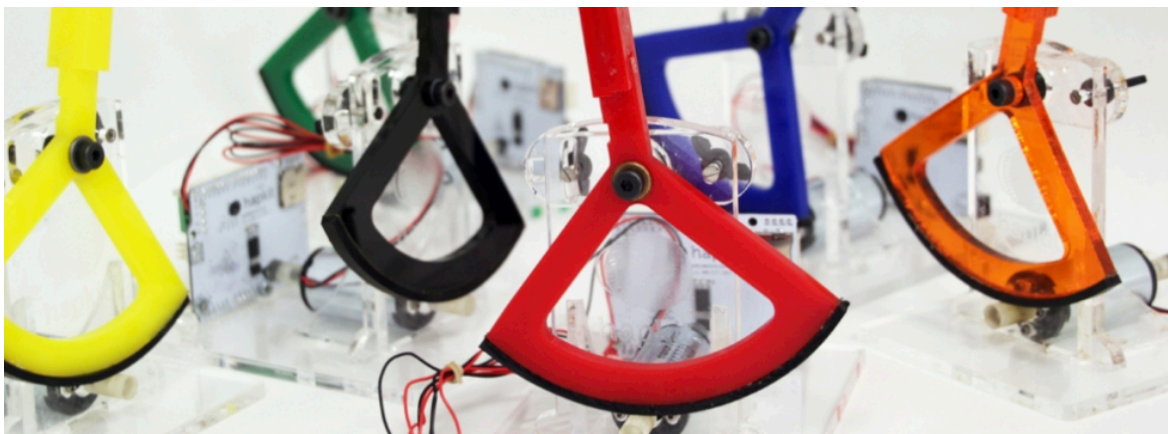
Οι απτικές συσκευές αναφέρονται στην αίσθηση και το χειρισμό μέσω της αφής επιτρέποντας στο χρήστη να αγγίζει και να αισθάνεται εικονική πραγματικότητα

ή έμμεσα κάποιο απομακρυσμένο αντικείμενο. Οι απτικές συσκευές λειτουργούν ταυτόχρονα ως συσκευές εισόδου και εξόδου. Ανταποκρίνεται στις κινήσεις του χρήστη όταν αυτός τις χειρίζεται μετακινώντας τον ακροδέκτη τους (end-effector) στο χώρο για να αισθανθεί τελικά ως αλληλεπίδραση τη δύναμη αντίστασης. Υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες απτικών συσκευών οι οποίες αναλύονται στα επόμενα.

2.4.1 Απτικές Συσκευές Μονού Σημείου αλληλεπίδρασης

Οι συσκευές μονού σημείου αλληλεπίδρασης [16] διαθέτουν ένα ακροδέκτη σε σχήμα ράβδου ή μπίλιας, την οποία χειρίζεται ο χρήστης σαν στυλό. Στο εικονικό περιβάλλον υπάρχει ένα αντίγραφο του ακροδέκτη το οποίο κινείται σύμφωνα με τις κινήσεις του χρήστη. Στη συνέχεια η θέση του ακροδέκτη στο εικονικό περιβάλλον αποτελεί την είσοδο στο σύστημα.

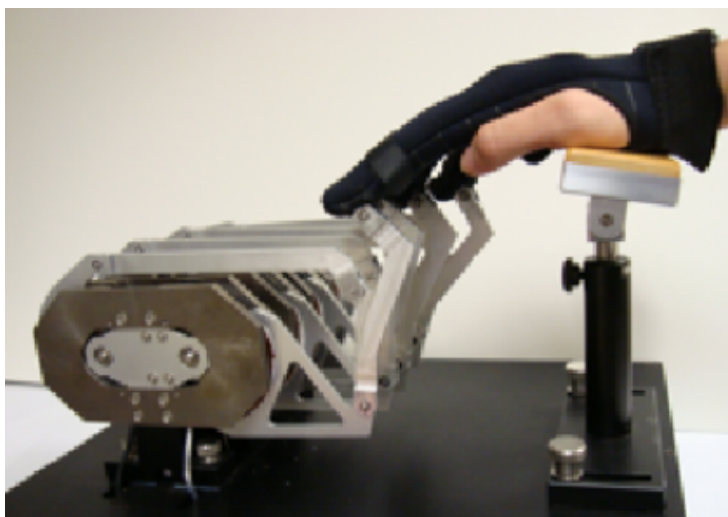
Οι συσκευές μονού σημείου αλληλεπίδρασης, έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας (Degrees of Freedom) ως προς τη κίνηση του χρήστη (θέση και προσανατολισμός ακροδέκτη) και τρεις βαθμούς ελευθερίας για ανάδραση δύναμης [30]. Σε πιο απαιτητικές εφαρμογές με υψηλότερες απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα ιατρικές εφαρμογές, εξελιγμένες συσκευές μονού σημείου αλληλεπίδρασης είναι σε θέση αποδώσουν ανάδραση δύναμης και ροπής με έξι βαθμούς ελευθερίας.



Εικόνα 5 - Απτικά πηδάλια [4]

2.4.2 Απτικές συσκευές πολλαπλών σημείων αλληλεπίδρασης

Αντίθετα οι συσκευές πολλαπλών σημείων αλληλεπίδρασης βασίζονται σε πολλές μονάδες απτικής ανάδρασης. Αυτό πραγματοποιείται μέσω εξωσκελετικών μηχανισμών οι οποίες συνήθως τοποθετούνται στα άκρα του χρήστη. Στη πλειοψηφία των συσκευών μπορεί να ασκηθεί δύναμη σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (ένας βαθμός ελευθερίας) σε κάθε δάκτυλο του χεριού. Η χρήση εξωσκελετικών συσκευών μπορεί να συνδυαστεί με τα γάντια δεδομένων (datagloves) προκειμένου οι πληροφορίες που ανατροφοδοτούνται στο σύστημα να είναι πιο ακριβής ως προς τη θέση και προσανατολισμό όλων των φαλάγγων των δακτύλων του χεριού. Η διαφορά των εξωσκελετικών μηχανισμών με τα γάντια δεδομένων είναι ότι οι εξωσκελετικές συσκευές παρέχουν μόνο απτική ανάδραση χωρίς να μπορούν να δώσουν περαιτέρω πληροφορίες σε αντίθεση με τα γάντια δεδομένων που μπορούν να παρέχουν στο σύστημα παραπάνω δεδομένα όπως για παράδειγμα την ακριβή θέση του χεριού, τον προσανατολισμό του κτλ. Για το λόγο αυτό οι εξωσκελετικές συσκευές δεν χρησιμοποιούνται κατευθείαν σαν είσοδος στο σύστημα αλλά συνδυάζονται με γάντια δεδομένων για πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 6 - Η απτική συσκευή πολλαπλών σημείων διαθέτει τέσσερις μηχανισμούς για αλληλεπίδραση ενός σημείου με κάθε ένα από τα τέσσερα δάχτυλα. Ο χρήστης φοράει γάντι με κλιπ για να συνδέσει τέσσερα δάκτυλα στους τέσσερις μηχανισμούς [5].

2.5 Αρχιτεκτονική απτικής απόδοσης

Η σημαντικότερη έννοια της αρχιτεκτονικής της απτικής απόδοσης, είναι η λειτουργία της σωλήνωσης απτικής ανάδρασης (haptic interaction pipeline) η οποία περιγράφει πώς πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων, προκειμένου να υλοποιηθεί η απτική αλληλεπίδραση ανθρώπου μηχανής.

Αποτελείται από 3 κύρια υποσυστήματα:

- Οι **αλγόριθμοι ανίχνευσης σύγκρουσης** καταγράφουν τις συγκρούσεις που γίνονται μεταξύ ενός απτικού αντιγράφου και των εικονικών αντικειμένων και ανατροφοδοτούν στο σύστημα τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη σύγκρουση.
- Οι **αλγόριθμοι υπολογισμού δύναμης** υπολογίζουν τη δύναμη που ασκήθηκε από τη σύγκρουση μεταξύ του εικονικού αντικειμένου και του απτικού αντιγράφου. Αυτός ο αλγόριθμος ιδανικά θα πρέπει να υπολογίζει τη δύναμη αν αυτή ασκούνταν πραγματικά. Για τον υπολογισμό της δύναμης λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι παράγοντες όπως η θέση των εικονικών αντικειμένων και των απτικών εγγράφων καθώς και η γεωμετρία αυτών.
- Οι **αλγόριθμοι ελέγχου** υπολογίζουν τη δύναμη που πρέπει να ασκηθεί στον ακροδέκτη της απτικής συσκευής προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ της τιμής που υπολογίστηκε στον προηγούμενο αλγόριθμο και της ασκούμενης δύναμης λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς και τις ιδιότητες της απτικής συσκευής. Αυτή η απόκλιση συμβαίνει λόγω των περιορισμών του υλικού των απτικών συσκευών που οδηγεί σε αδυναμία υπολογισμού της ακριβής δύναμης.

Η έννοια του «Haptic» περιλαμβάνει αναγκαστική ανατροφοδότηση μεταξύ αυτών που αλληλεπιδρούν. Έτσι από αυτή την αμφίδρομη ροή δημιουργούνται πληροφορίες.

Μέσω ειδικών συσκευών όπως joysticks και γάντια δεδομένων μπορούμε να πάρουμε ανατροφοδότηση από εφαρμογές ηλεκτρονικών υπολογιστών και να

αισθανθούμε οποιοδήποτε μέρος του σώματος. Οι απτικές αισθήσεις δημιουργούνται από κινητήρες που δημιουργούν δονήσεις στους χρήστες και είναι ελεγχόμενοι από ενσωματωμένο λογισμικό.

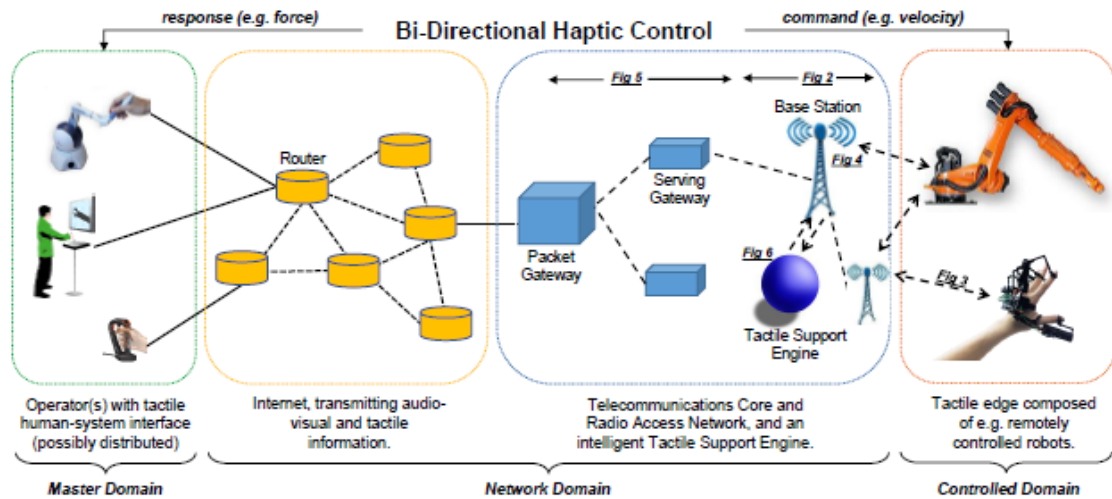
Σε συνδυασμό με μια οθόνη η απτική τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκπαιδεύσει ανθρώπους για εργασίες που απαιτούν οπτική και απτική επαφή . Η απτική ανατροφοδότηση είναι σημαντικό κλειδί για την ιατρική επιστήμη όπως είδαμε και παραπάνω πιο αναλυτικά.

2.6 Αρχιτεκτονική απτικού διαδικτύου

Η αίσθηση της αφής δημιουργεί μια συσχέτιση μεταξύ των ανθρώπων και άγνωστων περιβαλλόντων με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των ακουστικών και οπτικών αισθήσεων. Διαφορετικά από κλασσική έννοια της αφής, η απτική αίσθηση εμφανίζεται σε δύο επίπεδα. Για παράδειγμα ένα άγγιγμα ανιχνεύεται από την εφαρμογή κίνησης σε ένα περιβάλλον και την ανάδραση αυτού. Οι απτικές επικοινωνίες παρέχουν μια επιπλέον διάσταση σε σχέση με τις οπτικοακουστικές για πραγματικό έλεγχο σε απομακρυσμένα περιβάλλοντα.

Σε αντίθεση με το συμβατικό διαδίκτυο το οποίο συμβάλει στην μεταφορά ηχητικών και οπτικών σημάτων, το Απτικό Διαδίκτυο παρέχει επιπλέον τη δυνατότητα μεταφοράς αφής σε πραγματικό χρόνο. Δηλαδή παρέχεται η δυνατότητα απτικού και μη απτικού ελέγχου μέσω διαδικτύου.

Η βασική διάκριση μεταξύ απτικού και μη απτικού ελέγχου [9] είναι ότι στη περίπτωση του πρώτου υπάρχει απτική ανατροφοδότηση (κιναισθητική ή δονητική) εκτός από οπτικοακουστική από το σύστημα, ενώ στον μη απτικό έλεγχο υπάρχει μόνο οπτικοακουστική ανατροφοδότηση. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το Απτικό Διαδίκτυο μπορεί να χωριστεί σε τρεις τομείς: **τον κύριο τομέα** (master domain), **το τομέα δικτύου** (network domain) και **τον ελεγχόμενο τομέα** (controlled domain).



Εικόνα 7 - Αρχιτεκτονική Απτικού Διαδικτύου [1].

2.6.1 Master Domain

Ο κύριος τομέας αποτελείται από έναν άνθρωπο ο οποίος είναι ο χειριστής του συστήματος και την διεπαφή Ανθρώπου - Συστήματος (HSI - Human System Interface). Η HSI είναι μια απτική συσκευή (master robot) η οποία μετατρέπει τα ανθρώπινα δεδομένα εισόδου σε απτικά μέσω διαφόρων τεχνικών απτικής αποκωδικοποίησης. Η απτική αυτή συσκευή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αγγίζει, να αισθάνεται και να χειρίζεται αντικείμενα σε πραγματικό και εικονικό περιβάλλον καθώς και να κάνει βασικούς ελέγχους στη λειτουργία του controlled domain. Ο κύριος τομέας, ελέγχει επίσης τις οπτικοακουστικές ανατροφοδοτήσεις. Επιπλέον της απαίτησης για μη απτικό έλεγχο οι οπτικοακουστικές ανατροφοδοτήσεις έχουν επίσης καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της αντίληψης ενώ και το ανθρώπινο μυαλό αφομοιώνει έτσι καλύτερα τις διαφορετικές αισθητηριακές λεπτομέρειες. Στη συνέχεια, ο ρομποτικός βραχίονας ακολουθεί τις ανθρώπινες κινήσεις και έχει τη δυνατότητα να ασκήσει δύναμη στο άκρο του. Για να γίνει πραγματικότητα το όραμα του Απτικού διαδικτύου χρειάζονται ορισμένες βελτιώσεις στις απτικές συσκευές και πιο συγκεκριμένα, απαιτείται αύξηση των βαθμών ελευθερίας (DoF - Degrees of Freedom) προκειμένου να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των μελλοντικών εφαρμογών.

2.6.2 Network Domain

Ο τομέας δικτύου [9] παρέχει το μέσο για διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία συνδέοντας κιναισθητικά τον άνθρωπο με απομακρυσμένα περιβάλλοντα. Το Απτικό Διαδίκτυο απαιτεί εξαιρετική αξιοπιστία και υπέρ-ευαίσθητη σύνδεση δικτύου προκειμένου να μην υπάρχουν καθυστερήσεις και να επιτυγχάνεται μετάδοση σε πραγματικό χρόνο. Η βασική αρχιτεκτονική του αποτελείται από το Radio Access Network (RAN) και Core Network (CN) αναμένεται να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- i. Επαρκής υποστήριξη διαφόρων τεχνολογιών Ραδιοεπικοινωνίας (RAT- Radio Access Technology) όπως κυψελοειδές τεχνολογίες, MIMO κλπ.
- ii. Αποτελεσματική παράδοση των πακέτων μέσω αξιόπιστων ράδιο - πρωτοκόλλων και του φυσικού επιπέδου (PHY - Physical Layer).
- iii. Βέλτιστη επίλυση συγκρούσεων των διεπαφών μέσω τεχνικών ελέγχου της πρόσβασης στο φυσικό μέσο (MAC).

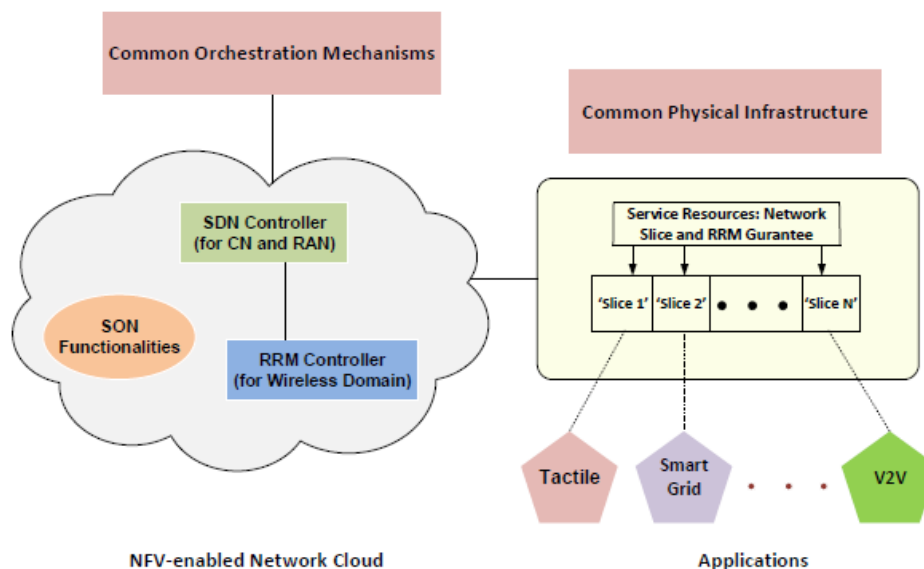
Οι βασικές λειτουργίες του δικτύου 5G που σχετίζονται με το Απτικό Διαδίκτυο είναι οι εξής:

- i. Παροχή δυναμικής ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS - Quality of Service).
- ii. Πρόσβαση σε υπηρεσίες cloud.
- iii. Ασφάλεια.

Παρόλο που διάφορες ερευνητικές προσπάθειες στηρίζονται στη μελέτη των 5G συστημάτων, δεν έχει συμφωνηθεί ακόμα η αρχιτεκτονική του δικτύου που θα υλοποιηθεί. Ωστόσο τόσο η ακαδημαϊκή όσο και η βιομηχανική κοινότητα έχουν συμφωνήσει ότι τα δίκτυα 5G θα πρέπει να σχεδιάζονται με ευέλικτο τρόπο, όπως ένα δίκτυο βασισμένο σε μία κοινή φυσική υποδομή, αποτελεσματικά διαμοιρασμένο μεταξύ διάφορων εφαρμογών. Αυτός ο διαμοιρασμός θα είναι δυνατός με τη κατάτμηση του δικτύου σε διαφορετικά κομμάτια. Ένα κομμάτι ορίζεται ως υπηρεσία συνδεσιμότητας βασισμένη σε διάφορες λειτουργίες λογισμικού που μπορούν να ελέγχουν τη περιοχή κάλυψης, τη διαθεσιμότητα, την

σταθερότητα, τη χωρητικότητα και την ασφάλεια. Μια τέτοια προσέγγιση, κατάτμησης του δικτύου κάνει το δίκτυο περισσότερο λειτουργικό. Οι πρόσφατες τάσεις της εικονοποίησης των λειτουργιών του δικτύου (NFV – Network Function Virtualization) και της δικτύωσης βασισμένης στο λογισμικό (SDN – Software Defined Network) είναι καθοριστικής σημασίας για τη διαμόρφωση μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής. Το NFV διαχωρίζει τις λειτουργίες δικτύου από την υποδομή υλικού. Η λειτουργία του δικτύου διαχειρίζεται ως μονάδα λογισμικού η οποία μπορεί να αναπτυχθεί σε οποιαδήποτε υποδομή υπολογιστικού νέφους. Από την άλλη πλευρά το SDN παρέχει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο όπου τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων είναι ξεχωριστά και επιτρέπει τον άμεσο προγραμματισμό του ελέγχου δικτύου από τους ελεγκτές.

Για την υποδομή του απικτικού διαδικτύου, πλέον θεωρείται ότι ταιριάζει καλύτερα η αρχιτεκτονική Cloud-RAN η οποία δίνει τη δυνατότητα μιας πιο ευέλικτης από άκρο σε άκρο αρχιτεκτονικής βασισμένης στον διαχωρισμό SDN/NFV στο τομέα της δικτύωσης. Έτσι μπορεί να σχεδιαστεί ένα δίκτυο με ευέλικτο τρόπο προσφέροντας διαφορετικές φέτες δικτυακών πόρων από άκρο σε άκρο σε διαφορετικές εφαρμογές. Ως παράδειγμα μπορούμε να δούμε την λογική αρχιτεκτονική προσέγγιση που απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 8 - Λογική προσέγγιση αρχιτεκτονικής 5G συστημάτων βασισμένη σε μια κοινή φυσική υποδομή [9]

2.6.3 Controlled Domain

Αυτός ο τομέας αποτελείται από την τηλεχειριζόμενη μονάδα (ελεγχόμενο ρομπότ) το οποίο ελέγχεται άμεσα από τον κύριο τομέα μέσω διαφόρων εντολών και αλληλεπιδράει με διάφορα αντικείμενα στο απομακρυσμένο περιβάλλον. Τυπικά δεν υπάρχει a priori γνώση σχετικά με το απομακρυσμένο περιβάλλον. Μέσω των εντολών και των ανατροφοδοτήσεων, η πληροφορία ανταλλάσσεται μεταξύ των δυο τομέων και έτσι δημιουργείται ένας βρόγχος ελέγχου.

3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

Οι περισσότεροι άνθρωποι στις μέρες μας είναι εξοικειωμένοι με την απτική τεχνολογία μέσω των διεπαφών για έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smart phones), tablet, pc και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών αφού υπάρχουν εφαρμογές που χρησιμοποιούν απτικούς και βιομετρικούς αισθητήρες για τη λειτουργία τους. Από την άλλη πλευρά οι απτικές συσκευές ενσωματώνουν αισθητήρες αφής που δέχονται τα δεδομένα που οι χρήστες εισάγουν.

Οι εφαρμογές νέας γενιάς θα είναι απτικές και θα ανταποκρίνονται σε μη λεκτική επικοινωνία στην οποία απομακρυσμένοι χρήστες θα απολαμβάνουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Με τη βοήθεια του δικτύου 5G, τα απτικά συστήματα και οι εφαρμογές θα διευκολύνουν την μετάδοση της αφής οδηγώντας σε μια νέα διάσταση αλληλεπίδρασης και παρεχόμενων υπηρεσιών αναφερόμενο ως «Haptic Communications». Αναμένεται ότι η εμπορευματοποίηση του 5G θα επιτρέψει στο Απτικό Διαδίκτυο να είναι πανταχού παρών αφού οι εφαρμογές του θα είναι διαθέσιμες οποιαδήποτε στιγμή και οπουδήποτε.

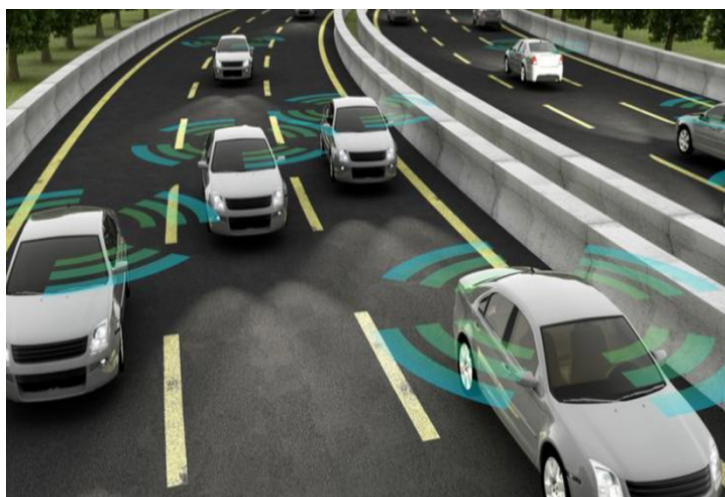
Το Απτικό Διαδίκτυο θα βελτιώσει τον τρόπο επικοινωνίας και θα οδηγήσει σε μια πιο ρεαλιστική κοινωνική αλληλεπίδραση σε διάφορα περιβάλλοντα. Όμως, τα υπάρχοντα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN – Wireless Local Area Network) και συστήματα κινητής τηλεφωνίας δεν πετυχαίνουν την επίτευξη του στόχου της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης της τάξης του 1ms η οποία είναι ζωτικής σημασίας για

την ύπαρξη του Απτικού Διαδικτύου και των εφαρμογών βάση αυτού. Έτσι η 5η γενιά (5G) δικτυακών συστημάτων προβλέπεται να κυριαρχήσει για πολλούς λόγους συμπεριλαμβανομένων της πολύ χαμηλής καθυστέρησης.

3.1 Αυτοματοποίηση στη βιομηχανία

Η αυτοματοποίηση στη βιομηχανία είναι ένα βασικό πεδίο εφαρμογής του Απτικού Διαδικτύου. Στις μέρες μας οι διαδικασίες ελέγχου πραγματοποιούνται με γρήγορη καλωδιακή σύνδεση αλλά στο μέλλον, τα ενσύρματα συστήματα θα αντικατασταθούν, μερικώς ή πλήρως με ασύρματα συστήματα προκειμένου θα επιτευχθεί μεγαλύτερη ευελιξία. Η αυτοματοποίηση στη βιομηχανία μαζί με την ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ μηχανών είναι από τις εφαρμογές που αναμένεται να αναπτυχθούν αρχικά στο πλαίσιο των 5G συστημάτων. Σε τέτοιες εφαρμογές διάφοροι έλεγχοι και διαδικασίες απαιτούν πολύ μικρή από άκρο σε άκρο καθυστέρηση και αξιόπιστη και ασφαλή μετάδοση δεδομένων.

3.2 Αυτόνομη οδήγηση



Εικόνα 9 - Συνδεδεμένα οχήματα για αυτόνομη οδήγηση [17]

Ένα νέο βήμα που συζητείται στο πλαίσιο εφαρμογής του 5G είναι η πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση [5] η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά τόσο τα τροχαία ατυχήματα όσο και την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την

επικοινωνία οχήματος με όχημα (V2V - Vehicle to Vehicle) ή οχήματος με μια ειδική υποδομή (V2I - Vehicle to Infrastructure) η οποία θα είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Ο χρόνος που απαιτείται για αποφυγή ατυχήματος και την ασφάλεια των οχημάτων, στις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές, είναι κάτω των 10ms. Η ανταλλαγή δεδομένων παρέχει πληροφορίες σχετικά με το

περιβάλλον του οχήματος όσο επίσης και για τα μη ορατά εμπόδια. Τα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών όπως το ραδιοφωνικό σύστημα FM (Frequency Modulation), έχουν υψηλή καθυστέρηση και χαμηλή ακρίβεια έτσι δεν είναι κατάλληλα για κρίσιμες εφαρμογές όπως αυτή που περιγράφουμε. Συνεργατικά συστήματα όπως το WLAN Car-2-X επιτρέπει άμεση ανταλλαγή δεδομένων αλλά δεν υποστηρίζει όλους τους κανόνες ασφαλείας. Εάν η ροή των δεδομένων είναι αμφίδρομη με σκοπό αυτόματους ελιγμούς του οχήματος και αποφυγή εμποδίων τότε μια καθυστέρηση της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου (ms) κρίνεται αναγκαία. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του Απτικού Διαδικτύου με καθυστέρηση που μπορεί να κυμαίνεται από 1-3 ms. Η πλήρως αυτόνομη οδήγηση αναμένεται να αλλάξει τελείως τη κυκλοφοριακή κίνηση, ειδικά όταν οι αποστάσεις μεταξύ των αυτόνομων οχημάτων είναι μικρές και πιθανές κρίσιμες καταστάσεις θα μπορούν να εντοπίζονται έγκαιρα από το σύστημα.

3.3 Ρομποτική

Τα τελευταία χρόνια, η ρομποτική έχει αναπτυχθεί σε διάφορους τομείς και είναι αναμενόμενο ότι στο προσεχές μέλλον θα αναπτυχθεί προς λύσεις αυξημένης πολυπλοκότητας που θα ανταποκρίνονται μόνο σε ένα συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών (πχ. αυτόνομη οδήγηση). Τηλεχειριζόμενα ρομπότ σε πραγματικό χρόνο, με οπτικό-απτική ανατροφοδότηση, φαίνεται να είναι η περισσότερο υποσχόμενη λύση στα αυτόνομα ρομπότ. Τα τηλεχειριζόμενα ρομπότ πρέπει να έχουν χρόνους καθυστέρησης ελέγχου αρκετά μικρούς, κάτι που είναι απαραίτητο τόσο για το ίδιο το ρομπότ όσο και για το αντικείμενο που ελέγχει. Αν η επικοινωνία και ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο δεν είναι εγγυημένη, τότε τα ρομπότ θα κινούνται χωρίς να επιτυγχάνουν τον σκοπό τους.

3.4 Πραγματική και επαυξημένη πραγματικότητα

Οι υπάρχουσες εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας μπορούν να επωφεληθούν σημαντικά από το Απτικό Διαδίκτυο. Η εικονική πραγματικότητα μπορεί να διαμοιραστεί, σε ένα απτικό περιβάλλον όπου πολλοί

χρήστες θα συνδέονται μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης, για την συνεργατική εκτέλεση ενεργειών με πλήρη αντίληψη του αντικειμένου, η οποία δεν θα είναι μόνο οπτικοακουστική αλλά επιπλέον θα περιλαμβάνει και την αίσθηση της αφής. Από την άλλη πλευρά, στην επαυξημένη πραγματικότητα ο συνδυασμός του πραγματικού και του εικονικού περιεχομένου που παράγει ο υπολογιστής οπτικοποιείται στο οπτικό πεδίο του χρήστη. Ο κύριος στόχος της επαυξημένης πραγματικότητας στο προσεχές μέλλον, συγκρίνοντας την με τις σημερινές εφαρμογές που βασίζονται σε στατικές πληροφορίες, είναι η απεικόνιση δυναμικού περιεχομένου και ενημερωμένων πληροφοριών. Η απτική ανατροφοδότηση, στην αναπαράσταση εικονικής πραγματικότητας αποτελεί προϋπόθεση για υψηλής ποιότητας ανάδραση. Η πλήρη αντίληψη του αντικειμένου στην εικονική πραγματικότητα μέσω της αίσθησης της αφής οδηγεί σε ανάπτυξη εφαρμογών με υψηλό επίπεδο ακρίβειας. Αυτή η ακρίβεια όμως μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο αν η καθυστέρηση μεταξύ των χρηστών και της εφαρμογής εικονικής πραγματικότητας είναι ελάχιστα ms. Η επαυξημένη, πρόσθετη, πληροφορία στο οπτικό πεδίο του χρήστη επιτρέπει την ανάπτυξη πολλών συστημάτων υποστήριξης όπως συστήματα συντήρησης, υποστήριξης οδηγού, εκπαίδευσης κ.α. Συμπερασματικά λοιπόν, με το Απτικό Διαδίκτυο, η πληροφορία που εμφανίζεται μέσω επαυξημένης πραγματικότητάς στον χρήστη μπορεί να είναι δυναμική αντί στατική και αυτό επιτρέπει σε πραγματικό χρόνο την εικονική επέκταση του οπτικού πεδίου του χρήστη.

3.5 Η συνεισφορά της απτικής τεχνολογίας στην ιατρική

Η τηλεδιαγνωστική, η τηλεχειρουργική και η απομακρυσμένη κλινική αποκατάσταση είναι μερικές από τις πιθανές εφαρμογές του Απτικού Διαδικτύου στο χώρο της υγειονομικής περίθαλψης. Χρησιμοποιώντας προηγμένα τηλεδιαγνωστικά εργαλεία η ιατρική τεχνογνωσία θα μπορεί να είναι διαθέσιμη οπουδήποτε ανά πάσα στιγμή ανεξάρτητα με το που βρίσκεται ο γιατρός. Έτσι ένα τηλερομπότ εκεί που βρίσκεται ο ασθενής θα ελέγχεται από ένα γιατρό, ο οποίος

θα έχει όχι απλά οπτικοακουστική ανατροφοδότηση αλλά και απτική η οποία προσφέρει μια νέα διάσταση στην εξ αποστάσεως διάγνωση και θεραπεία. Ένα παράδειγμα τηλειατρικής θα μπορούσε να είναι υπερηχογράφημα εξ αποστάσεως, ένας γιατρός χειρίζεται μια απτική συσκευή η οποία είναι συζευγμένη με ένα χειριστήριο υπερηχογραφήματος το οποίο κινείται ακολουθώντας τις κινήσεις της απτικής διεπαφής του γιατρού. Το αποτέλεσμα της εξέτασης μεταδίδεται στην οθόνη του γιατρού. Η ίδια τεχνική ακολουθείται και για εφαρμογές τηλεχειρουργικής. Στην τηλε-αποκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους ασθενείς και να ελέγχονται εξ αποστάσεως οι κινήσεις τους. Σε όλες τις τεχνολογίες του Απτικού Διαδικτύου που βασίζονται εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης, η υψηλή ποιότητα, η μέγιστη ακρίβεια και απειροελάχιστη καθυστέρηση είναι θεμελιώδους σημασίας για την τελική ανάπτυξη της τηλεϊατρικής τεχνολογίας. Η αίσθηση της αφής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη ιατρική τόσο για τη διάγνωση όσο και για τη θεραπεία του ασθενούς. Σε πολλές περιπτώσεις οι γιατροί αντλούν περισσότερες πληροφορίες μέσω της αφής παρά μέσω της όρασης. Έτσι έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για ανάπτυξη εφαρμογών συστημάτων απτικής αλληλεπίδρασης.

Το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας Berkeley's Robotics and Human Engineering Laboratory έχει δείξει ότι οι άνθρωποι που περιοριζόταν αποκλειστικά στη χρήση αναπηρικής καρέκλας ήταν σε θέση να περπατήσουν με ένα εξωσκελετικό μηχανισμό. Αυτό έχει τραβήξει τη παγκόσμια προσοχή παρουσιάζοντας ελπιδοφόρα αποτελέσματα για ασθενείς με παράλυση ότι θα έχουν τη δυνατότητα να περπατήσουν ξανά. Οι εξωσκελετικές συσκευές είναι προσαρμοσμένες στο σώμα και τα άκρα, επιτρέποντας τη κίνηση των άκρων μας με μεγαλύτερη δύναμη. Ο χρόνος ανάδρασης ενός εξωσκελετικού μηχανισμού πρέπει να είναι πολύ γρήγορος προκειμένου οι κινήσεις να βρίσκονται εντός του περιθωρίου λανθάνουσας καθυστέρησης. Αυτά πρέπει να ελέγχονται από ασύρματα συστήματα που αναγνωρίζουν άλλα άτομα με ή χωρίς εξωσκελετικούς μηχανισμούς καθώς και το περιβάλλον του ατόμου. Αυτό γίνεται προκειμένου να μην μπορεί ο άνθρωπος να βλάψει άλλα στοιχεία από το περιβάλλον του για παράδειγμα να μην πέσει από τις

σκάλες ή να μην ρίξει αντικείμενα με τη δύναμη του εξωσκελετικού μηχανισμού. Με τη κατασκευή ασύρματων συστημάτων με απτική καθυστέρηση ανοίγει ένας νέος κόσμος για άτομα με κινητικές δυσλειτουργίες. Ανεξάρτητα από την τρέχουσα σωματική κατάσταση του ατόμου πολλοί άνθρωποι θα μπορούν να κινηθούν ελεύθερα ξανά.

3.6 Εκπαίδευση & Αθλητισμός

Η χρήση εξωσκελετικών μηχανισμών [5] που συνδέονται ασύρματα, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εκμάθηση συγκεκριμένων κινήσεων που χρησιμεύουν για διάφορα σπορ (πχ. Surfing), ελιγμούς οχημάτων ή σε εκπαιδευτικές μηχανές εικονικής πραγματικότητας. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απομακρυσμένη φυσιοθεραπεία, φορώντας το συγκεκριμένο μηχανισμό και σε συνεχή επικοινωνία με το θεράποντα ιατρό, χωρίς δηλαδή τη φυσική παρουσία του ασθενούς και ιατρού. Το Απτικό Διαδίκτυο προσφέρει μια πληθώρα εφαρμογών για εκπαιδευτικούς σκοπούς και προσφέρει πολλές δυνατότητες βελτίωσης στην εκπαίδευση. Ένα παράδειγμα μίας πιθανής εκπαιδευτικής εφαρμογής είναι μια διαδραστική συνάντηση της τάξης στο μάθημα της ιστορίας σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που να διαδραματίζεται στη παλιά Ρώμη.

3.7 Άλλες εφαρμογές

Άλλες εφαρμογές του Απτικού Διαδικτύου θα μπορούσαν να είναι τα σοβαρά παιχνίδια, εφαρμογές για την εκπαίδευση, η εξατομικευμένη κατασκευή εξαρτημάτων καθώς και τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα. Τα σοβαρά παιχνίδια είναι προσομοιώσεις του πραγματικού κόσμου, σχεδιασμένα για την επίλυση προβλημάτων. Η καθυστέρηση στην αλληλεπίδραση μεταξύ παικτών και παιχνιδιών είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της εμπειρίας των παικτών και της χρηστικότητας του παιχνιδιού και αυτό γιατί η καθυστέρηση επηρεάζει άμεσα το ρεαλισμό του παιχνιδιού. Η εξατομικευμένη κατασκευή σε αντίθεση με τις υπάρχουσες γραμμές συναρμολόγησης μαζικής παραγωγής θα επιτρέπει σε ρομπότ να παράγουν εξαρτήματα κατ' απαίτηση (on demand). Αυτό

βέβαια απαιτεί ένα ασύρματο δίκτυο πραγματικού χρόνου για την επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ.

Τα μη επανδρωμένα αυτόματα ή τηλεχειριζόμενα συστήματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, πλέον ως υποστήριξη και εξ αποστάσεως βοήθεια σε ανθρώπους σε επικίνδυνα ή δυσπρόσιτα περιβάλλοντα ή για εργασίες πολύ κουραστικές για τον άνθρωπο. Ο τηλεχειρισμός ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους, για παράδειγμα, μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια χωρίς καθυστέρηση ανάδρασης και με σαφώς μειωμένη end-to-end καθυστέρηση ως εφαρμογή του Απτικού Διαδικτύου.

4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΥΓΕΙΑΣ

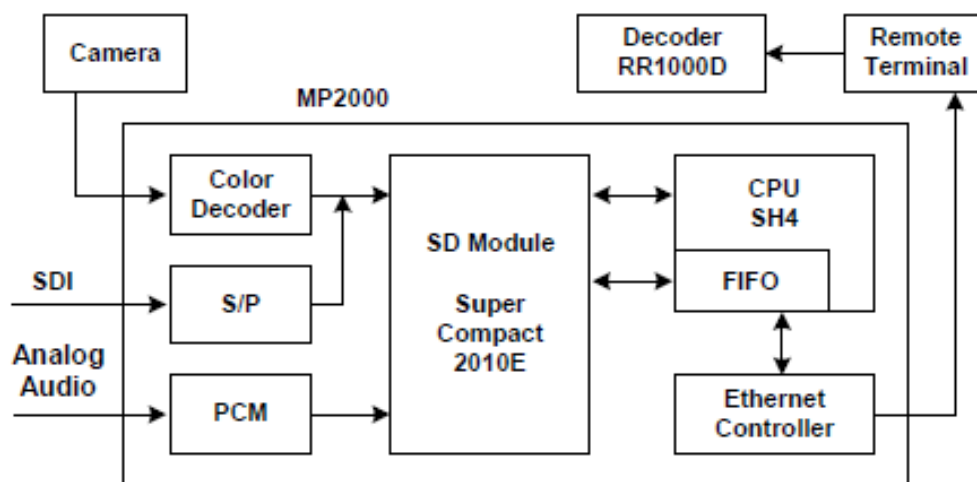
Το Απτικό Διαδίκτυο, όπου οι άνθρωποι θα ελέγχουν ασύρματα πραγματικά και εικονικά αντικείμενα, δεν θα γίνει πραγματικότητα αν δεν ξεπεραστούν τεράστιες σχεδιαστικές προκλήσεις. Η αλληλεπίδραση των ανθρώπων με το περιβάλλον τους είναι κρίσιμη ενώ οι αντιληπτικές μας ικανότητες μειώνουν τη ταχύτητα αντίδρασης μας. Δοκιμάζουμε την αντίδραση μας με ένα τεχνικό σύστημα διαισθητικό ή φυσικό μόνο εάν η ανατροφοδότηση του συστήματος είναι προσαρμοσμένη στον ανθρώπινο χρόνο αντίδρασης. Συνεπώς, οι απαιτήσεις για τεχνικά συστήματα που επιτρέπουν αντίδραση σε πραγματικό χρόνο εξαρτώνται από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Έτσι οι χρόνοι 100 ms, 10 ms και 1 ms απαιτούνται για ακουστική, οπτική και αλληλεπίδραση αφής αντίστοιχα. Πραγματοποιώντας αυτούς τους χρόνους ανάδρασης, όλες οι ανθρώπινες αισθήσεις μπορούν να αλληλεπιδράσουν με μηχανές. Άρα οι άνθρωποι, δεν είναι μόνο σε θέση να ακούσουν πράγματα από μακριά αλλά ακόμα να αγγίξουν και να τα αισθανθούν. Μεταφέροντας ακριβώς την ανθρώπινη αφή μέσω δικτύου δεδομένων είναι το όραμα που σκοπεύει να πραγματοποιήσει το Απτικό Διαδίκτυο.

4.1 Υπάρχουσα κατάσταση

Τα ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε ορισμένους τομείς της υγειονομικής περίθαλψης. Πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στο όραμα ενός ρομπότ με την αίσθηση της αφής. Το νεότερο και πιο γνωστό ρομποτικό χειρουργικό σύστημα είναι το Da Vinci Xi [34] το οποίο όμως δεν είναι κάτι παραπάνω από ένα σύστημα τηλεχειρισμού το οποίο χειρίζεται ένας εξειδικευμένος χειρουργός για λεπτομερείς και ακριβέστερες εγχειρίσεις. Ένα χειρουργικό σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε από την Intuitive Surgical Inc και παρουσιάστηκε την άνοιξη του 2014 διαθέτει ένα 3D οπτικό σύστημα υψηλής ευκρίνειας και μικροσκοπικά εργαλεία που λυγίζουν και περιστρέφονται με μεγαλύτερη ευκολία από το ανθρώπινο χέρι. Ως αποτέλεσμα επιτρέπει στους γιατρούς να εκτελούν λεπτές χειρουργικές επεμβάσεις χρησιμοποιώντας εξ αποστάσεως μικροσκοπικά χειρουργικά εργαλεία καθώς και να λειτουργούν με ενισχυμένη όραση, ευκρίνεια και έλεγχο. Η εταιρεία εστίασε στο να δώσει στους χειρουργούς τη καλύτερη δυνατή αίσθηση της όρασης καθώς η αίσθηση της αφής για επεμβάσεις σε μαλακούς ιστούς είναι ακόμα πέρα από τις δυνατότητες της απτικής τεχνολογίας. Ο Curt Salisbury, κύριος ερευνητής στο SRI International, ένα μη κερδοσκοπικό ινστιτούτο, είπε, ότι ενώ οι χειρουργοί θα μπορούσαν να βασίζονται στις οπτικές ενδείξεις για να καταλάβουν πόση δύναμη ασκούσαν στα εργαλεία τους, υπήρχαν φορές που μόνο η οπτική επαφή δεν αρκούσε. Όπως ανέφερε «Η απτική ανατροφοδότηση είναι σημαντική όταν δεν έχεις καλή οπτική πρόσβαση»

Σε μια πειραματική προσέγγιση το 2007 [8] γινόταν έρευνα για εξ αποστάσεως χειρουργικές επεμβάσεις και πιο συγκεκριμένα μεταξύ Ιαπωνίας και Ταϊλάνδης χρησιμοποιώντας το χαμηλής καθυστέρησης σύστημα CODEC. Μέχρι εκείνη τη στιγμή είχε πραγματοποιηθεί απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση με το ρομποτικό σύστημα ZEUS μεταξύ Νέας Υόρκης και Στρασβούργου [11] αποκλειστικά με τη χρήση οπτικών ινών. Ωστόσο επειδή ήταν πολύ δαπανηρή η τοποθέτηση οπτικών ινών και η λειτουργία τους, στηρίχτηκαν στις συμβατικές υποδομές δικτύου. Χρησιμοποιήθηκαν υποδομές δικτύου (ISDN (2B + D), ISDN (23B + D)). Πραγματοποίησαν κάποια απομακρυσμένα πειράματα χειρουργικών

επεμβάσεων μεταξύ Τόκιο και Shizuoka σε απόσταση πάνω από 100χμ. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία ISDN (Integrated Services Digital Network) καθώς ήταν η ευρέως χρησιμοποιούμενη υποδομή δικτύου για την επικοινωνία μεταξύ των νοσοκομείων στην Ιαπωνία. Διεξάχθηκαν επιτυχώς λαπαροσκοπικές εγχειρήσεις σε γουρούνια, με χρόνο ολοκλήρωσης της επέμβασης στα 90 λεπτά, δηλαδή περίπου ίδιο χρόνο με μια συμβατική επέμβαση. Χρησιμοποιώντας το ISDN (2B+D) η καθυστέρηση για τον έλεγχο και την αποστολή της εικόνας ήταν κατά μέσο όρο 99.8 ms και 676.0 ms αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας το ISDN (23B+D) η καθυστέρηση για τον έλεγχο και την αποστολή της εικόνας ήταν κατά μέσο όρο 35.6 ms και 785.0 ms αντίστοιχα. Έπειτα δημιούργησαν και ένα απομακρυσμένο σύστημα επεμβάσεων μεταξύ Ιαπωνίας και Κορέας χρησιμοποιώντας μια υποδομή μεταξύ Ασίας - Ειρηνικού η οποία αποτελούνταν από ένα υποθαλάσσιο, οπτικό, καλωδιακό δίκτυο. Λαπαροσκοπική επέμβαση πραγματοποιήθηκε σε γουρούνι με χρόνους ελέγχου σήματος και εικόνας 13,0 ms και 871 ms αντίστοιχα.



Εικόνα 10 - Σύστημα CODEC χαμηλής καθυστέρησης [10]

Σε προηγούμενα πειράματα εγχειρήσεων εξ αποστάσεως το μεγαλύτερο μέρος των καθυστερήσεων προερχόταν από την μετάδοση εικόνας και ήχου. Αυτό συμβαίνει επειδή οι πληροφορίες εικόνας και ήχου είναι σχετικά μεγάλες σε σύγκριση με το σήμα ελέγχου. Έτσι χρησιμοποιήθηκε το MPEG CODEC όπου το μέγεθος των

δεδομένων που μεταφέρονται μπορεί να είναι μικρότερο αλλά ο χρόνος επεξεργασίας για συμπίεση και αποσυμπίεση είναι χρονοβόρος. Το CODEC, σύστημα χαμηλής καθυστέρησης, αναπτύχθηκε για να μειώσει το χρόνο καθυστέρησης με μια γρήγορη διαδικασία συμπίεσης εικόνας.

4.2 Απαιτήσεις απτικού διαδικτύου

4.2.1 Υπέρ - Ευαίσθητη συνδεσιμότητα

Το Απτικό Διαδίκτυο απαιτεί εξαιρετικά γρήγορη σύνδεση δικτύου [7] δηλαδή η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση να είναι της τάξης του 1ms, για μετάδοση σε πραγματικό χρόνο. Μια απαίτηση που είναι εξαιρετικά κρίσιμη όταν πρόκειται για ιατρικές εφαρμογές καθώς η συνδεσιμότητα του δικτύου πρέπει να είναι υψηλή και χωρίς καθυστερήσεις. Όταν αναφερόμαστε σε ιατρικές εφαρμογές, αυτό σημαίνει ότι μια καθυστέρηση του δικτύου μπορεί να αποβεί μοιραία για την υγεία του ασθενούς με αποτέλεσμα να αποτύχει ο στόχος της εφαρμογής.

4.2.2 Αξιόπιστη συνδεσιμότητα

Η εκπληκτική επιτυχία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας υπήρξε η βάση για τη παροχή πανταχού και αξιόπιστης κάλυψης για φωνητική και γραπτή επικοινωνία. Με το 4G και την επιτυχία των φορητών υπολογιστικών συσκευών η βιομηχανία σκοπεύει να επιτύχει την ίδια αξιοπιστία και πανταχού παρουσία σε εφαρμογές όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο καθώς και η μετάδοση ροής (streaming) βίντεο και εικόνας. Το LTE, πλέον παρέχει αξιόλογους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, περίπου 50 Mb/s. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις εν δυνάμει ανάγκες της αγοράς, σε 10 χρόνια, πρέπει να είμαστε έτοιμοι να ανταποκριθούμε στις νέες απαιτήσεις ταχυτήτων 10Gb/s ή και περισσότερο και να εισάγουμε νέες εφαρμογές. Ενώ οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων θα είναι βασικό χαρακτηριστικό των 5G δικτύων, η υψηλή αξιοπιστία συνδεσιμότητας δικτύου είναι μία βασική απαίτηση για το Απτικό Διαδίκτυο. Η αξιοπιστία ορίζεται ως τη πιθανότητα να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη απόδοση υπό καθορισμένες συνθήκες σε δεδομένο χρονικό διάστημα. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας είναι διαφορετικές για τους

διάφορους τύπους υπηρεσιών και εφαρμογών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ένας ρυθμός αποτυχίας μετάδοσης ακόμα και κάτω από 10^{-7} είναι σημαντικός για κρίσιμες εφαρμογές 5ης γενιάς όπως οι ιατρικές, αν και αυτό αντιστοιχεί σε μόλις 3,17 δευτερόλεπτα διακοπής ανά έτος. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα ασύρματα συστήματα, θεωρούν ότι διακοπή της τάξης του 3% είναι ικανοποιητική. Ωστόσο όταν συνδυάζονται δυο ή περισσότερες συνδέσεις αυτό το ποσοστό μπορεί να μειωθεί περαιτέρω. Έτσι η ταυτόχρονη σύνδεση πολλών συνδέσεων (multi connectivity) μπορεί να αποτελέσει λύση για την επίτευξη της απαιτούμενης αξιοπιστίας για απτικές εφαρμογές. Προφανώς, η επίτευξη της αξιοπιστίας έχει θετικό αντίκτυπο και στη καθυστέρηση, καθώς χρειάζονται λιγότερες μεταδόσεις. Η αξιοπιστία της σύνδεσης διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στις απτικές ιατρικές εφαρμογές καθώς το δίκτυο πρέπει να είναι πανταχού παρόν, χωρίς διακοπές και με συνεχή κάλυψη.

4.2.3 Ασφάλεια και ιδιωτικότητα

Σημαντικές απαιτήσεις για το Απτικό Διαδίκτυο είναι η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα. Με αυστηρούς περιορισμούς καθυστέρησης, η ασφάλεια πρέπει να ενσωματωθεί στη φυσική μετάδοση και ιδανικά χωρίς μεγάλη σπατάλη υπολογιστικών πόρων. Χρειάζεται να αναπτυχτούν νέες τεχνικές κωδικοποίησης για απτικές εφαρμογές που θα επιτρέπουν μόνο τους νόμιμους χρήστες να επεξεργάζονται ένα μήνυμα. Η απόλυτη ασφάλεια θα επιτευχθεί αν ένας μη εξουσιοδοτημένος χρήστης δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει δεδομένα ακόμη και με άπειρη υπολογιστική ισχύ. Αυτό δημιουργεί μια πρόκληση ιδιαίτερα στις εφαρμογές που απαιτούν άψογη συνδεσιμότητα. Η αναγνώριση των εξουσιοδοτημένων χρηστών απαιτεί καινοτόμες, αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης μεθόδους. Μια τέτοια μέθοδος θα μπορούσε να είναι η χρήση μοναδικών χαρακτηριστικών όπως τα βιομετρικά (π.χ. δαχτυλικά αποτυπώματα). Συμπερασματικά, όταν πρόκειται για εφαρμογές υγείας το δίκτυο πρέπει να είναι ασφαλές και τα πληροί όλα τα απαραίτητα πρωτόκολλα προκειμένου να μην διαρρεύσουν ιατρικά προσωπικά δεδομένα.

4.2.4 Απτικά δεδομένα

Το Απτικό Διαδίκτυο πρέπει να χειρίζεται τις απτικές πληροφορίες με τον ίδιο τρόπο με τις παραδοσιακές οπτικοακουστικές πληροφορίες. Έτσι απαιτούνται κάποιοι μηχανισμοί απτικής κωδικοποίησης που να διευκολύνουν τη μετάδοση απτικής πληροφορίας μέσω μεταγωγής πακέτων. Ταυτόχρονα πρέπει να υπάρχει και παροχή ανατροφοδότησης οπτικοακουστικών μέσων εξαιτίας της πολυδιάστατης φύσης της ανθρώπινης αντίληψης.

4.2.5 Edge Intelligence

Καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα να σταλεί ηλεκτρομαγνητικό σήμα με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός, είναι πιθανό σε κάποιες περιπτώσεις να μην μπορούμε να πετύχουμε το όριο του 1 ms που είναι απαίτηση για την ύπαρξη του απτικού διαδικτύου. Σε αυτή τη περίπτωση μπορούμε να έχουμε ένα μηχανισμό πρόβλεψης στο άκρο του δικτύου που με κάποιο αλγόριθμο πρόβλεψης θα προβλέπει τις ενέργειες του χρήστη. Στην περίπτωση αυτή, όταν δεν έχουμε το πραγματικό σήμα εντός 1 ms θα είναι δυνατό να χρησιμοποιούμε την πρόβλεψη που έχουμε κάνει.

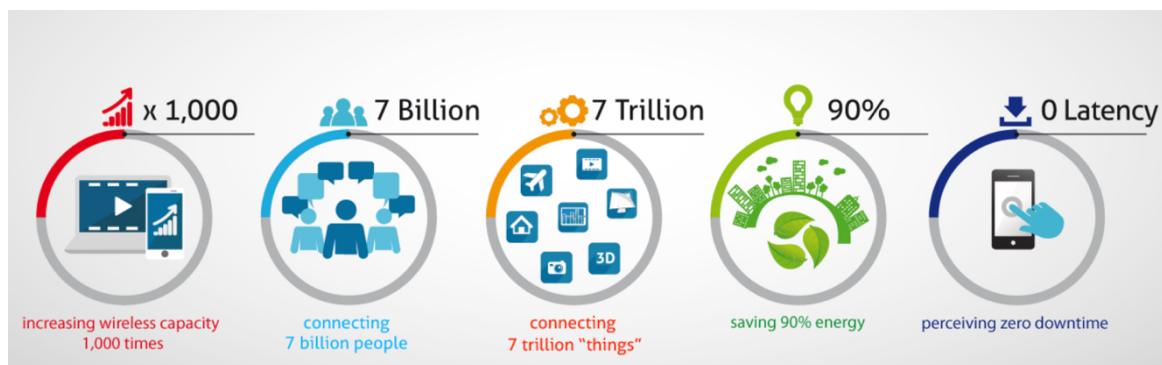
4.3 Επίτευξη Υψηλής Διαθεσιμότητας στα Ασύρματα Δίκτυα με Χρήση Βέλτιστου Αριθμού Συνδέσεων.

Τα μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να ικανοποιούν πολλές απαιτήσεις όπως η υψηλή διαθεσιμότητα και η χαμηλή καθυστέρηση προκειμένου να εκτελούνται εφαρμογές για έξυπνα δίκτυα, επικοινωνία μεταξύ οχημάτων, εφαρμογές αυτοματισμών στις βιομηχανίες κ.α. Μελετάται, λοιπόν, [13] πως μπορεί να επιτευχθεί υψηλή διαθεσιμότητα στα ασύρματα δίκτυα εστιάζοντας σε τεχνικές συνδυασμού Rayleigh-fading ζεύξεων. Εφαρμόζοντας το βασικό μοντέλο διαθεσιμότητας για μη συσχετισμένες ζεύξεις ελέγχθηκε αν είναι πιο αποτελεσματικό από άποψη ισχύος να χρησιμοποιούμε πολλές ζεύξεις παράλληλα σε σχέση με την αύξηση της ισχύος μιας μεμονωμένης ζεύξης. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι για υψηλή διαθεσιμότητα είναι αποδοτικότερο να

χρησιμοποιήσουμε πολλαπλές ζεύξεις παράλληλα. Ανάλογα με την επιθυμητή διαθεσιμότητα υπάρχει ένας βέλτιστος αριθμός ζεύξεων όσον αφορά τη κατανάλωση ισχύος. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι η ίδια απόδοση επιτυγχάνεται με 45dB λιγότερη ισχύ όταν αυτή μοιράζεται μεταξύ 20 ζεύξεων.

5 5G-PPP (Public Private Partnership)

Διάφορες ερευνητικές ομάδες μελετάνε τις σταθερές της 5^{ης} γενιάς επικοινωνιών. Το 5G-PPP ¹ αποτελεί μια συνεργασία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και διάφορων ερευνητικών ιδρυμάτων για την χρηματοδότηση της έρευνας των συστημάτων 5^{ης} γενιάς. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος το 5G-PPP θα προσφέρει νέες τεχνολογίες, αρχιτεκτονικές και πρότυπα. Αυτή η πρωτοβουλία ήταν κίνηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης με στόχο την επίτευξη 10-100 φορές μεγαλύτερη επισκεψιμότητα ανά τελικό χρήστη, χωρίς να αυξηθεί το κόστος ή η κατανάλωση ενέργειας με ταυτόχρονη παροχή υποδομών υψηλής ποιότητας και ασφάλειας του Η2020².



Εικόνα 11 - Στόχοι του 5G PPP [15]

¹ 5G - PPP: 5G - Public Private Partnership (5G υποδομή δημόσιου και ιδιωτικού τομέα)

² Horizon 2020: αποτελεί το μεγαλύτερο πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης με σχεδόν 80 τρις ευρώ χρηματοδότησης που διατίθεται για περισσότερα από 7 χρόνια (2014 - 2020). Υπόσχεται σημαντικές ανακαλύψεις και παγκόσμιες πρωτιές, εφαρμόζοντας ιδέες από το εργαστήριο στην αγορά.

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τη παραπάνω εικόνα, οι κύριοι στόχοι του 5G PPP είναι η αύξηση της ασύρματης χωρητικότητας (increasing wireless capacity), η εξοικονόμηση ενέργειας (saving energy), η διασύνδεση όλων των ανθρώπων μεταξύ τους (connecting all people), ο μικρός χρόνος αναμονής (low latency), η διασύνδεση αντικειμένων (connecting things) και τέλος η αξιοπιστία (reliability).

Το 5G - PPP [31] περιέχει 19 συνολικά project (τα οποία επελέγησαν από 83 συνολικές προτάσεις που υπεβλήθησαν προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή), τα λογότυπα των οποίων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12 - Λογότυπα Project 5G PPP [16]

5.1 Σύντομη περιγραφή των 5G-PPP projects

Παρακάτω θα δούμε μια σύντομη περιγραφή του έργου μερικών από των παραπάνω ερευνητικών ομάδων.

5.1.1 5G- XHAUL

Αυτή η μελέτη προτείνει μια λύση οπτικής και ασύρματης μεταφοράς που είναι ικανή να συνδέσει τα ευέλικτα μικρά κύτταρα (small cells) με το δίκτυο πυρήνα [35]. Αξιοποιώντας την κινητικότητα των χρηστών, επιτρέπει την δυναμική κατανομή των πόρων του δικτύου σε αυτά τα σημεία που δίνουν πρόσβαση στο

δίκτυο (hotspots). Για την υποστήριξη αυτών των νέων εννοιών, οι τεχνικές και ερευνητικές προκλήσεις περιλαμβάνουν την ανάπτυξη:

- **Πομπών μικροκυμάτων** που είναι δυναμικά προγραμματιζόμενοι και έχουν υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση.
- **Κοινόχρηστο οπτικό δίκτυο** που προσφέρει ελαστική κατανομή εύρους ζώνης, σε συνεργασία με προηγμένα παθητικά δίκτυα.
- **Επίπεδο ελέγχου που προσδιορίζεται από το λογισμικό** και είναι σε θέση να προβλέπει την ζήτηση της κυκλοφορίας στον χώρο και στον χρόνο και σύμφωνα με αυτές να επαναπροσδιορίσει τις συνιστώσες του δικτύου.

Το project 5G - XHAUL θα αναπτύξει ασύρματες λύσεις για δυναμικές backhaul και fronthaul αρχιτεκτονικές, παράλληλα με οπτικές διασυνδέσεις πολύ υψηλής χωρητικότητας. Σε αρχιτεκτονικές C-RAN απαιτείται ασύρματη μεταφορά βασικής ζώνης (baseband) ανάμεσα στις κεντρικές και τις απομακρυσμένες μονάδες.

5.1.2 COGNET

Το project CogNet [31] στοχεύει στην έρευνα και ανάπτυξη μιας πλατφόρμας διαχείρισης δικτύου σε πραγματικό χρόνο με την ικανότητα να κλιμακώνεται (επεκτείνεται) προκειμένου να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις του μελλοντικού 5G δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, το project αυτό έχει τους εξής στόχους:

- Συλλογή και προ επεξεργασία μαζικών δεδομένων από το δίκτυο 5G.
- Ανάπτυξη ενός συστήματος για την αυτοδιαχείριση των κόμβων του δικτύου, ενώ υποστηρίζει ενιαία διαχείριση δικτύου.
- Εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την αντιμετώπιση:
 - Πρόβλεψης της ζήτησης και του εφοδιασμού, επιτρέποντας στο δίκτυο να αλλάξει το μέγεθός του χρησιμοποιώντας εικονικοποίηση.
 - Θεμάτων ανθεκτικότητας δικτύου, συμπεριλαμβανομένων εντοπισμού σφαλμάτων δικτύου, βλαβών και συνθηκών όπως συμφόρηση δικτύου ή υποβάθμιση των επιδόσεων.

- Εντοπισμός (αναγνώριση) σοβαρών θεμάτων ασφαλείας όπως μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, παραβιασμένες συνιστώσες δικτύου ή χρήση συνιστωσών δικτύου που είναι σε κίνδυνο. Στη συνέχεια υπάρχει συνεργασία με την αυτόνομη διαχείριση του δικτύου για την λήψη των κατάλληλων μέτρων.

Οι τεχνικές και ερευνητικές προκλήσεις που προσπαθεί να ξεπεράσει το συγκεκριμένο project είναι οι εξής:

- Συλλογή και επεξεργασία μεγάλων δεδομένων από το 5G δίκτυο σε πραγματικό χρόνο.
- Ανάπτυξη νέων αλγορίθμων που χρησιμοποιούν μηχανική μάθηση για να μάθουν από τα συλλεχθέντα δεδομένα και στη συνέχεια να εφαρμόσουν την αποκτηθείσα γνώση για τη διαχείριση δικτύου.
- Βελτίωση της επεκτασιμότητας, της αντοχής και της ασφάλειας των 5G δικτύων.
- Πραγματοποίηση μετρήσιμων βελτιώσεων στα δίκτυα, όπως αυτές αναγνωρίζονται μέσω των βασικών δεικτών απόδοσης (KPI- Key Performance Indicator).

5.1.3 FANTASTIC - 5G

Η κύρια πρόκληση για το συγκεκριμένο project είναι η ανάπτυξη μιας σπονδυλωτής ασύρματης διεπαφής που θα είναι σε θέση να υποστηρίξει όλες τις αναμενόμενες περιπτώσεις χρήσης, με την υψηλότερη δυνατή επεκτασιμότητα και απόδοση, χωρίς όμως να είναι υπερβολικά περίπλοκη από την πλευρά του δικτύου[28]. Για το σκοπό αυτό, το έργο θα αναπτύξει τις τεχνικές συνιστώσες της Τεχνητής Νοημοσύνης (ευέλικτο πλαίσιο σχεδιασμού, επεκτάσιμες διαδικασίες πολλαπλής πρόσβασης, προσαρμοστικά συστήματα αναμετάδοσης, προηγμένη ανίχνευση πολλαπλών χρηστών, διαχείριση ασύρματων πόρων πολλαπλών κελιών) και ενσωμάτωση αυτών μέσα σε ένα συνολικό πλαίσιο τεχνητής νοημοσύνης, όπου θα επιτευχθεί η προσαρμογή προς τον υψηλό βαθμό ετερογένειας που διέπει τα δίκτυα 5G. Το project αυτό ασχολείται αποκλειστικά με

χαμηλές συχνότητες φορέα (< 6GHz). Οι στόχοι του Fantastic – 5G είναι η ανάπτυξη μιας ευέλικτης και κλιμακούμενης ασύρματης διεπαφής πολλαπλών υπηρεσιών με πανταχού παρούσα κάλυψη και υψηλή χωρητικότητα όπου και όταν χρειάζεται και ιδιαίτερη απόδοση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και πόρων.

5.1.4 mm Magic

Η χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων για τις κινητές επικοινωνίες είναι δύσκολη, αλλά ταυτόχρονα και αναγκαία για την υποστήριξη απαιτητικών κινητών ευρυζωνικών 5G υπηρεσιών, οι οποίες απαιτούν πολύ υψηλούς (έως 10 Gbps) ρυθμούς δεδομένων και σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ μικρούς από άκρο σε άκρο (end-to-end) χρόνους καθυστέρησης. Σε αυτό το project θα σχεδιαστούν νέες προσαρμοστικές και συνεργατικές τεχνικές για την αντιμετώπιση των ειδικών προκλήσεων των millimeter wave κινητών τηλεπικοινωνιών. Θα προβεί σε εκτεταμένες μετρήσεις των ασύρματων καναλιών στην περιοχή 6 – 100GHz και θα αναπτύξει προηγμένα μοντέλα καναλιών για την επικύρωση και ανάλυση σκοπιμότητας των προτεινόμενων εννοιών. Τέλος, θα υποστηριχθεί η απρόσκοπτη και ευέλικτη ενσωμάτωση με άλλες 5G ασύρματες διεπαφές μέσω του σχεδιασμού νέων λειτουργιών διαδίκτυωσης.

5.1.5 Selfnet

Το συγκεκριμένο project έχει στόχο να υλοποιήσει ένα αυτόνομο πλαίσιο διαχείρισης δικτύου προκειμένου να μειωθεί μια ευρεία γκάμα κοινών δικτυακών προβλημάτων που προς το παρόν αντιμετωπίζονται χειροκίνητα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν τα λειτουργικά κόστη.

Οι τεχνικές προκλήσεις του project αναφέρονται παρακάτω [28]:

- **Ενεργοποίηση και βελτιστοποίηση της ολιστικής χρήσης δικτύωσης** βασισμένης σε λογισμικό (NFV) με την συνδυασμένη λειτουργία οπτικών δικτύων, υπολογιστικής νέφους, τεχνητής νοημοσύνης και άλλων σχετιζόμενων τεχνολογιών για την επίτευξη νέων μη κοστοβόρων υπηρεσιών και αυτόνομης διαχείριση πραγματικού χρόνου σε δίκτυα 5G.

- Σχεδιασμός πολύ εύκολου στη χρήση μετρικών του επιπέδου ευρωστίας του δικτύου (HoN - Health of Network) που μπορούν να αντικατοπτρίσουν με ακρίβεια τις τρέχουσες συνθήκες τόσο του δικτύου όσο και των συνθηκών λειτουργίας των υπηρεσιών σε σχέση με τις απαιτήσεις των βασικών δεικτών απόδοσης.
- Επινόηση καινοτόμων, αποτελεσματικών και προσαρμόσιμων δυναμικών αλγορίθμων για την επίλυση ή την άμβλυνση των πιθανόν ζητημάτων διαχείρισης του δικτύου.

5.1.6 Sesame

Το συγκεκριμένο project [36] στοχεύει σε καινοτομίες γύρω από τρία κεντρικά στοιχεία της 5G τεχνολογίας: ανάπτυξη της νοημοσύνης του δικτύου μέσω της λειτουργίας εικονικοποίησης (NFV) και της τεχνολογίας Edge Cloud Computing.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι στόχοι του προαναφερόμενου project:

- Προσδιορισμός και εξειδίκευση της αρχιτεκτονικής του συστήματος και των διεπαφών για την τροφοδότηση δικτύων small cells, βελτιστοποιημένη για διαφορετικά σενάρια και περιπτώσεις χρήσης.
- Προδιαγραφές, σχεδιασμός και υλοποίηση της τεχνολογίας CESC (Cloud-Enabled Small Cell), υποστηρίζοντας τη δυνατότητα πολλαπλών μισθώσεων (multi - tenant) και υποδομών πρόσβασης πολλαπλών υπηρεσιών (multi - service).
- Προδιαγραφές, σχεδιασμός και υλοποίηση τεχνολογίας Light DC χαμηλού κόστους για την παροχή υποστήριξης της εικονικοποίησης του δικτύου και για την παροχή στήριξης σε απαιτητικές εφαρμογές και επίσης για την παροχή ασφαλών συνδέσεων και για την ελαχιστοποίηση του κόστους υποδομών και της κατανάλωσης ενέργειας.
- Σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός πλαισίου για τον αποτελεσματικό προγραμματισμό των πόρων και την συνεκτική διαχείριση της τεχνολογίας των smallcells ως κατανεμημένη υποδομή της εικονικοποίησης του δικτύου.

- Ανάλυση της αγοράς και δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων με αναλυτική τεχνοοικονομική ανάλυση για την αξιοποίηση και εμπορική εκμετάλλευση από βιομηχανικούς εταιρους.
- Διάδοση των αποτελεσμάτων του project προς τους ενδιαφερόμενους και αξιολόγηση των ληφθέντων σχολίων. Δημιουργία και αξιοποίηση των συνεργιών με τα υπόλοιπα έργα 5G PPP για την οικοδόμηση μιας συνεκτικής εικόνας 5G.

5.1.7 5G - Crosshaul

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι η ανάπτυξη μίας προσαρμοστικής λύσης που να ενσωματώνει τα τμήματα fronthaul και backhaul του δικτύου με παράλληλη στήριξη των υφιστάμενων και των νέων πρωτοκόλλων που οραματίστηκε το 5G. Αυτό το δίκτυο θα διασυνδέσει με ευελιξία την κατανεμημένη 5^η γενιά ασύρματης πρόσβασης και τις λειτουργίες δικτύου του πυρήνα, μέσω της εφαρμογής δύο νέων δομικών στοιχείων:

- Ένα ενοποιημένο επίπεδο δεδομένων που περιλαμβάνει τεχνολογίες μετάδοσης υψηλής χωρητικότητας και νέες αρχιτεκτονικές (5G - Crosshaul Forwarding Element, XFE).
- Υποδομή ελέγχου (5G - Crosshaul Control Infrastructure, XCI) που επιτρέπει στους διαχειριστές να δημιουργήσουν εύκολα υπηρεσίες από άκρο σε άκρο που να είναι διαφανείς σε όλες τις βασικές τεχνολογίες στο επίπεδο των δεδομένων.

Σύμφωνα με τις τελευταίες προβλέψεις ο όγκος των δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί πάνω από 10 φορές. Οι τεχνολογίες 5G-RAN που εξυπηρετούν αυτό το μεγάλο όγκο δεδομένων θα απαιτήσουν λύσεις fronthaul και backhaul ανάμεσα στην ασύρματη πρόσβαση του δικτύου και το κυρίως δίκτυο, ικανές να ανταπεξέλθουν στο αυξημένο φορτίο. Για να αυξηθεί η χωρητικότητα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι ρυθμοί δεδομένων 5G, πρέπει να παρέχεται εκτεταμένη υποστήριξη πάνω σε τεχνολογίες διεπαφής αέρα, όπως είναι οι τεχνολογίες Cooperative Multipoint (CoMP), Carrier Aggregation (CA) και Massive MIMO. Τέτοιες τεχνολογίες απαιτούν επεξεργασία πληροφοριών

από πολλαπλούς σταθμούς βάσης ταυτόχρονα προς μια κοινή κεντρική οντότητα και επίσης ακριβή συγχρονισμό των διαφορετικών ασύρματων περιοχών. Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες για τα fronthaul και backhaul θα πρέπει να πληρούν τις πιο αυστηρές προδιαγραφές, όχι μόνο αναφορικά με τους ρυθμούς δεδομένων αλλά επίσης και από την άποψη της καθυστέρησης και των ρυθμού σφαλμάτων. Ως προτιμώμενη προσέγγιση αποτελεί η εικονικοποίηση (virtualization) δικτύου πάνω από τυποποιημένο υλικό.

5.1.8 METIS II

Το project METIS II θα παρέχει ένα συνολικό 5G RAN σχεδιασμό, περιγράφοντας μια συνολική αρχιτεκτονική με όλες τις λειτουργίες και διεπαφές που απαιτούνται για την εκπλήρωση του οράματος του 5G. Ο συνολικός 5G RAN σχεδιασμός θα βασιστεί πάνω στους ακόλουθους άξονες:

- Ολιστική (σφαιρική) αρχιτεκτονική διαχείρισης του φάσματος.
- Ολιστικό πλαίσιο εναρμόνισης της διεπαφής αέρα.
- Ευέλικτη διαχείριση πόρων (Agile Resource Management - RM)

Το project METIS οριοθετεί τους ακόλουθους στόχους:

- 1000 φορές μεγαλύτερος όγκος δεδομένων κινητών δεδομένων (mobile data) ανά περιοχή.
- 10 έως 100 φορές υψηλότερος ρυθμός δεδομένων για ένα τυπικό χρήστη.
- 10 έως 100 φορές μεγαλύτερος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών.
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για συσκευές χαμηλής ισχύος.
- 5 φορές μειωμένη καθυστέρηση μεταξύ τερματικών συσκευών (E2E).

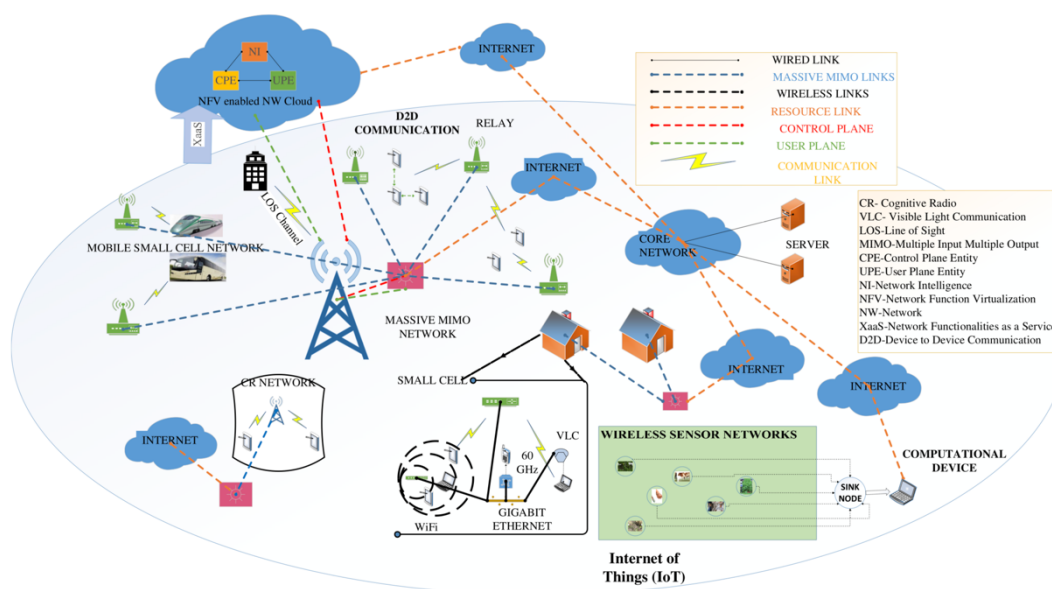
5.1.9 5GrEEn

Το έργο 5GrEEn [27] αποσκοπεί στην έρευνα μιας ενεργειακά αποδοτικής και ευέλικτης αρχιτεκτονικής ετερογενών δικτύων (HetNet) για διάφορες απαιτήσεις φορτίου του δικτύου, ενώ μελετήθηκαν επίσης και διάφορα σενάρια για παροχή

μεγαλύτερης χωρητικότητας. Ακόμα, έχει προταθεί και αξιολογηθεί ένα πλάνο για διαχείριση πόρων στο υπολογιστικό νέφος ως μια ακόμα πιο ευέλικτη λύση.

6 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ / ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5^{ης} ΓΕΝΙΑΣ

Δεδομένου ότι οι απτικές τεχνολογίες δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως και το πρώτο βήμα προς το απτικό διαδίκτυο είναι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, εξετάζουμε τις τεχνολογίες που ήδη αναπτύσσονται σε αυτά. Σ' αυτή την ενότητα λοιπόν, θα παρουσιάσουμε τις προκλήσεις των σημαντικότερων τεχνολογιών πάνω στις οποίες μπορούν να δομηθούν τα 5G δίκτυα.



Εικόνα 13- Αρχιτεκτονική δικτύων 5G [9]

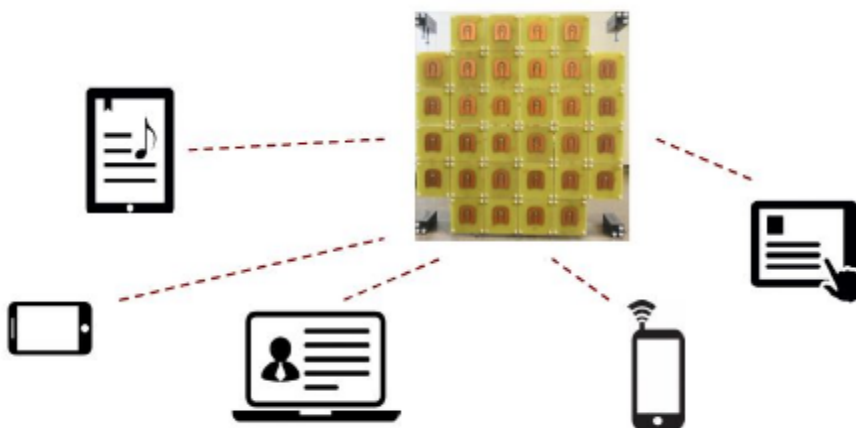
Στο παραπάνω σχήμα περιγράφεται η σύνδεση μεταξύ διάφορων σημαντικών αναδυόμενων τεχνολογιών 5G όπως το δίκτυο Massive MIMO, το δίκτυο Cognitive Radio καθώς και τα κινητά και στατικά δίκτυα μικρών κελιών. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική εξηγεί επίσης το ρόλο του NFV στην αρχιτεκτονική του δικτύου 5G ενώ επίσης περιλαμβάνει και την ιδέα της επικοινωνίας D2D.

Το 2020 αναμένεται να ξεκινήσει επίσημα η λειτουργία των δικτύων 5^{ης} γενιάς. Βασικό χαρακτηριστικό τους θα είναι ο μεγάλος όγκος συσκευών, συχνά μικρού

μεγέθους, με υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες, οι οποίες θα είναι σε θέση να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθώς και με τους χρήστες, σχηματίζοντας δυναμικά δίκτυα. Από τη συνεχή αύξηση των πωλήσεων έξυπνων συσκευών, θα αυξηθεί και η ποσότητα των δεδομένων που μεταφέρονται καθώς και κίνηση του δικτύου. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμογές όπως ο έλεγχος κίνησης, το smart grid, η αυτοματοποιημένη οδήγηση, η απομακρυσμένη διαχείριση εφαρμογών υγείας, που θα μπορούν να λειτουργούν εξίσου καλά χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση είναι εφαρμογές που στο άμεσο μέλλον θα κάνουν την εμφάνισή τους. Οι προϋποθέσεις για να γίνουν αυτά πραγματικότητα είναι η υψηλή χωρητικότητα του δικτύου, η χαμηλή καθυστέρηση, η έξυπνη διαχείριση της ενέργειας του δικτύου, η σωστή διαχείριση τόσο του υπάρχοντος όσο και του νέου φάσματος και τέλος η αξιοπιστία, ιδιαίτερα όταν μιλάμε για εφαρμογές υγείας, που κάθε δευτερόλεπτο είναι κρίσιμο.

6.1 Massive MIMO

Μια τεχνολογία που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα είναι η Massive MIMO. Η χρήση της αρχιτεκτονικής δικτύων κινητής τηλεφωνίας Massive MIMO θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και την βελτιωμένη εμπειρία του χρήστη.



Εικόνα 14 - Η τεχνολογία Massive MIMO εκμεταλλεύεται τις πολλαπλές κεραίες για να επιτύχει χωρική πολυπλεξία πολλών τερματικών [14]

Η βασική ιδέα αυτής της τεχνολογίας είναι η υλοποίηση μεγάλων συστοιχιών από κεραιές στους σταθμούς βάσης με σκοπό την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών τερματικών. Βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι με πολλές περισσότερες κεραιές από το πλήθος των ενεργών χρηστών. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη φασματική και ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Χρησιμοποιώντας περισσότερες κεραιές με έξυπνο τρόπο, μπορεί να βελτιωθεί τόσο η χωρητικότητα του δικτύου όσο και η κάλυψη. Αυξάνεται δηλαδή η φασματική απόδοση, επιτρέποντας τη μετάδοση περισσότερων bit ανά Hertz, ενώ η έξυπνη δομή της μπορεί να ενισχύει την εμβέλεια των σταθμών βάσης, εστιάζοντας ενέργεια RF (Radio Frequency Energy) σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Στο LTE σήμερα, τα δίκτυα εξελίσσονται από 2x2 σε 4x4 MIMO χρησιμοποιώντας ακόμα περισσότερες κεραιές. Ωστόσο στην πραγματικότητα υπάρχει ένας εγγενής περιορισμός σχετικά με το πόσες κεραιές μπορούν να προσαρμοστούν σε μια συσκευή ειδικά σε χαμηλότερες συχνότητες που οι κεραιές είναι μεγάλες λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος. Ένας τρόπος να αυξηθεί η χωρητικότητα χωρίς να προστεθούν περισσότερες κεραιές, είναι να υπάρχουν πιο πολλές κεραιές στους σταθμούς βάσης. Επίσης, σημαντικό τεχνολογικό χαρακτηριστικό του Massive MIMO είναι η ψηφιακή επεξεργασία. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κεραιά έχει τη δική της ραδιοσυχνότητα. Τα σήματα από όλες τις κεραιές, σε κάθε σταθμό βάσης, επεξεργάζονται μαζί. Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής επεξεργασίας είναι η αποφυγή απωλειών στο κανάλι διάδοσης, η δυνατότητα μέτρησης της απόκρισης του καναλιού κατά την άνω ζεύξη καθώς και η γρήγορη απόκριση σε αλλαγές. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι η πλήρης ψηφιακή επεξεργασία μπορεί όχι μόνο να προσφέρει υψηλότερη απόδοση, αλλά και καλύτερη ενεργειακή απόδοση, ενισχύοντας τη τάση ανάπτυξης κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος.

Συμπερασματικά λοιπόν, η τεχνολογία Massive MIMO προσφέρει δυο βασικά οφέλη:

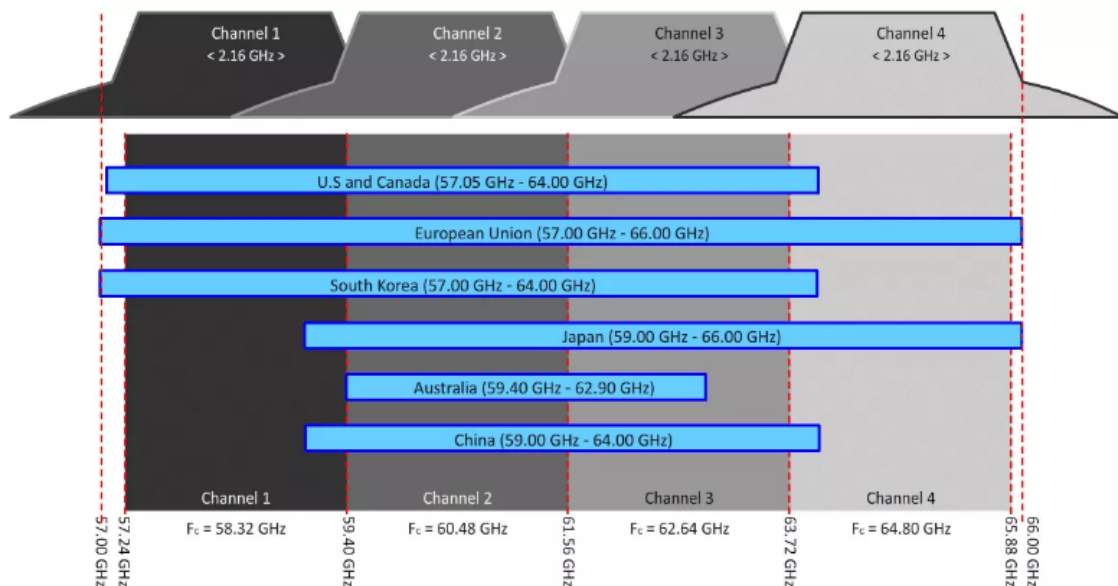
- **Υψηλή φασματική απόδοση**, η οποία επιτυγχάνεται με χωρική πολυπλεξία πολλών τερματικών στην ίδια συχνότητα.
- **Υψηλή ενεργειακή απόδοση** χάρη στο κέρδος των συστοιχιών κεραιών, που επιτρέπουν τη μείωση της ακτινοβολούμενης ισχύος.

6.2 Μικροκυματική ζώνη (mm-wave)

6.2.1 Mm-wave φυσικό επίπεδο

Η mm-wave (millimeter - wavelength) ζώνη, αυτή δηλαδή που το μήκος κύματος των σημάτων είναι της τάξης του χιλιοστού, είναι μία από τις φασματικές περιοχές των ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Σε παγκόσμια κλίμακα, υπάρχει ελεύθερο ένα εύρος συχνοτήτων 3GHz (59 GHz - 62 GHz) το οποίο παρουσιάζει ενδιαφέρον για ανάπτυξη εφαρμογών. Για παράδειγμα θα μπορούσε να το εκμεταλλευθεί η τεχνολογία RoF (Radio over Fiber) για αύξηση της χωρητικότητας και την επαρκή κάλυψη ενός συστήματος ένα WLAN όπως το IEEE 802.11ad.

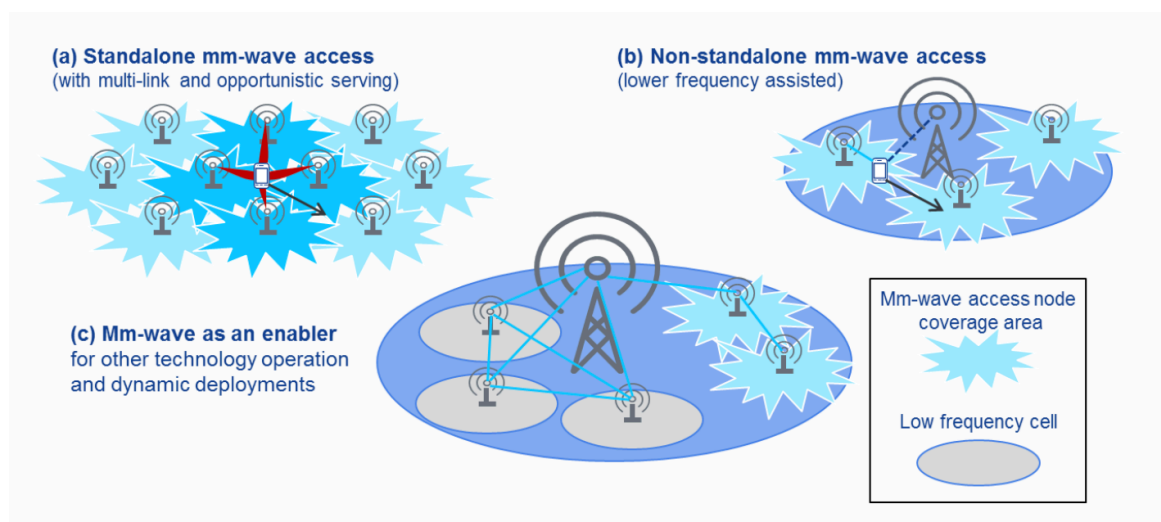
Παρακάτω θα αναπτύξουμε τον ορισμό του mm-wave φυσικού επιπέδου, όπως αυτό περιγράφεται στο IEEE 802.11ad πρωτόκολλο.



Εικόνα 15 - Πláνο ελεύθερων συχνοτήτων και συχνότητες ανά περιοχή [2]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι ελεύθερες φασματικές περιοχές σε κάθε μια από τις παραπάνω χώρες, καθώς και ο διαχωρισμός των καναλιών όπως ορίστηκε από

την ITU-R. Επιπλέον η ITU-R όρισε το εύρος των καναλιών στα 2.16 GHz με κεντρικές συχνότητες τα 58.32 GHz, 60.48 GHz, 62.64 GHz και 64.80 GHz αντίστοιχα. Το κανάλι 2 ορίστηκε ως βασικό καθώς χρησιμοποιείται από όλες τις περιοχές. Η προαναφερόμενη τεχνολογία χρησιμοποιείται σε αρκετά από τα project που έχουμε αναφέρει (5G XHAUL, FANTASTIC 5G, METIS-II).



Εικόνα 16. Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mm-wave [13]

Για τη μελέτη και την ανάπτυξη της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής χρησιμοποιήθηκαν δυο λειτουργικές εφαρμογές:

- **Αυτόνομη (standalone):** Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και επίλυση της αναξιόπιστης (διακοπόμενης) κάλυψης καθώς και θέματων κινητικότητας. Η τεχνολογία mm wave ασύρματης πρόσβασης (mm wave (RAT - Radio Access Technology), θα χρησιμοποιήσει μόνο τις mmwave συχνότητες και την ανάπτυξη των σημείων προσπέλασης (APs - Access Points).
- **Μη αυτόνομη (non standalone):** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την από κοινού ανάπτυξη των κόμβων mm-wave με κόμβους που λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες. Βελτιστοποιείται ο συντονισμός των APs σημείων προσπέλασης για τον περιορισμό των ζητημάτων κάλυψης και κινητικότητας που σχετίζονται με τη διάδοση mm-κυμάτων.

6.2.2 Mm wave Backhaul και Fronthaul

Ως αποτέλεσμα της συνεχούς πύκνωσης του δικτύου των small cells, θα πρέπει να αυξηθεί και η χωρητικότητα του backhaul (του οπιοθοζευκτικού δικτύου που αφορά τη σύνδεση ενός απομακρυσμένου δικτύου με ένα κεντρικό δίκτυο) προκειμένου να αποφευχθεί η συμφόρηση στο δίκτυο. Ο σχεδιασμός αξιόπιστων ασύρματων συνδέσεων backhaul είναι μια δύσκολη διαδικασία καθώς απαιτεί έλεγχο και αξιολόγηση πολλαπλών παραγόντων όπως η κάλυψη, ο ρυθμός διεκπεραίωσης, η καθυστέρηση, η διαθεσιμότητα, η υποστήριξη QoS, η ασφάλεια κλπ.

Σε μια περίπτωση χρήσης όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία 5G, έχουμε τους μισούς χρήστες να χρειάζονται μόνο 100 Mbps ρυθμό δεδομένων, και από την άλλη πολύ λίγοι χρήστες να χρειάζονται ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 20Gbps για την υποστήριξη βίντεο και 3D υπηρεσιών, το οποίο φέρνει προκλήσεις στις πλέον σύγχρονες τεχνολογίες backhaul. Επιπρόσθετα σημαντικός παράγοντας είναι το κόστος για τη σύνδεση κάθε small cell με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενσύρματης σύνδεσης backhaul, και έτσι παρουσιάζονται δυσκολίες σε ορισμένες plug and play ή ad-hoc αναπτύξεις. Έτσι θεωρούνται αποδοτικότερες ασύρματες λύσεις backhaul. Οι ζώνες mm-wave μπορούν να υποστηρίξουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και επιτρέπουν ασύρματες λύσεις backhaul υψηλού ρυθμού.

6.3 Fronthaul και Backhaul

Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς αναμένεται να μπορέσουν να εξυπηρετήσουν τον μεγάλο όγκο δεδομένων που θα προκύψει καθώς η κίνηση και η ποσότητα των δεδομένων θα αυξηθεί με τη πάροδο των χρόνων. Παρόλο αυτά απαιτούν λύσεις μεταφοράς μεταξύ των ασύρματων δικτύων πρόσβασης (RAN) και των δικτύων κορμού (packet core) προκειμένου να αντιμετωπίσουν το αυξημένο φορτίο δεδομένων και παράλληλα να πληρούν τις απαιτήσεις των δικτύων 5^{ης} γενιάς με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε μια επισκόπηση των διαφόρων τεχνολογιών που πληρούν τις προϋποθέσεις των 5G δικτύων. Το εύρος των απαιτήσεων καθιστά αδύνατη μια προσέγγιση που θα προσδιορίσει τα backhaul,

midhaul και fronthaul σε όλα τα δίκτυα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται ο συνδυασμός των διαφόρων τεχνολογιών για τη σύσταση του δικτύου 5G.

Οι τεχνολογίες αυτές κατατάσσονται σε τρεις ομάδες:

- Αρχικά σε ασύρματες τεχνολογίες, οι οποίες αναμένεται να παρέχουν μια οικονομικά αποδοτική και γρήγορη 5G Crosshaul ανάπτυξη.
- Δεύτερον, το 5G Crosshaul εξερευνά τις δυνατότητες της επαναχρησιμοποίησης της τρέχουσας εγκατεστημένης βάσης των υποδομών οπτικών ινών και χαλκού στο δίκτυο πρόσβασης.
- Τέλος, επανεξετάζονται μεγάλης χωρητικότητας οπτικές τεχνολογίες για τη συγκέντρωση της κυκλοφορίας (aggregation) από την άκρη έως τον πυρήνα του δικτύου.

6.4 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική - Συνδυασμός NFV - SDN

6.4.1 Εικονοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (NFV)

Το NFV [26] είναι αρχιτεκτονική δικτύου που χρησιμοποιεί τεχνολογίες εικονοποίησης για να εξομοιώσει λειτουργίες κόμβων δικτύων σε δομικά στοιχεία που μπορούν να συνδεθούν μαζί και να δημιουργήσουν υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών καθώς και να διευκολύνει το μεγάλο όγκο κυκλοφορίας των τυπικών διακομιστών ενός δικτύου. Το NFV ξεχωρίζει τις δικτυακές λειτουργίες από την υποδομή υλικού.

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας οδηγεί στη δημιουργία νέων υπηρεσιών που απαιτούν αποδοτικότερους μηχανισμούς διαχείρισης δικτύου. Πλέον μιλώντας με χρηματοδοτικούς όρους, το κόστος για τους διαχειριστές φορητών επικοινωνιών, το κόστος των λειτουργικών δαπανών (OPEX - Operating Expenses) είναι τριπλάσιο από αυτό των κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX - Capital Expenditure). Η ανισότητα αυτή είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της πολυπλοκότητας του συστήματος που χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση νέων, πιο γρήγορων **εφαρμογών** δεδομένων, τεχνολογικών αναβαθμίσεων και λειτουργιών εξυπηρέτησης πελατών. Στο πλαίσιο αυτό, το project SELFNET H2020 σχεδίασε και εφάρμοσε ένα αυτόνομο πλαίσιο της διαχείρισης του δικτύου για να παρέχει έτσι

δίκτυα που διαθέτουν ικανότητες αυτοοργάνωσης (SON - Self-Organizing Network)³ σε νέες υποδομές δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G. Με την αυτόματη ανίχνευση και την άμβλυση μιας σειράς κοινών προβλημάτων του δικτύου, που επί του παρόντος αντιμετωπίζονται από τους διαχειριστές του δικτύου, το project Selfnet θα παρέχει ένα πλαίσιο που θα μπορεί να μειώσει σημαντικά το λειτουργικό κόστος, με ταυτόχρονη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη.

Με τη διερεύνηση της ενσωμάτωσης των νέων τεχνολογιών (SDN, NFV, SON, AI, Cloud Computing κ.λ.π.), το Selfnet θα παρέχει ένα επεκτάσιμο και έξυπνο σύστημα διαχείρισης του δικτύου και το πλαίσιο λειτουργίας του θα βοηθήσει τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να εκτελούν τα βασικά καθήκοντα διαχείρισης όπως αυτόματη εγκατάσταση των εφαρμογών SDN/NFV, εφαρμογές που θα παρέχουν αυτοματοποιημένη παρακολούθηση, αυτόνομη συντήρηση δικτύου και προληπτικές ενέργειες για το μετριασμό των υφιστάμενων ή πιθανών νέων προβλημάτων του δικτύου.

6.4.2 Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό (SDN)

Το SDN παρέχει μία αρχιτεκτονική δομή όπου τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων διαχωρίζονται και επιτρέπει τον άμεσο προγραμματισμό των δικτυακών λειτουργιών. Το SDN είναι μια δυναμική, διαχειρίσιμη και οικονομικά αποδοτική αρχιτεκτονική, που τη καθιστά ιδανική για τη δημιουργία έξυπνων δικτύων. Έτσι, με σκοπό να πετύχει αυτό διαιρεί τις λειτουργίες του δικτύου σε τρία μέρη: το επίπεδο δεδομένων χρήστη (user data plane), το επίπεδο του ελεγκτή (user plane) και το επίπεδο ελέγχου (control plane). Πιο συγκεκριμένα το Data plane αποτελείται από την ανταλλαγή στοιχείων δικτύου (Networks Elements - NEs) που είναι υπεύθυνα για τη προώθηση της κυκλοφορίας του χρήστη σύμφωνα με τις βασικές εντολές που έλαβε από τη διεπαφή. Το επίπεδο user data plane αποτελείται από SDN ελεγκτές, οι οποίοι παρέχουν τις βασικές εντολές στα δεδομένα χρήστη

³ Είναι μια τεχνολογία αυτοματισμού με στόχο να κάνει το σχεδιασμό, τη διαμόρφωση, τη διαχείριση, τη βελτιστοποίηση και την αποκατάσταση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας απλούστερη και ταχύτερη.

και από διεπαφές υψηλού επιπέδου που αποτελούν εφαρμογές API, στο επίπεδο ελέγχου. Το Control plane αποτελείται από μία ανοιχτή διεπαφή ανάμεσα στις άλλες δύο οντότητες των control και data planes και προσφέρει τη δυνατότητα προγραμματισμού των οντοτήτων από εξωτερικές εφαρμογές.

6.4.3 Συνδυασμός αρχιτεκτονικών SDN και NFV

Παρά το γεγονός ότι είναι δυο διαφορετικές αρχιτεκτονικές αποτελούν συμπληρωματικές τεχνολογίες για αυτό και συχνά αναφέρονται ως SDN/NFV. Η τεχνολογία NFV εστιάζει στη βελτιστοποίηση των υπηρεσιών του δικτύου και αποσυνδέει τις λειτουργίες δικτύου. Ωστόσο η αρχιτεκτονική SDN παραμετροποιεί αναλόγως το δίκτυο, διαχωρίζει τα δίκτυα ελέγχου ενεργοποιώντας τη διαμόρφωση και τον προσδιορισμό της σύνδεσης των λειτουργιών και γενικότερα δίνει μια γενικότερη άποψη του κατανεμημένου δικτύου.

6.5 Mobile Edge Computing (MEC)

Η 5^η γενιά κινητών επικοινωνιών θα αποτελέσει σημαντική βάση για την υλοποίηση του Απικτού Διαδικτύου, με το στόχο της μέγιστης συνολικής καθυστέρησης 1 ms να παραμένει πρόκληση για την επίτευξη του Απικτού διαδικτύου. Η υπολογιστικής ισχύς στο άκρο του κινητού δικτύου, MEC (Mobile Edge Computing), είναι μια λύση για να μειωθεί η συνολική καθυστέρηση και να βρεθεί ένας τρόπος για τον υπολογισμό της απόστασης από το κυψελοειδές δίκτυο. Μια προσέγγιση που έχει ερευνηθεί είναι η δημιουργία ενός κυψελλωτού συστήματος βασισμένο σε υπηρεσίες cloud πολλαπλών επιπέδων στο οποίο το κάθε κομμάτι του κυψελοειδούς συστήματος θα συνδέεται με μονάδες micro cloud με περιορισμένες δυνατότητες. Αυτές οι μονάδες cloud συνδέονται με την σειρά τους με μονάδες mini cloud με μεγαλύτερες δυνατότητες. Το βασικό δίκτυο συνδέει τα mini cloud με το υπόλοιπο σύστημα. Το προτεινόμενο αυτό σύστημα μειώνει την καθυστέρηση ανατροφοδότησης και τη συμφόρηση του δικτύου και αυξάνει την ευελιξία και διαθεσιμότητα.

Το MEC [30] είναι μία νέα τάση η οποία έχει δημιουργηθεί από τους φορείς εκμετάλλευσης των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας για τη βελτίωση της

αποδοτικότητας του δικτύου διαμοιράζοντας τις λειτουργίες του σε κοντινά νέφη. Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιών είναι ένας από τους κύριους οργανισμούς που ασχολούνται με το MEC. Πιο απλά MEC μπορεί να οριστεί ως ο τρόπος προώθησης των δυνατοτήτων του υπολογιστικού νέφους [στο άκρο](#) των κινητών δικτύων. Αυτό προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα τα οποία μπορούν να συγκεκριμενοποιηθούν στα παρακάτω.

- Μειώνει τη συνολική καθυστέρηση των δεδομένων που μεταφέρονται.
- Προσφέρει έναν αποτελεσματικό τρόπο για το διαμοιρασμό των δεδομένων στο κυρίως δίκτυο.
- Προσφέρει υψηλό εύρος ζώνης.
- Εισάγει νέες εφαρμογές και υπηρεσίες με πρόσβαση στις πληροφορίες δικτύου.

Η μετάβαση από τα μεγάλα και δαπανηρά κέντρα δεδομένων σε μικρές κατανεμημένες μονάδες υπολογιστικού νέφους θα ανοίξει το δρόμο για την επίτευξη της επιθυμητής καθυστέρησης το οποίο είναι ο βασικός περιορισμός για την απτική υλοποίηση. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του Απτικού Διαδικτύου βασίζεται στη μείωση της συνολικής καθυστέρησης προωθώντας την υπηρεσία του νέφους στα κινητά δίκτυα. Μόνο με μία ή δύο δικτυακές μεταβάσεις (communication hops) μπορεί να επιτευχθεί καθυστέρηση 1ms. Γενικά το Απτικό Διαδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως χρήστης κινητής τηλεφωνίας, μονάδα υπολογιστικού νέφους, βασικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, τρέχον διαδίκτυο και απομακρυσμένη υπηρεσία νέφους. Με βάση την έκθεση του ETSI πάνω στο MEC υπάρχουν διάφορα σενάρια για το τρόπο τοποθέτησης των μονάδων υπολογιστικού νέφους και των διακομιστών MEC όπως:

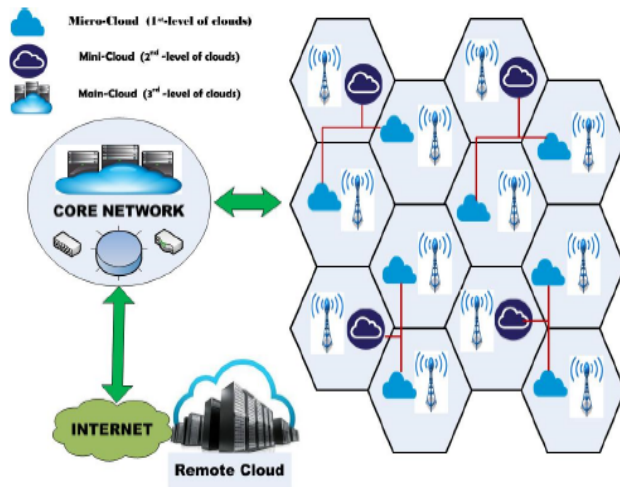
- Οι διακομιστές είναι συνδεδεμένοι σε σταθμό βάσης LTE (eNB).
- Η μονάδα υπολογιστικού νέφους μπορεί να τοποθετηθεί στον ελεγκτή δικτύου 3G/4G (RNC).
- Η μονάδα υπολογιστικού νέφους μπορεί να συνδεθεί σε πολλαπλούς eNB (multiple eNB).

- Η μονάδα υπολογιστικού νέφους μπορεί να βρίσκεται στην άκρη του δικτύου κορμού.

Υπάρχουν πολλές έρευνες σχετικά με την εισαγωγή μικρών μονάδων νέφους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ορισμένοι χρησιμοποιούν τον όρο υπολογιστικό νέφος για να αναφερθούν σε οποιαδήποτε δευτερεύουσα μονάδα υπολογιστικού νέφους. Οι μικρές μονάδες υπολογιστικού νέφους αναφέρονται ως *microcloud*.

Επίσης το πρότυπο που έχει ανακοινώσει η Cisco γνωστό ως *fog paradigm* έχει επεκταθεί στα ασύρματα δίκτυα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα κυψελοειδή δίκτυα. Η εφαρμογή αυτού στα ασύρματα δίκτυα μειώνει τη καθυστέρηση τοποθετώντας μονάδες επεξεργασίας στο δίκτυο. Είναι σαφές ότι το υπολογιστικό νέφος, η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου (NFV) και τα καθορισμένα από το λογισμικό δίκτυα (SDN) είναι οι βάσεις για τα δίκτυα 5ης γενιάς και το απτικό διαδίκτυο. Η Nokia[18] ανακοίνωσε μερικές λύσεις χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό νέφος οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν και να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας προκειμένου να επιτύχουν τις απαιτήσεις του απτικού διαδικτύου. Δύο από τις πιο πρόσφατες λύσεις που προτάθηκαν είναι το *NetAct Cloud* και το *Telco Cloud*. Με βάση τις λύσεις που προτάθηκαν από τη Nokia, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα σταθμό βάσης με μια μονάδα νέφους.

6.5.1 Αρχιτεκτονική προτεινόμενου συστήματος



Εικόνα 17 - Πολυεπίπεδη δομή υπολογιστικού νέφους[11]

Το σύστημα αποτελείται από τρία επίπεδα υπολογιστικών νεφών που συνδέονται με καλώδια οπτικής ίνας πολύ υψηλής ταχύτητας. Αυτό σχηματίζει ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας (FIWI) το οποίο είναι το βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων 5ης γενιάς. Το πρώτο επίπεδο της ιεραρχίας αποτελείται από micro clouds. Κάθε κελί του κινητού δικτύου έχει ένα micro cloud συνδεδεμένο με το σταθμό βάσης του. Έτσι κάθε eNB είναι συνδεδεμένο μέσω οπτικής ίνας με ένα micro cloud περιορισμένων δυνατοτήτων. Η απόσταση μεταξύ του UE (User Equipment) και του κοντινού υπολογιστικού νέφους είναι μία ασύρματη επικοινωνία ενός hop. Αυτό έχει πολλά οφέλη όπως:

- ο Μείωση καθυστέρησης.
- ο Παρέχει τρόπους μείωσης της συμφόρησης του δικτύου.
- ο Αυξάνει τη διαθεσιμότητα του συστήματος.
- ο Έχει πρόσβαση σε παραμέτρους του δικτύου με αποτέλεσμα να παρέχει νέες υπηρεσίες.
- ο Αυξάνει την ασφάλεια καθώς οι εφαρμογές είναι αναπτυσσόμενες εντός του συστήματος. Το προτεινόμενο αυτό σύστημα μειώνει την καθυστέρηση ανατροφοδότησης και τη συμφόρηση του δικτύου και αυξάνει την ευελιξία και διαθεσιμότητα.

Το πρώτο επίπεδο είναι ομοιογενές, το οποίο σημαίνει ότι κάθε eNB συνδέεται με ένα micro cloud. Παρόλο αυτά μπορούν να λειτουργήσουν και ετερογενείς τύποι κυψελών. Οι περιοχές με μεγάλη πυκνότητα UE μπορούν να εξυπηρετηθούν από

picocells και femtocells. Το micro cloud μπορεί να χειριστεί άμεσα απλές διεργασίες και αν δεν μπορεί, εξαιτίας των περιορισμών του υλικού ή χωρητικότητας, στέλνει το αίτημα στη μονάδα υπολογιστικού νέφους δεύτερου επιπέδου.

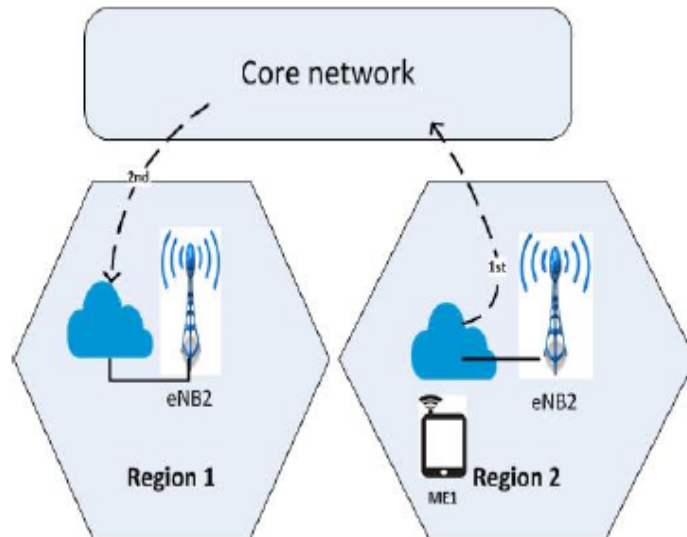
Το δεύτερο επίπεδο της ιεραρχίας του υπολογιστικού νέφους αποτελείται από μεγαλύτερα κέντρα δεδομένων, γνωστά ως mini cloud. Κάθε μονάδα mini cloud συνδέεται με micro clouds μέσω ινών μεγάλων ταχυτήτων. Το mini cloud ελέγχει τα συνδεδεμένα micro clouds. Τα mini clouds έχουν περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης συγκριτικά με τα micro clouds. Το δεύτερο επίπεδο είναι ετερογενές το οποίο σημαίνει ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων micro cloud στο mini cloud δεν είναι ίσος. Ο αριθμός των συνδεδεμένων micro clouds στο mini cloud διαφέρει ανάλογα με το πλήθος των χρηστών και τη φύση των απαιτούμενων υπηρεσιών. Ο αριθμός τους είναι μια σχεδιαστική παράμετρος που πρέπει να βελτιστοποιηθεί για να μειωθεί το κόστος της χρήσης των mini cloud.

Το τρίτο επίπεδο αντιπροσωπεύει τη μονάδα νέφους που χρησιμοποιείται στον πυρήνα του δικτύου. Το νέφος στο πυρήνα του δικτύου συνδέεται με όλα τα mini clouds του δικτύου μέσω οπτικών ινών μεγάλων ταχυτήτων. Επίσης αντιπροσωπεύει τη πύλη εισόδου στο διαδίκτυο και επομένως και τα απομακρυσμένα δημόσια νέφη (Microsoft Azure, Amazon Elastic Compute Cloud, Google AppEngine).

6.5.2 Σύγκριση Συστήματος

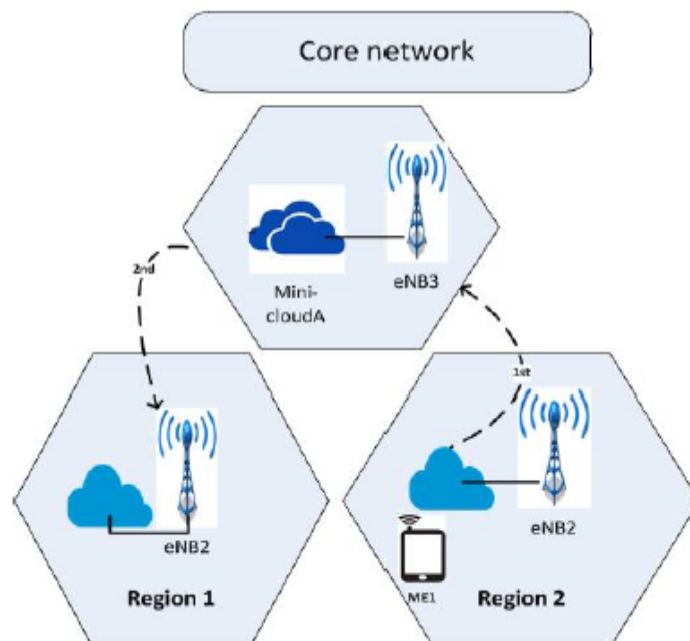
Για να μπορέσουμε να οπτικοποιήσουμε τα οφέλη από την χρήση των mini clouds θα εξετάσουμε δυο σενάρια [29]. Το πρώτο σενάριο χρησιμοποιεί μόνο τρία επίπεδα νεφών. Το πρώτο επίπεδο είναι μικρές ομάδες νεφών που συνδέονται με κάθε enB στο δίκτυο. Αυτές οι μικρές ομάδες υπολογιστικού νέφους συνδέονται με την μονάδα νέφους στο κεντρικό δίκτυο. Εδώ δεν υπάρχουν μεσαία επίπεδα μεταξύ των μικρών ομάδων και του κεντρικού δικτύου. Αυτό το σύστημα προτείνεται από

πολλούς ερευνητές όπου διαπίστωσαν ότι το κύριο πρόβλημα είναι η υπερφόρτωση του κεντρικού δικτύου.



Εικόνα 18 - Μετάβαση από το eNB2 στο eNB1 μέσω του κεντρικού δικτύου [11]

Στο παραπάνω σχήμα αν ο χρήστης UE1 μεταβεί από τη περιοχή κάλυψης του eNB2 στη περιοχή κάλυψης του eNB1, το κεντρικό δίκτυο θα πρέπει να περιλαμβάνεται στο μονοπάτι επικοινωνίας. Αυτή η διαδικασία προκαλεί υπερφόρτωση δικτύου και επιφέρει συμφόρηση στο κεντρικό δίκτυο.



Εικόνα 19 - Μετάβαση από το eNB2 στο eNB1 μέσω του mini cloud A [11]

Για να μειώσουμε αυτές τις ανεπιθύμητες συνέπειες θεωρούμε ότι το δεύτερο σενάριο αντιπροσωπεύει το σύστημα μας. Στο παραπάνω σχήμα ο χρήστης UE1 μεταβαίνει από τη περιοχή κάλυψης eNB2 στη περιοχή κάλυψης eNB1. Η διαδικασία θα διεκπεραιωθεί μέσω των μονάδων mini cloud με αποτέλεσμα το κεντρικό δίκτυο να μην χρειάζεται να υπάρχει στο μονοπάτι επικοινωνίας. Το παραπάνω σενάριο ισχύει μόνο αν το micro cloud 1 και micro cloud 2 είναι συνδεδεμένα με το mini cloud A.

Συνοψίζοντας τα οφέλη από την εισαγωγή νέου επιπέδου νεφών μεταξύ του κύριου δικτύου και των mini clouds:

- Μειώνεται η καθυστέρηση ανατροφοδότησης με μείωση του μονοπατιού επικοινωνίας.
- Δεν υπάρχει η ανάγκη επικοινωνίας με το κεντρικό δίκτυο αν το micro cloud δεν μπορεί να χειριστεί το αίτημα.
- Το mini cloud μπορεί να χειριστεί αυτά τα αιτήματα χωρίς να περάσουν από το κεντρικό δίκτυο.
- Μειώνεται η συμφόρηση του δικτύου.
- Δεν υπερφορτώνεται το κεντρικό δίκτυο.
- Ελέγχονται οι λειτουργίες των micro cloud και υπάρχει και εφεδρικό σε περίπτωση βλάβης.

Τα δεδομένα που εκφορτώνονται από το χρήστη σε επίπεδο νέφους δέχονται τρία είδη καθυστερήσεων. Την καθυστέρηση επικοινωνίας της άνω και κάτω ζεύξης, την καθυστέρηση διάδοσης και την καθυστέρηση επεξεργασίας. Οι συνολικές καθυστερήσεις άνω και κάτω ζεύξης (T_{up} , T_{dow}) μπορούν να υπολογιστούν με βάση το ρυθμό δεδομένων από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$T_{up} = (1 + U_F)(D_U / B_U)$$

$$T_{dow} = (1 + D_F)(D_d / B_d)$$

Παράμετρος Σημασία

U_F	Ποσοστό αποτυχίας μετάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη
D_U	Συνολικός αριθμός μεταδιδόμενων bits στην ανερχόμενη ζεύξη.
B_U	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στην ανερχόμενης ζεύξης.
D_F	Ποσοστό αποτυχίας μετάδοσης στην κατερχόμενη ζεύξη
D_d	Συνολικός αριθμός μεταδιδόμενων bits στην κατερχόμενη ζεύξη.
B_d	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στην κατερχόμενη ζεύξη.

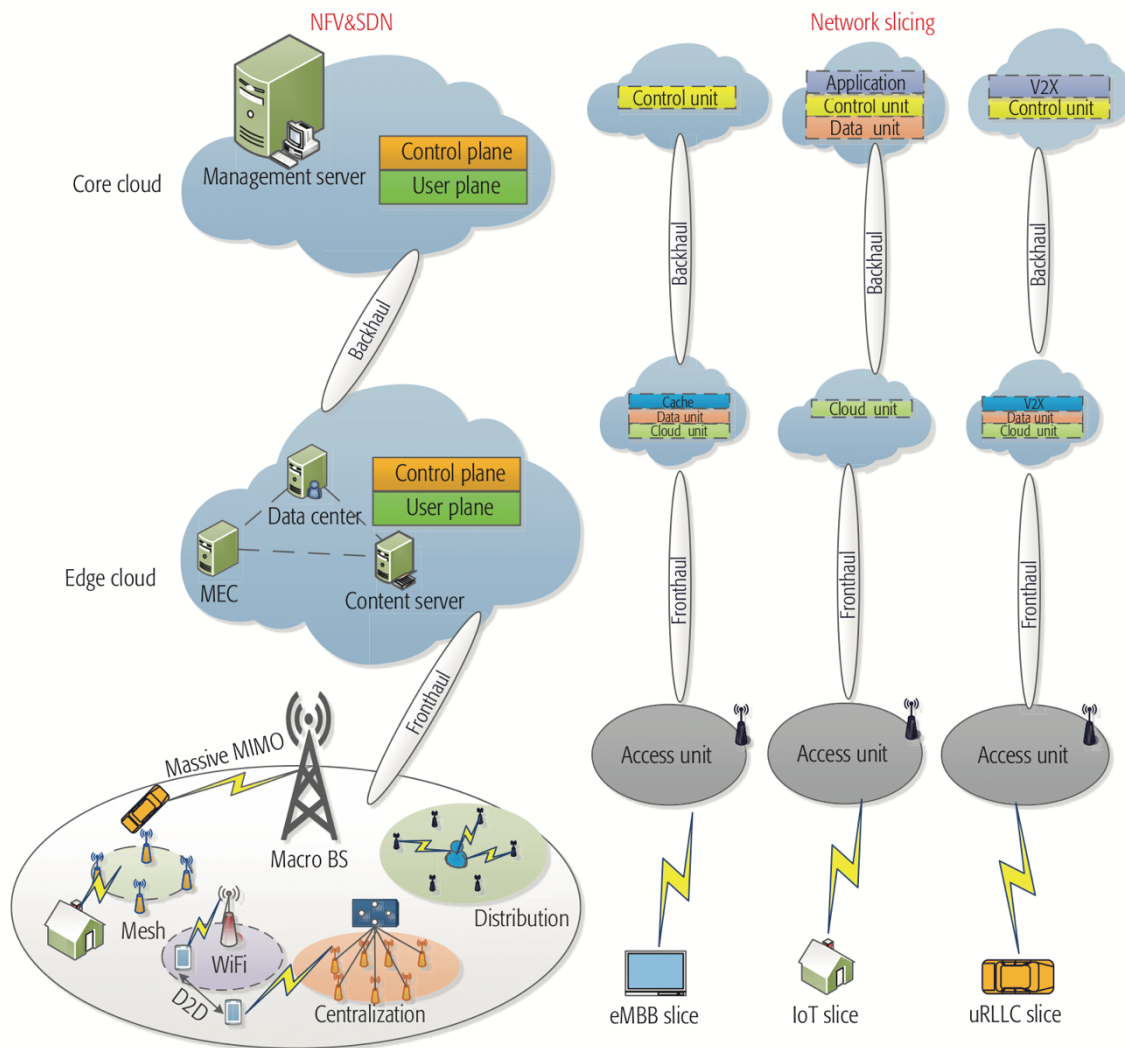
Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν, μπορούμε να μειώσουμε τη συνολική καθυστέρηση του δικτύου εφαρμόζοντας πολλαπλές μονάδες υπολογιστικών νεφών. Η εισαγωγή νέου επιπέδου νέφους, με περισσότερες δυνατότητες μεταξύ του κεντρικού δικτύου και των eNB μονάδων νέφους, μειώνει τη συνολική καθυστέρηση. Αυτό θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο στο πεδίο των ιατρικών εφαρμογών, όπου η καθυστέρηση είναι εξαιρετικά κρίσιμο ζήτημα. Μειώνοντας το μονοπάτι επικοινωνίας, μειώνεται και η πιθανότητα συμφόρησης και καθυστέρησης στο δίκτυο. Δεν μπορούμε όμως να αμελήσουμε να σκεφτούμε και το κόστος αυτών. Έτσι απαιτείται να βελτιστοποιηθεί ο αριθμός των mini cloud που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο και του αριθμού των micro clouds που συνδέονται στο mini cloud.

6.6 Network Slicing

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να ικανοποιήσουν τις διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) των χρηστών. Η κατάτμηση του δικτύου είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τα δίκτυα 5G και την παροχή εξατομικευμένων υπηρεσιών στους χρήστες. Με βάση την αυξημένη κίνηση και ποσότητα των δεδομένων από διαφορετικά σενάρια εφαρμογών θα πρέπει να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά συστήματα κατανομής πόρων προκειμένου να βελτιωθεί η ευελιξία και η χωρητικότητα των συστημάτων που είναι βασισμένα στη κατάτμηση δικτύου. Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα δίκτυο ειδικά σχεδιασμένο για απτικές

επικοινωνίες. Όμως στη πραγματικότητα αυτό δεν μπορεί να συμβεί. Η βιομηχανία έχει συμβιβαστεί με το γεγονός ότι τα 5G δίκτυα πρέπει να σχεδιαστούν με ευέλικτο τρόπο βασισμένο σε μια κοινή φυσική υποδομή. Αυτό το δίκτυο κατανέμεται αποτελεσματικά μεταξύ εφαρμογών διαφορετικών απαιτήσεων όπως απτικές, έξυπνου δικτύου, M2M, V2V. Αυτό θα είναι αποδοτικότερο αν το δίκτυο διαχωριστεί σε κομμάτια ανάλογα το πεδίο εφαρμογής.

Ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής των 5G δικτύων [29] θα πρέπει να βασίζεται σε μια περιεκτική θεώρηση του ελέγχου λογισμικού και της δομής του υλικού καθώς και τη διασύνδεση αυτών. Η κατάτμηση του δικτύου η οποία μπορεί να εκπληρώσει τις διάφορες απαιτήσεις δικτύου και βασίζεται στην ενοποιημένη φυσική υποδομή και στην κοινή χρήση πόρων. Η αρχιτεκτονική SDN έχει γίνει ευρέως αποδεκτή ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για κατάτμηση του δικτύου με βάση την εικονοποίηση των λειτουργιών του δικτύου (NFV). Η λογική αρχιτεκτονική ενός συστήματος 5G βασισμένη στη κατάτμηση δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 20 - 5G Δίκτυο βασισμένο στη τεχνολογία Network Slicing [8]

Στο επίπεδο πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων του συστήματος 5G, ένα ετερογενές δίκτυο δέχεται πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs) και υποστηρίζει την αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ τους. Τα μικρά κελιά και τα σημεία πρόσβασης WiFi αναπτύσσονται πυκνά για να καλύψουν την αυξανόμενη κίνηση δεδομένων σε συστήματα 5G. Επιπλέον, οι επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή (D2D) χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της αποδοτικότητας του ραδιοφάσματος μειώνοντας παράλληλα τις καθυστερήσεις επικοινωνίας και ανακουφίζοντας το φορτίο των μακροκελιών. Οι επικοινωνίες D2D θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στα συστήματα 5G που βασίζονται σε δίκτυα,

κυρίως για τη βελτίωση της ποιότητας των τοπικών υπηρεσιών, των επικοινωνιών έκτακτης ανάγκης και του IoT.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η παραδοσιακή αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού έχει εξελιχθεί σε μια υλοποίηση νέφους, το οποίο διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο χρήστη και έτσι μειώνονται οι καθυστερήσεις στην μετάδοση των δεδομένων. Η υλοποίηση στο νέφος παρέχει ορισμένες λειτουργίες ελέγχου όπως τη διαχείριση της κινητικότητας, εικονική διαχείριση των πόρων, διαχείριση των παρεμβολών κ.α. Οι διακομιστές και οι και οι άλλες λειτουργίες του RAN βρίσκονται στο άκρο του δικτύου του υπολογιστικού νέφους το οποίο είναι μια συγκεντρωτική δομή εικονικών λειτουργιών. Στο άκρο του νέφους πραγματοποιούνται κυρίως λειτουργίες μεταδόσεως δεδομένων και στο πεδίο ελέγχου λειτουργίες όπως επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης. Στο επίπεδο χρήστη οι λειτουργίες P/S-GW μετατοπίζονται στην άκρη του νέφους για να παρέχουν υπηρεσίες με χαμηλή καθυστέρηση και να μειωθεί η επιβάρυνση του backhaul. Οι πλατφόρμες υπολογιστικής ακρίβειας αναπτύσσονται επίσης στην άκρη του νέφους σε συνδυασμό με τους διακομιστές αποθήκευσης δεδομένων οι οποίοι μπορούν να εκτελούν μαζική μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα αντίστοιχα VM (Virtual Machines - εικονικές μηχανές) θα διανεμηθούν στο νέφος και στην άκρη του νέφους για να εκτελέσουν εικονοποιημένες λειτουργίες δικτύου. Χρησιμοποιώντας το SDN, τα δίκτυα 5G μπορούν να συνδέσουν τα VM που διανέμονται στο σύννεφο και στη άκρη του νέφους, δημιουργώντας τη σύνδεση μεταξύ τους. Επιπλέον, οι ελεγκτές SDN μπορούν να ελέγξουν τον κατακερματισμό του δικτύου με κεντρικό τρόπο.

Κάθε τμήμα του δικτύου είναι ένα ανεξάρτητο δίκτυο. Τα ξεχωριστά τμήματα θα υλοποιούνται σε μια κοινή φυσική υποδομή, που περιλαμβάνει το υλικό, την επεξεργασία, την αποθήκευση, και το οπισθοζευκτικό δίκτυο (backhaul). Αυτό θα γίνεται χρησιμοποιώντας ένα εικονικό δίκτυο αντί για την ανάπτυξη ξεχωριστών υποδομών δικτύου.

6.7 Ενεργειακή απόδοση

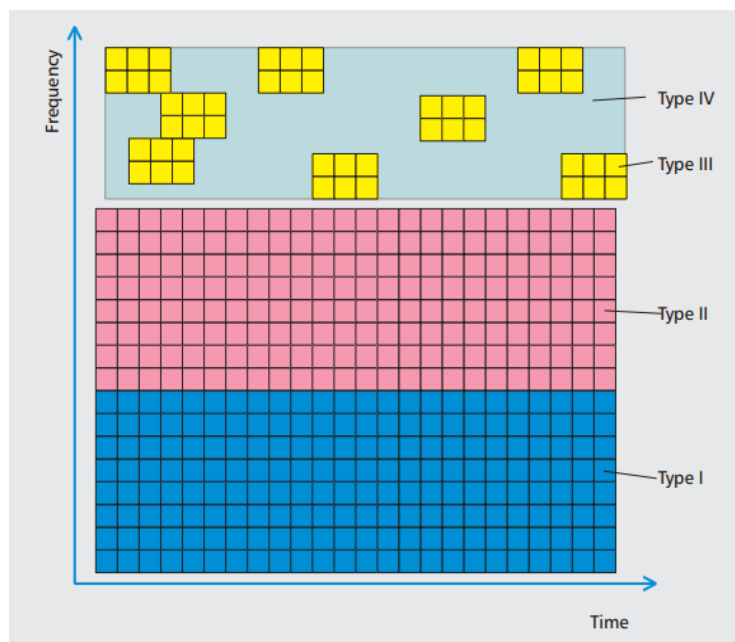
Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη νέων δικτύων. Πλέον, περισσότερο από το 0,5% της παγκόσμιας ενέργειας καταναλώνεται από τα κινητά δίκτυα. Επομένως η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων είναι μια από τις σημαντικότερες πτυχές που λαμβάνονται υπόψη για την ανάπτυξη του 5G, και αυτό όχι μόνο για περιβαλλοντολογικούς λόγους, αλλά και για την λειτουργία του ίδιου του δικτύου. Ο Tombaz και Sung έδειξαν με νούμερα, ότι ένα δίκτυο που έχει γίνει πιο πυκνό με τη μείωση του μεγέθους των κυψελών έχει σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις. Καθώς το δίκτυο θα έχει μεγαλύτερο αριθμό, μικρότερων κυψελών θα είναι μεγαλύτερη η ενέργεια που καταναλώνεται. Για να επιτευχθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα στα 5G συστήματα πρέπει να παραμετροποιηθούν ορισμένοι τομείς:

- **Εξοικονόμηση πόρων:** Μπορούν να εξοικονομηθούν μεγάλα ποσά πόρων/ενέργειας μειώνοντας το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- **Ανανεώσιμη ενέργεια:** Χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι σταθμοί βάσης θα είναι σε θέση να εξοικονομούν μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς να επιβαρύνουν επιπλέον το δίκτυο.
- **Προγραμματισμός δικτύου:** Ο ενεργειακά αποδοτικός προγραμματισμός δικτύου μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικά ποσά ενέργειας. Ένας τρόπος είναι να μειωθεί ο αριθμός των σταθμών βάσεων για την κάλυψη μιας περιοχής. Επίσης, ο σχεδιασμός και χρησιμοποίηση προσαρμοζόμενων σταθμών βάσεων μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια, αφού όταν δεν υπάρχει ενεργός χρήστης ή υπάρχει πολύ χαμηλή κίνηση φορτίου θα κλείνει ο σταθμός βάσης.
- **Λύσεις υλικού:** Χρησιμοποιώντας low-loss κεραίες καθώς και τεχνικές προσαρμοσμένου διαχωρισμού των τομέων ανάλογα με τις απαιτήσεις φορτίου θα επιτευχθεί ενεργειακή αποδοτικότητα.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Στοιχεία του φυσικού επιπέδου αρχιτεκτονικής 5G

Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε επιλεγμένα στοιχεία του φυσικού επιπέδου αρχιτεκτονικής που μπορούν να ξεπεράσουν τις τεχνολογικές προκλήσεις [28]. Μια προσέγγιση 5G πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει αποτελεσματικά διαφορετικούς τύπους κίνησης οι οποίοι αναμένεται να είναι υπάρχουν στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Το όραμα για μια ενοποιημένη δομή που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα και έχει ως στόχο να αντιμετωπίσει όλες τις απαιτήσεις ενός 5G συστήματος.



Εικόνα 21-Το όραμα του 5G για μια ενοποιημένη δομή για διαφορετικούς τύπους κίνησης [12]

Μια πολλαπλή προσέγγιση θα επιτρέψει το συνδυασμό συγχρονισμένων /ασύγχρονων μεθόδων και ορθογώνιων και μη, τύπων μετάδοσης φορτίου. Η κλασική μετάδοση bit (τύπος 1) με μετάδοση δεδομένων μεγάλου όγκου και μεγάλη φασματική απόδοση εκμεταλλεύεται την ορθογωνικότητα και το συγχρονισμό όπου αυτό είναι δυνατό. Τα κατακόρυφα επίπεδα σε κοινούς πόρους

χρόνου/συχνότητας παράγουν ένα μη ορθογώνιο σχήμα που υποστηρίζει ετερογενείς δομές πιο αποτελεσματικά. Για εφαρμογές δεδομένων μεγάλου όγκου (τύπος 2) απαιτείται να αναπτυχθεί η έννοια ενός πομποδέκτη πολλαπλών κυψελών και χρηστών. Η αρχή της πολλαπλής διαίρεσης (IDMA - Interleave Division Multiple Access) είναι μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για τη δημιουργία τέτοιων διαφορετικών επιπέδων μετάδοσης σήματος. Το MTC (Machine Type Communication) αναμένεται να είναι κυρίαρχη εφαρμογή των 5G συστημάτων. Για αυτόν τον σποραδικό τύπο κίνησης (τύπος 3), απαιτείται μια τεχνική πρόσβασης που κάνει κοινή χρήση του μέσου εκπομπής μειώνοντας έτσι την αυστηρή απαίτηση του συγχρονισμού.

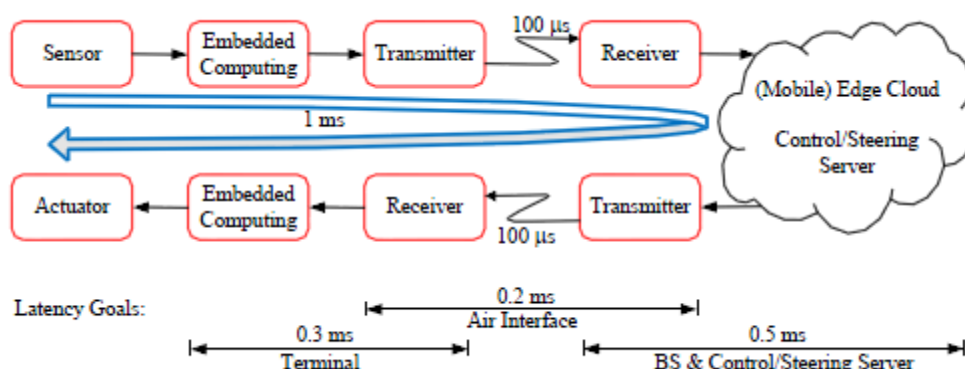
7.2 Επανάσταση στο hardware

Όπως αναλύσαμε παραπάνω για την επίτευξη του στόχου καθυστέρησης 1 ms πρέπει να αναλύσουμε επίσης και τη καθυστέρηση λόγω της ταχύτητας του φωτός. Μέσα σε 1 ms το φως ταξιδεύει περίπου 200χμ. Από αυτό συνεπάγεται ότι η μέγιστη απόσταση του server ελέγχου που πρέπει να είναι τοποθετημένο στο σημείο της απτικής αλληλεπίδρασης από τους χρήστες είναι 100χμ. Αυτή η εκτίμηση δεν λαμβάνει υπόψη ούτε την επεξεργασία των δεδομένων ούτε καθυστερήσεις δικτυακής συμφόρησης στο πλαίσιο της επικοινωνίας. Εξετάζοντας ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο και λαμβάνοντας υπόψη την επιπρόσθετη επεξεργασία σήματος, τον χειρισμό του πρωτοκόλλου και τις δικτυακές καθυστερήσεις, καταλήγουμε στο ότι ο διακομιστής ελέγχου θα βρίσκεται σε ένα εύρος λίγων χιλιομέτρων από το απτικό σημείο αλληλεπίδρασης. Ως εκ τούτου, οι διακομιστές ελέγχου πρέπει να βρίσκονται όσο πιο κοντά στο σταθμό βάσης. Ο καλύτερος τρόπος για να επιτευχθεί αυτή η εγγύτητα είναι να συνδυαστούν οι διακομιστές σε ένα κοινό πλαίσιο με σταθμούς βάσης και σημεία πρόσβασης. Ως λύση σε αυτό είναι το όραμα ενός εξαιρετικά προσαρμοστικού και αποδοτικού ενεργειακά πλαισίου HAEC (Highly Adaptive and Energy-Efficient Box). Το HAEC είναι μια νέα ιδέα για το πώς ο υπολογιστικός σχεδιασμός μπορεί να κατασκευαστεί με τη χρήση οπτικών και ασύρματων chip to chip επικοινωνιών έτσι ώστε να επιτευχθεί σημαντική αύξηση απόδοσης σε σύγκριση με τους σημερινούς διακομιστές. Έτσι

λοιπόν το HAEC box είναι μια πολύ αποδοτική ενεργειακά υπολογιστική πλατφόρμα όπου μπορεί να αντικαταστήσει ένα σταθμό βάσης και ένα διακομιστή ελέγχου.

7.3 Σχεδιασμός Φυσικού Επιπέδου για Χαμηλή Καθυστέρηση

Προκειμένου να πετύχουμε 1 ms end to end καθυστέρηση για την υλοποίηση του Απτικού Διαδικτύου είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η αλυσίδα μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα του στόχου των καθυστερήσεων ενός ασύρματου συστήματος για το Απτικό διαδίκτυο. Ο αισθητήρας μετράει τις προεπεξεργασίες και παρέχει δεδομένα στο ενσωματωμένο σύστημα που ελέγχει την ασύρματη διασύνδεση (air interface). Στη συνέχεια η ασύρματη διασύνδεση μεταβιβάζει τα δεδομένα στο φυσικό στρώμα (PHY) και το ίδιο συμβαίνει από τη πλευρά της λήψης. Στο παράδειγμα βλέπουμε έναν σταθμό βάσης με ένα συνδεδεμένο κινητό υπολογιστικό νέφος, ενώ τα δεδομένα να παρέχονται από το διακομιστή ελέγχου.



Εικόνα 22 - Παράδειγμα καθυστερήσεων ασύρματου συστήματος για στο Απτικό Διαδίκτυο [1]

Τα περισσότερα από τα σημερινά συστήματα ευρυζωνικών επικοινωνιών είναι βασισμένα σε OFDM πολυπλεξία, εξαιτίας της ανθεκτικότητας που προσφέρει. Ωστόσο για να επιτευχθεί η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση 1 ms, η φυσική μετάδοση πρέπει να έχει πολύ μικρά πακέτα τα οποία θα απαιτούν μονόδρομη μετάδοση 100μs στο φυσικό στρώμα (PHY). Ωστόσο στα υπάρχοντα LTE συστήματα, το μεσοδιάστημα των υποφερόντων είναι 15 KHz και η διάρκεια ενός

συμβόλου OFDM είναι της τάξης των 70 μ s. Επίσης, στη πολυπλεξία OFDM, το κυκλικό πρόθεμα (CP - cyclic prefix) προστίθεται σε κάθε σύμβολο για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ συμβόλων.

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί η καθυστέρηση της τάξης του 1 ms και να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί, είναι να αλλάξει η διάρκεια του συμβόλου, το μεσοδιάστημα υποφερόντων, το κυκλικό πρόθεμα και επιπλέον γρήγορη εκτίμηση και αποκωδικοποίηση των καναλιών. Στα [20], [21] και [22], έχει αποδειχθεί ότι ένα σύστημα βασισμένο σε OFDM, με τις παραπάνω βελτιώσεις μπορεί να έχει πιο αξιόπιστη μετάδοση με καθυστέρηση 1 ms.

Η χαμηλή καθυστέρηση απαιτείται για τις εφαρμογές Απτικού Διαδικτύου, ωστόσο οι ανάγκες για shorts bursts of data (SBD)⁴, σημαίνει ότι τα σήματα OFDM με ένα CP ανά σύμβολο μπορεί να παρουσιάσουν χαμηλή φασματική απόδοση. Ακόμα ο τετραγωνικός παλμός OFDM οδηγεί σε υψηλές εκπομπές εκτός ζώνης (out of band) το οποίο επίσης αποτελεί πρόκληση [24]. Έτσι καταλήγουμε να ερευνάμε εναλλακτικές κυματομορφές OFDM για το φυσικό επίπεδο της 5^{ης} γενιάς κινητών επικοινωνιών.

7.4 Μείωση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης

Χωρίς αμφιβολία η OFDM είναι η βάση για τα συστήματα 5G. Έχουν ερευνηθεί πολλές παραλλαγές του OFDM με στόχο την αντιμετώπιση πιθανών μειονεκτημάτων. Αξιοσημείωτη είναι η έννοια του ρυθμιζόμενου OFDM για το 5G. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της έννοιας είναι η προσαρμοστικότητα της στις διαφορές απαιτήσεις του 5G. Στα κανάλια με μικρές διαφορές καθυστέρησης, το μεσοδιάστημα υποφερόντων (subcarrier spacing) μπορεί να αυξηθεί και να μειωθεί το μέγεθος των FFT blocks και το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλότερη καθυστέρηση μετάδοσης του φυσικού επιπέδου.

⁴ Η υπηρεσία Short Burst Data είναι σχεδιασμένη για εφαρμογές, για την αποστολή μηνυμάτων δεδομένων μικρότερου μεγέθους ή μεγαλύτερης συχνότητας από ότι είναι οικονομικά δυνατό, με τα κυκλώματα μεταγωγής πακέτων.

7.5 Επίτευξη μέγιστης αξιοπιστίας συνδεσιμότητας

Προκειμένου να επιτευχθεί καθυστέρηση 1ms για το Απτικό Διαδίκτυο είναι σημαντικό να κατανοηθεί η αλυσίδα μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Οι αισθητήρες μετρούν, επεξεργάζονται και παρέχουν δεδομένα στο σύστημα που ελέγχει τη διεπαφή. Στη συνέχεια η διεπαφή διαβιβάζει τα δεδομένα από όλα τα επίπεδα πρωτοκόλλου στο φυσικό επίπεδο (PHY). Αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει από πλευράς λήψης, για παράδειγμα ένας σταθμός βάσης με ένα συνδεδεμένο κινητό νέφος με δεδομένα να παρέχονται σε ένα διακομιστή ελέγχου.

Πλέον τα περισσότερα συστήματα ευρυζωνικής επικοινωνίας βασίζονται στην ορθογώνια πολύπλεξη διαίρεσης συχνοτήτων (OFDM) κυρίως λόγω της ανθεκτικότητας έναντι άλλων καναλιών. Ωστόσο για να επιτευχθεί καθυστέρηση από άκρο σε άκρο 1ms, η φυσική μετάδοση πρέπει να χωριστεί σε πολύ μικρά πακέτα τα οποία απαιτούν μια μονόδρομη μετάδοση στο φυσικό επίπεδο της τάξεως των 100μs όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.

Δεδομένου ότι η κωδικοποίηση σφάλματος πακέτου στο πομπό και η αποκωδικοποίηση σφάλματος στο δέκτη περιορίζει το μέγεθος του πακέτου σε λιγότερο από την επιθυμητή καθυστέρηση, το πακέτο πρέπει να είναι μικρότερο από 10μs διάρκεια. Στα πλέον κυψελοειδή συστήματα LTE, η απόσταση είναι 15kHz και η διάρκεια ενός OFDM συμβόλου είναι της τάξεως των 70μs.

7.6 Οικονομικός Αντίκτυπος

Το Απτικό Διαδίκτυο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα καθυστέρησης και πολύ υψηλή αξιοπιστία, διαθεσιμότητα και ασφάλεια. Οι προηγούμενες μορφές διαδικτύου υποστήριζαν τη αποστολή περιεχομένου, όπως περιεχόμενο πολυμέσων ή στατικό περιεχόμενο πχ. ροές βίντεο, αρχεία δεδομένων, φωνή ή ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Με το Απτικό Διαδίκτυο πραγματικά και εικονικά αντικείμενα μπορούν να σταλθούν σε ταχύτητες πραγματικού χρόνου. Έτσι μεταφέρονται και πληροφορίες ελέγχου πέρα από περιεχόμενο. Το απτικό διαδίκτυο προσφέρει νέες ευκαιρίες τόσο για υπάρχουσες εφαρμογές όσο και για νέες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό αντίκτυπο στις επιχειρήσεις, στην

ιατρική αλλά και στη κοινωνία, δημιουργώντας πολλές νέες ευκαιρίες για τις τεχνολογικές αγορές και τη παροχή βασικών δημόσιων υπηρεσιών καθώς και στο τρόπο που αλληλοεπιδρούν οι καταναλωτές με το περιβάλλον τους. Στατιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή του απτικού διαδικτύου σε διάφορες αγορές όπως οι επιχειρήσεις, η εκπαίδευση, η ψυχαγωγία, η υγεία, τα έξυπνα δίκτυα η γεωργία κ.α. θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η δυνητική αγορά κατά 20 τρισεκατομμύρια δολάρια σε όλο το κόσμο. Πρόκειται περίπου για το 20% του σημερινού παγκόσμιου ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ).

7.7 Τελικά συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εστίασαμε στην ανάλυση των τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών πέμπτης γενιάς καθώς αυτό είναι το πρώτο βήμα για την επίτευξη του απτικού διαδικτύου. Όσον αφορά την πέμπτη γενιά κινητών επικοινωνιών, αναμένεται να αλλάξει τον τρόπο υλοποίησης των σύγχρονων δικτύων, όπως αναλύθηκε και στα παραπάνω κεφάλαια, καθώς παρουσιάζει σημαντικά οφέλη σε σύγκριση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Συνοπτικά, η νέα γενιά επικοινωνιών θα είναι περισσότερο «πράσινη», θα έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, θα μειώσει τις καθυστερήσεις και την υπερφόρτωση στο δίκτυο, θα επιτρέψει τη σύνδεση περισσότερων συσκευών κ.α. Οι περισσότερες εταιρείες κινητών επικοινωνιών επενδύουν και χρηματοδοτούν τη παραπάνω τεχνολογία με σκοπό να την εντάξουν στο δίκτυο τους.

Οι διάφορες προσεγγίσεις του Διαδικτύου επισκιάζονται από την εμφάνιση του Απτικού Διαδικτύου το οποίο θα παρέχει έλεγχο σε πραγματικό χρόνο καθώς και απτική εμπειρία απομακρυσμένα. Θα αποτελέσει επανάσταση για κάθε πτυχή της κοινωνίας μας. Αναμένεται ότι η επόμενη γενιά κινητών επικοινωνιών 5G θα υποστηρίξει το Απτικό Διαδίκτυο στο ασύρματο κομμάτι.

Στόχος αυτής της διπλωματικής ήταν να ερευνηθεί τι είναι το Απτικό Διαδίκτυο και ποια η σχέση του με την επόμενη γενιά δικτύων 5G. Έπειτα συζητήθηκαν οι εφαρμογές που θα προκύψουν από την ανάπτυξη του Απτικού Διαδικτύου ενώ

επίσης προσδιορίστηκαν οι απαιτήσεις του. Ακόμα αναλύθηκαν τεχνικά χαρακτηριστικά και η αρχιτεκτονική του.

Η επίτευξη του Απτικού Διαδικτύου θα φέρει ένα τεράστιο αντίκτυπο στη κοινωνία, στις επιχειρήσεις στην υγεία και σε άλλες πτυχές της ζωής μας και θα δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για πολλά μέλη της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική πέρα στοχεύει να παρουσιάσει τομείς για μελλοντική έρευνα συμπεριλαμβανομένων της υψηλής συνδεσιμότητας στα ασύρματα δίκτυα, τη μείωση της end-to-end καθυστέρησης, αποτελεσματικούς τρόπους κωδικοποίησης της απτικής πληροφορίας και τέλος την υπέρβαση του φυσικού ορίου της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός.

Βιβλιογραφία

- [1] <http://allaboutroboticsurgery.com/forcehapticfeedback.html>.
- [2] ITU-T Technology Watch Report, "The Tactile Internet," Aug. 2014
- [3] Maier, M., Chowdhury, M., Rimal, B. P., & Van, D. P. (2016). The tactile internet: vision, recent progress, and open challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 138-145.
- [4] Kapoor, S., Arora, P., Kapoor, V., Jayachandran, M., & Tiwari, M. (2014). Haptics-Touchfeedback technology widening the horizon of medicine. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*, 8(3), 294.
- [5] Fettweis, G. P. (2014). The tactile internet: Applications and challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1), 64-70.
- [6] Die Auferstehung, Die Zeit. [Online]. Available: www.zeit.de/zeit-wissen/2013/02/Exoskelette-Querschnittslaehmung
- [7] Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A. H., Friderikos, V., & Frodigh, M. (2017). Realizing the tactile internet: Haptic communications over next generation 5G cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(2), 82-89.
- [8] Arata, J., Takahashi, H., Pitakwatchara, P., Warisawa, S. I., Tanoue, K., Konishi, K., ... & Fujino, Y. (2007, April). A remote surgery experiment between Japan and Thailand over Internet using a low latency CODEC system. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 953-959). IEEE.
- [9] Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J., & Fettweis, G. (2016). 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 460-473.
- [10] Wunder, G., Jung, P., Kasparick, M., Wild, T., Schaich, F., Chen, Y., ... & Mendes, L. L. (2014). 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 97-105.
- [11] Okamura, A. M. (2004). Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery. *Industrial Robot: An International Journal*, 31(6), 499-508.
- [12] Marescaux, J., Leroy, J., Gagner, M., Rubino, F., Mutter, D., Vix, M., ... & Smith, M. K. (2001). Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413(6854), 379.
- [13] Öhmann, D., Simsek, M., & Fettweis, G. P. (2014, December). Achieving high availability in wireless networks by an optimal number of Rayleigh-fading links. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014* (pp. 1402-1407). IEEE.
- [14] Βοσνιάδου, Σ. (2001). Εισαγωγή στην ψυχολογία: βιολογικές, αναπτυξιακές και συμπεριφοριστικές προσεγγίσεις-γνωστική ψυχολογία.

- [15] Sharma, N., Uppal, S., Gupta, S., Patiala, V. B. P. R. D., & Panipat, S. D. (2011). Technology based on touch: Haptics technology. *IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management*, 12.
- [16] Moustakas, K., Paliokas, I., Tzovaras, D., Tsakiris, A., Μουστακάς, Κ., Παλιόκας, Ι., ... & Τσακίρης, Α. (2015). Εικονική Πραγματικότητα.
- [17] Okamura, A. M., Basdogan, C., Baillie, S., & Harwin, W. S. (2011). Haptics in medicine and clinical skill acquisition. *IEEE Transactions on Haptics*, (3), 153-154.
- [18] Nokia White paper, 2016, "The value of the telco Cloud".
- [19] Yilmaz, O. N., Wang, Y. P. E., Johansson, N. A., Brahmi, N., Ashraf, S. A., & Sachs, J. (2015, June). Analysis of ultra-reliable and low-latency 5G communication for a factory automation use case. In *Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 1190-1195). IEEE.
- [20] Johansson, N. A., Wang, Y. P. E., Eriksson, E., & Hessler, M. (2015, June). Radio access for ultra-reliable and low-latency 5G communications. In *Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 1184-1189). IEEE.
- [21] Qualcomm Technologies Inc., White Paper,(Sept, 2016), "Making 5G NR a reality. Leading the technology innovations for a unified, more capable 5G air interface ".
- [22] Van De Beek, J., & Berggren, F. (2008). Out-of-band power suppression in OFDM. *IEEE communications letters*, 12(9).
- [23] Mitra, R. N., & Agrawal, D. P. (2015). 5G mobile technology: A survey. *ICT Express*, 1(3), 132-137.
- [24] Tombaz, S., Sung, K. W., & Zander, J. (2012, December). Impact of densification on energy efficiency in wireless access networks. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE* (pp. 57-62). IEEE.
- [25] Olsson, M., Cavdar, C., Frenger, P., Tombaz, S., Sabella, D., & Jantti, R. (2013, October). 5GrEEen: Towards Green 5G mobile networks. In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2013 IEEE 9th International Conference on* (pp. 212-216). IEEE.
- [26] Neves, P., Calé, R., Costa, M. R., Parada, C., Parreira, B., Alcaraz-Calero, J., ... & Schotten, H. D. (2016). The SELFNET approach for autonomic management in an NFV/SDN networking paradigm. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(2), 2897479.
- [27] Zhang, H., Liu, N., Chu, X., Long, K., Aghvami, A. H., & Leung, V. C. (2017). Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(8), 138-145.
- [28] Wunder, G., Jung, P., Kasparick, M., Wild, T., Schaich, F., Chen, Y., ... & Mendes, L. L. (2014). 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 97-105.

- [29] Ateya, A. A., Vybornova, A., Kirichek, R., & Koucheryavy, A. (2017, February). Multilevel cloud based Tactile Internet system. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2017 19th International Conference on* (pp. 105-110). IEEE.
- [30] Anouris, N., Katsanos, C., Tselios, N., Moustakas, K., Αβούρης, Ν., Κατοάνος, Χ., ... & Μουστακάς, Κ. (2015). Εισαγωγή, επισκόπηση γνωστικής περιοχής Επικοινωνίας Ανθρώπου-Υπολογιστή.
- [31] Ζαχαρία, Α. Μελέτη και αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών στα δίκτυα 5G, Πάτρα
- [32] Remley, C. A., Jargon, J. A., Gordon, J. A., Curtin, A. E., Novotny, D. R., Holloway, C. L., ... & Papazian, P. B. (2017). *Measurement Challenges for 5G and Beyond* (No. IEEE Microwave Magazine).
- [33] Simmons, A. (2015). Perception in Early Modern Philosophy. *The Oxford Handbook of Philosophy of Perception*, 81.
- [34] <https://intuitivesurgical.com/products/da-vinci-xi/>. (n.d.).
- [35] Κυριακίδης, Δ. (2017). Δίκτυα υποδομής και τεχνολογίες δικτύωσης για συστήματα 5ης γενιάς
- [36] <https://5g-ppp.eu/sesame/> Sesame project, 5G-PPP.
- [37] <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2027041/Palpatronix-Surgeons-future-feel-tumours-key-hole-surgery-thanks-haptic-scalpel.html> ,(2011), University of Leeds.

Βιβλιογραφία εικόνων

- [1] Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J., & Fettweis, G. (2016). 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 460-473.
- [2] <https://www.wirelesstrainingolutions.com/802-11-2016/>
- [3] <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>
- [4] <https://tltl.stanford.edu/project/hapkit>
- [5] https://www.researchgate.net/figure/224129898_fig1_Figure-1-The-Multi-Finger-Haptic-Device-has-four-mechanisms-for-single-point-interaction
- [6] Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3, 1206-1232.
- [7] <https://medium.com/@1992singhvinay/haptic-technology-bb12f30cf250>

- [8] Zhang, H., Liu, N., Chu, X., Long, K., Aghvami, A. H., & Leung, V. C. (2017). Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(8), 138-145.
- [9] Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3, 1206-1232.
- [10] Arata, J., Takahashi, H., Pitakwatchara, P., Warisawa, S. I., Tanoue, K., Konishi, K., ... & Fujino, Y. (2007, April). A remote surgery experiment between Japan and Thailand over Internet using a low latency CODEC system. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 953-959). IEEE.
- [11] Ateya, A. A., Vybornova, A., Kirichek, R., & Koucheryavy, A. (2017, February). Multilevel cloud based Tactile Internet system. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2017 19th International Conference on* (pp. 105-110). IEEE.
- [12] Wunder, G., Jung, P., Kasparick, M., Wild, T., Schaich, F., Chen, Y., ... & Mendes, L. L. (2014). 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 97-105.
- [13] <https://5g-mmmagic.eu/project/>
- [14] <https://pdfs.semanticscholar.org/9a2e/78fd79fd478f38200f803531fe3c82babc42.pdf>
- [15] <https://www.ng-voice.com/5g-ppp/>
- [16] Neves, P., Calé, R., Costa, M. R., Parada, C., Parreira, B., Alcaraz-Calero, J., ... & Schotten, H. D. (2016). The SELFNET approach for autonomic management in an NFV/SDN networking paradigm. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(2), 2897479.
- [17] <https://www.itprotoday.com/windows-10/windows-10-redstone-5-build-tracker-pcs>
- [18] Maier, M., Chowdhury, M., Rimal, B. P., & Van, D. P. (2016). The tactile internet: vision, recent progress, and open challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 138-145.

Λεξικό Χρήσιμων Όρων

5G Network	Δίκτυα πέμπτης γενιάς
Cyber sickness	Κοβερνοασθένεια
Cyclic Prefix	Κυκλικό πρόθεμα
Haptic	Αιπός
Hardware	Υλικό
Network Slicing	Κατάτμηση δικτύου
Subcarrier Spacing	Μεσοδιάστημα υποφερόντων
Tactile Internet	Αιπτικό Διαδίκτυο
Haptic Rendering	Αιπτική Απόδοση
Haptic Devices	Αιπτικές συσκευές
Data Gloves	Γάντια δεδομένων
Handover	Διαπομπή
Internet of Things	Διαδίκτυο των πραγμάτων
Mobile Data	Κινητά δεδομένα
Backhaul	Οπισθοζευκτικό
Smart Grid	Έξυπνο δίκτυο

Συντμήσεις - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

5G

5th Generation

AP	Access Point
CN	Core Network

CA	Carrier Aggregation
CAPEX	Capital Expenditure
CP	Cyclic Prefix
CoMP	Coordinated Multi-Point Transmission
CDMA	Code Division Multiple Access
D2D	Device to Device
DC	Direct Current
DoF	Degrees of Freedom
ERM	Eccentric Rotating Mass
FM	Frequency Modulation
FiWi	Fiber Wireless
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
H2H	Human to Human
H2M	Human to Machine
HAEC	Highly Adaptive and Energy-Efficient Box
HetNets	Heterogenous Networks
HSPA	High Speed Packet Access
HSI	Human System Interface

HoN	Health of Network
IC	Integrated Circuit
IDMA	Interleave Division Multiple Access
ISDN	Integrated Services Digital Network
IoT	Internet of Things
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
LRA	Linear Resonant Actuator
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple-input Multiple-output
MTC	Machine type communications
MU-MIMO	Multi-user Multiple-input Multiple- output
M2M	Machine to Machine
MCU	Microcontroller
MU-MIMO	Multi-user Multiple-input Multiple- output
NFV	Network Function Virtualisation
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OOB	Out Of Band
OPEX	Operating Expenses
PHY	Physical Layer
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technologies
RAN	Radio Access Network
SON	Self Organising Network
SDN	Software Defined Networks
SBD	Shorts Bursts of Data
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UHF	Ultra High Frequency
UE	User Equipment
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VHT	Very High Throughput
VNF	Virtualized Network Functions
WLAN	Wireless Local Area Network
XFE	Crosshaul Forwarding Element

XCI

Crosshaul Control Infrastructure
