



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Δρακάκης Κωνσταντίνος

ΑΜ: mtd1704

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ευθύμογλου Γεώργιος

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ιανουάριος 2020

(κενή σελίδα)

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει τα ασύρματα δίκτυα τα οποία δημιουργήθηκαν ως επέκταση των ενσύρματων δικτύων, για να επεκτείνουν τις δυνατότητες και την κάλυψη αυτών, σε σημεία όπου δεν είναι δυνατή η ενσύρματη ζεύξη, αλλά και τη διασύνδεση συσκευών που δεν υποστηρίζουν ενσύρματη σύνδεση, παρά μόνο ασύρματη. Τα ασύρματα δίκτυα από όταν αναπτύχθηκαν συνδέθηκαν άμεσα με τις αρχιτεκτονικές οι οποίες τα δομούν και τα οργανώνουν. Στο πρώτο κεφάλαιο, αναφερόμαστε στις αρχιτεκτονικές οι οποίες εφαρμόζονταν στο παρελθόν και αποτελούσαν τεχνολογικά επιτεύγματα για την εποχή εφαρμογής τους. Κάποιες από αυτές εφαρμόζονται ακόμη και σήμερα για διάφορους λόγους (π.χ. κόστος αναβάθμισης, συμβατότητα εξοπλισμού, κ.α.). Βέβαια, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται και αυξάνονται οι ανάγκες γύρω από τα ασύρματα δίκτυα, είναι αναγκαίο να αλλάξουν και οι αρχιτεκτονικές τους. Επομένως, στο δεύτερο κεφάλαιο αναφερόμαστε στην κατηγορία των αρχιτεκτονικών νέας γενιάς όπως οι αρχιτεκτονικές network slicing, cloud-RAN, small cells, relays, cognitive radio, NFV τις οποίες αναλύουμε, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, τον τρόπο εφαρμογής και τις δυνατότητές τους. Οι περισσότεροι πάροχοι πλέον (ειδικά στα δίκτυα νέας γενιάς 5G) ξεκινούν το στήσιμο των υποδομών τους με την εφαρμογή αυτών των αρχιτεκτονικών. Στο τρίτο κεφάλαιο θα εφαρμόσουμε ανάλυση SWOT σε καθεμία από αυτές, ώστε να καταλήξουμε σε αυτές τις αρχιτεκτονικές οι οποίες με την εφαρμογή τους οδηγούν σε μείωση του κόστους λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου και στην αύξηση των δυνατοτήτων του. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, δίνονται συμπεράσματα για τις αρχιτεκτονικές νέων δικτύων τα οποία έχουν προκύψει από το βασικό εργαλείο σε οικονομικές μελέτες και σε μελέτες επενδύσεων SWOT analysis.

## Abstract

The present thesis studies wireless networks created as an expansion to their wired counterparts to extend the coverage of the latter in points where wired communication was impossible as well as to use for connecting with devices supporting solely wireless connectivity. Wireless networks, beginning from their initial development, are connected with the architectures, which build and organize them. In the first chapter, we present in the past architectures used and considered as important scientific achievement at the time. Some of them are used even today for various reasons (e.g. upgrade cost, compatibility, etc.). Still, as technology advances and the need around wireless networks rise, it is necessary for the architectures to evolve and adapt. Therefore, in the second chapter, we continue with the presentation of new generation architectures, such as network slicing, cloud-RAN, small cells, relays, cognitive radio, NFV, which are analyzed with regard to their advantages and disadvantages, their capabilities, and their practical application. Most of the communication providers (especially in 5G networks) begin building the backbone of their network using these architectures. In the third chapter, we apply a SWOT analysis in each of the presented architectures, in order to specify those which can lead to cost reduction of the wireless network, maintaining simultaneously or even expanding its general capabilities. Finally, in the fourth chapter, we refer to the conclusions about the new wireless network architectures that have emerged from SWOT analysis tool.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Δομή .....	6
Εισαγωγή .....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή και περιγραφή των σημερινών αρχιτεκτονικών, της κατάστασης και του κόστους εφαρμογής των ασυρμάτων δικτύων. ....	11
Hiperlan .....	18
wind-flex.....	20
ATM .....	23
UMTS .....	25
Κεφάλαιο 2:Εύρεση αρχιτεκτονικών νέας γενιάς (next generation) και περιγραφή τους....	30
network slicing .....	31
cloud-RAN.....	41
small cells .....	49
relays .....	56
cognitive radio.....	62
Nfv .....	69
Κεφάλαιο 3:SWOT ANALYSIS στις next generation αρχιτεκτονικές και εύρεση αυτών με το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας.....	76
network slicing .....	79
cloud-RAN.....	82
small cells .....	86
Relays.....	89
cognitive radio .....	92
Nfv .....	95
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα .....	100
Βιβλιογραφία .....	102

## Δομή

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την ανάδειξη της αρχιτεκτονικής νέας γενιάς με το χαμηλότερο κόστος εφαρμογής, με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Αρχικά, θα κάνουμε μια εισαγωγή στην κατάσταση που επικρατεί σήμερα στο κομμάτι των ασυρμάτων δικτύων, εντοπίζοντας και παρουσιάζοντας κάποιες από τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Στη συνέχεια, και σε επόμενο κεφάλαιο, θα εντοπίσουμε, με τη βοήθεια της βιβλιογραφίας, τις αρχιτεκτονικές νέας γενιάς, θα περιγράψουμε την καθεμία ξεχωριστά, αναφέροντας και κάποια παραδείγματα εφαρμογής, και τέλος θα περάσουμε στο βασικότερο κομμάτι που είναι η SWOT ανάλυση (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats analysis, δηλαδή ανάλυση Δυνατών Σημείων, Αδύνατων Σημείων, Ευκαιριών και Απειλών) σε καθεμία από αυτές, η οποία θα μας δείξει και ποια είναι αυτή που αποφέρει μεγαλύτερη μείωση κόστους λειτουργίας σε σχέση με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που έχει η εφαρμογή της.

## Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν ένα βασικό εργαλείο στη σύγχρονη εποχή και βοηθούν στην επίτευξη τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών και όχι μόνο. Στις αρχές της δημιουργίας τους, τα ασύρματα δίκτυα είχαν μεγάλο κόστος υλοποίησης, το οποίο βέβαια όσο περνάει ο καιρός μειώνεται σημαντικά, λόγω της καθολικής εδραίωσής τους. Χρονολογίες σταθμοί στην ιστορία των ασυρμάτων δικτύων είναι το 1971, που έγινε το πρώτο ασύρματο πειραματικό δίκτυο από το πανεπιστήμιο της Χαβάης, το 1986, που αναπτύχθηκε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο ασύρματο δίκτυο, το 1991, οπότε και δημιουργείται το πρώτο 2G δίκτυο και τέλος το 1997, που δημιουργείται το γνωστό σε όλους μας 802.11 Wi-Fi.

Καθώς εδραιώθηκαν τα ασύρματα δίκτυα, άρχισαν να δημιουργούνται και αρχιτεκτονικές υλοποίησής τους, που αρκετές από αυτές χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Τέτοιες είναι η UMTS, η ATM καθώς και η Wind-Flex, η οποία βέβαια έχει πάψει να χρησιμοποιείται [5,6,11,12,24].

Η αρχιτεκτονική UMTS [5,6,24], ή όπως είναι και ευρέως γνωστή ως 3G αρχιτεκτονική, χρησιμοποιείται ώστε να δίνει δυνατότητες μεγαλύτερων ταχυτήτων στο απλό δίκτυο GSM και είναι ουσιαστικά μια αναβάθμισή του. Η UMTS απαιτεί άλλες συχνότητες, στις οποίες βέβαια μπορούν να εκπέμψουν οι ήδη υπάρχοντες εξοπλισμοί των δικτύων 2G με μικρή αναβάθμιση και άρα το κόστος υλοποίησης είναι χαμηλό.

Η ATM (ασύγχρονη μεταφορά δεδομένων) [6,11] είναι μια σημαντική τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους ασυρμάτων δικτύων. Από την άποψη υπηρεσιών, η ATM συνδυάζει τόσο τις πληροφορίες δεδομένων όσο και τα πολυμέσα, ενώ υποστηρίζεται από τις βασικές συνδέσεις ραχοκοκαλιάς (backbone connections) μεταφέροντας πακέτα δεδομένων από την ασύρματη υποδομή στην ενσύρματη και το αντίθετο. Υποστηρίζει ολοκληρωμένη μετάδοση δεδομένων (δεδομένα, φωνή, βίντεο) με εγγυημένο QoS (ποιότητα υπηρεσιών) και σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που δίνει ο χρήστης.

Βέβαια, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επηρεάσει αρκετά και τα ασύρματα δίκτυα. Η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μεγαλύτερη εμβέλεια, αλλά και σύνδεση πολλών συσκευών ταυτόχρονα, δημιουργεί συνεχώς νέα

πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές υλοποίησης των ασυρμάτων δικτύων, κάνοντας τις ήδη υπάρχουσες παρωχημένες, με αποτέλεσμα να παύουν να χρησιμοποιούνται με τον καιρό.

Συνεπώς, αναπτύσσονται αρχιτεκτονικές που υλοποιούνται με τη βοήθεια λογισμικού (software-defined networking (SDN)) [16,23,27] και τη βοήθεια cloud υποδομών [13], με δυνατότητες δημιουργίας εικονικών δικτύων σε ήδη υφιστάμενες εγκαταστάσεις (network function virtualization (NFV)) [2,23,27] και όχι με υλικό εξοπλισμό όπως συνηθίζονταν στις ήδη υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Αυτές οι νέες αρχιτεκτονικές είναι περισσότερο ευέλικτες στη δρομολόγηση και την επαναδρομολόγηση πακέτων δεδομένων σε περίπτωση προβλήματος στην οριζόμενη κύρια διαδρομή, καθώς είναι εύκολα παραμετροποιήσιμες και δεν απαιτούν επέμβαση και αλλαγή στα κομμάτια του εξοπλισμού, παρά μόνο στο προγραμματιστικό κομμάτι και το λογισμικό.

Μια από αυτές είναι και ο τεμαχισμός δικτύου (network slicing) [17-19], που είναι μια μορφή αρχιτεκτονικής με την οποία δημιουργούνται ένα ή περισσότερα εικονικά δίκτυα που χρησιμοποιούν τον ίδιο εξοπλισμό και τους ίδιους πόρους με το κύριο δίκτυο. Τα εικονικά δίκτυα προσαρμόζονται, ώστε να ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες ανάγκες των εφαρμογών, των υπηρεσιών, των συσκευών, των πελατών ή και των φορέων εκμετάλλευσής τους.

Ακόμη, προσφέρεται και η Cloud-RAN αρχιτεκτονική [14,15,28,29] ή, σε ελληνική απόδοση, ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται σε υποδομές cloud. Στην αρχιτεκτονική αυτή οι πομποδέκτες διαχωρίζονται από τους ψηφιακούς επεξεργαστές βάσης. Αυτό σημαίνει ότι οι μονάδες εκπομπής μπορούν να τοποθετηθούν πιο κοντά στις κεραίες και αναφέρονται συχνά ως απομακρυσμένες μονάδες εκπομπής. Η Cloud-RAN αρχιτεκτονική επιτρέπει επίσης στους χειριστές των δικτύων να συγκεντρώνουν τους ψηφιακούς επεξεργαστές βάσης σε μια βολική τοποθεσία –τη βάση ενός πύργου– ή σε ένα κέντρο δεδομένων. Πρόκειται για τον όρο centralized RAN, ο οποίος είναι η αρχή και βάση της αρχιτεκτονικής cloud-RAN. Ένα δίκτυο cloud-RAN βασισμένο στις ίδιες αρχές του centralized RAN μετακινεί όλες τις λειτουργίες που παραδοσιακά εκτελούνται από το υλικό κομμάτι του δικτύου, στο λογισμικό το οποίο βρίσκεται στο σύννεφο (cloud), χωρίς να καταλαμβάνει κάποια



υποδομή και φυσικούς πόρους. Έτσι, αυξάνεται ακόμη περισσότερο η εξοικονόμηση πόρων και υλικών.

Η αρχιτεκτονική των small cells [26], η οποία βέβαια αποτελεί και αυτή αρχιτεκτονική νέας γενιάς, βασίζεται σε εξοπλισμό και όχι λογισμικό, όπως οι προηγούμενες που παρουσιάστηκαν. Πρόκειται για εγκαταστάσεις που αποτελούνται από μικρές κεραιές και εξοπλισμό εκπομπής χαμηλής ισχύος που τοποθετούνται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, σε φανάρια δρόμων, μικρές ταράτσες σπιτιών, τοίχους στις άκρες των δρόμων ή κολόνες φωτισμού. Έχουν μεγάλη διαφορά, κυρίως στο μέγεθος, από τους κλασικούς πύργους εκπομπής (macro cells) που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα. Αυτό συμβαίνει γιατί με τον τρόπο αυτό χρησιμοποιούνται τα ίδια κανάλια και φάσματα εκπομπής σε πολλά μέρη ταυτόχρονα χωρίς παρεμβολές, και έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, η βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας και η καλύτερη κάλυψη σε σημεία που θα ήταν δύσκολη έως απίθανη η τοποθέτηση ενός κλασικού συστήματος πύργου εκπομπής.

Η χρήση αναμεταδοτών (network relays), οι οποίοι είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής ισχύος πομποδέκτες που δεν έχουν κάποια ενσύρματη σύνδεση-υποδομή είναι επίσης συχνή. Πολλές φορές ένας αναμεταδότης είναι κοινός με παραπάνω από έναν πάροχο δικτύου, μειώνοντας έτσι ακόμη περισσότερο το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Χρησιμοποιούνται για την κάλυψη σημείων που δεν μπορούν να καλυφθούν από το σήμα των βασικών σταθμών ή έχουν πολύ κόσμος και άρα πολλές συσκευές και χρειάζεται επιπλέον χωρητικότητα στο δίκτυο (π.χ. σταθμοί τρένων, στάδια, εμπορικά κέντρα κ.α.). Υπάρχουν τρεις τύποι αναμεταδοτών: οι σταθεροί, οι νομαδικοί και οι κινητοί, που εγκαθίστανται πάνω σε τρένα ή καράβια.

Ακόμη μια αρχιτεκτονική νέας γενιάς είναι η Cognitive Radio (CR) [3], μια προσαρμοστική έξυπνη αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου, η οποία έχει τη δυνατότητα και βρίσκει τα διαθέσιμα κανάλια στο φάσμα εκπομπής και να αλλάζει τις παραμέτρους του συστήματος εκπομπής αυτόματα, με τη χρήση ειδικού έξυπνου λογισμικού, ενεργοποιώντας έτσι ταυτόχρονες πολλές ζεύξεις με βέλτιστη ποιότητα.

Με τη χρήση αυτών των αρχιτεκτονικών νέας γενιάς μειώνεται το κόστος λειτουργίας του δικτύου, που είναι ένας πολύ βασικός παράγοντας στα ασύρματα δίκτυα. Στην παρούσα διπλωματική, κάνοντας χρήση του οικονομικού εργαλείου SWOT

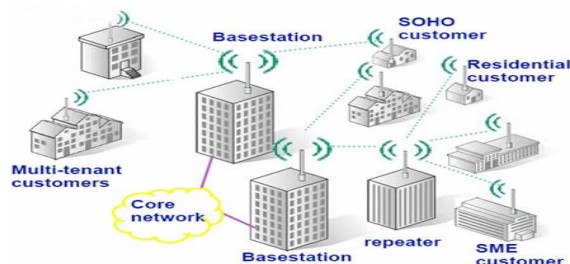
ANALYSIS [8], θα μελετήσουμε ποια από αυτές έχει το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με αυτά που προσφέρει και γιατί.

Τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς, όπως θα δούμε, βασίζονται στο Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) [1,9,21], μια τεχνολογία που καλύπτει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων λειτουργίας των ασυρμάτων δικτύων όπως την ποιότητα της επικοινωνίας (QoS), την ασφάλεια, τη φορητότητα και τη διαχείριση πόρων (radio resource management, RRM). Χαρακτηρίζεται από πολλαπλές κεραιές λήψης-εκπομπής (MIMO συστήματα), εύκολο σχεδιασμό, έλεγχο συσκευών, καθώς και βελτιστοποίηση κόστους λειτουργίας, η οποία επικεντρώνεται στην εξοικονόμηση κόστους που μπορεί να επιτευχθεί κυρίως μέσω της συγκέντρωσης του ελέγχου, της ανάπτυξης και της λειτουργίας του δικτύου, αρχικά με το λογισμικό διαχείρισης να φιλοξενείται σε εσωτερικές υποδομές και όχι σε κάποιο εξωτερικό πάροχο. Πάνω στο WiMAX εφαρμόζονται πολλές από τις νέες αρχιτεκτονικές που αναφέραμε προηγουμένως.

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή και περιγραφή των σημερινών αρχιτεκτονικών, της κατάστασης και του κόστους εφαρμογής των ασυρμάτων δικτύων

Σύμφωνα με τον Geier, τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν ένα σημαντικό τεχνολογικό εργαλείο στις μέρες μας. Λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τα ενσύρματα δίκτυα, επιτελούν τον ίδιο σκοπό, δηλαδή μεταδίδουν και αυτά πακέτα, απλά σε μορφή κατάλληλη για ασύρματη εκπομπή. Οι συσκευές που επικοινωνούν με τη χρήση των ασύρματων δικτύων μπορεί να είναι, εκτός από φορητές, και σταθερές συσκευές. Ακόμη, τα ασύρματα δίκτυα αρκετές φορές χρησιμοποιούνται για την ένωση δύο ή περισσότερων ενσύρματων υποδομών σημείο προς σημείο ή σημείο προς πολλά σημεία. Επιπλέον, παρόλα τα πλεονεκτήματά τους (όπως για παράδειγμα η εύκολη και με σχετικά χαμηλό κόστος επεκτασιμότητα σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα), τα ασύρματα δίκτυα έχουν ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα: δεν μπορούν να διαπεράσουν σοβαρά εμπόδια όπως κτήρια, βουνά κ.α. Βέβαια, όσο εξελίσσονται αυτό τείνει να επαλειφθεί σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση νέων συχνοτήτων αλλά και νέας τεχνολογίας εξοπλισμού [4,20].



Εικόνα 1: Ασύρματο δίκτυο

Τα ασύρματα δίκτυα αλλάζουν τον τρόπο επικοινωνίας των υπολογιστών, αλλά και των χρηστών τους. Με την αύξηση του αριθμού των συσκευών που αλληλεπιδρούν, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να προσφέρουν λύσεις, οι οποίες θα βελτιώσουν την επικοινωνία και θα αυξήσουν την αποδοτικότητα αυτής. Με τη χρήση των ασύρματων δικτύων η επικοινωνία γίνεται πιο άμεση, το δίκτυο παρέχει κάλυψη χωρίς περιορισμούς και η επέκταση του γίνεται πιο εύκολα και με πιο μικρό κόστος

απ' ότι με ένα ενσύρματο δίκτυο. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι εντελώς ακίνδυνος για τον ανθρώπινο οργανισμό, ειδικά στα μικρά δίκτυα, η ακτινοβολία είναι μη ιονίζουσα και τα επίπεδα ακτινοβολίας είναι πολύ πιο χαμηλά από τα επιτρεπτά για τον ανθρώπινο οργανισμό όρια (Πεπούδη,2009).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε βελτίωση της ποιότητας των ασυρμάτων δικτύων με όλο και αυξανόμενες ταχύτητες, νέα πρότυπα αλλά και νέες αρχιτεκτονικές. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα των Bluetooth, GPRS (General Packet Radio Service), HIPERLAN (High-Performance European Radio LAN) και 802.11 WLAN [6].

Ακόμη, ο Geier υποστηρίζει πως η υποδομή ενός ασύρματου δικτύου ουσιαστικά διασυνδέει χρήστες και υποσυστήματα με τελικά κύρια συστήματα, κάνοντας χρήση διαφόρων συχνοτήτων, ανάλογα με τη χρήση αλλά και με τις απαιτήσεις σε ταχύτητες και αποστάσεις μεταξύ βάσης/σταθμού εκπομπής και χρηστών/πελατών. Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από σταθμούς βάσης (ένα από τα βασικότερα συστατικά μέρη τους), ελεγκτές πρόσβασης, λογισμικό ελέγχου και δρομολόγησης πακέτων, συστήματα κεραιών, σημεία πρόσβασης αλλά και την ενσύρματη υποδομή, το λεγόμενο και σύστημα διασύνδεσης, όπου γίνονται και οι συνδέσεις ραχοκοκαλιάς (backbones) (Geier,2008).

Ένας σταθμός βάσης είναι συνήθως τοποθετημένος αρκετά πάνω από την εδαφική περιοχή που καλύπτει. Ακόμη, διαφορετικοί τύποι σταθμών βάσης τοποθετούνται ανάλογα με την περίπτωση αλλά και τις απαιτήσεις κάλυψης. Σύμφωνα με την techopedia οι τύποι αυτών είναι οι:

Macrocells ή μεγάλοι σταθμοί βάσης/κυψέλες: καλύπτουν τις μεγαλύτερες περιοχές του δικτύου και τοποθετούνται σε εκτός αστικού κέντρου περιοχές, κυρίως σε λόφους με οπτική επαφή με το αστικό κέντρο και τις περιοχές κάλυψης αλλά και σε αυτοκινητόδρομους.



Εικόνα 2: Macrocell πύργος εκπομπής (πηγή: <https://www.geo-tel.com/wp-content/uploads/2017/03/CellTowersB.jpg>)

Microcells ή μικροί σταθμοί χαμηλής ισχύος: καλύπτουν περιοχές μικρές και κυρίως σημεία όπου δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση μεγάλου σταθμού βάσης και η κάλυψη από τους παρακείμενους δεν είναι εφικτή. Αυτό συμβαίνει κυρίως μέσα στα αστικά κέντρα.



Εικόνα 3: Σταθμός Microcell σε στύλο (πηγή: <https://sanfrancisco.cbslocal.com/2015/10/31/san-francisco-residents-battle-wireless-companies-cell-tower-building-boom-super-bowl-fifty/>)

Picocells ή πολύ μικροί σταθμοί: Αυτοί οι σταθμοί είναι πολύ μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του δικτύου και της κάλυψής του σε σημεία με πολλούς χρήστες, όπως για παράδειγμα εμπορικά κέντρα, στάδια, εκθέσεις κ.α.

Ένας πάροχος δικτύου έχει εγκατεστημένους και διασυνδεδεμένους πολλούς σταθμούς βάσης κάθε τύπου στο δίκτυό του, ώστε να μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες των χρηστών του δικτύου του. Αυτό συμβαίνει σε κάθε είδος ασύρματου δικτύου. Ανάλογα με την απαιτούμενη κάλυψη, την ευρυζωνικότητα (χωρητικότητα του δικτύου) και τη γεωγραφία των περιοχών, επιλέγεται ο τύπος του σταθμού βάσης, οι συχνότητες εκπομπής, τα συστήματα εκπομπής, η ισχύς εκπομπής και ο τρόπος διασύνδεσής του με το υπόλοιπο δίκτυο, ώστε η ποιότητα που παρέχεται στους χρήστες να είναι η μέγιστη δυνατή (techopedia,2018).



Εικόνα 4: PicoCell (πηγή: <https://www.voip-systems.ru/assets/images/voip/gsm-repeater/PicoCell/picocell-1800-sxb/picocell-1800-sxb.jpg>)

Ο WLC (Wireless Lan Controller) είναι ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια ενός σωστά στημένου ασύρματου δικτύου. Είναι σημαντικό γιατί ελέγχει το δίκτυο και την πρόσβαση σε αυτό. Ένας από τους πιο συχνούς και διαδομένους ελέγχους που γίνονται από τους WLC στα ασύρματα δίκτυα είναι ο έλεγχος των δεδομένων με την έννοια της καταμέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, σε πολλά ασύρματα δίκτυα όπως τα hotspots αλλά και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας υπάρχουν τα λεγόμενα πακέτα δεδομένων, τα οποία αγοράζουν οι χρήστες ώστε να έχουν πρόσβαση και να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του δικτύου. Πολλές φορές, αρκετές υπηρεσίες, όπως για παράδειγμα η πρόσβαση στο site του παρόχου ή στο site όπου δίνονται πληροφορίες του υπολοίπου και των διαθέσιμων πακέτων, γίνεται δωρεάν και χωρίς να καταναλώνονται τα δεδομένα του χρήστη. Αυτούς τους ελέγχους τους κάνει ο WLC. Ακόμη ένας έλεγχος δεδομένων που κάνει ο WLC είναι και ο έλεγχος της πρόσβασης και των διακινούμενων δεδομένων. Αποτέλεσμα τέτοιου ελέγχου είναι ο αποκλεισμός ιστοσελίδων, τα όρια στην ταχύτητα πλοήγησης κ.α. Ο WLC επίσης κάνει τη δρομολόγηση και την ανεξαρτητοποίηση των χρηστών, δηλαδή ο κάθε χρήστης δρα ανεξάρτητα και δεν αλληλεπιδρά με τους υπόλοιπους, κυρίως για λόγους ασφαλείας.



Εικόνα 5: Ελεγκτής πρόσβασης (πηγή: [https://scwifi.files.wordpress.com/2017/09/img\\_8526.jpg?w=630](https://scwifi.files.wordpress.com/2017/09/img_8526.jpg?w=630))

Οι WLC έχουν διάφορες μορφές, σύμφωνα με τον Peterson αυτές αναλύονται παρακάτω:

### WLC στημένος στο cloud

Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος WLC. Η εφαρμογή του είναι γνωστή και ως “controller-less” καθώς, εξαιτίας της δομής cloud, ο WLC ουσιαστικά είναι στημένος και φιλοξενείται στο cloud, δηλαδή σε ένα datacenter που μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε στον κόσμο και να διασυνδέεται με το δίκτυο που γίνεται ο έλεγχος μέσω του διαδικτύου. Αυτός ο τύπος WLC έχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς με ένα ετήσιο συνήθως ενοίκιο σε κάποιον πάροχο cloud, όλη η υποδομή για ένα WLC είναι διαθέσιμη, κάτι που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να υπάρχει εγκατεστημένος εξοπλισμός, ο οποίος καταλαμβάνει χώρο και απαιτεί επιπλέον έξοδα. Επίσης, είναι πολύ πιο εύκολη η επέκταση και ανάπτυξη του ασύρματου δικτύου και των παροχών του.

### WLC στημένος σε Access Point:

Είναι μια ακόμη λύση η οποία συχνά υιοθετείται. Και αυτή η εφαρμογή είναι γνωστή και ως “controller-less” εξαιτίας της δομής της. Ο WLC ουσιαστικά είναι στημένος στον εξοπλισμό των access points (σημείων πρόσβασης) και έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο αριθμό σημείων πρόσβασης ως WLC. Όταν ένα σημείο πρόσβασης οριστεί ως WLC, τα υπόλοιπα σημεία πρόσβασης που υπάρχουν στον έλεγχο του στέλνουν αναφορά στον WLC και αυτός εκτελεί όλους τους ελέγχους. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός ελέγχου. Μειονεκτήματα είναι αρχικά ότι ο WLC δεν είναι τόσο γρήγορος, έχει όριο στα σημεία πρόσβασης που μπορεί να ελέγξει αλλά και στις δυνατότητες που έχει ως προς τον έλεγχο καθαυτό.

### WLC βασισμένος σε εικονικό υπολογιστή (Virtual Machine):

Υπάρχουν και εικονικοί ελεγκτές WLC. Η Cisco είναι ένα παράδειγμα κατασκευαστή που προσφέρει έναν WLC ελεγκτή βασισμένο σε εικονικό υπολογιστή (VM). Αυτό έχει το πλεονέκτημα να εγκατασταθεί στο υπάρχον κέντρο δεδομένων και στους υπάρχοντες διακομιστές, χωρίς να χρειαστεί επιπλέον εξοπλισμός. Οι εικονικοί ελεγκτές μπορούν να κάνουν καλή δουλειά στη διαχείριση των πακέτων δεδομένων, αλλά δεν διαθέτουν το κατάλληλο εξειδικευμένο υλικό που επιτρέπει στους ελεγκτές να επεξεργάζονται όλη την κίνηση των δεδομένων και να ασκούν πλήρη έλεγχο στο δίκτυο και τους χρήστες του. Αυτή η επιλογή μπορεί να είναι μια καλή αντιστοιχία

για εταιρείες που έχουν ένα ισχυρό περιβάλλον VM στο κέντρο δεδομένων τους και θέλουν να αξιοποιήσουν τους υπάρχοντες πόρους του κέντρου για να φιλοξενήσουν το WLC τους.

#### Φυσικός εξοπλισμός WLC:

Τέλος, οι φυσικοί ελεγκτές προσφέρουν τον μεγαλύτερο και πιο αξιόπιστο έλεγχο του ασύρματου δικτύου, προσφέροντας ένα μεγάλο φάσμα λειτουργιών. Ορισμένοι φυσικοί ελεγκτές επεξεργάζονται όλα τα δεδομένα ελέγχου αλλά και δεδομένα που προκύπτουν από επεξεργασία αυτών, ενώ όλοι οι προηγούμενοι WLC μπορούν να χειριστούν μόνο δεδομένα ελέγχου χωρίς να τα επεξεργάζονται. Εκείνοι που επεξεργάζονται δεδομένα μόνο μερικές φορές διατίθενται στο εμπόριο ως λύσεις “ιδιωτικού cloud”, καθώς μπορούν να παρέχουν το ίδιο είδος ελέγχου που παρατηρείται σε λύσεις βασισμένες σε cloud ή σε σημεία πρόσβασης, με τη διαφορά ότι τα AP μπορούν να στείλουν τα δεδομένα του ελέγχου μέσω του Διαδικτύου σε ένα WLC που τα ελέγχει, αντί για το cloud. Εκείνοι οι WLC που επεξεργάζονται και δεν ελέγχουν μόνο τα δεδομένα παρέχουν επίσης το μεγαλύτερο επίπεδο ελέγχου στο δίκτυο, αλλά και προσαρμόζουν ολόκληρο το ασύρματο δίκτυο εάν δεν υπάρχει διαθέσιμος ελεγκτής.

Πολλοί από τους σημερινούς φυσικούς ελεγκτές μπορούν να χρησιμοποιήσουν έναν ελεγκτή υψηλής διαθεσιμότητας (HA) για την αποτροπή διακοπών του ασύρματου δικτύου. Ένας σταθερός ελεγκτής HA είναι ουσιαστικά ένα αντίγραφο backup του πρωτεύοντος ελεγκτή και όταν ο πρωτεύων ελεγκτής πάθει κάτι και τεθεί εκτός λειτουργίας, ο backup ελεγκτής HA αναλαμβάνει έχοντας την ίδια διεύθυνση IP και το δίκτυο να συνεχίσει σαν να μην έχει συμβεί τίποτα. Οι φυσικοί ελεγκτές παρέχουν τον μεγαλύτερο έλεγχο, αλλά συχνά απαιτούν εξειδικευμένους τεχνικούς για να τους διαχειριστούν και μπορεί να είναι πιο ακριβοί από άλλες λύσεις που περιγράψαμε παραπάνω (Peterson,2015).

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω, κάθε συσκευή δικτύου (π.χ. ο ελεγκτής WLC) πρέπει να έχει μια μοναδική διεύθυνση IP, ώστε να είναι αναγνωρίσιμη από τις υπόλοιπες και να μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα. Αρχικά, το πρωτόκολλο IP απαιτούσε κάθε σύστημα να έχει μια παγκόσμια μοναδική διεύθυνση. Αυτό οδήγησε στο πρόβλημα της έλλειψης διευθύνσεων IP, το οποίο επιλύθηκε εν μέρει με τη δημιουργία των ιδιωτικών/τοπικών διευθύνσεων, αλλά και των



διευθύνσεων IPv6. Κάθε μία από αυτές τις λύσεις έχει και τα δικά της προβλήματα. Για παράδειγμα, οι κόμβοι με τοπικές διευθύνσεις δεν είναι εύκολα προσβάσιμοι έξω από το τοπικό δίκτυο π.χ. μέσω του internet, κάνοντας δύσκολη αν όχι ανέφικτη την απομακρυσμένη πρόσβαση σε αυτές. Το Διαδίκτυο επόμενης γενιάς (Internet of Things) επιτρέπει στους οργανισμούς να επιλέγουν ποια από τα τοπικά τους αντικείμενα είναι προσβάσιμα από το εξωτερικό και ποια όχι [11].

Άλλο ένα θέμα στα ασύρματα δίκτυα είναι η ποιότητα της υπηρεσίας, η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με τις ομάδες πακέτων που χρησιμοποιούνται στην υπηρεσία αυτή. Οι χρήστες του δικτύου συνήθως ενδιαφέρονται να λάβουν κάποιες εγγυήσεις σχετικά με την καθυστέρηση και την απόδοση των πακέτων που στέλνουν κάνοντας χρήση των διαφόρων υπηρεσιών/εφαρμογών τους. Η φύση της IP καθιστούσε δύσκολη την εγγύηση της ποιότητας. Βέβαια, αυτό πλέον δεν ισχύει καθώς η επόμενη γενιά του διαδικτύου επιτρέπει μια ποικιλία εγγυήσεων ποιότητας, συμπεριλαμβανομένης της ολικής απομόνωσης κάποιας συσκευής (π.χ. αν κάνει βαριά χρήση ενάντια στους όρους του παρόχου δικτύου), εάν είναι επιθυμητό. Επίσης, το QoS σχετίζεται με την οικονομία του εύρους ζώνης και την εξοικονόμηση πόρων του δικτύου. Έτσι, θα πρέπει να γίνεται και συσχέτιση της ποιότητας με τα πακέτα και τις χρεώσεις του δικτύου [11].

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε μερικές από τις αρχιτεκτονικές αυτές που υπάρχουν μέχρι και σήμερα, καθώς και τον τρόπο λειτουργίας και δομής τους ώστε να γίνει μια εισαγωγή στον τρόπο δόμησης των ασύρματων δικτύων. Βέβαια, όλες αυτές οι αρχιτεκτονικές με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας αντικαθίστανται με της νέας γενιάς αρχιτεκτονικές, τις οποίες και θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

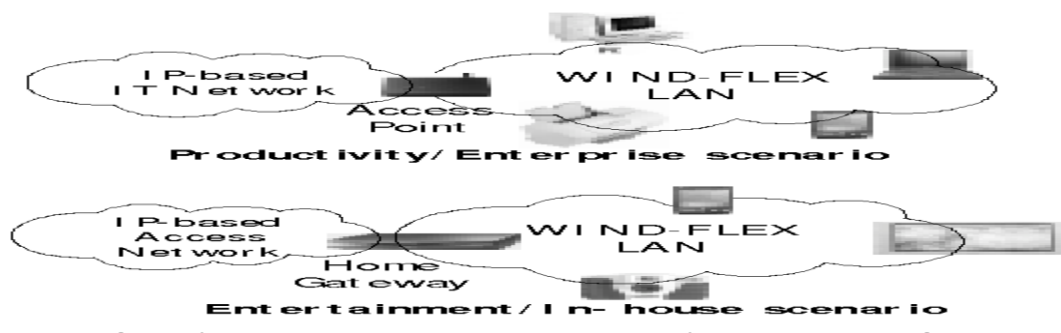
## Hiperlan

Μία ακόμη εναλλακτική πρόταση αρχιτεκτονικής ασυρμάτων δικτύων αποτελεί το πρότυπο HiperLAN (High performance radio Local Area Network), το οποίο αναπτύχθηκε από το ETSI (European Telecommunications Standardization Institute-Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών) και υποστηρίζεται από διάφορες εταιρίες του κόσμου. Προϊόντα που να στηρίζονται στο πρότυπο HiperLAN είχαν αρχίσει να αναγγέλλονται στα μέσα του 2000. Το HiperLAN υπάρχει σε δύο εκδόσεις, το HiperLAN Type 1, που τυποποιήθηκε το 1996 και υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 24 Mbps και το HiperLAN Type 2, η ανάπτυξη του οποίου δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί και θα υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 54 Mbps. Αμφότερες οι εκδόσεις του HiperLAN χρησιμοποιούν τη συχνότητα των 5 GHz, η οποία στην Αμερική και στην Ιαπωνία είναι ελεύθερη, ενώ στην Ευρώπη έχει επισήμως παραχωρηθεί για χρήση από τα ασύρματα δίκτυα, με αποτέλεσμα αφενός μεν να μη δημιουργούνται προβλήματα με τα δίκτυα που τρέχουν στα 2.4 GHz και αφετέρου οι συσκευές HiperLAN να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου χωρίς τροποποιήσεις. Μια άλλη ιδιαιτερότητα του HiperLAN είναι επίσης το ad hoc roaming, η δυνατότητα δηλαδή της αυτόματης προώθησης των δεδομένων από AP σε AP, σε περίπτωση που ο δέκτης δεν βρίσκεται στο βεληνεκές του πομπού. Εκτός από αυτό, η υπεροχή στην ταχύτητα και η δυνατότητα υψηλού QoS είναι δύο ακόμη ιδιαιτερότητες που έχει το HiperLAN έναντι των άλλων προτύπων ασύρματης δικτύωσης. Με το υψηλό QoS μπορούν τα πακέτα δεδομένων να κατηγοριοποιούνται και να αποκτούν διαφορετική σειρά προτεραιότητας, ανάλογα με το είδος τους. Έτσι, για παράδειγμα τα πακέτα που αφορούν ένα video μπορεί να έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα κατά τη μεταφορά, με αποτέλεσμα την πιο ομαλή εμφάνισή του. Το HiperLAN2, σε αντίθεση με όλα τα υπόλοιπα πρότυπα, είναι συμβατό με μια τεράστια ποικιλία δικτύων γιατί, εκτός από το να συνδέεται με δίκτυα Ethernet, έχει τη δυνατότητα και για μεταφορά πακέτων IP, Firewire, ATM, UMTS κ.ά. Τα projects BRAN (ραδιοδίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης) του ETSI αναπτύσσουν μια νέα γενεά προτύπων που θα υποστηρίζει και τα ασύγχρονα δεδομένα και τις υπηρεσίες στις οποίες ο χρόνος μετάδοσης είναι κρίσιμος (φωνή και βίντεο), για να επιτύχουν μια αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Ένα από αυτά τα πρότυπα είναι το HiperLAN Type 2, που θα υποστηρίζει μετάδοση πολυμεσικών εφαρμογών μεταξύ

διαφορετικών ευρυζωνικών κεντρικών δικτύων και κινητών τερματικών. Το HiperLAN Type 2 παρέχει μια εύκαμπτη πλατφόρμα για ποικίλες εφαρμογές πολυμέσων για επιχειρήσεις και για προσωπική χρήση που μπορούν να υποστηρίξουν ένα σύνολο από υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54 Mbps. Σε ένα τυπικό σενάριο επιχειρησιακής εφαρμογής, ένα κινητό τερματικό χρησιμοποιεί υπηρεσίες και την υποδομή του καλωδιωμένου εταιρικού/δημόσιου δικτύου. Εκτός από υψηλό QoS, το δίκτυο θα παράσχει στα κινητά τερματικά τις διοικητικές υπηρεσίες ασφάλειας κατά τη μετακίνηση. Σε ένα υποδειγματικό σενάριο προσωπικής εφαρμογής, μια χαμηλού κόστους και εύκαμπτη δικτύωση υποστηρίζεται για τη διασύνδεση των ασύρματων ψηφιακών καταναλωτικών συσκευών. Για να εκπληρώσει αυτούς τους στόχους, το HiperLAN Type 2 στηρίζεται στην κυψελοειδή τοπολογία δικτύωσης. Υποστηρίζει δύο βασικούς τρόπους λειτουργίας, τον συγκεντρωτικό και τον άμεσο. Ο συγκεντρωτικός τρόπος χρησιμοποιείται στην κυψελοειδή τοπολογία δικτύωσης όπου κάθε σταθμός ελέγχεται από ένα σημείο πρόσβασης, που καλύπτει μια ορισμένη γεωγραφική περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο, ένα κινητό τερματικό επικοινωνεί με άλλα κινητά τερματικά ή με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός σημείου πρόσβασης. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιείται κυρίως στις επιχειρησιακές εφαρμογές, και στο εσωτερικό της επιχείρησης αλλά και εξωτερικά, όπου μια περιοχή πολύ μεγαλύτερη από ένα σταθμό πρέπει να καλυφθεί. Ο άμεσος τρόπος χρησιμοποιείται στην ειδική τοπολογία δικτύωσης, κυρίως στα χαρακτηριστικά ιδιωτικά περιβάλλοντα, όπου ένας σταθμός καλύπτει ολόκληρη την εξυπηρετούμενη περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, τα κινητά τερματικά σε ένα προσωπικό δίκτυο μίας κυψέλης μπορούν άμεσα να ανταλλάξουν δεδομένα [7].

## Wind-flex

Όλες οι πρόσφατες εξελίξεις στην ασύρματη τεχνολογία, παρόλο που έχουν ανακτηθεί από διαφορετικές απαιτήσεις τεχνολογίας και απαιτήσεις της αγοράς (π.χ. WLAN για φορητή συνδεσιμότητα σε επιχειρήσεις πληροφορικής γραφείου, WPAN για αντικατάσταση καλωδίων και διασύνδεση προσωπικού σφαιρικού κλπ.), χαρακτηρίζονται από μια κοινή αναζήτηση για υψηλότερη πυκνότητα χωρητικότητας και ταχύτητας σύνδεσης, αφενός, και μεγαλύτερης αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας αφετέρου, υπό την παρουσία διαφορετικών συνθηκών καναλιών και απαιτήσεις συστήματος σε υψηλό QoS. Η ευρωπαϊκή κοινοπραξία WINDFLEX ξεκίνησε το 2000 με στόχο την εξειδίκευση, την ανάπτυξη και την επίδειξη μιας ασύρματης αρχιτεκτονικής που ικανοποιεί από κοινού τις παραπάνω απαιτήσεις σε ένα σενάριο της (semi) ad hoc δικτύωσης μεταξύ σταθερών και φορητών συσκευών σε περιοχή μικρής εμβέλειας.



Εικόνα 6: WINDFLEX δίκτυο (πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/High-Bit-Rate-Adaptive-WIND-FLEX-Modem-Architecture-Saarinen-Coppola/7f79bcdf5b7eee21841c5f5bf5c96760b4de7e01/figure/0>)

Όπως υποστηρίζουν οι Saarinen et. Al [13], η αρχιτεκτονική διασύνδεσης ραδιοσυχνοτήτων έχει σχεδιαστεί με τρόπο που αναπτύσσει μια κοινή στρατηγική προσαρμογής σε χαμηλότερα επίπεδα, με στόχο τη δυναμική βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος σε σενάρια που συνεπάγονται χρονικά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις υπηρεσίας και συνθήκες αιχμής στο δίκτυο. Για τη διατήρηση τέτοιων χαρακτηριστικών, έχουν σχεδιαστεί όλα τα βασικά σχήματα διασύνδεσης (δηλ. διαμόρφωση, κωδικοποίηση, σχήμα πρόσβασης κλπ.), έτσι ώστε να επιτρέπουν διαφόρων μεγεθών και εύρους παραλλαγές των παραμέτρων τους, που δημιουργούνται από προσαρμοστικούς αλγορίθμους και αναδιαμορφώσιμα υποσυστήματα. Παρά την εγγενή μακροπρόθεσμη φύση της, μπορεί να προβλεφθεί μια βραχυπρόθεσμη επιχειρηματική ευκαιρία για την τεχνολογία WINDFLEX,

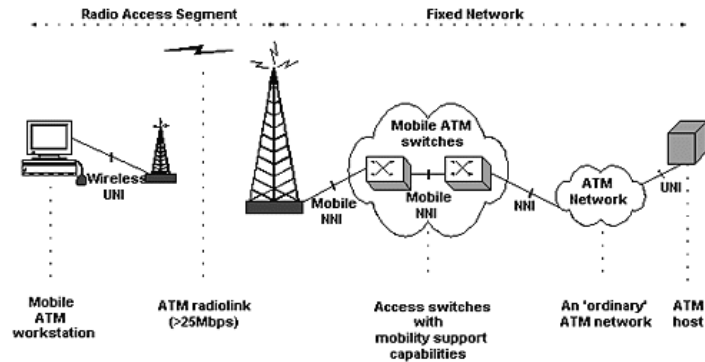
αξιοποιώντας τη συνέργεια με τις υπάρχουσες τεχνολογίες WLAN, συγκεκριμένα την υιοθέτηση του WIND-FLEX ως ασύρματης ραχοκοκαλιάς για τυπικά ασύρματα δίκτυα LAN (π.χ. IEEE 802.11a/c). Αυτά τα συνδυασμένα δίκτυα WINDFLEX/WLAN θα επιτρέψουν μια πραγματική “πλήρη” κάλυψη ασύρματου δικτύου εσωτερικών χώρων, παρέχοντας μια ευκολότερη και ταχύτερη ανάπτυξη, ευελιξία (διανομή δυναμικότητας ανάλογα με τις ανάγκες) στη λύση σχεδιασμού και ρύθμισης, σε σύγκριση πάντα με το τρέχον υβριδικό Ethernet/WLAN. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του WINDFLEX είναι η διεξοδική εξερεύνηση και εκμετάλλευση των σημαντικών εννοιών της ευελιξίας, της προσαρμοστικότητας και της ανασυγκρότησης (FAR) και, ειδικότερα, ο τρόπος με τον οποίο θα μπορούσαν να εκδηλωθούν σε αυτό το καινοτόμο σχεδιασμό διασύνδεσης. Τα δύο κύρια αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας είναι: (α) ο ορισμός, η αποσαφήνιση και η επεξεργασία αυτών των εννοιών στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής, και (β) επακόλουθος ακριβής προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο μπορούν να υιοθετηθούν τα WINDFLEX μόντεμ. Κάθε μία από αυτές τις έννοιες έχει εξεταστεί προηγουμένως στον ευρύ τομέα των ασύρματων (κυρίως ράδιο)συστημάτων και δικτύων, περιστασιακά με αλληλεπικαλυπτόμενες έννοιες και οράματα.

Ένα από τα βασικά μέρη του WINDFLEX επικεντρώνεται στην έρευνα καινοτόμων αλγορίθμων του τμήματος της βάσης του συστήματος. Ο στόχος είναι να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί μια αρχιτεκτονική βασικών ζωνών, η οποία να επιτρέπει ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας peer-to-peer σε εσωτερικό χώρο με αργή κινητικότητα των χρηστών και χαρακτηρίζεται από FAR ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος διάδοσης και την προσφερόμενη ποιότητα. Οι μέθοδοι διαμόρφωσης και ποικιλομορφίας διερευνήθηκαν όσον αφορά την απόδοση και την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων του συστήματος. Μια νέα προσέγγιση για το πρόβλημα φόρτισης δυαδικών ψηφίων και ισχύος στα συστήματα πολλαπλών μεταφορέων αναφέρθηκε όταν μελετήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι από τους παραδοσιακούς αλγόριθμους φόρτωσης. Σημαντική ερευνητική προσπάθεια βασίστηκε σε αλγόριθμους εξισορρόπησης προσαρμογέα πολλαπλών μεταφορέων. Κατά συνέπεια, σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες επωφελούνται από το DFE και από το λογισμικό soft-input soft-output. Έχει αναπτυχθεί ένα νέο διακριτό μοντέλο που διερευνά την κοινή μορφή του παρατηρήσιμου σήματος στην έξοδο ενός δέκτη OFDM παρουσία διαφόρων δυσλειτουργιών (εξάπλωση καθυστέρησης, θόρυβος

φάσης, αποσυγχρονισμός, χρονικής καθυστέρησης κ.α.). Έχουν διερευνηθεί η απόδοση και η πολυπλοκότητα των παράλληλων μειωμένων συνελκτικών κωδίκων (PCCC), συμπεριλαμβανομένων των κωδίκων Turbo, και των κλασσικών σχημάτων κωδικοποίησης (συνελκτικοί κώδικες, κωδικοί μπλοκ και συναφείς κώδικες). Έτσι, μελετήθηκε ένα μόντεμ OFDM χρησιμοποιώντας κώδικες Turbo έναντι SCCC. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα OFDM με κωδικό Turbo με όλες τις σχετικές παραμέτρους. Η απόδοση BER της κωδικοποίησης Turbo με διαφορετικές παραμέτρους, δηλαδή πολυώνυμο κώδικα, ρυθμό κώδικα, μήκος μπλοκ πληροφοριών, σχήμα διαμόρφωσης, τύπος αποκωδικοποιητή αξιολογήθηκε. Ο συγχρονισμός είναι ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να μελετηθεί σε ένα δέκτη OFDM. Έχουν διερευνηθεί οι αλγόριθμοι εκτίμησης καρέ, χρονισμού και φέρουσας συχνότητας. Η αμφίδρομη μοντελοποίηση των πιο κρίσιμων αλγορίθμων του συστήματος WINDFLEX θεωρείται ως ένα από τα σημαντικότερα καθήκοντα προκειμένου να καταστεί δυνατή η έγκυρη εκτίμηση πολυπλοκότητας της εφαρμογής [13].

## ATM

Ένας ακόμη τύπος εκπομπής ο οποίος θα μπορούσε να θεωρηθεί αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου είναι ο ATM.



Εικόνα 7: Δίκτυο με αρχιτεκτονική ATM (πηγή:

[http://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/sam\\_vacca2\\_wireless/elementLinks/vacca2\\_fig1.gif](http://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/sam_vacca2_wireless/elementLinks/vacca2_fig1.gif))

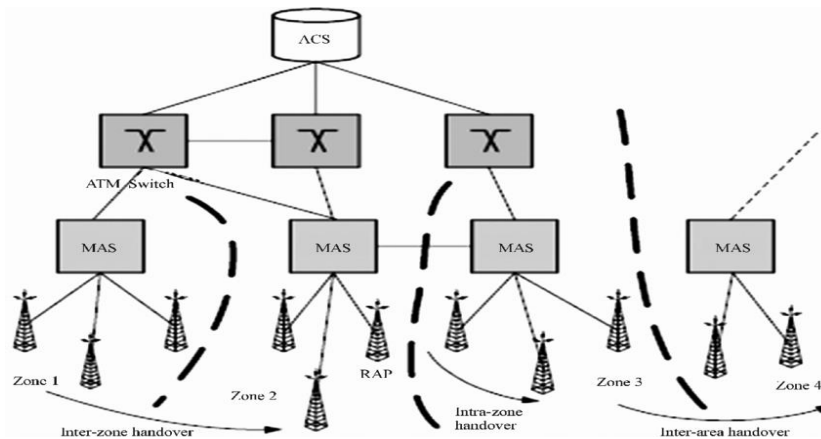
Διάφορες εφαρμογές δικτύου απαιτούν όλο και μεγαλύτερο εύρος ζώνης και δημιουργούν ένα ετερογενές μίγμα κυκλοφορίας δικτύου. Τα υφιστάμενα δίκτυα δεν μπορούν να παρέχουν τις εγκαταστάσεις μεταφοράς για να υποστηρίξουν αποτελεσματικά μια ποικιλία κυκλοφορίας με διάφορες απαιτήσεις παροχής υπηρεσιών. Το ATM σχεδιάστηκε για να είναι σε θέση να υποστηρίξει ετερογενή κυκλοφορία (π.χ. φωνή, βίντεο, δεδομένα) σε μία τεχνολογία μεταφοράς και αλλαγής υφασμάτων. Υποσχέθηκε να προσφέρει μεγαλύτερη ενοποίηση των δυνατοτήτων και των υπηρεσιών, πιο ευέλικτη πρόσβαση στο δίκτυο και πιο αποτελεσματική και οικονομική υπηρεσία.

Το ATM είναι μια τεχνολογία προσανατολισμένη στις συνδέσεις, με την έννοια ότι προτού δύο συστήματα στο δίκτυο μπορούν να επικοινωνήσουν, θα πρέπει να ενημερώσουν όλους τους ενδιάμεσους διακόπτες σχετικά με τις ανάγκες εξυπηρέτησης και τις παραμέτρους της κυκλοφορίας. Αυτό είναι παρόμοιο με τα τηλεφωνικά δίκτυα στα οποία έχει οριστεί μια σταθερή διαδρομή από το καλούντα στο μέρος που την λαμβάνει.

Στα δίκτυα ATM, κάθε σύνδεση ονομάζεται εικονικό κύκλωμα ή εικονικό κανάλι (VC), διότι επιτρέπει επίσης την κοινή χρήση της χωρητικότητας του κάθε συνδέσμου με συνδέσεις που χρησιμοποιούν αυτή τη σύνδεση βάσει ζήτησης και διαθεσιμότητας και όχι με σταθερές κατανομές και δρομολογήσεις. Οι συνδέσεις

επιτρέπουν στο δίκτυο να εγγυάται την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), περιορίζοντας τον αριθμό των VC. Συνήθως, ο χρήστης δηλώνει τις βασικές απαιτήσεις υπηρεσίας τη στιγμή της σύνδεσης, δηλώνει τις παραμέτρους της κυκλοφορίας και μπορεί να συμφωνήσει να ελέγχει δυναμικά αυτές τις παραμέτρους όπως απαιτείται από το δίκτυο.

Το ATM προοριζόταν να παρέχει ένα απλό ενιαίο πρότυπο δικτύωσης, το οποίο θα μπορούσε να υποστηρίξει συγχρονικές και ασύγχρονες τεχνολογίες και υπηρεσίες, προσφέροντας ταυτόχρονα πολλαπλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών για τη μεταφορά πακέτων. Το ATM προσπάθησε να επιλύσει τη σύγκρουση μεταξύ δικτύων μεταγωγής κυκλωμάτων και δικτύων μεταγωγής πακέτων, τόσο στις ροές bit όσο και στις ροές πακέτων. Πολλές εταιρίες έχουν υλοποιήσει δίκτυα ATM ευρείας περιοχής και πολλές εφαρμογές ADSL χρησιμοποιούν ATM. Ωστόσο, η ATM απέτυχε να αποκτήσει ευρεία χρήση ως τεχνολογία/αρχιτεκτονική και η μεγάλη πολυπλοκότητά της έχει αναχαιτίσει την πλήρη ανάπτυξή της ως ενιαία τεχνολογία δικτύωσης με τον τρόπο που οι εφευρέτες της είχαν αρχικά επιδιώξει.



Εικόνα 8: Δίκτυο με αρχιτεκτονική ATM χωρισμένο σε ζώνες (πηγή:

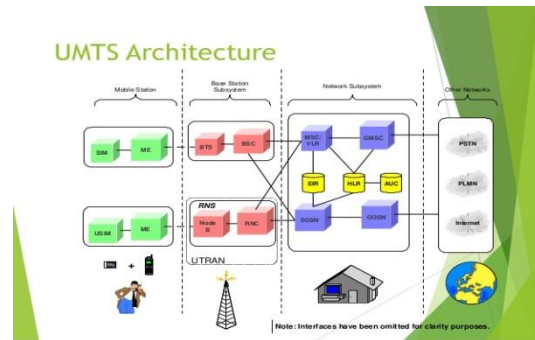
[https://file.scirp.org/pdf/CN\\_2014111811214445.pdf](https://file.scirp.org/pdf/CN_2014111811214445.pdf))

Προκειμένου τα δίκτυα ATM να παρέχουν κατ' απαίτηση εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας, ενώ μεγιστοποιούν τη χρήση των διαθέσιμων πόρων δικτύου, απαιτούνται αποτελεσματικοί μηχανισμοί διαχείρισης της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Σχεδόν κάθε πτυχή της λειτουργίας του δικτύου ATM, από αιτήματα σηματοδότησης και δρομολόγησης σε κατανομή πόρων δικτύου και έλεγχο, περιλαμβάνει κάποιους μηχανισμούς διαχείρισης της κυκλοφορίας για αυτόν τον σκοπό.



## UMTS

Η UMTS είναι και αυτή μια αρχιτεκτονική ασυρμάτων δικτύων πιο εξελιγμένη από τις δύο προηγούμενες, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για τη μεταφορά δεδομένων αλλά και φωνής.



Εικόνα 9: UMTS αρχιτεκτονική δικτύου (πηγή: <https://image.slidesharecdn.com/journeyofevolutionofumts-160915145828/95/journey-of-evolution-of-umts-and-cdma-34-638.jpg?cb=1473951521>)

Στην technopedia αναλύεται ως ο όρος που περιλαμβάνει τις τεχνολογίες ραδιοσυχνότητας τρίτης γενιάς (3G) που αναπτύχθηκαν από το 3GPP (Σχέδιο Σύμπραξης 3<sup>ης</sup> Γενιάς), ένα έργο συνεργασίας που σχεδιάστηκε για να παράγει Τεχνικές Προδιαγραφές και Τεχνικές Αναφορές για ένα κινητό σύστημα 3G βασισμένο σε εξελιγμένα δίκτυα με πυρήνα το GSM και τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης που συνδέονται με αυτές. Η πιο κοινή παραλλαγή του UMTS χρησιμοποιεί τη διεπαφή αέρα και ονομάζεται W-CDMA. Ως αποτέλεσμα, οι δύο όροι συνήθως ανταλλάσσονται και χρησιμοποιούνται αδιακρίτως (techopedia,2018).

Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών αντιπροσωπεύει ένα πλήρες σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι περιλαμβάνει κινητά τηλέφωνα (και άλλο κινητό εξοπλισμό), την υποδομή ραδιοσυχνότητας που απαιτείται για την παροχή κλήσεων και δεδομένων, τον κεντρικό εξοπλισμό δικτύου για τη μεταφορά κλήσεων και δεδομένων χρηστών, τα συστήματα χρέωσης και τα συστήματα ασφαλείας, μεταξύ άλλων.

Επειδή το UMTS έχει βαθιές ρίζες στο GSM, καλείται μερικές φορές 3GSM. Ωστόσο, όπως υπονοεί το όνομα W-CDMA, χρησιμοποιεί επίσης εκτεταμένα την τεχνολογία CDMA. Τα αναβαθμισμένα δίκτυα UMTS σε όλο τον πλανήτη είναι σε θέση να παρέχουν γρήγορες ταχύτητες λήψης έως και 14 Mbps μέσω του

πρωτοκόλλου HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access). Η ταχύτητα της άνω ζεύξης φτάνει επίσης τα 5.7 Mbps, και επιτυγχάνεται μέσω του πρωτοκόλλου HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access). Τόσο η HSDPA όσο και η HSUPA αποτελούν μέρος μιας μεγαλύτερης οικογένειας πρωτοκόλλων, γνωστής ως High Access Packet Access (HSPA).

Επειδή το UMTS βασίζεται σε δίκτυα GSM, απολαμβάνει τις ίδιες παγκόσμιες δυνατότητες περιαγωγής. Πρακτικά, όλα τα τηλέφωνα UMTS μπορούν να μεταβούν στη λειτουργία GSM. Αυτό σημαίνει ότι εάν χρησιμοποιείται μια συσκευή UMTS και τυχαίνει να απομακρυνθεί από ένα δίκτυο UMTS και είναι κοντά σε ένα δίκτυο GSM, μπορείτε ακόμα να επωφεληθείτε από τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το ίδιο τηλέφωνο (με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν φυσικά οι απαραίτητες συμφωνίες περιαγωγής με τον πάροχο).

Όπως και με τα παλαιά GSM, τα κινητά τηλέφωνα UMTS έρχονται επίσης με μια αναβαθμισμένη κάρτα SIM (Subscriber Identity Module), γνωστή ως USIM (Universal SIM). Τα τηλέφωνα UMTS μπορούν να λειτουργούν είτε με παλαιού τύπου κάρτες SIM είτε με USIM.

Με την ασύρματη βιομηχανία να κινείται από 3G σε 4G, το UMTS χρησιμεύει ως βάση για το νέο σύνολο τεχνολογιών ραδιοσυχνοτήτων 3GPP, γνωστό ως Long Term Evolution (LTE). Τα δίκτυα που αναβαθμίζονται από το GSM στο LTE μπορούν να επαναχρησιμοποιήσουν ορισμένα στοιχεία δικτύου, όπως: το Μητρώο Αρχικής Τοποθέτησης, το Μητρώο Τοποθεσίας Επισκεπτών, το Κέντρο Μεταγωγής Κινητών Τηλεφώνων και το Κέντρο Επαλήθευσης. Ωστόσο, απαιτείται νέος σταθμός βάσης ελεγκτή και σταθμός βάσης πομποδέκτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δίκτυα 3G και 2G θα λειτουργούν δίπλα-δίπλα στις ίδιες εγκαταστάσεις και στους ήδη εγκατεστημένους σταθμούς βάσης.

## Κόστος και εφαρμογή ασυρμάτων δικτύων

Σχετικά με το κόστος εφαρμογής ενός ασύρματου δικτύου, θα δούμε μερικούς από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αλλά και τη λειτουργία του. Στοιχεία που προέκυψαν από έρευνες που έχουν γίνει σε διάφορες εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων από την εταιρία ASD-USA το 2018.

### Απαιτήσεις σε καλωδίωση μεταξύ των σημείων πρόσβασης:

Η ποσότητα των καλωδίων που απαιτούνται για κάθε σημείο πρόσβασης βασίζεται στη διακίνηση δεδομένων, στον πλεονασμό για λόγους σταθερότητας αλλά και στη συχνή χρήση μιας επιπλέον θύρας για την κονσόλα ελέγχου κάθε σημείου. Έτσι, η ποσότητα των καλωδίων σε κάθε σημείο πρόσβασης αλλά και ο τύπος καλωδίου μπορεί να επηρεάσει το κόστος.

### Κάλυψη δικτύου:

Η ανάγκη για κάλυψη σε όλους τους χώρους της εγκατάστασης ή μόνο συγκεκριμένες περιοχές επηρεάζει το κόστος σημαντικά. Ορισμένες εγκαταστάσεις απαιτούν μόνο κοινόχρηστους χώρους ενώ άλλες αναζητούν συνολική κάλυψη. Ακόμη, σύμφωνα και με μία έρευνα της εταιρίας Vilicom που έγινε το 2009, το κόστος ανάπτυξης ενός δικτύου UMTS στα 1800 MHz είναι το 88.5% του κόστους της ανάπτυξης ενός δικτύου UMTS στα 2100 MHz και το κόστος ανάπτυξης ενός δικτύου UMTS στα 900 MHz είναι το 65.6% του κόστους της ανάπτυξης ενός UMTS δικτύου στα 2100 MHz. Έτσι, παρατηρούμε ότι το δίκτυο UMTS στα 2100 MHz είναι το πιο ακριβό και το δίκτυο UMTS στα 900 MHz το πιο φθινό. Άρα, εκτός του επιπλέον εξοπλισμού, το κόστος σχετίζεται και με τη συχνότητα που θα χρησιμοποιηθεί. Βέβαια, όπως θα αναλύσουμε και στα επόμενα κεφάλαια, όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία, οι αρχιτεκτονικές και ο τρόπος που στήνονται τα ασύρματα δίκτυα αλλάζει και βελτιώνεται. Έτσι, έχουμε και σημαντική μείωση του κόστους αλλά και αύξηση των δυνατοτήτων και των υπηρεσιών που παρέχουν τα δίκτυα.

### Πυκνότητα:

Στο κόστος συμβάλει σοβαρά και το πόσα άτομα θα έχουν πρόσβαση στο ασύρματο δίκτυο σε μια δεδομένη περιοχή. Για παράδειγμα, σε αμφιθέατρο, σε αίθουσα εκδηλώσεων, σε εμπορικά κέντρα, κ.α. θα χρειαστεί να υπάρχει υποδομή για πολλούς χρήστες.

### Εφαρμογή:

Οι εφαρμογές που επιτρέπονται και καταναλώνουν εύρος ζώνης στο δίκτυο επηρεάζουν το κόστος. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση βίντεο, το περιεχόμενο σε 4K, η μετάδοση μουσικής ή και η πλοήγηση καταναλώνουν μεγάλο εύρος ζώνης και άρα απαιτούν πόρους οι οποίοι κοστίζουν.

### Ασφάλεια:

Εκτός από τα κοινά μέτρα ασφαλείας, όπως η κρυπτογράφηση, μπορεί να αναπτυχτεί ακτίνα προστασίας, LDAP, επαλήθευση σε 2 βήματα ή άλλα μέτρα ασφαλείας που βασίζονται σε φυσικό εξοπλισμό ή στο λογισμικό και έτσι οι ανάγκες ασφαλείας θα επηρεάσουν το κόστος.

### Χρήση ή μη φυσικού ελεγκτή WLC

Μερικοί πελάτες προτιμούν να έχουν έναν φυσικό ελεγκτή σε κάθε τοποθεσία, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν λύσεις όπου ο ελεγκτής είναι σε cloud περιβάλλον, όπως είδαμε προηγουμένως. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος του ασύρματου δικτύου θα επηρεάσει ασφαλώς το κόστος.

### Εγκατάσταση:

Η φυσική εγκατάσταση των σημείων πρόσβασης είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον προϋπολογισμό. Παράγοντες όπως το ύψος της οροφής ή εάν το σημείο πρόσβασης θα εγκατασταθεί σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς χώρους θα επηρεάσει τη συνολική τιμή του συστήματος.

#### Άδειες εγκατάστασης – Λογισμικά:

Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν δικαιώματα διαχείρισης ή άδειες κατάλληλες για το cloud, που κυμαίνονται σε διάφορες τιμές και ενοίκια. Οι δαπάνες αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν εξετάζεται το συνολικό κόστος του δικτύου.

#### Γεωγραφική θέση:

Σε σχέση με το που βρίσκεται το δίκτυο, ορισμένα σημεία εγκατάστασης θα είναι αναμενόμενα πιο ακριβά από άλλα. Ορισμένες αγροτικές περιοχές μπορεί να απαιτούν επιπλέον εργασία και αγορά εξοπλισμού από άλλες πιο αστικές περιοχές, λόγω της διαθεσιμότητας των πόρων του τόπου που θα μπορούσαν να αυξήσουν το κόστος.

#### Μέγεθος και τύπος περιβάλλοντος:

Το είδος του περιβάλλοντος θα επηρεάσει την τιμή. Το γραφείο, το κτήριο, η αυλή, το οικοδομικό τετράγωνο, η πόλη, το εσωτερικό ή το εξωτερικό θα μπορούσαν να επηρεάσουν το συνολικό κόστος, λόγω απαιτήσεων εξοπλισμού που διαφέρουν κατά περίπτωση.

#### Υποδομή:

Οι διαδρομές των καλωδίων μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στο συνολικό κόστος του συστήματος. Οι δαπάνες για το μέγεθος των οπών και η πλάκα κοπής για αγωγούς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία κατάρτισης του προϋπολογισμού.

#### Ώρες εγκατάστασης – Πληρωμή εργατικού προσωπικού:

Οι κανονικές ώρες εργασίας εντός της εβδομάδας είναι λιγότερο δαπανηρές σε σχέση με τις υπερωρίες ή την εργασία τα Σαββατοκύριακα.

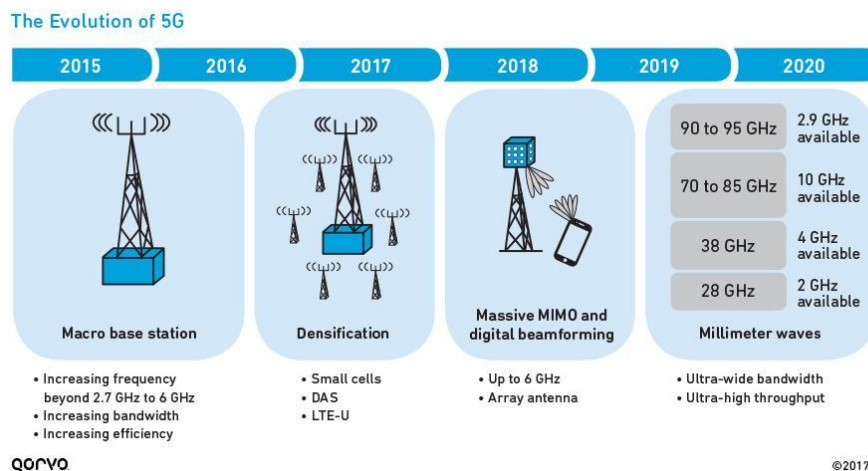
#### Νέα κατασκευή ή ανακαίνιση:

Η νέα κατασκευή είναι συνήθως λιγότερο δαπανηρή από την ανακαίνιση ενός ήδη υπάρχοντος δικτύου.

## Κεφάλαιο 2

### Εύρεση αρχιτεκτονικών νέας γενιάς (next generation) και περιγραφή τους.

Όπως αναφέραμε, με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση των αναγκών για ασύρματες διασυνδέσεις αναπτύσσονται αρχιτεκτονικές νέας γενιάς, για να μπορούν τα ασύρματα δίκτυα να καλύπτουν τους όλο και περισσότερους χρήστες αλλά και την ανάγκη μεγαλύτερης ευρυζωνικότητας, κάτι που δεν είναι δυνατό να γίνει με τις παρωχημένες αρχιτεκτονικές, όπως αυτές που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω, θα αναλύσουμε τις πιο διαδεδομένες αρχιτεκτονικές νέας γενιάς που αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, με τις ιδιότητες της καθεμίας, ώστε να είναι δυνατό στο επόμενο κεφάλαιο να μπορέσουμε να κάνουμε της ανάλυση SWOT σε κάθε μια από αυτές και να καταλήξουμε σε αυτή με το χαμηλότερο κόστος εφαρμογής.



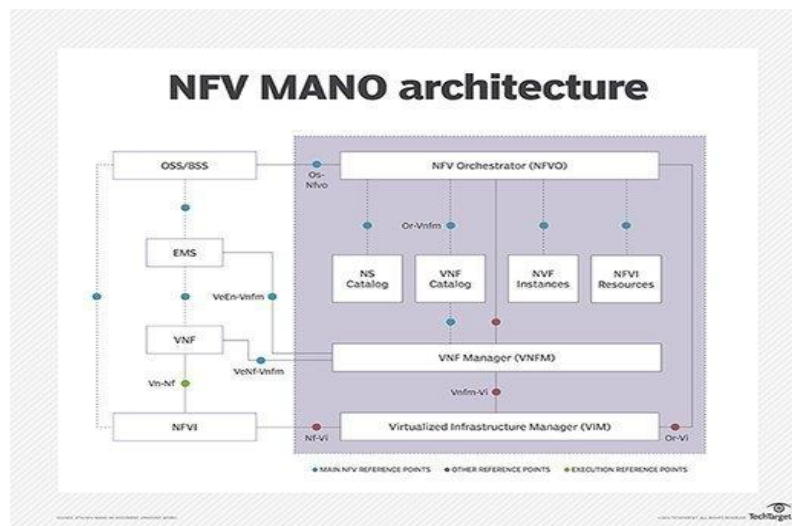
Εικόνα 2.10: 5G δίκτυα νέας γενιάς (πηγή: [https://www.qorvo.com/-/media/images/qorvopublic/blog/2017/small-cells/evolution-of-5g-infographic\\_960px.png?la=en&hash=0F4C3D60DEAC790291FF4932364608DA4C5AB951](https://www.qorvo.com/-/media/images/qorvopublic/blog/2017/small-cells/evolution-of-5g-infographic_960px.png?la=en&hash=0F4C3D60DEAC790291FF4932364608DA4C5AB951))

## Network slicing

Σύμφωνα με τους Masahiko et. Al [21], η συνεχής αύξηση της κίνησης δεδομένων απαιτεί την εισαγωγή μιας αποδοτικής και κλιμακούμενης πλατφόρμας μεταφοράς, για συνδέσεις ταχύτητας 100 Gbps και πάνω, στο μελλοντικό οπτικό δίκτυο. Μια καινοτόμα αρχιτεκτονική δικτύου οπτικών μεταφορών η οποία εφαρμόζεται, είναι αυτή με την ονομασία SLICE, η οποία είναι αποδοτική από άποψη ραδιοφάσματος και εύκολα κλιμακούμενη. Η αρχιτεκτονική SLICE επιτρέπει τη συστέγαση δεδομένων με μήκος κύματος στο υπέρυθρο φάσμα, υπερυψωμένου μήκους κύματος και πολυπλεξίας με τρόπο εξαιρετικά αποδοτικό από άποψη ραδιοφάσματος, παρέχοντας έτσι υπηρεσίες κλασματικού εύρους ζώνης. Η δυναμική διακύμανση του εύρους ζώνης των οπτικών διαδρομών παρέχει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες, που προσφέρουν οικονομικά αποδοτικές και εξαιρετικά διαθέσιμες υπηρεσίες συνδεσιμότητας μέσω του χρονικά εξαρτώμενου επιμερισμού του εύρους ζώνης, της ενεργειακής αποδοτικότητας του δικτύου και της υψηλής επιβίωσης αποκατάστασης με συμπιεσμένο εύρος ζώνης. Ως τεχνολογίες που επιτρέπουν τη φιλοσοφία SLICE, ορίζονται ένας οπτικός ορθογώνιος αναμεταδότης ευέλικτου ρυθμού μετάδοσης που βασίζεται σε πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας και μια διασύνδεση μήκους κύματος μεταβλητού εύρους ζώνης [21].

Το SLICE είναι μια σημαντική τεχνολογία που επηρεάζει τον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας νέων λύσεων δικτύωσης και στα ασύρματα δίκτυα. Επί του παρόντος, υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις για το network slicing (τεμαχισμό δικτύου), αλλά μέχρι στιγμής δεν υπάρχει συστηματική προσέγγιση που να περιλαμβάνει όλες τις πτυχές της τεχνολογίας. Το NFV MANO είναι ένας τύπος τεμαχισμού δικτύου για οργάνωση τομέων καθώς και υποστήριξης τεμαχισμού πολλαπλών τομέων δικτύου. Ο τεμαχισμός στο δίκτυο επιτρέπει τη δημιουργία πολλών, πλήρως ανεπτυγμένων εικονικών δικτύων σε μια κοινή υλική υποδομή, διατηρώντας παράλληλα την απομόνωση μεταξύ των δικτύων αυτών. Ένας εικονικός τομέας δικτύου μπορεί να ενσωματωθεί στις εφαρμογές. Ο βασικός ενεργοποιητής του δικτύου είναι η τεχνολογία ETSI Network Functions Virtualization (NFV). Ο τεμαχισμός δικτύου εισήχθη από το PlanetLab το 2002 και πρόσφατα επαναπροσδιορίστηκε από το NGMN. Παρέχει τρία βασικά του πλεονεκτήματα είναι: (i) η δυναμική ανάπτυξη λύσεων δικτύωσης σε σύντομο χρονικό διάστημα στην αγορά και με χαμηλό κόστος,

(ii) η ικανότητα δημιουργίας δικτύων που συνδέονται στενά με τις υπηρεσίες τους και (iii) η ανάθεση σχεδόν πλήρους διαχείρισης των τεμαχίων του δικτύου σε έναν μισθωτή φέτας. Το NFV δεν έχει ιδιαίτερη υποστήριξη για τον τεμαχισμό του δικτύου, αλλά αυτή είναι η βασική τεχνολογία που χρησιμοποιείται συνήθως στις περισσότερες λύσεις δικτύου. Έχει προταθεί να προστεθεί στην αρχιτεκτονική NFV μια συγκεκριμένη οντότητα (Slice Controller), ως μέρος του τομέα OSS/BSS. Αυτή, επικοινωνεί με το MANO μέσω του σημείου αναφοράς OS-MA-NFVO, πέρα από το οποίο όλα βασίζονται σε βασικές έννοιες και διαδικασίες NFV. Η ETSI NFV στην τρίτη έκδοσή της σχεδιάζει να αντιμετωπίσει κάποιες επιπλέον απαιτήσεις δικτύου, όπως είναι η επεκτασιμότητα και η πολυεπίπεδη μίσθωση. Στο ερευνητικό πρόγραμμα PPP 5G, πολλά έργα που εντάσσονται σ' αυτό εστιάζουν στη χρήση της διχοτόμησης δικτύου (network slicing), χρησιμοποιούν συνήθως τεχνολογίες NFV και SDN. Το 5G PPP project, 5G NORMA II, προτείνει μια αρχιτεκτονική κινητής τηλεφωνίας για το περιβάλλον πολλαπλών μισθωτών. Ο NORMA υποθέτει ότι ορισμένες λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου πρέπει να είναι κοινές για πολλαπλές φέτες. Το έργο 5GEx επικεντρώνεται μόνο στα δίκτυα μεταφοράς. Στόχος είναι ο πολλαπλασιασμός πολλών τομέων με την επέκταση του πλαισίου ETSI NFV MANO στην οριζόντια ενορχήστρωση και διαχείριση.



Εικόνα 2.11: NFV MANO (πηγή: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/NFV-MANO-network-functions-virtualization-management-and-orchestration>)

#### Απαιτήσεις και προδιαγραφές σχεδιασμού:

- **Απομόνωση τομέα:** Η απομόνωση των τομέων δικτύου (εικονικά δίκτυα) μπορεί να είναι πλήρης ή μερική, λογική ή φυσική. Οι περιορισμένες δυνατότητες



απομόνωσης ορισμένων λύσεων προκαλούν τις χαλαρές απαιτήσεις απομόνωσης. Η απομόνωση αφορά κυρίως τους πόρους των τομέων.

- **Δικαιώματα δημιουργίας τομέων:** Ο διαχειριστής οργάνωσης, τα τρίτα μέρη ή οι τελικοί χρήστες θα πρέπει να μπορούν να δημιουργήσουν ένα τομέα.
- **Υποστήριξη για τεμαχισμό ανά πλάνο χρήσης:** Σε ορισμένες περιπτώσεις, αποτελεί έναν περιορισμό της εφαρμογής, ενώ η διατήρηση κάποιων λειτουργιών παραμένει κοινή για όλα τα πλάνα χρήσης (π.χ. έλεγχος ταυτότητας, παράδοση), είναι εύλογη και μ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να κάνει άμεσα πλάνα χρήσης, ταχύτερα στην παροχή.
- **Χαρτογράφηση υπηρεσιών σε τομείς:** Οι τομείς πρέπει να υποστηρίζουν ενιαίες ή πολλαπλές υπηρεσίες. Στην τελευταία περίπτωση, η διαχείριση της διάρκειας ζωής των υπηρεσιών θα πρέπει να διαχωριστεί από τη διαχείριση της διάρκειας ζωής.
- **Υπο-τομείς δικτύου:** Ένας τομέας μπορεί να δημιουργηθεί ως ένας συνδυασμός υφιστάμενων ή κατά παραγγελία δημιουργημένων υπό-τομέων δικτύου.
- **Πολλαπλασιασμός τομέα:** Πρέπει να διασχίζουν σύνορα τεχνολογικών ή διοικητικών κανόνων. Για το σκοπό αυτό, ο κάθε τομέας πρέπει να αποτελείται από υπό-τομείς.
- **Χρόνος εφοδιασμού σε κομμάτια δικτύου:** Ορισμένοι τομείς που έχουν δημιουργηθεί κατά παραγγελία, ενδέχεται να απαιτούν σύντομο χρόνο εφοδιασμού.
- **Συμβατότητα 3GPP:** Συμμορφώνεται με τις προσεγγίσεις τομέα τύπου 3GPP (μηχανισμοί επιλογής χωριστών τεμαχίων, μη διχοτομημένο RAN, κοινές λειτουργίες του πεδίου ελέγχου του πυρήνα 5G).
- **Συμπερίληψη λύσεων Legacy:** Τα παλαιά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα συνυπάρχουν με τα δίκτυα 5G.
- **Ομαδοποίηση τομέων:** Μία ομάδα τομέων προσανατολισμένων ως προς την παρεχόμενη υπηρεσία μπορεί π.χ. να χρησιμοποιηθεί από το MVNO. Η ομαδοποίηση θα πρέπει να επηρεάζει τα δικαιώματα πρόσβασης σε τομείς (χωρίς πρόσθετο έλεγχο ταυτότητας κ.λπ.).
- **Δικαιώματα διαχείρισης τομέα:** Ο χειριστής/ιδιοκτήτης τομέων θα πρέπει να διαθέτει δυνατότητες διαχείρισης που περιλαμβάνουν, τη διαχείριση βάσει

πολιτικής, τη διαμόρφωση, τις λειτουργίες ασφαλείας, τη λογιστική παρακολούθηση και την παρακολούθηση επιδόσεων του εκάστοτε τομέα.

- **Διαβάθμιση της διαχείρισης:** Καθώς ο αριθμός των πιθανών τομέων μπορεί να είναι μεγάλος, οι διαδικασίες διαχείρισης πρέπει να αυτοματοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο και η διαχείριση να είναι κλιμακωτή.

Έχει αποφασιστεί να ομαδοποιηθούν οι κοινώς διαμοιραζόμενες λειτουργίες σε ένα υπό-τομέα μεμονωμένου τύπου, που ονομάζεται Common Sub-Slice (CSS) και να ομαδοποιηθούν οι λειτουργίες που είναι αφιερωμένες σε ένα συγκεκριμένο στόχο ως DSS (Dedicated Sub-Slice (s)). Τα DSS μπορούν να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες CSS μέσω των API CSS. Και τα δύο υποστρώματα «διασυνδεδεμένα κάθετα», αποτελούν μια ενιαία αποδιδόμενη ομάδα λειτουργιών. Αναμένεται ότι σε ένα μόνο τομέα θα υπάρχει ένα ενιαίο CSS και πολλαπλά DSS.

Ένα παράδειγμα τομέα που αποτελείται από CSS και ένα μόνο DSS ακολουθεί. Το CSS είναι γενικά προαιρετικό, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις η ύπαρξή του μπορεί να επιβληθεί από περιορισμούς του κεντρικού συστήματος, ενώ σε άλλες περιπτώσεις είναι μια λύση επιλογής. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αποφευχθεί το CSS σε παλαιότερες λύσεις και η χρήση του CSS για την αντιμετώπιση της κινητικότητας και του ελέγχου ταυτότητας των χρηστών που συνδέονται με διάφορα DSS είναι λογική. Οι κύκλοι ζωής των CSS και DSS διαχωρίζονται –από την άποψη του DSS, το CSS είναι ένα μόνιμο κομμάτι. Καθώς χρησιμοποιούνται οι λειτουργίες CSS, τα DSS ενδέχεται να έχουν μικρότερο αποτύπωμα και να μπορούν να παρέχονται γρηγορότερα, κάτι που έχει πρωταρχική σημασία για τομείς που δημιουργούνται κατά παραγγελία. Το CSS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό του κοινού επιπέδου ελέγχου, με λειτουργίες που μπορούν να αξιοποιηθούν από τους ειδικούς τομείς. Το σύνολο των λειτουργιών CSS δεν πρέπει να διορθωθεί και θα πρέπει να είναι δυνατή η προσθήκη νέων λειτουργιών στο τρέχον CSS. Ένας συνδυασμός CSS και DSS μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένας υπό τομέας CSS. Με αυτόν τον τρόπο, η έννοια του συνδυασμού CSS-DSS μπορεί να γίνει αναδρομική.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με το 3GPP δεν επιτρέπει την ύπαρξη μεμονωμένων λειτουργιών δικτύου που μοιράζονται μεταξύ πολλών DSS. Ο λόγος είναι μια πρόσθετη πολυπλοκότητα της διαχείρισης τέτοιων επιμέρους λειτουργιών. Η προτεινόμενη λύση είναι να συγχωνευθούν αυτές οι μεμονωμένες, νέες λειτουργίες

με το υπάρχον CSS. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η ύπαρξη κοινών λειτουργιών (δηλ. CSS) δημιουργεί επίσης κάποια προβλήματα. Οι περιορισμοί των υπηρεσιών CSS μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη συνολική λειτουργικότητα και την ευελιξία ενός τομέα CSS/DSS. Επιπλέον, ο διαχωρισμός μεταξύ DSS μειώνεται επίσης λόγω της χρήσης του CSS. Τέλος, ένα περιβάλλον πολλαπλών τμημάτων απαιτεί ένα σύνολο λειτουργιών που δεν υπάρχουν σε αρχικά δίκτυα μη τεμαχισμένα σε τομείς. Από την άποψη του χρήστη, αυτές οι λειτουργίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν την ανακάλυψη, την επιλογή, τη συνδρομή και τον έλεγχο ταυτότητας.

Η αλυσιδωτή τοποθέτηση των τομέων (δημιουργία του τομέα από άκρη σε άκρη από τους “οριζόντια” ενωμένους υπό-τομείς) απαιτεί επίσης μηχανισμούς, όπως η έκθεση της αφανούς απόψεως ενός μονού τύπου τομέα σε άλλους τομείς και η υποστήριξη των λειτουργιών μεταξύ τους. Αυτές οι λειτουργίες ομαδοποιούνται στο μπλοκ SOS (Slice Operations Support) που αναπτύσσεται μαζί με το τεμαχισμένο δίκτυο, ενισχύοντας τις λειτουργίες του Blueprint από το μπλοκ SOS.

Αυτές οι βελτιώσεις, θα πρέπει να προσαρμόζονται στις ανάγκες των υπό-τομέων οριζόντιας ή κατακόρυφης ένωσης. Ωστόσο, πρέπει να υποστηριχθούν αρκετές επιλογές. Για παράδειγμα, η επιλογή τομέα μπορεί να κωδικοποιηθεί (π.χ. σε περιπτώσεις συσκευών IoT), να γίνει με τρόπο απόλυτα άγνωστο προς τον τελικό χρήστη από το δίκτυο ή με βάση μια διαδικασία διαπραγμάτευσης μεταξύ του δικτύου και του τελικού χρήστη. Οι τελευταίες μπορεί να περιλαμβάνουν τις προτιμήσεις των τελικών χρηστών (τιμή, απόδοση κλπ.). Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρχει ένα “προεπιλεγμένο” κομμάτι που θα χρησιμοποιηθεί αν δεν μπορεί να βρεθεί ένας σωστός συνδυασμός ενός συγκεκριμένου τομέα, ώστε να γίνει χρήση του. Θα πρέπει επίσης να είναι δυνατή η δημιουργία τομέα κατά παραγγελία. Στην τελευταία περίπτωση, ο προεπιλεγμένος τομέας πρέπει να παρέχει τη βασική επικοινωνία και τις υπηρεσίες μέχρι να δημιουργηθεί το κομμάτι που ζητήθηκε. Υφιστάμενα παλαιότερα συστήματα μη τεμαχισμένα (π.χ. το δίκτυο LTE), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προεπιλεγμένος τομέας. Η χρήση τους με τον περιγραφόμενο τρόπο επιτρέπεται, αλλάζοντας από μη τεμαχισμένα σε τεμαχισμένα δίκτυα. Η αρχική επιλογή τομέα εκτελείται από τη λειτουργία επιλογής CSS (SSF), που συνδυάζεται με μια κύρια βάση τομέων (Global Slice Repository, GSR). Κάθε DSS μπορεί να διαθέτει ένα τοπικό, προαιρετικά τροποποιημένο, αντίγραφο της GSR, του τοπικού καταλόγου αποκοπής (LSR). Η δυνατότητα κλιμάκωσης και αξιοπιστίας επιλογής

τομέων δικαιολογεί την ύπαρξη SSF και LSR ως μέρος του DSS. Επιπλέον, το LSR μπορεί να έχει ένα υποσύνολο τομέων μόνο GSR, π.χ. μόνο οι τομείς δικτύου που λειτουργούν από τον ίδιο μισθωτή (βλέπε MVNO). Ο τεμαχισμός πολλαπλών τομέων απαιτεί ένα σύνολο λειτουργιών που υποστηρίζουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των τομέων των γειτονικών περιοχών για την παροχή της δραστηριότητας από άκρο σε άκρο. Τέτοιες λειτουργίες τοποθετούνται στο μπλοκ SOS υποστήριξης λειτουργιών διεπαφών (IDOS). Παρέχει την έκθεση μιας φέτας στους γειτονικούς τομείς (π.χ. αφαίρεση τοπολογίας) και υποστηρίζει πρωτόκολλα που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των τομέων.

Ο Διαχειριστής Slice (SM) είναι ένα στοιχείο ενός τμήματος που ενεργεί ως διαχειριστικός φορέας. Είναι μόνο ένα μέρος του συνολικού συστήματος διαχείρισης, που συνεργάζεται με την κύρια πλατφόρμα διαχείρισης –το Global OSS/BSS. Δύο λόγοι δικαιολογούν τη συμπερίληψη του SM σε κάποιον τομέα δικτύου. Ο πρώτος είναι η δυνατότητα κλιμάκωσης, καθώς η διαχείριση πολλαπλών λειτουργικά απομονωμένων τομέων από ένα ενιαίο σύστημα διαχείρισης δεν είναι κλιμακωτή και εγείρει προβλήματα που σχετίζονται με τον διαχωρισμό των λειτουργιών διαχείρισης μεταξύ των τομέων. Ο δεύτερος είναι επιχειρηματικού προσανατολισμού. Συνήθως υποτίθεται ότι οι δημιουργούμενοι τομείς θα είναι προσαρμοσμένοι στις ανάγκες συγκεκριμένων υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν από τρίτους (verticals), που ενοικιάζουν και χρησιμοποιούν τομείς. Κάθε μισθωτής θα πρέπει να έχει κάποιες δυνατότητες διαχείρισης για να λειτουργήσει αποτελεσματικά τον τομέα ή τους τομείς του. Το SM διαδραματίζει τον ρόλο του επιπέδου διαχείρισης του τεμαχισμένου δικτύου, αλλά είναι ελαφρώς διαφορετικό από το επίπεδο διαχείρισης των απλών δικτύων που δεν είναι τεμαχισμένα. Ο μισθωτής (τυπικά δεν είναι επαγγελματίας χειριστής) αποκτά με το SM μια απλή και άνετη διαχείριση του τομέα μέσω μιας αποκλειστικής διεπαφής. Επιπλέον, το SM χειρίζεται ελαττώματα (ή υποστυλώματα) φθοράς και απόδοσης, ονόματος υποστήριξης διαμόρφωσης και ενεργοποίηση τροποποίησης των πολιτικών χρόνου εκτέλεσης του τομέα, των διαμορφώσεων των υπηρεσιών του και των συνδρομών των χρηστών σε αυτόν.

Η ενότητα Παρακολούθησης και Αναφοράς KPI παρέχει τις πληροφορίες του ενοικιαστή σχετικά με την κατάσταση και τη χρήση των τομέων και με ένα συνδυασμό του λογιστικού στοιχείου επιτρέπει τη χρέωση των χρηστών. Οι πληροφορίες λογιστικής αποθηκεύονται επιπρόσθετα στο Global OSS/BSS, επειδή το

SM ενός τομέα εξαφανίζεται στον τερματισμό του. Για να γίνει ελαφριά και άνετη η διαχείριση των τομέων για το όλο σύστημα, οι περισσότερες λειτουργίες διαχείρισης του ενοικιαστή (π.χ. EMF) θα πρέπει να αυτοματοποιηθούν, παρέχοντας τη συνολική επεκτασιμότητα του συστήματος διαχείρισης και τον σύντομο χρόνο ανταπόκρισης για συμβάντα, συναγεμούς κλπ. Εάν χρησιμοποιούνται συστήματα παλαιού τύπου με δική τους διαχείριση, το EMF θα πρέπει να περιλαμβάνει υποστήριξη για λειτουργίες διαχείρισης παλαιού τύπου.

#### Δραστηριότητες διαχείριση και οργάνωση τομέων:

Περιγράφουμε πρώτα τη διαχείριση και την οργάνωση για την περίπτωση τομέα ενιαίας οργάνωσης. Υποθέτουμε αποκλειστικά την οργάνωση με NFV MANO. Έτσι, είναι άγνωστη για τον τομέα, ενώ η διαχείριση των τομέων είναι ειδικός τομέας ή υπό τομέας αποκλειστικά για αυτό το σκοπό.

#### Διεργασίες τομέα μονού τύπου:

Το Global OSS/BSS λειτουργεί ως κύριος οδηγός συμβάλλοντας επίσης στην οργάνωση τύπου MANO. Η πρώτη ομάδα λειτουργιών Global OSS/BSS περιλαμβάνει λειτουργίες eTOM γενικού χαρακτήρα και πύλες για χειριστές οργάνωσης του δικτύου και μισθωτές. Οι μισθωτές χρησιμοποιούν την Πύλη OSS για να ζητήσουν τη δημιουργία και τον τερματισμό τομέων και την πρόσβαση σε τρέχοντα αλλά και ιστορικά δεδομένα που σχετίζονται με τον κάθε τομέα που έχουν δικαιοδοσία. Η δεύτερη ομάδα λειτουργιών Global OSS/BSS (Single Domain OSS) οδηγεί σε MANO οργάνωση των τομέων και παρέχει μια μοναδική διαχείριση. Ο διαμορφωτής τομέων αναλύει τα αιτήματα, τα σχέδια, καθώς και τις πολιτικές χρηστών και χειριστών. Σε συνεργασία με την οντότητα υποστήριξης του NFVO, η οποία διατηρεί τον κατάλογο των τομέων δικτύου, δημιουργεί την περιγραφή δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί από το NFVO για την ανάπτυξη τομέων. Παράλληλα, δημιουργείται η οντότητα υποστήριξης τομέα, η οποία χειρίζεται τη συνεργασία με το SM αυτού του τομέα. Ο Διαχειριστής Τομέα διατηρεί πληροφορίες σχετικά με όλους τους διαθέσιμους πόρους στον τομέα, τη χρήση τους, την κατανομή τους, καθώς και γενικές πληροφορίες σχετικά με τις ειδοποιήσεις κλπ. Μπορεί επίσης να κάνει κατανομή πόρων σε τομείς με βάση τις προτεραιότητές τους. Η υποστήριξη Common Slice μπορεί να περιλαμβάνει συστήματα διαχείρισης παλαιού τύπου (δηλαδή υλικού), εάν δεν υλοποιούνται ως τμήμα SM του CSS. Όπως ήδη αναφέραμε,

χρησιμοποιούμε το ETSI MANO όπως είναι. Ωστόσο, η δυνατότητα κλιμάκωσης της οργάνωσης τύπου MANO μπορεί επίσης να είναι ένα πρόβλημα. Αυτό μπορεί εν μέρει να λυθεί με τη χρήση πολλαπλών VNFMs και NFVOs. Η τελευταία περίπτωση απαιτεί την ύπαρξη πολλαπλών VIM που μοιράζονται την ίδια υποδομή και τη δυναμική κατανομή πόρων μεταξύ τους.

#### Διεργασίες τομέα πολλαπλού τύπου

Η οριζόντια ένωση πολλών τομέων επηρεάζει την εφαρμογή των SOS. Αφορά συγκεκριμένα τις λειτουργίες προσανατολισμού με επιλογή τομέα και λειτουργικές οντότητες IDOS (και οι δύο λειτουργίες αποτελούν μέρος του SOS). Οι δυνατότητες επιλογής φέτας θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο σε υπό τομείς. Οι οντότητες IDOS λειτουργούν ως πύλες μεταξύ των τμημάτων που εφαρμόζουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ γειτονικών για την αποτελεσματική συνεργασία τους. Σε αυτό το πλαίσιο, το IDOS θα πρέπει να εκθέσει μια αφηρημένη άποψη του τομέα του, καθώς και να επιτρέψει επικοινωνία μεταξύ των διαμέσων μέσω της υποστήριξης των απαραίτητων πρωτοκόλλων. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας λειτουργικότητας, ωστόσο δεν μπορεί να βρεθεί σε λειτουργίες επιπέδου τομέα. Η διαμόρφωση SOS κάθε υποτομέα θα πρέπει να γίνει κατά τη διάρκεια της παράδοσης τομέα πολλαπλού τύπου από κάθε διαμορφωτή τομέα του ενιαίου τομέα OSS [20].

Ο τεμαχισμός δικτύου επιτρέπει στον χειριστή να δημιουργεί προσαρμοσμένα δίκτυα για να παρέχει βελτιστοποιημένες λύσεις για διάφορα σενάρια αγοράς που απαιτούν ποικίλες απαιτήσεις, π.χ. στους τομείς λειτουργικότητας, απόδοσης και απομόνωσης. Για αυτό, απαιτεί εγγενή υποστήριξη από τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος. Η συνολική αρχιτεκτονική αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα: το στρώμα υποδομής, το επίπεδο τομέα δικτύου και το επίπεδο διαχείρισης δικτύου. Το επίπεδο υποδομής παρέχει τους φυσικούς ή εικονικούς πόρους και τη θεμελιώδη δυνατότητα για τον τεμαχισμό του δικτύου, για παράδειγμα τον υπολογιστικό πόρο, τους πόρους αποθήκευσης και τη συνδεσιμότητα. Το στρώμα τομέα δικτύου εκτελείται πάνω από το επίπεδο υποδομής και παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες δικτύου για τη δημιουργία λογικών δικτύων E2E μέσω των NSIs. Το επίπεδο διαχείρισης δικτύου περιέχει το συμβατικό σύστημα υποστήριξης επιχειρήσεων/λειτουργικής υποστήριξης (BSS/OSS) και το σύστημα διαχείρισης τομέα δικτύου (NSM), το οποίο σχεδιάζει και διαχειρίζεται το κόστιμο του δικτύου.

### Αρχιτεκτονική τεμαχισμού κεντρικού δικτύου

Μια σύντομη περιγραφή κάθε λειτουργίας δικτύου (NF) παρατίθεται παρακάτω:

- **Λειτουργία διακομιστή ελέγχου ταυτότητας (AUSF):** υποστηρίζει τη λειτουργία διακομιστή ελέγχου ταυτότητας.
- **Πρόσβαση και λειτουργία διαχείρισης κινητικότητας (AMF):** έλεγχος πρόσβασης, έλεγχος κινητικότητας, διαφανής μεσολάβηση για τη δρομολόγηση μηνυμάτων SM.
- **Ενοποιημένο καταθετήριο δεδομένων (UDR):** αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων από UDM, PCF ή NEF.
- **Λειτουργία μη δομημένης αποθήκευσης δεδομένων (UDSF):** αποθήκευση και ανάκτηση πληροφοριών ως μη δομημένων δεδομένων από οποιοδήποτε NF.
- **Λειτουργία έκθεσης δικτύου (NEF):** εκθέτει τις υπηρεσίες και τις δυνατότητες που παρέχονται από τις λειτουργίες δικτύου 3GPP.
- **Λειτουργία καταλόγου NF (NRF):** διατηρεί το προφίλ NF, υποστηρίζει την ανακάλυψη υπηρεσιών.
- **Λειτουργία ελέγχου πολιτικής (PCF):** αποφασίζει την πολιτική και την παρέχει στη λειτουργία του επιπέδου ελέγχου.
- **Λειτουργία διαχείρισης συνόδων (SMF):** διαχειρίζεται τη συνεδρία PDU, π.χ. εγκατάσταση συνεδρίασης PDU, τροποποίηση και απελευθέρωση.
- **Διαχείριση ενοποιημένης διαχείρισης δεδομένων (UDM):** επεξεργασία διαπιστευτηρίων ταυτότητας, εξουσιοδότηση πρόσβασης, διαχείριση εγγραφής/κινητικότητας και διαχείριση εγγραφών.
- **Λειτουργία πλάνου χρήστη (UPF):** χειρίζεται την κίνηση του πλάνου χρήσης κάθε χρήστη, π.χ. δρομολόγηση και προώθηση της κυκλοφορίας, επιθεώρηση κυκλοφορίας και αναφορά χρήσης, χειρισμός.
- **Λειτουργία εφαρμογής (AF):** αλληλεπιδρά με το δίκτυο πυρήνα 3GPP (CN) για την παροχή υπηρεσιών.
- **Λειτουργία επιλογής κόμβου δικτύου (NSSF):** επιλέγει την NSI, καθορίζει τις επιτρεπόμενες πληροφορίες βοήθειας επιλογής τομέα δικτύου (NSSAI) και την AMF που έχει οριστεί για την εξυπηρέτηση του UE.

### Επέκταση δυνατοτήτων

Το νέο δίκτυο μεταφορών μπορεί να συνδυάσει το DWDM με την παραδοσιακή φυσική διεπαφή ηλεκτρικής στρώσης. Το νέο δίκτυο μεταφοράς υποστηρίζει μεγάλο εύρος ζώνης στον φυσικό σωλήνα ηλεκτρικής στρώσης. Το νέο δίκτυο μεταφορών μπορεί επίσης να πραγματοποιήσει την ευέλικτη επέκταση του σωλήνα ηλεκτρικού στρώματος για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις εφαρμογής υψηλού εύρους ζώνης, μέσω της δέσμευσης των πολλαπλών οπτικών στρώσεων μήκους κύματος. Η δέσμευση με βάση το μήκος κύματος όχι μόνο αυξάνει σημαντικά την ικανότητα επέκτασης του εύρους ζώνης του καναλιού, αλλά και συνειδητοποιεί το τεράστιο πλεονέκτημα του κόστους εξοικονομώντας τις ίνες. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση του εξοπλισμού μεταφοράς μπορεί να είναι ένας ευέλικτος συνδυασμός των ηλεκτρικών και οπτικών στρωμάτων, τα οποία μπορούν να διαμορφωθούν ως ολοκληρωμένος εξοπλισμός με ηλεκτρικά και οπτικά στρώματα και επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστά από το ηλεκτρικό στρώμα. Η αρχιτεκτονική του νέου δικτύου μεταφορών ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχετικά με το εύρος ζώνης.

Ο τεμαχισμός δικτύων μπορεί να καλύψει δύο μεγάλες προκλήσεις: 1) να υποστηρίξει τις κάθετες βιομηχανικές εφαρμογές ώστε να επεκταθεί η αγορά της βιομηχανίας ασύρματης επικοινωνίας και 2) να βελτιώσει περαιτέρω την ικανότητα των συσκευών και την εμπειρία των χρηστών. Εφαρμόζουμε τον τεμαχισμό του δικτύου σε δύο διαστάσεις: κατακόρυφος και οριζόντιος τεμαχισμός δικτύου. Ο κατακόρυφος τεμαχισμός επιτρέπει την ανταλλαγή πόρων μεταξύ υπηρεσιών και εφαρμογών και αποφεύγει ή απλοποιεί ένα παραδοσιακό πρόβλημα τεχνικής της ποιότητας των υπηρεσιών. Ο οριζόντιος τεμαχισμός, ως βήμα μπροστά, στοχεύει στην επέκταση των δυνατοτήτων των κινητών συσκευών και στην ενίσχυση της εμπειρίας των χρηστών. Ο οριζόντιος τεμαχισμός ξεπερνά τα όρια της φυσικής υποδομής. Επιτρέπει την κοινή χρήση πόρων μεταξύ κόμβων δικτύου και συσκευών, δηλ. οι κόμβοι δικτύου/συσκευές υψηλής ικανότητας μοιράζονται τους πόρους τους (π.χ. υπολογισμοί, επικοινωνία, αποθήκευση) για να ενισχύσουν τις δυνατότητες των λιγότερο ικανοποιημένων κόμβων/συσκευών δικτύου. Ο οριζόντιος τεμαχισμός απαιτεί κοινή χρήση πόρων μέσω του δικτύου σε κόμβους δικτύου [19].

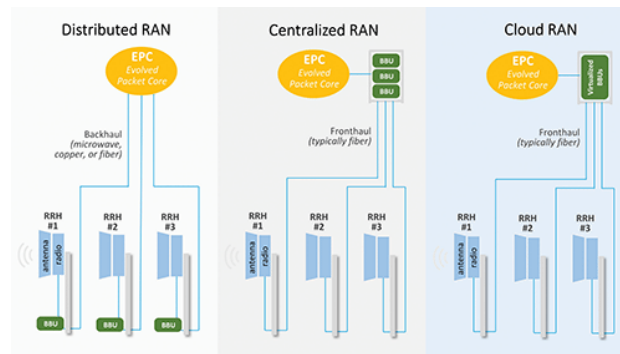


## Cloud-RAN

Νέες ανάγκες αναδύονται και επικρατούν νέες προκλήσεις στα δίκτυα, όπως το μικρότερο βάρος της λειτουργίας και της διαχείρισης, που σχετίζονται με τις επικοινωνίες μεταξύ συσκευών και τη νέα δυναμική των κοινωνικών δικτύων. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, απαιτούνται τεράστιες επενδύσεις για την αλλαγή/αναβάθμιση των υφιστάμενων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας. Λαμβανομένης υπόψη τις νέες αυτές προτεραιότητες των απαιτήσεων, είναι σκόπιμο να αναμένεται ότι ορισμένες απαιτήσεις του δικτύου μπορούν να υλοποιηθούν με νέα τεχνολογία/αρχιτεκτονική βασισμένη στις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες, οι οποίες συνεχώς ενισχύονται, παράλληλα με τις τάσεις των χρηστών και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Αναμένεται επίσης ότι η νέα αρχιτεκτονική θα μπορούσε να αποτελέσει το θεμέλιο των δικτύων του μέλλοντος. Οι μελλοντικές τεχνολογίες δικτύων θα πρέπει να είναι σε θέση να ευθυγραμμίζονται με νέες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας ενεργοποίησης νέας υπηρεσίας κατ' απαίτηση, ακόμη και με σοβαρά προβλήματα υπερχειλίσης, νέα λειτουργικότητα δικτύου ή πρωτόκολλο με δυνατότητα αυτοδιαχείρισης με χαμηλό κόστος. Ο καθαρός κύκλος ζωής του έργου στο πλαίσιο ευφυούς συστήματος ενεργειακής ευαισθητοποίησης για την κινητικότητα δικτύων, υπηρεσιών και συσκευών με εγγυημένη ποιότητα παροχής υπηρεσιών και τη διευκόλυνση των κατάλληλων συμφωνιών επιπέδου υπηρεσιών.

Η αρχιτεκτονική RAN (Radio Access Network), μπορεί να υποστηρίξει απλές επιλογές συντονισμού των παρεμβολών σε κεντρικά δίκτυα σε πιο εξελιγμένα συστήματα Coordinated Multi Point (CoMP) με αυτόνομη οργάνωση των δυνατοτήτων, παρέχοντας δίκτυα υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης για την έγκαιρη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μονάδων βάσης ζώνης (BBU) μέσα στην ομάδα μονάδων. Η αρχιτεκτονική Cloud RAN (C-RAN) μπορεί να υποστηρίξει πλήρως κατανεμημένα και συγκεντρωτικά δίκτυα ή το συνδυασμό κεντρικών και κατανεμημένων δικτύων με συνεργατικό τρόπο που μπορούν να αναπτύξουν πυκνά ετερογενή δίκτυα με ευφυείς και ευέλικτους κόμβους. Με τη συγκέντρωση των πόρων της βάσης ζώνης και των υψηλότερων στρωμάτων μπορεί να σχηματιστεί μια δεξαμενή, έτσι ώστε το δίκτυο C-RAN να χειρίζεται δυναμικά τους πόρους επεξεργασίας και να αναπτύσσει κατανεμημένα τις μονάδες εκπομπής καθώς και την

κεραία. Εδώ, η σηματοδότηση ελέγχου μπορεί να παραδοθεί από τους σταθμούς εκπομπής (macro cells) και η μετάδοση δεδομένων χρήστη μπορεί να παραδοθεί από μικρά στοιχεία εκπομπής (small cells), με αυτοματοποιημένο σύστημα κίνησης, επιτρέποντας την προσέγγιση εικονικού πομποδέκτη στην κινητή πρόσβαση, η οποία μπορεί να επιλέξει έναν κατάλληλο πομπό και δέκτη από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις πομπού/δέκτη. Αυτός ο τύπος αρχιτεκτονικής οδηγεί σε ομοιόμορφη απόδοση και ποιότητα παντού πάνω σε ένα σταθμό, ακόμη και στο όριο της εμβέλειας του με κοινή μετάδοση και επεξεργασία, συντονισμένο προγραμματισμό, διαχείριση ισορροπίας φορτίου και συντονισμό παρεμβολών μεταξύ μεμονωμένων μικρών ευέλικτων κυψελών από κεντρική τοποθεσία, όπου μπορεί να φιλοξενοούνται αρκετές δεκάδες σταθμοί βάσης με την ικανότητα να κατανέμονται δυναμικά οι πόροι επεξεργασίας σε σταθμούς με υψηλή κίνηση και βάσει ζήτησης, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας. (Subrat et. al, 2016)



Εικόνα 2.12: RAN αρχιτεκτονικές (πηγή: [https://encrypted-](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTAPweITD8ioV3Mtp_tDd7IH8103c-PurLODpnxsfJNwBtv03YB)

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTAPweITD8ioV3Mtp\\_tDd7IH8103c-PurLODpnxsfJNwBtv03YB](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTAPweITD8ioV3Mtp_tDd7IH8103c-PurLODpnxsfJNwBtv03YB))

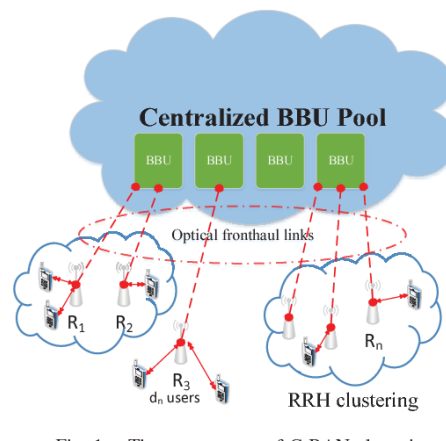
### Αρχιτεκτονική του C-RAN

Είναι μια φυσική εξέλιξη του κατακεκολλημένου συστήματος BTS, το οποίο αποτελείται από τη Μονάδα Βάσης (BBU) και την απομακρυσμένη κεφαλή εκπομπής (RRH). Σύμφωνα με τη διαφορετική διάσπαση των λειτουργιών μεταξύ BBU και RRH, υπάρχουν δύο είδη λύσεων C-RAN: το ένα ονομάζεται “πλήρης συγκέντρωση”, όπου η ζώνη βάσης (layer 1) και οι λειτουργίες BTS layer 2 και layer 3 βρίσκονται στην κεφαλή εκπομπής BBU. Το άλλο είδος ονομάζεται “μερική συγκέντρωση”, όπου το RRH ενσωματώνει όχι μόνο τη λειτουργία εκπομπής αλλά και τη λειτουργία βασικής ζώνης, ενώ όλες οι άλλες λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου εξακολουθούν να βρίσκονται στο BBU.

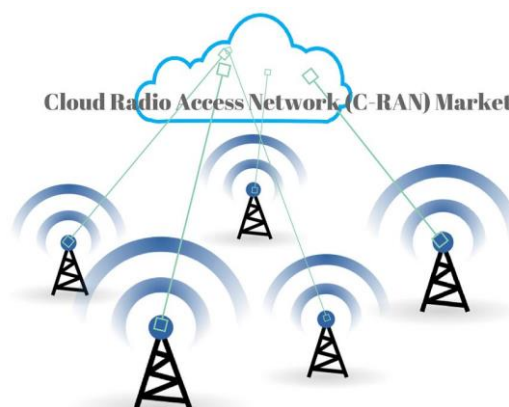
Με βάση αυτές τις δύο διαφορετικές μεθόδους λειτουργιών, υπάρχουν δύο αρχιτεκτονικές C-RAN. Και οι δύο αποτελούνται από τρία βασικά μέρη: Πρώτον, τις καταναμημένες μονάδες ραδιοσυχνότητας που μπορούν να αναφέρονται ως κεφαλές εκπομπής (RRH) και κεραιές που βρίσκονται στην απομακρυσμένη περιοχή. Δεύτερον, το δίκτυο οπτικών μεταφορών με υψηλό εύρος ζώνης χαμηλής καθυστέρησης, που συνδέει τις μονάδες RRH και BBU. Και τρίτον, το BBU που αποτελείται από επεξεργαστές υψηλής απόδοσης προγραμματιζόμενους και με τεχνολογία οπτικοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Η “πλήρως κεντρική” αρχιτεκτονική C-RAN έχει τα πλεονεκτήματα της εύκολης αναβάθμισης και της επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου. Έχει επίσης καλύτερες δυνατότητες για υποστήριξη λειτουργίας πολλαπλών προτύπων, μέγιστου επιμερισμού πόρων και είναι πιο βολική στην υποστήριξη της επεξεργασίας σημάτων συνεργασίας με πολλούς σταθμούς βάσης. Το κύριο μειονέκτημά της είναι η απαίτηση υψηλού εύρους ζώνης μεταξύ του BBU και η μεταφορά του σήματος I/Q της βασικής ζώνης. Στην ακραία περίπτωση, μια κεραία TD-LTE 8 με εύρος ζώνης 20 MHz θα χρειαστεί ένα ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps. Η “μερική κεντρική” αρχιτεκτονική C-RAN έχει το πλεονέκτημα ότι απαιτεί πολύ μικρότερο εύρος ζώνης μετάδοσης μεταξύ BBU και RRH, διαχωρίζοντας την επεξεργασία βασικής ζώνης από την BBU και ενσωματώνοντάς την στο RRH. Σε σύγκριση με την “πλήρως κεντρική”, η σύνδεση BBU-RRH χρειάζεται μόνο να μεταφέρει αποδιαμορφωμένα δεδομένα, τα οποία είναι  $1/20 \sim 1/50$  από τα αρχικά δεδομένα δείγματος βάσης I/Q. Ωστόσο, έχει και αυτή μειονεκτήματα. Επειδή η επεξεργασία της βασικής ζώνης είναι ενσωματωμένη στο RRH, έχει λιγότερη ευελιξία στην αναβάθμιση και λιγότερη ευκολία για την επεξεργασία πολύπλοκων σημάτων που απαιτούνται από τις κεραιές εκπομπής.

Μία από αυτές τις αρχιτεκτονικές C-RAN επιλέγουν οι φορείς κινητής τηλεφωνίας κυρίως, αλλά όχι μόνο, δηλαδή εφαρμόζεται και σε άλλους τύπους ασύρματων δικτύων καθώς μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα και να κάνουν αναβαθμίσεις στο δίκτυό τους. Ο κάτοχος του δικτύου χρειάζεται μόνο να εγκαταστήσει νέες μονάδες RRH και να τις συνδέσει στη βάση BBU για να επεκτείνει την κάλυψη του δικτύου ή να χωρίσει την κυψέλη εκπομπής για να βελτιώσει τη χωρητικότητα. Εάν το φορτίο του δικτύου αυξάνεται, χρειάζεται μόνο να αναβαθμίσει το HW της βάσης BBU για να ικανοποιήσει την αυξημένη ικανότητα επεξεργασίας. Επιπλέον, η “πλήρως κεντρική”, σε συνδυασμό με ανοιχτές πλατφόρμες και επεξεργαστές γενικής χρήσης,

παρέχει έναν εύκολο τρόπο ανάπτυξης και εγκατάστασης δικτύου βασισμένου σε λογισμικό (SDR), που επιτρέπει την αναβάθμιση των προτύπων της διεπαφής με το λογισμικό μόνο και καθιστά ευκολότερο αναβαθμίσιμο το RAN και υποστηρίζει τη λειτουργία πολλαπλών προτύπων. Διαφορετικά από την παραδοσιακή κατανομημένη αρχιτεκτονική BS, το C-RAN διασπά τη στατική σχέση μεταξύ RRH και BBU. Κάθε RRH δεν ανήκει σε κανένα συγκεκριμένο φυσικό BBU. Τα ραδιοφωνικά σήματα από/προς ένα συγκεκριμένο RRH μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία από ένα εικονικό BS, το οποίο αποτελεί μέρος της χωρητικότητας επεξεργασίας που διατίθεται από τη φυσική μονάδα BBU από την τεχνολογία οπτικοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Η υιοθέτηση τεχνολογίας οπτικοποίησης μεγιστοποιεί την ευελιξία του συστήματος C-RAN (China Mobile research inst. Kuilin et al.,2011).



Εικόνα 2.13: Αρχιτεκτονική Cloud RAN (πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/Centralized-and-distributed-RRH-clustering-in-Cloud-Taleb-Helou/b282634a19434d7dc22eeb5280b3d317b76643bf>)



Εικόνα 2.14: Αρχιτεκτονική Cloud RAN (πηγή: [https://www.openpr.com/images/articles/R/7/R72013191\\_g.jpg](https://www.openpr.com/images/articles/R/7/R72013191_g.jpg))

### Πλεονεκτήματα του C-RAN

- Ενεργειακή απόδοση/Πράσινη υποδομή:** Το C-RAN είναι μια φιλική προς το περιβάλλον υποδομή. Πρώτον, με την κεντρική επεξεργασία της αρχιτεκτονικής C-RAN, ο αριθμός των θέσεων BS μπορεί να μειωθεί αρκετά. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας του κλιματισμού και του εξοπλισμού υποστήριξης μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Δεύτερον, η απόσταση από τα RRH στα UE μπορεί να μειωθεί, δεδομένου ότι η συνεργατική τεχνολογία εκπομπής μπορεί να μειώσει την παρεμβολή μεταξύ RRH και να την επιτρέψει υψηλότερη πυκνότητά τους. Μικρότερες κυψέλες εκπομπής με χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης μπορούν να αναπτυχθούν, ενώ η ποιότητα κάλυψης δικτύου δεν επηρεάζεται. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση σήματος θα μειωθεί, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μείωση της κατανάλωσης ρεύματος στο RAN και για την επέκταση του χρόνου αναμονής της μπαταρίας των UE. Τέλος, επειδή η βάση BBU είναι ένας κοινός πόρος μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού εικονικών BS, αυτό σημαίνει ένα πολύ υψηλότερο ποσοστό χρησιμοποίησης των πόρων επεξεργασίας και η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί. Όταν ένα εικονικό BS είναι αδρανές τη νύχτα και το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος επεξεργασίας δεν είναι απαραίτητο, μπορεί να απενεργοποιηθεί επιλεκτικά (ή να ληφθεί σε κατάσταση χαμηλότερης ισχύος), χωρίς να επηρεαστεί η δέσμευση εξυπηρέτησης 24x7 του δικτύου.
- Εξοικονόμηση κόστους στο CAPEX & OPEX:** Επειδή οι BBU και ο εξοπλισμός υποστήριξης τοποθεσιών συγκεντρώνονται σε μερικές μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις, είναι πολύ πιο εύκολη η κεντρική διαχείριση και λειτουργία, εξοικονομώντας μεγάλο μέρος του κόστους οργάνωσης και διαχείρισης που συνδέεται με τον μεγάλο αριθμό θέσεων BS σε ένα παραδοσιακό δίκτυο RAN. Δεύτερον, αν και ο αριθμός των RRH δεν μπορεί να μειωθεί σε μια αρχιτεκτονική C-RAN, η λειτουργικότητά του είναι απλούστερη, το μέγεθος και η κατανάλωση ενέργειας μειώνονται και μπορούν να καθίσουν σε πόλους με ελάχιστη υποστήριξη και διαχείριση χώρου. Το RRH απαιτεί μόνο την εγκατάσταση των βοηθητικών συστημάτων τροφοδοσίας κεραίας, επιτρέποντας στους ιδιοκτήτες του δικτύου να επιταχύνουν την κατασκευή του για να αποκτήσουν ένα πλεονέκτημα πρώτης κίνησης. Έτσι, οι φορείς εκμετάλλευσης

μπορούν να αποκομίσουν μεγάλο κέρδος από την ενοικίαση του χώρου καθώς και την οργάνωση-διαχείριση.

- **Βελτίωση χωρητικότητας:** Στην C-RAN, οι εικονικοί BS μπορούν να συνεργαστούν σε μια μεγάλη φυσική βάση BBU και μπορούν εύκολα να μοιράζονται στο σύστημα τα δεδομένα σηματοδότησης, κίνησης και κατάστασης των ενεργών καναλιών των UE. Είναι πολύ πιο εύκολο να εφαρμοστεί η κοινή επεξεργασία και προγραμματισμός για να μετριαστεί η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών (ICI) και να βελτιωθεί η φασματική απόδοση. Για παράδειγμα, η συνεργατική τεχνολογία επεξεργασίας πολλαπλών σημείων (CoMP σε LTE-Advanced) μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί και στην υποδομή C-RAN.
- **Προσαρμοστικότητα για μη ομοιόμορφη κυκλοφορία:** Το C-RAN είναι επίσης κατάλληλο για μη ομοιόμορφα κατανεμημένη κίνηση, λόγω της ικανότητας εξισορρόπησης φορτίου στην κατανεμημένη βάση BBU. Παρόλο που η υπηρεσία RRH αλλάζει δυναμικά σύμφωνα με την κίνηση των UE, το BBU που εξυπηρετεί ακόμα στην ίδια BBU ομάδα. Καθώς η κάλυψη μίας βάσης BBU είναι μεγαλύτερη από την παραδοσιακή BS, η μη ομοιόμορφα κατανεμημένη κίνηση που παράγεται από UE μπορεί να διανεμηθεί σε ένα εικονικό BS, το οποίο βρίσκεται στην ίδια βάση BBU.
- **Έξυπνη κυκλοφοριακή συμφόρηση διαδικτύου:** Με την ενεργοποίηση της τεχνολογίας έξυπνης διάσπασης στο C-RAN, η αυξανόμενη κίνηση στο διαδίκτυο από έξυπνα τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές μπορεί να εκφορτωθεί από το βασικό δίκτυο των φορέων εκμετάλλευσης. Τα οφέλη είναι η μειωμένη επιστρεφόμενη κίνηση και το κόστος, η μειωμένη κυκλοφορία δικτύου πυρήνα και το κόστος αναβάθμισης δικτυακής πύλης και η μειωμένη καθυστέρηση (latency) στους χρήστες (China Mobile research inst. Kuilin et al.,2011).

Το CRAN και το MEC είναι εξαιρετικά συμπληρωματικές τεχνολογίες. Η συνεγκατάσταση αυτών βοηθά να καταστούν οι οικονομίες καθενός από αυτά σημαντικά πιο ελκυστικές. Το CRAN και το MEC βοηθούν επίσης ένα MNO να υποστηρίξει (και να παράγει έσοδα από) μερικές από τις βασικές εφαρμογές 5G που δεν θα μπορούσε να υποστηρίξει διαφορετικά. Ωστόσο, για να συνειδητοποιήσουν αυτά τα πλεονεκτήματα, οι φορείς εκμετάλλευσης των ασύρματων δικτύων πρέπει να ξεπεράσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη συνδιαλλαγή, καθώς και να

μεγιστοποιήσουν την απόδοση που μπορεί να αποφέρει η MEC. Αυτά τα ζητήματα είναι υπερβολικά υψηλά και η βιομηχανία είναι σε θέση να αναπτύξει αυτήν την δυνητικά επαναστατική νέα τεχνολογία. Επιπλέον, η συνεγκατάσταση μπορεί επίσης να ενεργοποιήσει τις υπηρεσίες MEC (π.χ. το καθορισμένο από το ETSI API, API τοποθεσίας, API ταυτότητας UE και API διαχείρισης εύρους ζώνης) για την εκμετάλλευση του CRAN και την ενεργοποίηση των εφαρμογών MEC για την αξιοποίηση των πληροφοριών CRAN. Οι φορείς εκμεταλλεύσεις δικτύου θα μπορούσαν, για παράδειγμα, να επιλύσουν τις πολυπλοκότητες διαχείρισης που σχετίζονται με πολλαπλές στοίβες IaaS, ενώ οι υπηρεσίες δημιουργίας εσόδων, όπως το RNIS, είναι μοναδικά για τα σύννεφα της MEC. Αντίστροφα, η ανάπτυξη ενός CRAN στη γενική υπολογιστική υποδομή (σε αντίθεση με το αποκλειστικό, RAN-βελτιστοποιημένο υλικό) είναι η ίδια σημαντική επένδυση για ένα MNO. Εκτός από το κόστος ανάπτυξης των ίδιων μονάδων επεξεργασίας CRAN, υπάρχει το κόστος της κίνησης προς εικονικές συσκευές RAN, δοκιμές, ενσωμάτωση και συντήρηση αυτών των νέων λύσεων. Ενώ η επιχειρησιακή ευελιξία και η δυνατότητα επαναπροσδιορισμού του δικτύου που προσφέρεται από την οπτικοποίηση που μπορεί να φέρει σημαντικά μακροπρόθεσμα οφέλη.

Τα σημαντικά στρατηγικά οφέλη του MEC μπορούν να καταστήσουν την απόφαση σαφέστερη. Μεταξύ των επενδύσεων σε υποδομές κινητών δικτύων, το RAN αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος των κεφαλαιουχικών δαπανών της MNO (CAPEX) –αυτό είναι πέρα από το κόστος του ίδιου του φάσματος, ενώ η συντήρηση, η πιθανή χρήση των γραμμών μισθωμένων δικτύων μεταφοράς και η βελτιστοποίηση του δικτύου προσθέτουν σημαντικά πρόσθετες επιχειρησιακές δαπάνες (OPEX). Δεδομένης αυτής της κατάστασης, η ανάπτυξη CRAN, η οποία προσομοιώνει μεγάλο μέρος των λειτουργιών RAN σε τυπικούς επεξεργαστές γενικής χρήσης (GPP), θεωρείται ως ένας σημαντικός τεχνολογικός παράγοντας για τη μείωση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO) που συνδέεται με το RAN. Το ποσό της επένδυσης και το κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης (OAM) αναμένεται να μειωθούν γρήγορα χάρη στις τεχνολογίες του σύννεφου που ωριμάζουν και στην εμπειρία ανάπτυξης. Η προσέγγιση CRAN διευκολύνει την ταχύτερη ανάπτυξη του ασύρματου δικτύου, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο που απαιτείται για συμβατικές εφαρμογές [18].

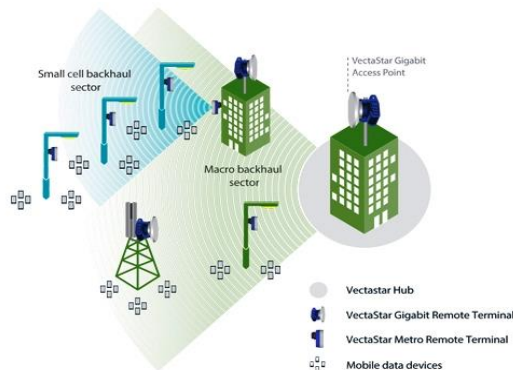
## Ασφάλεια

Μια άλλη σημαντική πρόκληση για το C-RAN είναι αυτή της ασφάλειας όσον αφορά την ιδιωτικότητα των χρηστών και τα έμπιστα μέρη. Καθώς οι πόροι μοιράζονται μεταξύ των BBU, η παραβίαση της ιδιωτικότητας των χρηστών και η πρόσβαση στα υποθετικά ασφαλή δεδομένα είναι μια πιθανότητα, ειδικά σε μια τέτοια κατανεμημένη αρχιτεκτονική. Επιπλέον, τα μέρη θεωρούνται αξιόπιστα σε C-RAN, συμπεριλαμβανομένων των BBU και RRU. Τέτοιες υποθέσεις ενδέχεται να είναι άκυρες, ιδίως λόγω του μεγάλου αριθμού χρηστών που έχουν εγγραφεί σε τέτοια συστήματα. Ένας εκτεθειμένος χρήστης μπορεί να επωφεληθεί από ένα τέτοιο μεγάλο, εικονικό σύστημα, για να παραβιάσει και να απειλήσει τους χρήστες. Ως εκ τούτου, εκτός από τις ευπάθειες που υπάρχουν στα παραδοσιακά κυψελοειδή συστήματα, το C-RAN παρουσιάζει άλλη μια πρόκληση ασφάλειας, που δεν θεωρήθηκε ή ήταν λιγότερο δύσκολη πριν [30].



## Small cells

Όπως αναφέραμε, όσο η χρήση ασύρματων δεδομένων συνεχίζει να αυξάνεται, οι πάροχοι πρέπει να βρουν νέους και καινοτόμους τρόπους για να συμβαδίσουν με τη ζήτηση των καταναλωτών για μεγαλύτερη ταχύτητα και χωρητικότητα δεδομένων. Ένας τρόπος αντιμετώπισης της κρίσης δυναμικότητας είναι η ανάπτυξη “μικρών κυψελών”, ενός τύπου ασύρματης τεχνολογίας για την ευρυζωνική υποδομή. Γενικά, η “μικρή κυψέλη” αναφέρεται τόσο στη μικρότερη περιοχή κάλυψης του ασύρματου σήματος όσο και στο μικρότερο μέγεθος της υποδομής/συσκευής. Οι εγκαταστάσεις μικρών κυψελών καλύπτουν γενικά πολύ μικρότερες γεωγραφικές περιοχές – μετρούμενες σε εκατοντάδες μέτρα– από τους παραδοσιακούς πύργους εκπομπής (macrocell), που μπορούν να καλύψουν αρκετά χιλιόμετρα προς κάθε κατεύθυνση. Οι κεραιές είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που αναπτύσσονται σε εγκαταστάσεις macrocell και συχνά εγκαθίστανται πάνω σε κτίρια, στέγες και δομές δημόσιων δικαιωμάτων (ROW), συμπεριλαμβανομένων των πυλώνων του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του φωτισμού ή άλλων κατάλληλων επιφανειών.



Εικόνα 2.15: Αρχιτεκτονική Small cells (πηγή: <https://cbl.com/solutions-small-cell-backhaul>)

Ο εξοπλισμός εκπομπής που συνοδεύει την κεραιά μπορεί επίσης να είναι απαραίτητος και μπορεί να είναι αρκετά μικρός σε μέγεθος. Αυτός ο εξοπλισμός μπορεί να βρίσκεται στο ROW ή σε άλλη δημόσια ή ιδιωτική ιδιοκτησία. Αυτές οι διευκολύνσεις συμβάλλουν στη συμπλήρωση ή στην ενίσχυση της κάλυψης των πύργων εκπομπής και στην προσθήκη χωρητικότητας σε περιοχές με μεγάλη ζήτηση. Η υποδομή μικρών κυψελών χρησιμοποιείται συνήθως για την ελάφρυνση των περιορισμών της δυναμικότητας όταν συγκεντρώνονται πολλά άτομα σε ένα σημείο ή για την κάλυψη στοχευμένων περιοχών, συμπεριλαμβανομένων των δημόσιων

πλατειών και χώρων, των πεζόδρομων, των πάρκων, των κτιρίων γραφείων, των πανεπιστημίων ή των σταδίων. Με την αυξανόμενη χρήση ασύρματων συσκευών και δεδομένων, οι πόλεις αντιμετωπίζουν αυξημένη ζήτηση αξιόπιστων ασύρματων υπηρεσιών. Οι εγκαταστάσεις μικρών κυψελών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της χωρητικότητας του ευρυζωνικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας στις πόλεις. Αυτή η βελτιωμένη εξυπηρέτηση και ικανότητα έχει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της οικονομικής ανταγωνιστικότητας, της φήμης, καθώς και των περισσότερων ευκαιριών για την ανάπτυξη εφαρμογών έξυπνης πόλης και διαδικτύου. Συχνά, οι πάροχοι ασύρματων δικτύων θα θέλουν οι μικρές κυψέλες που αναπτύσσονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές να παρέχουν επαρκή χωρητικότητα σε σημεία με υψηλή ζήτηση και κάθε πάροχος θέλει να εγκατασταθεί η δική του εγκατάσταση για να καλύψει την ίδια πυκνή περιοχή. Έτσι, μπορεί να υπάρχουν αρκετές αιτήσεις για τον εντοπισμό τέτοιων εγκαταστάσεων στις ίδιες υποδομές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συστάδες μικρών κυψελών που υποβαθμίζουν την αισθητική της περιοχής όπου βρίσκονται.

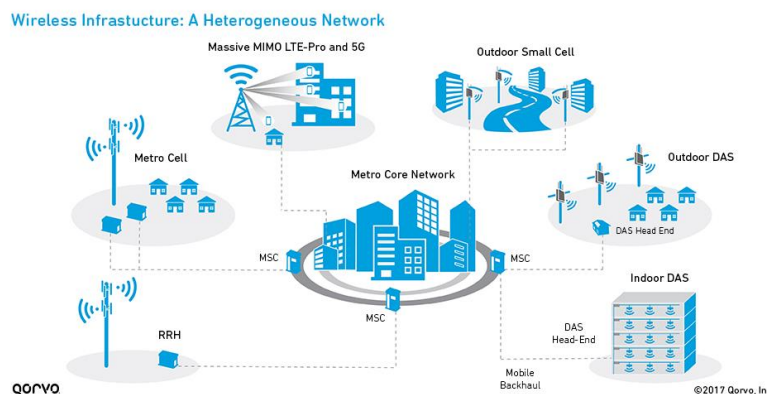
Η εγκατάσταση και λειτουργία εγκαταστάσεων μικρών κυψελών ενδέχεται να επηρεάσει την υπάρχουσα τεχνολογία, όπως τα σήματα ασύρματης επικοινωνίας και άλλες δημοτικές τεχνολογίες σε κοντινή απόσταση. Υπάρχει επίσης ο κίνδυνος να χαθεί ο εξοπλισμός εδάφους σε σχέση με κάποιες μικρές εγκαταστάσεις κυψελών που παρεμποδίζουν τα δικαιώματα των πολυσύχναστων πόλεων. Επιπλέον, οι πρόσφατες κρατικές και ομοσπονδιακές προσπάθειες για την επιτάχυνση της εγκατάστασης τέτοιων μικροεγκαταστάσεων έχουν επικεντρωθεί στο επίπεδο της τοπικής αυτοδιοίκησης για την επανεξέταση και τον έλεγχο των μικρών κυψελωτών εγκαταστάσεων ή για τη συλλογή δίκαιων ενοικίων για τη χρήση δημόσιας περιουσίας. Οι τοπικές αρχές μπορούν να χρεώνουν τους παρόχους ασύρματων υπηρεσιών για επεξεργασία εφαρμογών, πρόσβαση σε δικαιώματα πρόσβασης ή/και συνεχιζόμενες αμοιβές για πρόσβαση σε δημόσιο ακίνητο –όπως δημοτικά φώτα δρόμου ή φανάρια– είτε σύμφωνα με τοπικούς κώδικες, ως μέρος ενός μεγάλου κύριου συμβολαίου μίσθωσης ή άδειας εκμετάλλευσης με έναν πάροχο υπηρεσιών ή με βάση μια εφαρμογή [27].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να αναπτυχθούν μικρές κυψέλες για να επεκταθεί η χωρητικότητα δικτύου:

- **Συστήματα παθητικής κατανεμημένης κεραίας (DAS):** Γνωστό ως αρχική λύση μικροκυψελών, το DAS είναι μια λύση χειριστή, συχνότητας και πρωτοκόλλου δικτύου. Το DAS λειτουργεί με τη λήψη μιας τροφοδότησης από το macrocell και στη συνέχεια με τη διανομή του σε ίνες μέσα σε ένα κτίριο ή εκτός του χώρου. Ένας ειδικός πομπός βάσης συνδεδεμένος σε DAS εξασφαλίζει τόσο κάλυψη όσο και χωρητικότητα, βελτιώνοντας την ποιότητα των υπηρεσιών φωνής και δεδομένων. Εκτός από την ενεργοποίηση της κάλυψης σε περιοχές που δεν καλύπτονταν προηγουμένως, το DAS εξαλείφει επίσης την κυκλοφορία από το δίκτυο των πύργων εκπομπής σε επικαλυπτόμενες περιοχές. Είναι επίσης ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος διανομής ασύρματων συνδέσεων μέσα σε ένα μεγάλο κτίριο και εξάλειψης των νεκρών ζωνών.
- **Ενεργά συστήματα κατανεμημένων κεραιών (DAS):** Σε μεγάλες περιοχές πανεπιστημιούπολεων, εμπορικών κέντρων και αεροδρομίων, όπου το παθητική DAS έχει πρακτικούς περιορισμούς όσον αφορά την επεκτασιμότητα, μπορεί να εξεταστεί το ενδεχόμενο ενεργού DAS. Το ενεργό DAS είναι ένας οπτικός αναμεταδότης που μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα σε οπτικά, για ευρύτερη προσέγγιση. Στη συνέχεια, μεταφράζει τα οπτικά σήματα πίσω στα κύματα EMF με επιλεκτικό τρόπο. Ορισμένες νέες τεχνολογίες εκπομπής χαμηλής κατανάλωσης, όπως οι ενσωματωμένοι πομποί στους σταθμούς ή ο σταθμός μικρό-βάσης, δοκιμάζονται επίσης από τους χειριστές για τον καθορισμό της τοπικής χωρητικότητας και της κάλυψης.
- **Συγκεντρωμένα, ενσωματωμένα metrocells:** Αυτά είναι οι μίνι μικρό-κυψέλες, που μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα και οικονομικά αποδοτικότερα, για την ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου. Οι metrocells αντιμετωπίζουν όλα τα κοινά ζητήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη της τοποθέτησης πύργων εκπομπής σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, διευκολύνοντας τα ζητήματα χωροταξικού σχεδιασμού και απόκτησης χώρου. Μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν σε τμήματα δρόμων όπως σε στύλους φώτων και είναι αισθητικά ευχάριστα, ευέλικτα και επεκτάσιμα.
- **Κεραίες πολλαπλού σήματος και διαχωρισμός τομέων:** Όταν βρίσκονται σε περιοχές με υψηλή κυκλοφορία δεδομένων, οι τομείς δικτύου σε πύργους εκπομπής χρειάζονται έναν τρόπο αύξησης της χωρητικότητας, καλύτερη διείσδυση του σήματός τους στα κτήρια ή/και κάλυψη μεγαλύτερου υπαίθριου χώρου. Διαχωρίζοντας έναν τομέα σε δύο (διπλασιάζοντας την παραγωγική του

ικανότητα) χρησιμοποιώντας κεραίες πολλαπλού σήματος, απαιτείται μία μόνο κεραία για να δημιουργηθεί η διπλάσια χωρητικότητα.

Με αυτές τις διαφορετικές προσεγγίσεις είναι εύκολο να καταλάβουμε γιατί οι μικρές κυψέλες κερδίζουν μέσα από τις προκλήσεις απόκτησης του χώρου και την ανάπτυξη θέσεων υψηλής χρήσης, όπου η χωρητικότητα πρέπει να αυξηθεί επειγόντως. Μια ποικιλία προσεγγίσεων θα είναι ζωτικής σημασίας για τους φορείς εκμετάλλευσης ασύρματων δικτύων στον σημερινό κόσμο, όπου η ποιότητα των υπηρεσιών αποτελεί βασικό μοχλό της αφοσίωσης των πελατών (Pankaj,2014).



Εικόνα 2.16: Αρχιτεκτονικές cells (πηγή: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>)

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να δοθεί σήμα στις μικρές κυψέλες από ένα πύργο εκπομπής, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης μισθωμένης γραμμής χαλκού, ινών ή ασύρματων μικροκυμάτων. Καθεμία από αυτές τις μεθόδους έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι συνδέσεις ινών παρέχουν τις υψηλότερες ταχύτητες και χωρητικότητα, αλλά μπορεί να είναι δαπανηρές χωρίς μια ήδη υπάρχουσα υποδομή. Το DSL ή ο χαλκός παρέχουν περιορισμένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και απαιτούν επίσης τη χρήση προκαθορισμένων δικτύων. Το ασύρματο δίκτυο, από την άλλη πλευρά, απαιτεί οπτική επαφή.

### Απαιτήσεις

Για την υλοποίηση ενός δικτύου μικρών κυψελών ως οικονομικά αποδοτική επένδυση για τους παρόχους και τους πελάτες τους, πρέπει να συμμορφώνεται με ορισμένες απαιτήσεις.

- **Χαμηλό κόστος:** Παρέχεται κάλυψη σε λιγότερους συνδρομητές, συνεπώς το κόστος πρέπει να μειωθεί.
- **Εύκολο στη διαχείριση:** Ο τεράστιος αριθμός των μικρών κυψελών που αναπτύσσονται σημαίνει ότι απαιτείται ενοποιημένη διαχείριση.
- **Ελαφρύς σχεδιασμός:** Οι μικρές κυψέλες τοποθετούνται συχνά σε φώτα και πινακίδες δρόμου, έτσι ώστε να μην υπάρχουν περιοριστικές απαιτήσεις που ορίζονται από ιδιοκτήτες της τοποθεσίας (π.χ. ταράτσες, στύλοι δήμου κλπ.).
- **Υψηλή καιρική ασφάλεια και σχεδιασμός ασφαλούς επαφής:** Οι μικρές κυψέλες παρέχουν κάλυψη σε επίπεδο δρόμου και βρίσκονται σε άμεση γεινίαση με την ανθρώπινη δραστηριότητα.

#### Πλεονεκτήματα:

- Λύση για τη βελτίωση της κάλυψης σε μικρές περιοχές με χαμηλή ισχύ εξόδου.
- Αξιόπιστη και αποτελεσματική κάλυψη και χωρητικότητα.
- Πολύ μικρό αποτύπωμα στο χώρο.
- Χαμηλότερο συγκριτικό κόστος και μεγαλύτερη ευελιξία από σταθμούς βάσης/πύργους ή συστήματα κεραιών.

Δεδομένου ότι τα συστήματα DAS για μεγάλες εγκαταστάσεις και κτίρια αναπτύσσουν χωρητικότητα για 40 περίπου τομείς με εκατοντάδες ειδικές κεραίες, ένα σύστημα μικρών κυψελών θα μπορούσε εύκολα να προσθέσει 200 τομείς χωρητικότητας 3G/4G για το 25% του κόστους σε σύγκριση με το DAS, υπολογίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα. Όπως έγραψε σε ένα άρθρο του και ο Ronny Haraldsvik, πρώην SVP και ΚΟΑ της SpiderCloud Wireless. «Αυτό είναι πιο κοντά σε 50 έως 100 φορές διαφορετικό. Η επιχειρηματική περίπτωση DAS έχει νόημα για 1 έως 10 εκατομμύρια τετραγωνικά πόδια. Κάτω από ένα εκατομμύριο, η υπόθεση των επιχειρήσεων ευνοεί τα μικρά συστήματα κυψελών.»

#### Μειονεκτήματα

- Έλλειψη οργάνωσης σε διαφορετικά συστήματα και ομάδες.
- Αβέβαιος χρόνος εγκατάστασης λόγω της απόκτησης του χώρου και της τοποθέτησής τους.
- Το Backhaul εξακολουθεί να αποτελεί δαπανηρό και πολύπλοκο πρόβλημα για τους παρόχους.

- Το Crown Castle δήλωσε ότι χρειάζονται 18 έως 24 μήνες για την ανάπτυξη μικρών κυψελών για έναν πάροχο, με επιπλέον ενοικιαστές να παίρνουν 9 έως 18 μήνες, σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση του RCR Wireless News. Πολλά έργα που ξεκίνησαν κατά τη διάρκεια της αιχμής της αρχικής εκστρατείας για τοποθέτηση μικρών κυψελών μόλις τώρα εμφανίζονται και οι αριθμοί ανάπτυξης θα πρέπει να αυξηθούν από εδώ και στο εξής.
- Απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια που συχνά δεν είναι διαθέσιμη στο σημείο εγκατάστασης.
- Η εμβέλεια των μικρών κυψελών κυμαίνεται με μέγιστο από 10 έως 2 χιλιόμετρα (Tracy,2016).

#### Πρότυπο δρομολόγησης ACR στα δίκτυα μικρών κυψελών

Η κύρια ιδέα του πρωτοκόλλου είναι η χρήση κυψελών για την αναμετάδοση πακέτων εντοπισμού διαδρομής. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο ACR, ολόκληρη η περιοχή δρομολόγησης χωρίζεται σε τετράγωνα ίδιου μεγέθους, που ονομάζονται κύτταρα. Το πρωτόκολλο ACR απαιτεί δύο στρατηγικές δρομολόγησης: μία για πυκνά δίκτυα και μία για αραιά δίκτυα. Συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο ACR αποτελείται από τρία συστατικά: 1) τη δρομολόγηση κυψελοειδούς κυκλώματος (CR) για πυκνά δίκτυα, 2) τη δρομολόγηση μεγάλων κυψελών (LC) για αραιά δίκτυα και 3) ένα προσαρμοστικό σχήμα που ανιχνεύει μεταβολές της πυκνότητας κόμβου CR ή LC δρομολόγησης, με βάση την πυκνότητα των κόμβων. *Πρωτόκολλο δρομολόγησης κυψελοειδούς κυκλώματος για πυκνή δικτύωση*: Η δρομολόγηση κυτταρικού τύπου (CR) είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατά παραγγελία, βασισμένο στη δρομολόγηση πηγής. Χρησιμοποιείται για ένα δίκτυο με υψηλή πυκνότητα κόμβων. Σε ένα πυκνό δίκτυο, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κόμβων στην περιοχή δρομολόγησης και επομένως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κάθε κύτταρο να έχει τουλάχιστον έναν κόμβο, εάν το μέγεθος κυψέλης είναι κατάλληλα επιλεγμένο. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης CR σε πυκνά δίκτυα είναι επίσης ένα ενεργειακό πρωτόκολλο. Δηλαδή, μόνο οι κόμβοι με περισσότερη ενέργεια που απομένει σε ένα κύτταρο συμμετέχουν στη δρομολόγηση και την προώθηση των πακέτων, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου.

Λέμε ότι η πυκνότητα του κόμβου αλλάζει όταν συμβεί τουλάχιστον ένα από τα παρακάτω συμβάντα. (1) Ο αριθμός των ενεργών κόμβων στην περιοχή

δρομολόγησης αλλάξει. (2) Το μέγεθος της περιοχής δρομολόγησης αλλάξει. Για ολόκληρη την περιοχή δρομολόγησης, επιλέγεται ένας κόμβος ως Adaptive Head (AH), ο οποίος ανιχνεύει μια αλλαγή πυκνότητας κόμβου σε παγκόσμιο επίπεδο και καθορίζει εάν η στρατηγική δρομολόγησης πρέπει να αλλάξει. Ένα AH θα μπορούσε να είναι ένας συνήθης κόμβος σε ένα ομοιογενές MANET ή θα μπορούσε να είναι ένας ισχυρός κόμβος υποδομής σε ένα ετερογενές MANET. Μια AH προτιμάται να είναι ένας κόμβος με λιγότερη κινητικότητα (οι στατικοί κόμβοι είναι η καλύτερη επιλογή). Εάν δεν υπάρχει κανένας τρόπος να βρεθεί ένας σχετικά στατικός κόμβος ως AH, τότε το τρέχον AH θα μεταδίδει τη θέση του σε όλους τους άλλους κόμβους όταν το AH μετακινηθεί σε ένα νέο κελί. Έτσι, κάθε κόμβος γνωρίζει την τρέχουσα θέση του AH και μπορεί εύκολα να στείλει ένα μήνυμα στο AH. Αρχικά, ο AH ξέρει τους κόμβους και τα αναγνωριστικά τους στο δίκτυο. Ο AH και όλοι οι άλλοι κόμβοι γνωρίζουν το όριο της περιοχής δρομολόγησης. Όταν συμβεί οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα συμβάντα, αποστέλλεται μήνυμα AH για αλλαγή πυκνότητας [31].

## Relays

Οι πολύ υψηλοί ρυθμοί δεδομένων που προβλέπονται για ασύρματα συστήματα τέταρτης γενιάς (4G) σε μεγάλες περιοχές, δεν φαίνεται να είναι εφικτοί με τη συμβατική κυψελοειδή αρχιτεκτονική λόγω δύο βασικών λόγων. Πρώτον, οι ρυθμοί μετάδοσης που προβλέπονται για τα συστήματα 4G είναι δύο τάξεις μεγέθους υψηλότεροι από αυτούς των συστημάτων 3G. Δεύτερον, το φάσμα που απαιτείται για συστήματα 4G είναι σχεδόν βέβαιο ότι βρίσκεται πολύ πάνω από τη ζώνη των 2 GHz που χρησιμοποιούν τα συστήματα 3G. Η διάδοση του ραδιοσήματος σε αυτές τις ζώνες είναι σημαντικά πιο ευάλωτη σε συνθήκες μη οπτικής επαφής, που είναι ο τυπικός τρόπος λειτουργίας στις σημερινές αστικές κυψελοειδείς επικοινωνίες. Η λύση σε αυτά τα δύο προβλήματα είναι να αυξηθεί σημαντικά η πυκνότητα των σταθμών βάσης, με αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερο κόστος εγκατάστασης που είναι εφικτό μόνο αν ο αριθμός των συνδρομητών αυξηθεί επίσης με τον ίδιο ρυθμό. Αυτό φαίνεται απίθανο, καθώς η διείσδυση των κινητών τηλεφώνων είναι ήδη υψηλή στις ανεπτυγμένες χώρες. Από την άλλη, ο ίδιος αριθμός συνδρομητών έχει πολύ υψηλότερη ζήτηση σε ποσοστά μετάδοσης, φτάνοντας τον συνολικό ρυθμό απόδοσης ως τη συμφόρηση δικτύου, στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα. Σύμφωνα με την επιχειρησιακή υπόθεση ότι οι συνδρομητές δεν θα είναι πρόθυμοι να πληρώσουν το ίδιο ποσό ανά δυαδικό ψηφίο δεδομένων όπως για τα φωνητικά bits, η δραστική αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης δεν φαίνεται οικονομικά δικαιολογημένη και εφικτή. Είναι προφανές από την παραπάνω συζήτηση ότι απαιτούνται πιο θεμελιώδεις βελτιώσεις για τις πολύ φιλόδοξες απαιτήσεις διακίνησης και κάλυψης των μελλοντικών συστημάτων. Προς τούτο, εκτός από τις προηγμένες τεχνικές μετάδοσης και τις συνεργαζόμενες τεχνολογίες κεραιάς, απαιτούνται μερικές σημαντικές τροποποιήσεις στην ίδια την αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου, που θα επιτρέψει την αποτελεσματική διανομή και λήψη σημάτων προς και από τους ασύρματους χρήστες. Η ενσωμάτωση της δυνατότητας πολλαπλών συστημάτων σε συμβατικά ασύρματα δίκτυα είναι ίσως η πιο ελπιδοφόρα αρχιτεκτονική αναβάθμιση.

Η εφαρμογή δικτύωσης πολλαπλών δικτύων σε κυψελοειδή συστήματα ευρείας περιοχής έχει τα ακόλουθα οφέλη. Ενώ τα συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα θεωρούνται ότι έχουν κυψέλες εμβέλειας 2-5 km, τα τελευταία χρόνια υπήρξε αύξηση του ενδιαφέροντος για δίκτυα που βασίζονται σε υποδομές πολλαπλών σημείων επαφής,



τόσο στον εμπορικό όσο και στον ακαδημαϊκό χώρο, όπως τα δίκτυα mesh στο IEEE 802.16 και η επέκταση κάλυψης του HiperLAN2, μέσω αναμεταδόσεων ή συνεταιρισμών χρηστών πολλαπλών δικτύων. Επιπλέον, η αναμετάδοση παρουσιάζεται ως μέσο για τη μείωση του κόστους ανάπτυξης των υποδομών. Φαίνεται επίσης ότι μέσω της εκμετάλλευσης της χωρικής ποικιλομορφίας, η αναμετάδοση πολλαπλών σταθμών μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα σε κυψελοειδή δίκτυα.

Ο ιστός στον οποίο είναι τοποθετημένος ο αναμεταδότης δεν χρειάζεται να είναι τόσο υψηλός όσο για ένα πύργο εκπομπής, μειώνοντας τα λειτουργικά έξοδα όπως το κόστος μίσθωσης πύργου και συντήρησης για τον πάροχο υπηρεσιών. Οι αναμεταδότες δεν έχουν καλωδιακή σύνδεση με το δίκτυο ραχοκοκαλιάς. Αντ' αυτού, αποθηκεύουν τα δεδομένα που λαμβάνονται ασύρματα από το BS και προωθούνται στα τερματικά του χρήστη και αντιστρόφως. Έτσι, το κόστος του δικτύου ραχοκοκαλιάς που χρησιμεύει ως διασύνδεση μεταξύ του BS και του ενσύρματου δικτύου μπορεί να εξαλειφθεί για ένα αναμεταδότη. Εάν η πυκνότητα των αναμεταδοτών σε μια κυψέλη είναι μέτρια υψηλή, τα περισσότερα τερματικά είναι σημαντικά πιο κοντά σε ένα ή περισσότερους αναμεταδότες από ό,τι στον BS. Αυτό σημαίνει ότι η απώλεια διάδοσης από το BS σε ένα τέτοιο τερματικό είναι μεγαλύτερη από ό,τι από ένα κοντινό αναμεταδότη προς το τερματικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στις συνδέσεις μεταξύ των αναμεταδοτών και των τερματικών, με αποτέλεσμα την πιθανή επίλυση του προβλήματος κάλυψης για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε μεγαλύτερες κυψέλες. Δεδομένου ότι είναι δυνατή η ταυτόχρονη μετάδοση τόσο από το BS όσο και από τους αναμεταδότες, η αύξηση της παραγωγικής ικανότητας μπορεί επίσης να επιτευχθεί είτε αξιοποιώντας την αποδοτικότητα επαναχρησιμοποίησης είτε τη χωρική ποικιλομορφία. Οι συνδέσεις από τον αναμεταδότη προς τον χρήστη μπορεί να χρησιμοποιούν ένα διαφορετικό (χωρίς άδεια) φάσμα (π.χ., IEEE 802.11x), από ό,τι οι συνδέσεις BS προς τον χρήστη (ορισμένο φάσμα), αποδίδοντας σημαντικά κέρδη από εξισορρόπηση φορτίου μέσω αναμεταδοτών.

Σε σύγκριση με τα δίκτυα ad hoc, τα δίκτυα που χρησιμοποιούν αναμετάδοση μέσω της σταθερής υποδομής δεν χρειάζονται πολύπλοκα καταναμημένους αλγόριθμους δρομολόγησης, διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία να μετακινούνται οι αναμεταδότες, καθώς αλλάζουν τα πρότυπα δρομολόγησης με την πάροδο του

χρόνου. Αξίζει να δοθεί έμφαση στη βασική διαφορά μεταξύ των θεμελιωδών στόχων των συμβατικών ad hoc δικτύων και των δικτύων που περιγράφηκαν. Ενώ ο καθοριστικός στόχος των ad hoc δικτύων είναι η ικανότητα να λειτουργούν χωρίς υποδομή, ο στόχος στους τελευταίους τύπους είναι η παροχή πολύ υψηλής κάλυψης και απόδοσης δεδομένων. Γενικά, ο BS χρησιμοποιείται για παραδοσιακά κυψελοειδή συστήματα, ενώ ο όρος σημείο πρόσβασης (AP) χρησιμοποιείται για συστήματα ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN). Και οι δύο έχουν κοινό το γεγονός ότι συνδέονται άμεσα με το δίκτυο κορμού τους ενσύρματα ή και ασύρματα, το οποίο τους διακρίνει από τους σταθμούς αναμετάδοσης (RS).

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μελλοντικές διεπαφές στον αέρα θα μπορούσαν να θολώσουν τη διάκριση μεταξύ BS και AP, και τελικά να οδηγήσουν στη σύγκλιση τους. Ακόμη, το ασύρματο σύστημα πολυμέσων (WMS) είναι ένα παράδειγμα μιας νέας αρχιτεκτονικής δικτύου που βασίζεται σε σταθερούς αναμεταδότες.

Ενσωματωμένοι αμφίδρομοι ενισχυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε συστήματα 2G και 3G. Ωστόσο, αυτοί οι αναλογικοί αναμεταδότες αυξάνουν το επίπεδο θορύβου και υποφέρουν από τον κίνδυνο αστάθειας λόγω του σταθερού κέρδους τους, γεγονός που έχει περιορίσει την εφαρμογή τους σε συγκεκριμένα σενάρια. Τα περισσότερα υπάρχοντα και τυποποιημένα συστήματα σχεδιάστηκαν για αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ κεντρικού BS και των κινητών σταθμών που συνδέονται άμεσα με αυτά. Η πρόσθετη κυκλοφορία δεδομένων μεταξύ ενός κινητού τερματικού και ενός αναμεταδότη που ενδιάμεσα εισάγεται σε μια σύνδεση μεταξύ του κινητού τερματικού και του BS απαιτεί πρόσθετους ραδιοφωνικούς πόρους που πρέπει να διανεμηθούν, όντως ένας από τους παράγοντες που μέχρι τώρα εμποδίζουν την ανάπτυξη έξυπνων αναμεταδοτών.

Τα συστήματα βασισμένα σε χρονική κατανομή πολλαπλών προσβάσεων (TDMA) είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την εισαγωγή αναμετάδοσης, καθώς αυτό επιτρέπει την εύκολη κατανομή πόρων στους συνδέσμους κινητών προς αναμετάδοση. Το πρώτο σύστημα που βασίζεται σε πολυπλεξία πολλαπλής χρονικής κατανομής (TDM) και σε αναμεταδότες που συνδέουν κινητά με το σταθερό δίκτυο προτάθηκε το 1985. Μια άλλη μέθοδος που προτείνεται για συστήματα F/TDMA είναι η επαναχρησιμοποίηση ενός καναλιού συχνότητας από γειτονικές κυψέλες. Το 1998, το πρότυπο του

ETSI/DECT ήταν το πρώτο που χρησιμοποίησε σταθεροποιημένοι αναμεταδότες (ασύρματα BS) για ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούν κανάλια TDM για επικοινωνίες φωνής και δεδομένων. Η άνω και η κάτω ζεύξη διαχωρίζονται με τη χρήση διπλής διαίρεσης συχνότητας (FDD), όπως γίνεται στο IS-95 και στο επίγειο ραδιοεπικοινωνικό σύστημα UTTS (Universal Mobile Telecommunications System – UMTS και UDRA). Ομοίως, χρησιμοποιεί σταθμούς αναμετάδοσης για την εκτροπή της κυκλοφορίας δικτύου από ενδεχομένως συμφωνημένες περιοχές ενός κυψελοειδούς συστήματος σε κυψέλες με χαμηλότερο φορτίο κυκλοφορίας. Αυτοί οι σταθμοί αναμετάδοσης χρησιμοποιούν διαφορετική διεπαφή αέρα για επικοινωνία μεταξύ τους και με κινητούς σταθμούς, οι οποίοι θα μπορούσαν, για παράδειγμα, να παρέχονται από ένα πρότυπο WLAN.

Το ευρυζωνικό δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (BRAN) ETSI, το LAN υψηλής απόδοσης (HiperLAN1) και το IEEE 802.11x περιέχουν τα στοιχεία για τη λειτουργία δικτύων ad hoc. Το ETSI HiperLAN2, στην οικιακή επέκταση, περιέχει έναν ad hoc τρόπο λειτουργίας των συστημάτων που βασίζονται στο TDMA και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την εισαγωγή αναμετάδοσης δεδομένου ότι αυτό το σχήμα επιτρέπει την εύκολη κατανομή πόρων στους συνδέσμους κινητών προς αναμετάδοση. Το πρώτο σύστημα που βασίζεται σε Time Division Multiplex (TDM) και αναμεταδότες που συνδέουν κινητά στο σταθερό δίκτυο προτάθηκε το 1985. Η λειτουργία του, επιτρέπει στους κόμβους να συμφωνήσουν σε έναν κεντρικό ελεγκτή (CC), ο οποίος να αναλάβει το ρόλο ενός AP σε ένα σύμπλεγμα κόμβων, αλλά μέχρι στιγμής δεν έχουν καθοριστεί λειτουργίες πολλαπλών σταθμών σε κανένα πρότυπο WLAN. Σε βασική λειτουργία HiperLAN2 (χρησιμοποιώντας ένα AP) έχει αποδειχθεί ότι η λειτουργία πολλαπλών συναλλαγών μέσω της προώθησης κινητών τερματικών είναι εύκολο να εκτελεστεί στο πλαίσιο του προτύπου. Στα συστήματα ενίσχυσης και προώθησης, οι αναμεταδότες ουσιαστικά δρουν ως αναλογικοί αναμεταδότες, αυξάνοντας έτσι το επίπεδο θορύβου των συστημάτων. Εκτός εάν δηλώνεται διαφορετικά, θεωρούμε συστήματα εμπρόσθιας αποκωδικοποίησης, καθώς η πλειονότητα των προτεινόμενων εννοιών είναι αυτής της κλάσης και θεωρούνται γενικά πιο βιώσιμα σε σχέση με την υλοποίηση.

### Συνεργασιακή αναμετάδοση και συστάδες εικονικών κεραιών

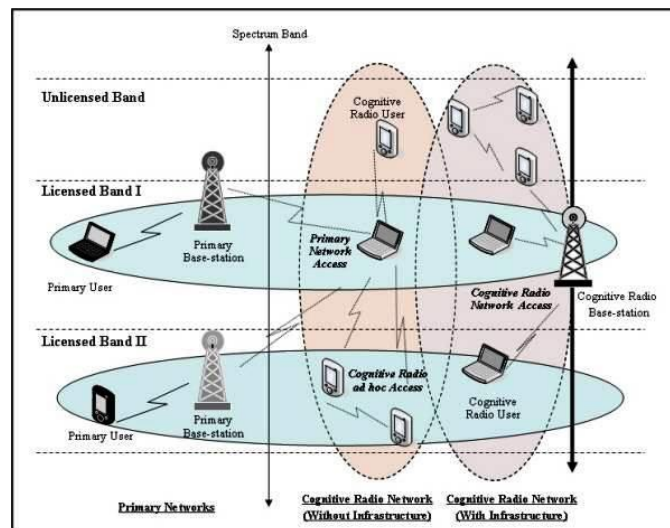
Κοινή σε όλες τις τεχνικές αναμετάδοσης που συζητήθηκαν μέχρι τώρα είναι η λειτουργία αποθήκευσης και προώθησης των κόμβων σε μια αλυσίδα αναμετάδοσης. Κάθε δέκτης κατά μήκος αυτής της αλυσίδας εκμεταλλεύεται μόνο το αντίγραφο των πληροφοριών που έχουν αποσταλεί από τον αντίστοιχο πομπό του, ενώ απορρίπτει εκπομπές από άλλους πομπούς στην αλυσίδα. Η βασική ιδέα της συνεργατικής αναμετάδοσης είναι να προχωρήσει ένα βήμα περαιτέρω αξιοποιώντας δύο βασικά χαρακτηριστικά του ασύρματου μέσου: τη φύση της μετάδοσης και την ικανότητά του να επιτύχει ποικιλομορφία μέσω ανεξάρτητων καναλιών. Ενώ η φύση της εκπομπής συχνά θεωρείται μειονέκτημα καθώς οδηγεί σε αμοιβαία παρεμβολή σε ασύρματο δίκτυο, οι έννοιες που συζητούνται σε αυτήν την υποενότητα εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι ένα σήμα, μόλις μεταδοθεί, μπορεί να ληφθεί από πολλούς τερματικούς σταθμούς. Γενικά, τα συστήματα συνεργατικής αναμετάδοσης έχουν έναν κόμβο πηγής που διανέμει ένα μήνυμα σε έναν αριθμό συνεργατικών (δηλαδή βοηθητικών) αναμεταδοτών. Ο κόμβος προορισμού συνδυάζει τα σήματα που λαμβάνονται από τους αναμεταδότες, λαμβάνοντας επίσης υπόψη το αρχικό σήμα της πηγής. Με την πραγματοποίηση αυτού του συνδυασμού, η εγγενής ποικιλία του καναλιού αναμετάδοσης εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά. Οι πιο προηγμένες έννοιες περιλαμβάνουν επιπλέον διαδοχική ακύρωση παρεμβολών για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, αυτά τα σενάρια αναμετάδοσης μπορούν να θεωρηθούν ως εικονικές συστοιχίες κεραιών: κάθε αναμεταδότης γίνεται μέρος μιας μεγαλύτερης κατανεμημένης συστοιχίας. Αυτή η κατανεμημένη φύση οδηγεί σε μια σειρά από νέες προκλήσεις, μεταξύ των οποίων ο συγχρονισμός, η διαθεσιμότητα πληροφοριών κατάστασης καναλιών και η κατάλληλη συσχέτιση. Όπως τα συμβατικά συστήματα μετεγκατάστασης, τα συστήματα συνεταιρισμών επωφελούνται από την εξοικονόμηση απώλειας διαδρομής. Επιπλέον, μπορούν να αναμένονται τα εξής κέρδη:

- Κέρδος ισχύος λόγω του γεγονότος ότι κάθε ένας από τους αναμεταδότες μπορεί να προσθέσει επιπλέον ισχύ εκπομπής που συνδυάζεται στον ακροδέκτη προορισμού.
- Κέρδος Macrodiversity, που επιτρέπει την καταπολέμηση της σκίασης
- Κέρδος ποικιλομορφίας παρουσία εξασθένισης

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η υλοποίηση πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO), μπορεί να οδηγήσει σε προηγμένα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων, με υψηλή φασματική απόδοση [26].

## Cognitive radio

Το νοητικό σύστημα εκπομπής (cognitive radio, CR) είναι η τεχνολογία ενεργοποίησης για την υποστήριξη της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα: η πολιτική που αντιμετωπίζει το πρόβλημα της έλλειψης φάσματος που παρουσιάζεται σε πολλές χώρες. Έτσι, η CR θεωρείται ευρέως ως μία από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες για τις μελλοντικές ασύρματες επικοινωνίες. Το να γίνουν νοητικά τα ραδιοκύματα και τα ασύρματα δίκτυα, δεν είναι καθόλου απλό έργο και απαιτεί συνεργατική προσπάθεια από διάφορες ερευνητικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της θεωρίας των επικοινωνιών, της μηχανικής δικτύωσης, της επεξεργασίας σήματος, της θεωρίας παιγνίων, του σχεδιασμού κοινού λογισμικού, του υλικού τομέα της κεραίας αλλά ακόμη και του σχεδιασμού ραδιοσυχνότητων.



Εικόνα 2.17: Αρχιτεκτονική Cognitive Radio (πηγή: <http://bwn.ece.gatech.edu/CR/projectdescription.html>)

Το ραδιοφάσμα, το οποίο απαιτείται για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, είναι ένας φυσικά περιορισμένος πόρος. Για την υποστήριξη διαφόρων ασύρματων εφαρμογών και υπηρεσιών χωρίς παρεμβολές, η πολιτική πρόσβασης στο σταθερό φάσμα (FSA) υιοθετήθηκε παραδοσιακά από ρυθμιστές φάσματος, οι οποίοι εκχωρούν κάθε κομμάτι φάσματος με συγκεκριμένο εύρος ζώνης σε έναν ή περισσότερους αποκλειστικούς χρήστες. Με αυτόν τον τρόπο, μόνο οι εκχωρημένοι (αδειοδοτημένοι) χρήστες έχουν το δικαίωμα να εκμεταλλευτούν το εκχωρημένο φάσμα και άλλοι χρήστες δεν επιτρέπεται να το χρησιμοποιούν, ανεξάρτητα από το αν οι χρήστες με άδεια χρήσης το χρησιμοποιούν ή όχι. Με τον πολλαπλασιασμό των ασύρματων υπηρεσιών τις τελευταίες δεκαετίες, σε πολλές χώρες, το μεγαλύτερο

μέρος του διαθέσιμου φάσματος έχει διατεθεί πλήρως, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα το πρόβλημα της ανεπάρκειας του φάσματος. Για να διατηρηθεί η βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας ασύρματων επικοινωνιών, θα πρέπει να αναπτυχθούν καινοτόμες λύσεις για τη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης του ραδιοφάσματος.

Η δυναμική πρόσβαση στο ραδιοφάσμα (DSA) έχει προταθεί ως εναλλακτική πολιτική που επιτρέπει την αποτελεσματικότερη χρήση του ραδιοφάσματος. Στο DSA, ένα κομμάτι φάσματος μπορεί να διανεμηθεί σε έναν ή περισσότερους χρήστες, οι οποίοι ονομάζονται πρωτεύοντες χρήστες (PU). Ωστόσο, η χρήση αυτού του φάσματος δεν παρέχεται αποκλειστικά στους εν λόγω χρήστες, αν και έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα στη χρήση. Άλλοι χρήστες, οι οποίοι αναφέρονται ως δευτερεύοντες χρήστες (SU), μπορούν επίσης να έχουν πρόσβαση στο καταναμημένο φάσμα, εφόσον οι PU δεν το χρησιμοποιούν προσωρινά ή μπορούν να μοιράζονται το φάσμα με τους PU, εφόσον οι PU μπορούν να προστατευθούν σωστά. Με αυτόν τον τρόπο, το ραδιοφάσμα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί με ευκαιριακό τρόπο ή να μοιράζεται όλη την ώρα. Επομένως, η αποτελεσματικότητα της χρήσης φάσματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Για να υποστηρίξουμε το DSA, οι SU πρέπει να καταγράψουν το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων και ένας SU με μια τέτοια ικανότητα ονομάζεται επίσης γνωστικός σταθμός (cognitive radio, CR). Υπάρχουν διάφοροι τύποι γνωστικών δυνατοτήτων με τους οποίους μπορεί να εξοπλιστεί ένα σύστημα με CR.

#### Τεχνικές αναγνώρισης φάσματος

Όπως προαναφέρθηκε, ένα κομμάτι φάσματος είναι μια ζώνη συχνοτήτων που έχει αποδοθεί στους PU αλλά δεν χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένο χρόνο και τοποθεσία. Σε μερικά τμήματα του φάσματος όπως η ζώνη τηλεόρασης, το τηλεοπτικό πρόγραμμα μπορεί να είναι προκαθορισμένο σε ορισμένες περιοχές. Έτσι, τέτοιες πληροφορίες φάσματος μπορούν να μεταδοθούν στους SU χρησιμοποιώντας λύσεις βάσης δεδομένων γεωλογικής κατανομής. Όταν αυτές οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες στους SU, η αναγνώριση του φάσματος επιτρέπει στους χρήστες CR να αναγνωρίζουν τα κομμάτια του φάσματος, προστατεύοντας έτσι τους PU. Επομένως, η αναγνώριση του φάσματος θεωρείται ένα από τα κρίσιμα στοιχεία του σχεδιασμού CR. Ένα ζεύγος χρηστών CR (CR Tx και CR Rx) προτίθεται να έχει πρόσβαση στα

κομμάτια φάσματος για δευτερεύουσα επικοινωνία. Για να διασφαλιστεί η προστασία των PU, η CR Tx πρέπει να πραγματοποιήσει ανίχνευση φάσματος για να βρει κομμάτια φάσματος. Συγκεκριμένα, η CR Tx απαιτείται να ανιχνεύσει εάν υπάρχει ενεργός πρωτογενής Rx μέσα στην κάλυψη του CR Tx. Αν όχι, το CR Tx μπορεί να μεταδώσει με ασφάλεια στην CR Rx χρησιμοποιώντας το αναγνωρισμένο κομμάτι φάσματος. Διαφορετικά, οι χρήστες CR δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούν τη ζώνη. Επομένως, η ανίχνευση των κοντινών πρωτεύων Rx μπορεί να εντοπίσει άμεσα το κομμάτι φάσματος, η οποία αποκαλείται άμεση αναγνώριση φάσματος. Είναι γνωστό ότι η ανίχνευση ενός Rx είναι μια δύσκολη εργασία, επειδή το Rx συνήθως δεν μεταδίδει σήματα όταν λειτουργεί. Έτσι, τα περισσότερα από τα υπάρχοντα συστήματα ανίχνευσης φάσματος αναγνωρίζουν τα κομμάτια του φάσματος ανιχνεύοντας τα πρωτεύοντα Tx. Επομένως, η έμμεση ανίχνευση φάσματος χρειάζεται να ανιχνεύσει πολύ αδύναμα πρωτεύοντα σήματα, γεγονός που καθιστά την αίσθηση του φάσματος πιο δύσκολη. Επιπλέον, όταν ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) του πρωτεύοντος σήματος που μετράται στο CR Tx είναι αρκετά χαμηλός, π.χ., κάτω από το όριο του SNR, είναι αδύνατο για το CR Tx να ανιχνεύσει το πρωτεύον Tx, ακόμη και όταν χρησιμοποιείται αριθμός άπειρων δειγμάτων των πρωτογενών σημάτων.

### 1. Άμεση ανίχνευση φάσματος

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ανίχνευσης φάσματος είναι η άμεση ανίχνευση του πρωτογενούς Rx, επειδή είναι το Rx ενός συστήματος PU που πρέπει να προστατευθεί. Γενικά, τα συστήματα PU μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες δύο κατηγορίες: συστήματα επικοινωνίας μονής κατεύθυνσης και αμφίδρομα συστήματα επικοινωνίας. Τα συστήματα επικοινωνίας μονής κατεύθυνσης έχουν μόνο μία επικοινωνία κατεύθυνσης από την κύρια Tx στην κύρια Rx, όπως οι τηλεοπτικές και ραδιοφωνικές εκπομπές. Ο μόνος τρόπος ανίχνευσης αυτού του είδους των Rx είναι να ανιχνευτούν τα σήματα διαρροής από τα ενεργά Rx. Τα αμφίδρομα συστήματα επικοινωνίας έχουν αμφίδρομες επικοινωνίες και υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ του Tx και του Rx, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση του φάσματος.



## 2. Έμμεση ανίχνευση φάσματος

Στην πρωτογενή ανίχνευση Tx, η έμμεση ανίχνευση φάσματος ανιχνεύει την παρουσία ή την απουσία πρωτογενών σημάτων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως πρόβλημα δοκιμής δυαδικών υποθέσεων. Σημειώστε πως το σήμα που προέρχεται από ένα πρωτεύον Tx και λαμβάνεται στο CR Rx ως. Σύμφωνα με το επίπεδο πληροφοριών των πρωτογενών σημάτων που είναι γνωστά στους χρήστες CR, αυτοί μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικά είδη συστημάτων ανίχνευσης για την ανίχνευση φάσματος. Αυτά είναι: (1) Ανίχνευση αντιστοίχου φίλτρου, (2) ED, (3) Κυκλοστατική ανίχνευση, (4) CBD και (5) Ανίχνευση φάσματος χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες.

## 3. Συνεργατική ανίχνευση φάσματος

Όπως προαναφέρθηκε, η ικανότητα ανίχνευσης φάσματος είναι κρίσιμη για την ενεργοποίηση των χαρακτηριστικών CR και την ενίσχυση της χρήσης του φάσματος. Οι τοπικές τεχνικές ανίχνευσης φάσματος δεν εγγυώνται πάντοτε ικανοποιητικές επιδόσεις, λόγω της αβεβαιότητας του θορύβου και της εξασθένησης του καναλιού. Για παράδειγμα, ένας χρήστης CR δεν μπορεί να ανιχνεύσει το σήμα από ένα πρωτεύον Tx πίσω από ένα υψηλό κτίριο και μπορεί να έχει πρόσβαση στο κανάλι που έχει λάβει άδεια και να κάνει έτσι παρεμβολές στις πρωτεύουσες Rx. Μέσω της συνεργασίας πολλαπλών χρηστών στην ανίχνευση φάσματος, η πιθανότητα σφάλματος ανίχνευσης μειώνεται λόγω της εισαγόμενης χωρικής ποικιλομορφίας και ο απαιτούμενος χρόνος ανίχνευσης σε κάθε μεμονωμένο χρήστη CR μπορεί επίσης να μειωθεί. Σε συνεταιριστική ανίχνευση φάσματος, οι χρήστες CR στέλνουν πρώτα τα ακατέργαστα δεδομένα που συλλέγουν σε ένα συνδυασμό χρήστη ή κέντρο σύντηξης. Εναλλακτικά, κάθε χρήστης μπορεί να εκτελεί ανεξάρτητα την τοπική ανίχνευση φάσματος και στη συνέχεια να αναφέρει είτε μια δυαδική απόφαση είτε στατιστικές δοκιμής σε έναν συνδυασμό χρηστών. Τέλος, ο συνδυασμός χρήστη λαμβάνει μια απόφαση σχετικά με την παρουσία ή την απουσία του σήματος με βάση τις πληροφορίες που λαμβάνει.

## Νοητική ανίχνευση φάσματος

Μέχρι στιγμής, οι τεχνικές ανίχνευσης φάσματος για την αναγνώριση των κομματιών φάσματος έχουν αναθεωρηθεί από την προοπτική επεξεργασίας σημάτων. Με βάση

τα αποτελέσματα της ανίχνευσης, οι χρήστες CR μπορούν να εκτελέσουν γνωστική πρόσβαση φάσματος μέσω του μοντέλου OSA. Εναλλακτικά, εάν το CR Tx έχει αποκτήσει τις πληροφορίες κατάστασης καναλιού που εμπλέκονται για την προστασία του πρωτογενούς Rx, το μοντέλο CSA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την γνωστική πρόσβαση στο φάσμα.

### Γνωσιακά ασύρματα δίκτυα

Όπως προαναφέρθηκε, οι χρήστες CR μπορούν να αναγνωρίσουν τα κομμάτια του φάσματος και να δημιουργήσουν ευκαιριακές επικοινωνιακές συνδέσεις σε δευτερεύουσα βάση. Ένα CRN (cognitive radio network – γνωσιακό ασύρματο δίκτυο) αποτελείται από πολλούς χρήστες CR και κάθε χρήστης CR μπορεί να επιθυμεί να έχει πρόσβαση στην αναγνωρισμένη δυνατότητα ελεύθερου ραδιοφάσματος. Ένα από τα κρίσιμα ζητήματα για το σχεδιασμό CRN είναι ο συντονισμός των μεταδόσεων κάθε χρήστη CR με βάση τα καθορισμένα κομμάτια φάσματος, αποφεύγοντας παράλληλα την παρεμβολή στους PU ή στο PN. Γενικά, τα CRN μπορούν να ταξινομηθούν ως κεντρικά ή ad hoc δίκτυα και οι αρχιτεκτονικές CRN πρέπει να υποστηρίζουν τους μηχανισμούς για τη λειτουργία CR και τη συνύπαρξη του πρωτογενούς και δευτερεύοντος δικτύου. Σε ένα κεντρικό CRN, μια κεντρική μονάδα, όπως ένα BS σε κυψελοειδή δίκτυα, συντονίζει τις λειτουργίες αίσθησης φάσματος και πρόσβασης φάσματος μεταξύ των χρηστών CR. Σε αυτή την περίπτωση, ολόκληρο το συγκεντρωτικό CRN μπορεί να αντιμετωπιστεί ως χρήστης super-CR, αλλά σε ένα λεπτομερές επίπεδο, διαφορετικοί χρήστες ενδέχεται να υποχρεωθούν να εκτελούν διαφορετικά καθήκοντα. Έτσι, κάθε χρήστης CR μπορεί να έχει διαφορετικές γνωστικές ικανότητες. Σε ad hoc CRN, δεν υπάρχει κεντρική μονάδα για το συντονισμό των χρηστών CR. Έτσι, κάθε χρήστης CR πρέπει να έχει ένα ορισμένο επίπεδο CR ικανότητας για να υποστηρίζει τις επικοινωνίες του με άλλους χρήστες.

### Μοντέλα CRN

Υπάρχουν διαφορετικά επιχειρησιακά μοντέλα για CRN. Ένα μοντέλο είναι ότι όλοι οι κόμβοι CR έχουν το ίδιο επίπεδο γνωσιακής ικανότητας και εκτελούν το ίδιο σύνολο πρωτοκόλλων δικτύωσης. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται στα ασύρματα περιφερειακά δίκτυα IEEE 802.22, όπου κάθε κυψέλη αντιμετωπίζεται ως κεντρικός CRN, ο οποίος καλείται να πραγματοποιήσει ανάλυση φάσματος στις ζώνες. Ένα

άλλο μοντέλο είναι ότι το CRN περιέχει μια συλλογή ετερογενών ασύρματων δικτύων, στα οποία οι κόμβοι CR υποστηρίζουν τη συνύπαρξη και διευκολύνουν την αποδοτική εκμετάλλευση ετερογενών δικτύων. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε στο IEEE P1900.4 και στο ETSI RRS.

### Τομογραφία CRN

Κατά τον σχεδιασμό των CRN, εκτός από την ανίχνευση της παρουσίας των PU, μερικές φορές οι κόμβοι CR πρέπει επίσης να αντιληφθούν τα μοντέλα κυκλοφορίας των PN και των συνυπαρχόντων δικτύων. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως τομογραφία CRN. Τα μοντέλα κυκλοφορίας των PN και των συνυπαρχόντων δικτύων είναι σημαντικά για τον σχεδιασμό δρομολόγησης και την κατανόηση της χρήσης του δικτύου σε πακέτο. Η τομογραφία CRN αποκτά τις παραμέτρους και τα πρότυπα κυκλοφορίας που απαιτούνται για τις λειτουργίες CRN μέσω της παθητικής παρακολούθησης και της ενεργής ανίχνευσης των συνυπαρχόντων δικτύων και χρησιμοποιώντας τεχνικές στατιστικής μέτρησης, επεξεργασίας και εξαγωγής.

### Δρομολόγηση CRN

Μέχρι στιγμής, έχουμε επικεντρωθεί στην παροχή ενός πακέτου από έναν κόμβο CR στον άμεσο γειτονικό του κόμβο. Η ερευνητική κοινότητα έχει επίσης εξετάσει τη γενική κατάσταση, όπου η επικοινωνία πολλαπλών σταθμών ή αναμετάδοσης είναι ενεργοποιημένη στο πλαίσιο της CR. Αυτή η περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα γνωστικό και συνεργατικό ασύρματο δίκτυο που δημιουργεί μια νέα διάσταση στις προκλήσεις του σχεδιασμού. Ο σύνδεσμος CR σε CRN μπορεί να χαρακτηριστεί ως μοντέλο αλυσίδας Markov. Το μονοκατευθυντικό χαρακτηριστικό των συνδέσεων CR προέρχεται κυρίως από τους ακόλουθους δύο παράγοντες: (1) τη σύντομη διαθεσιμότητα σε χρονική διάρκεια (ευκαιριακό χρονικό παράθυρο) σε οποιονδήποτε συγκεκριμένο ευκαιριακό CR σύνδεσμο και (2) μια λειτουργία ανώτερου στρώματος δικτύου.

### Δρομολόγηση βασισμένη στο φάσμα συχνοτήτων

Υπάρχουν δύο θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη δρομολόγηση αυτού του τύπου. Το πρώτο ζήτημα είναι ότι οι αλγόριθμοι δρομολόγησης και τα πρωτόκολλα πρέπει να γνωρίζουν τη δυναμικότητα φάσματος και να προσαρμόζουν τις λειτουργίες τους σε ένα τέτοιο μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Δεύτερον, οι αλγόριθμοι

δρομολόγησης πρέπει να αλληλεπιδρούν με τις ρουτίνες δυναμικής κατανομής φάσματος για να επιλέξουν τις διαδρομές δρομολόγησης, μέσω των οποίων ελαχιστοποιείται η παραγόμενη παρεμβολή. Αυτή η προσέγγιση σχετίζεται με το πρόβλημα κατανομής συχνотήτων, το οποίο επίσης λαμβάνεται υπόψη στο πλαίσιο δυναμικών βιομηχανικών, επιστημονικών και ιατρικών λειτουργιών ζώνης. Ωστόσο, η χρήση της δυναμικής κατανομής φάσματος αυξάνει τους βαθμούς ελευθερίας και την ανάγκη για γρήγορη προσαρμογή.

#### Στατιστικός έλεγχος ποιότητας υπηρεσιών

Εκτός από τη δρομολόγηση, ένα επιτυχημένο CRN απαιτεί έλεγχο QoS, έλεγχο σφαλμάτων, έλεγχο συμφόρησης και έλεγχο τοπολογίας. Για να χειριστούμε αυτούς τους μηχανισμούς έναντι των CRN που συνίστανται σε ευκαιριακές συνδέσεις, ο “στατιστικός έλεγχος” μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει το σκοπό μας. Με τα στατιστικά στοιχεία της διαθεσιμότητας κόμβου-κόμβου, ο στατιστικός έλεγχος QoS και ο έλεγχος της καθυστέρησης αποτελούν πρακτικές εναλλακτικές λύσεις για υπηρεσίες από άκρο σε άκρο, σε λειτουργίες CRN. Για να συναγάγουμε μια τέτοια προηγμένη γνώση ή μια εκτίμηση της διαθεσιμότητας κόμβου-κόμβου, μπορούμε να παρατηρήσουμε το ιστορικό και τα στατιστικά στοιχεία της επιτυχημένης μεταφοράς πακέτων μέσω μιας συγκεκριμένης διαδρομής συνεργατικής αναμετάδοσης. Επειδή πρόκειται για μεταδόσεις πακέτων σε πολλαπλούς συνδέσμους, μπορεί να εφαρμοστεί ενεργή τομογραφία CRN σε επίπεδο δικτύου με βάση τα πρότυπα κυκλοφορίας του δικτύου.

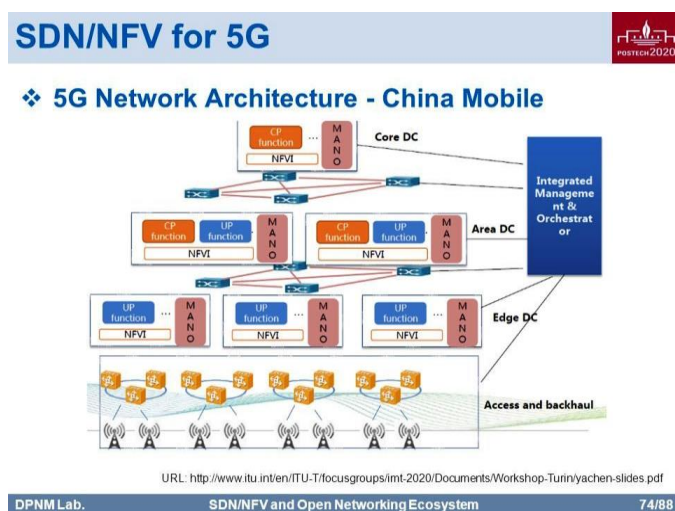
#### Έλεγχος σφαλμάτων

Το ARQ σε επίπεδο συνδέσμου είναι δύσκολο να εφαρμοστεί μέσω μιας ευκαιριακής σύνδεσης σε CRN. Η κατασκευή ενός υβριδικού αιτήματος αυτόματης επανάληψης (HARQ) από άκρο σε άκρο, συνδυάζοντας πληροφορίες από πολλαπλές διαδρομές υποδοχής στον προορισμό, μπορεί να είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση ως γενίκευση των μακροσκοπικών συνεργατικών επικοινωνιών. Στα CRN, ωστόσο, υπάρχουν αρκετοί μονοκατευθυντικοί σύνδεσμοι λόγω αποφυγής παρεμβολών με τις PU. Το HARQ επιπέδου σύνδεσης που βασίζεται στα κανάλια ανατροφοδότησης είναι γενικά μη διαθέσιμο. Για αυτό, στο HARQ σε επίπεδο συνεδρίας, ο έλεγχος σφαλμάτων εκτελείται σε επίπεδο περιόδου σύνδεσης (από άκρο σε άκρο) μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Δημιουργούμε ένα κωδικοποιημένο πακέτο από ένα

πακέτο μηνυμάτων στην πηγή και διαιρούμε το κωδικοποιημένο πακέτο σε πολλά κωδικοποιημένα υποσυστήματα. Στη συνέχεια, αυτά τα πακέτα αποστέλλονται μέσω διαφορετικών διαδρομών των CRN. Η αποκωδικοποίηση εκτελείται μόνο στον προορισμό συνδυάζοντας τα κωδικοποιημένα υποσυστήματα που έχει λάβει, τα οποία ενδέχεται να μην λαμβάνουν όλα τα μεταδιδόμενα πακέτα. Συνεπώς, αποφεύγεται ο έλεγχος σφαλμάτων σε επίπεδο συνδέσμου. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος ενισχύει και προωθεί τα πακέτα στο επόμενο βήμα κατά μήκος της διαδρομής δρομολόγησης. Μια εντολή ACK/NACK παράγεται μόνο από τον κόμβο προορισμού, με την προϋπόθεση ότι το αρχικό μήνυμα δεν ανακτάται με επιτυχία [3].

## NFV

Η οπτικοποίηση δικτύου (NV), είναι η δυνατότητα δημιουργίας ενός εικονικού δικτύου πάνω από ένα φυσικό δίκτυο, επιτρέποντας σε ένα μεγάλο αριθμό δικτύων πολλαπλών μισθωτών να τρέχουν σε ένα φυσικό δίκτυο (φυσική υποδομή), αποτελούμενη από πολλά διασυνδεδεμένα ικριώματα ή συστοιχίες ικριωμάτων σε ένα ή ακόμη και σε πολλαπλά κέντρα πληροφοριών, εάν είναι απαραίτητο. Περιλαμβάνοντας επίσης στοιχεία ελέγχου και απομόνωσης, καθώς και εισαγωγή υπηρεσιών επιτάχυνσης ή ασφάλειας (sdxcentral,2015).



Εικόνα 2.18: Αρχιτεκτονική NFV (πηγή: <https://slideplayer.com/slide/11695523/>)

Βάσει της NV, η Virtualization Functions Virtualization (NFV) αρχιτεκτονική αναπτύσσεται σταδιακά και κυρίως από τους φορείς παροχής υπηρεσιών Ίντερνετ (ISP) στα δίκτυα μεταφορέων τους, μέσω των αλυσίδων Virtual Network Function (VNF), για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών τους. Το κίνητρο είναι η αυξανόμενη διαχείριση, η αξιοπιστία και η απόδοση των συστημάτων NFV, τα κέρδη στην ενέργεια και το χώρο που παρέχεται από την οπτικοποίηση των δικτύων, με κόστος που γίνεται ανταγωνιστικό σε σχέση με τους κόμβους των φυσικών δικτύων. Από τη σκοπιά της βελτιστοποίησης του δικτύου, η δρομολόγηση αλυσίδων VNF σε ένα δίκτυο φορέων συνεπάγεται βασικές καινοτομίες, που καθιστούν το πρόβλημα δρομολόγησης αλυσίδας VNF μοναδικό σε σχέση με την κατάσταση της τεχνολογίας: ο ρυθμός μετάδοσης κάθε ροής ζήτησης μπορεί να αλλάξει κατά μήκος μιας αλυσίδας VNF, η καθυστέρηση και το υπολογιστικό φορτίο μπορεί να είναι συνάρτηση της

κυκλοφορίας αιτημάτων, τα VNFs μπορούν να μοιραστούν μεταξύ των απαιτήσεων κλπ [29].

Οι υπηρεσίες που βασίζονται στο NFV, διεκπεραιώνουν την κυκλοφορία δικτύου χρησιμοποιώντας διασυνδεδεμένες λειτουργίες δικτύου VirtualNet (VNF). Τα VNF μπορούν να έχουν κατανομημένη ανάπτυξη σε πολλαπλά κέντρα δεδομένων σε διαφορετικές τοποθεσίες, π.χ. πιο κοντά στην άκρη του δικτύου. Η ροή της κυκλοφορίας δικτύου μπορεί να ελεγχθεί, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει σταθερή αλυσίδα ή σειρά στην οποία οι λειτουργίες του δικτύου επεξεργάζονται τα πακέτα. Αυτό διαφέρει από την εφαρμογή που βασίζεται σε στρώματα εφαρμογών των κλασσικών εφαρμογών cloud. Το «κλασικό» σύστημα cloud είναι βασικά μια σύνδεση από έναν πελάτη σε ένα διακομιστή και τελικά σε ένα μόνο κέντρο δεδομένων. Για να καλυφθεί το κενό αυτό, έχουμε δημιουργήσει ένα περιβάλλον SDK για επιπλέον επικύρωση: Service Function Chaining (SFC), προσαρμοσμένη τοποθέτηση σε πολλαπλά σημεία παρουσίας (PoP) και εξειδικευμένες λειτουργίες ελέγχου και VNF κλίμακας στην υπηρεσία. Αυτή η λειτουργικότητα βασίζεται περαιτέρω στα διαθέσιμα πρότυπα για τα πλαίσια διαχείρισης και οργάνωσης (MANO). Το SDK επεκτείνει αποτελεσματικά το πλαίσιο MANO, καθώς συμβάλλει στη στενή ενσωμάτωση τόσο λειτουργικών όσο και αναπτυξιακών πτυχών σε ένα σύστημα. Οι προηγούμενες ενσωματώσεις του MANO-DevOps, επικεντρώνονται μόνο στην αντιμετώπιση λειτουργικών υπηρεσιών. Στην πραγματικότητα, μπορούμε να θεωρήσουμε αυτό το περιβάλλον SDK ως ένα πρότυπο για να αναπτύξουμε και να δοκιμάσουμε τις υπηρεσίες δικτύου που βασίζονται στο NFV. Προσφέρει υποστήριξη για τυπικές NFV δράσεις, όπως: τον καθορισμό και την επικύρωση VNF αλυσίδων προώθησης, τη δοκιμαστική κυκλοφορία σε μια υπηρεσία δικτύου, τα API διαχείρισης και δοκιμής ενός VNF, τον εντοπισμό των σημείων συμφόρησης και των πακέτων νέων υπηρεσιών. Το τελικό προϊόν του SDK είναι ένα πακέτο υπηρεσιών: ένας ορισμός της πλήρους υπηρεσίας, αφαιρώντας όλα τα VNF, δικτυακούς συνδέσμους και μηχανισμούς ελέγχου. Αυτό μειώνει το εμπόδιο μεταξύ των ιδιόκτητων τομέων των προμηθευτών και των χειριστών σε ένα περιβάλλον.

Οποιοσδήποτε προμηθευτής ή προγραμματιστής υπηρεσιών μπορεί να χρησιμοποιήσει το SDK για να δημιουργήσει μια υπηρεσία βασισμένη σε VNF, να την επικυρώσει και να τη μεταγλωττίσει σε ένα πακέτο. Αυτό το πακέτο είναι στη συνέχεια έτοιμο για ανάπτυξη στο πλαίσιο MANO του χειριστή. Ο αρθρωτός

σχεδιασμός του SDK επιτρέπει την εύκολη προσθήκη υποστήριξης για άλλες μορφές πακέτων. Υπάρχουν πρόσθετα χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως η υπογραφή πακέτων και η διαχείριση χρηστών. Το πλήρες σύνολο χαρακτηριστικών επιτρέπει στο πακέτο υπηρεσιών να είναι αξιόπιστο από τον χειριστή MANO και να είναι πλήρως λειτουργικό και ασφαλές (Rossem et. al, 2017).

### Κινητά δίκτυα βασισμένα σε λογισμική υποδομή

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα τμήματα, διερευνάται από τον οργανισμό τυποποίησης, τον (ETSI) και το ερευνητικό πρόγραμμα UNIFY, μια στοιχειωτή αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων για δίκτυα φορέων με βάση τις αρχές SDN και NFV. Η υπολογιστική αρχιτεκτονική δικτύων και οι πόροι δικτύωσης ορίζονται με οργανωμένο τρόπο, αποσυνθέτοντας την πολύπλοκη φύση της κινητής τεχνολογίας σε πολλαπλά, μικρότερα λειτουργικά στρώματα, το καθένα από τα οποία αποτελείται από μικρότερα στοιχεία. Η διαμόρφωση διεγείρει τη μέγιστη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των συστατικών στοιχείων και επιτρέπει πολλαπλά δυναμικά μονοπάτια μετάβασης προς μελλοντικές αρχιτεκτονικές [23].

Τα τρία βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής VNF είναι: (α) Φυσικό υλικό: Το υλικό είναι οποιαδήποτε μηχανή που φιλοξενεί πόρους όπως CPU, μνήμη και αποθήκευση. (β) Εικονικό επίπεδο διαχειριστή: Αυτό το εικονικό επίπεδο είναι το στρώμα λογισμικού που τρέχει στο υλικό κομμάτι (συσκευές) που διαχειρίζεται τους. (γ) Εικονική μηχανή: Η εικονική μηχανή είναι ένα λογισμικό που εξομοιώνει την αρχιτεκτονική και τις λειτουργίες της φυσικής υποδομής χρησιμοποιώντας ένα κομμάτι των φυσικών πόρων. Ως αποτέλεσμα, ένα συγκεκριμένο υλικό μπορεί να φιλοξενήσει περισσότερα από ένα VM. Ο μέγιστος αριθμός VM που μπορούν να φιλοξενοούνται σε μια φυσική υποδομή εξαρτάται από τους πόρους που είναι διαθέσιμοι και το ποσό των πόρων που χρησιμοποιούνται από κάθε VM. Το βασικό πλεονέκτημα των αρχιτεκτονικών VNF και SDN είναι ότι ένας εξυπηρετητής COTS γενικής χρήσης μπορεί να ενσωματωθεί σε δίκτυα κλάσεων επιχειρηματικών δραστηριοτήτων για τη διαχείριση και τον υπολογισμό μεγάλων δεδομένων. Ακόμη και η επεξεργασία φυσικών επιπέδων των κυψελοειδών δικτύων κινητής τηλεφωνίας μπορεί να υλοποιηθεί σε αυτούς τους διακομιστές COTS10. Αυτό είναι ένα μεγάλο βήμα για τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών καθώς έτσι θα μετασχηματίσει ολόκληρη



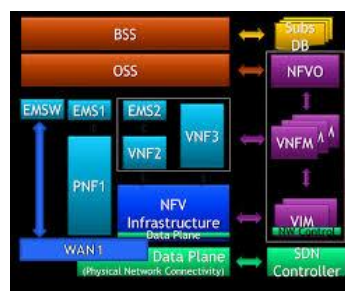
την αρχιτεκτονική κυψελοειδών δικτύων, θα μειώσει δραματικά τις επενδύσεις κεφαλαίου και θα μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, προσφεύγοντας σε κέντρα δεδομένων που βασίζονται στο cloud. Πολλαπλοί ενοικιαστές θα μπορούν να μοιράζονται δομές βασισμένες σε cloud υποδομές σε αρχιτεκτονική SDN και NFV για τη βελτίωση των περιθωρίων κέρδους και την επίτευξη μειωμένων δαπανών για της υποδομές τους [28].

### Διαχείριση και οργάνωση (MANO)

Το MANO είναι η οργάνωση διαχείρισης NFV που αποτελείται κυρίως από τρεις οντότητες: VIM, VNFM και τον οργανωτή. Είναι υπεύθυνη για τη δυναμική διαμόρφωση της υποδομής και των λειτουργιών ολόκληρου του δικτύου. Για να ολοκληρωθεί το επίπεδο οπτικοποίησης, η διαχείριση και ο σχεδιασμός στρώματος πόρων υλικού είναι υπεύθυνος για τη χαρτογράφηση μεταξύ πόρων εικονικού δικτύου και υλικού και την εφαρμογή διαδικασιών επιχειρησιακών πόρων από OSS/BSS.

### Στάδιο σχεδιασμού

Σε αυτό το στάδιο, το τμήμα της ζήτησης που παρέχεται από το πρότυπο λειτουργίας διαχείρισης ενότητας και τα εργαλεία επεξεργασίας, το τμήμα ρύθμισης παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της τοπολογίας του δικτύου, της λειτουργικής μονάδας και του πρωτοκόλλου αλληλεπίδρασης, του δείκτη επιδόσεων και των απαιτήσεων υλικού κλπ.



Εικόνα 2.19: Αναπαράσταση OSS/BSS στην NFV (πηγή: <https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/sb-OSS-BSS.pdf>)

### Λειτουργία και διαχείριση

Κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης, ο ιδιοκτήτης μπορεί να χωρίσει το δίκτυο σε τομείς σε πραγματικό χρόνο και να κάνει τη δυναμική συντήρηση με το τεμαχισμό

της λειτουργίας διαχείρισης και της δυναμικής προσαρμογής της διανομής, κυρίως την πηγή του κυβερνοχώρου, την προσθήκη, τη διαγραφή και την ενημέρωση της λειτουργίας του τμήματος, και την απελευθέρωση σφαλμάτων στον κύκλο ζωής του τεμαχισμένου δικτύου, της δυναμικής αλλαγής των υπηρεσιών απόκρισης σε πραγματικό χρόνο και των δικτύων, για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση του κυβερνοχώρου και η καλή εμπειρία του χρήστη [18].

### Πλεονεκτήματα του NFV

Υπάρχουν πολλά οφέλη για την εφαρμογή του NFV ως εναλλακτική λύση στην τυπική αρχιτεκτονική. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Χαμηλότερο CAPEX και OPEX.
- Αυξημένη ελαστικότητα όσον αφορά την αυξομείωση του πλήθους του δικτύου.
- Αυξημένη ευελιξία εξυπηρέτησης για την υποστήριξη νέων, ταχείας ανάπτυξης, υπηρεσιών.
- Βελτιωμένη λειτουργική απλότητα.
- Ταχύτερη καινοτομία εξαιτίας ενός δικτύου που ελέγχεται από λογισμικό, το οποίο εξαλείφει την ανάγκη για αλλαγές υλικού.

Υπάρχουν επίσης ισχυρές ενδείξεις ότι εκτός από την απλή εξοικονόμηση κεφαλαίου, το NFV μπορεί επίσης να είναι ένας βιώσιμος δημιουργός εσόδων. Το NFV συμβάλλει επίσης στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας συλλογής, ανάλυσης και λήψης επιχειρηματικών αποφάσεων, σχετικών με τα ασύρματα δίκτυα.

### Μειονεκτήματα του NFV

Το NFV είναι συνάρτηση του SDN και συνεπώς υποφέρει από ορισμένους από τους ίδιους περιορισμούς. Όπως και το SDN, το NFV έχει ακόμα κάποιο έδαφος για να γίνει απόλυτα αξιόπιστο όταν αναπτύσσεται σε επίπεδο επιχείρησης. Αλλά με τις εξελίξεις που έχουν ήδη ξεκινήσει, δεν θα περάσει πολύς καιρός πριν η πραγματικότητα του NFV κατακτήσει την τόλμη της ιδέας πίσω από αυτό.

Ορισμένες από τις άλλες συγκεκριμένες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η NFV είναι [17]:

- Πρέπει να συνυπάρξει με ένα υβριδικό περιβάλλον που ενσωματώνεται στο cloud αλλά και σε φυσικές συσκευές.

- Σε αντίθεση με τα συμβατικά περιβάλλοντα πληροφορικής, το NFV απαιτεί τη διαχείριση της πληροφορικής αφηρημένα.
- Τα περιβάλλοντα NFV είναι πιο δυναμικά από τα παραδοσιακά, τα οποία ενδέχεται να απαιτούν κλιμάκωση με πρόσθετα χαρακτηριστικά για την αντιμετώπιση.
- Το NFV απαιτεί επίσης μια επανευθυγράμμιση της διαδικασίας, έτσι ώστε η φυσική και η εικονική υποδομή να μπορούν να διαχειρίζονται ταυτόχρονα.

### Κεφάλαιο 3:

## SWOT ANALYSIS στις next generation αρχιτεκτονικές και εύρεση αυτών με το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προχωρήσουμε σε SWOT ανάλυση των αρχιτεκτονικών νέας γενιάς, ώστε να εντοπίσουμε αυτή με το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Η SWOT ανάλυση αποτελεί βασικό εργαλείο σε οικονομικές μελέτες και σε μελέτες επενδύσεων και επιχειρήσεων σχετικά με το μέλλον τους και την ανάπτυξή τους. Γίνεται μέσω της ανάλυσης του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος μίας επιχείρησης (Λιβιεράτος) (Παππάς,2009).

Η λέξη SWOT προκύπτει από τις αγγλικές λέξεις:

Strengths	δυνατά σημεία
Weaknesses	αδύνατα σημεία
Opportunities	ευκαιρίες
Threats	απειλές

Τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία προκύπτουν από τους εσωτερικούς διαθέσιμους πόρους μιας επιχείρησης (π.χ. χρηματοοικονομική κατάσταση, ικανότητες προσωπικού και στελεχών, τεχνογνωσία, λοιπές ιδιότητες και χαρακτηριστικά της επιχείρησης, κλπ.).

Οι ευκαιρίες και οι απειλές αποτελούν μεταβλητές του εξωτερικού περιβάλλοντος τις οποίες η επιχείρηση θα πρέπει να εντοπίσει, να προσαρμοστεί σε αυτές ή ακόμα και να τις προσαρμόσει όπου κάτι τέτοιο είναι εφικτό (π.χ. είσοδος νέων ανταγωνιστών, ρυθμίσεις στο νομικό περιβάλλον, δημιουργία ή/και εμφάνιση νέων αγορών, κλπ.).

Κατά την ανάλυση, πρέπει να επιχειρείται να απαντηθούν με όσο το δυνατόν πιο ποσοτικοποιημένο τρόπο ερωτήματα για την περιοχή όπως:

- Δυνάμεις:
  - Ποια είναι τα πλεονεκτήματα;

- Ποιο είναι το πλέον ανταγωνιστικό προϊόν/υπηρεσία;
- Ποιοι είναι οι διαθέσιμοι πόροι που είναι μοναδικοί ή έχουν το μικρότερο συγκριτικά κόστος;
- Τι θεωρούν οι τοπικοί οικονομικοί παράγοντες ως ενδογενή δύναμη της περιοχής;
- Αδυναμίες:
  - Τι θα μπορούσε να βελτιωθεί;
  - Τι θα έπρεπε να αποφευχθεί;
  - Τι θεωρούν οι τοπικοί οικονομικοί παράγοντες ως ενδογενή αδυναμία;

Η παραπάνω ανάλυση των Δυνάμεων-Αδυναμιών πραγματοποιείται τόσο από την επιχείρηση όσο και από τους πελάτες. Επίσης, πρέπει να συσχετίζεται με τον ανταγωνισμό.

- Ευκαιρίες:
  - Ποιές είναι οι καλές ευκαιρίες που προβάλλουν;
  - Ποιές είναι οι ενδιαφέρουσες τάσεις που αφορούν την περιοχή;
- Χρήσιμες ευκαιρίες μπορεί να θεωρηθούν:
  - Αλλαγές στην τεχνολογία και τις αγορές, σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα.
  - Αλλαγές στην κρατική πολιτική στο πεδίο ενδιαφέροντος.
  - Αλλαγές σε κοινωνικά μοτίβα, πληθυσμιακά προφίλ, αλλαγές τρόπου ζωής.
  - Τοπικά γεγονότα.

Μια συνήθης προσέγγιση εντοπισμού των ευκαιριών έγκειται στην ανασκόπηση των Δυνάμεων και τη διερεύνηση της δυναμικής τους για άνοιγμα ευκαιριών. Εναλλακτικά, ανασκοπούνται οι Αδυναμίες και διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης ευκαιρίας μέσω της εξάλειψής τους.

- Απειλές:
  - Ποια εμπόδια εμφανίζονται συνήθως;
  - Τι κάνουν οι ανταγωνιστές;
  - Εμφανίζονται αλλαγές στις προδιαγραφές για τα ήδη παρεχόμενα προϊόντα ή υπηρεσίες;
  - Οι τεχνολογικές αλλαγές απειλούν ή ακυρώνουν την υφιστάμενη οικονομία της περιοχής;

- Υπάρχουν χρηματοδοτικά ή χρηματοοικονομικά προβλήματα;
- Αποτελεί κάποια από τις Αδυναμίες πραγματική απειλή για την οικονομία της περιοχής;



Εικόνα 3.20: SWOT ANALYSIS (πηγή: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSOE4GIZ1n-K65tEB6N1Xr39Hc-f3tqHMOta8zmKW\\_DG6tawujV](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSOE4GIZ1n-K65tEB6N1Xr39Hc-f3tqHMOta8zmKW_DG6tawujV))

## Network slicing

Ξεκινώντας την ανάλυση SWOT από την αρχιτεκτονική network slicing (τεμαχισμός δικτύου), ακολουθούν οι Δυνατότητες, οι Αδυναμίες, οι Ευκαιρίες και οι Απειλές, σύμφωνα με όσα αναφέραμε για αυτή την αρχιτεκτονική στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Δυνατότητες

Η αρχιτεκτονική SLICE επιτρέπει τη συστέγαση δεδομένων. Παρέχει τη δυναμική ανάπτυξη λύσεων δικτύωσης σε σύντομο χρονικό διάστημα και με χαμηλό κόστος, την ικανότητα δημιουργίας δικτύων που συνδέονται στενά με τις υπηρεσίες τους και την ανάθεση σχεδόν πλήρους διαχείρισης των τεμαχίων/τομέων του δικτύου στο μισθωτή του τομέα. Παρέχει τη δυνατότητα η απομόνωση των τομέων δικτύου (εικονικά δίκτυα) να είναι πλήρης ή μερική, λογική ή φυσική. Ακόμη, υπάρχει υποστήριξη για τεμαχισμό δικτύου ανά πλάνο χρήσης. Επιπλέον, γίνεται χαρτογράφηση των υπηρεσιών σε διαφορετικούς τομείς. Ένας τομέας μπορεί να δημιουργηθεί ως ένας συνδυασμός υφιστάμενων ή κατά παραγγελία δημιουργημένων υπό-τομέων δικτύου. Οι τομείς πρέπει να διασχίζουν σύνορα τεχνολογικών ή διοικητικών κανόνων. Υπάρχει μικρός χρόνος εφοδιασμού σε κομμάτια δικτύου λόγω τεμαχισμού. Υπάρχουν λύσεις συμβατότητας, δηλαδή τα παλαιά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα συνυπάρχουν με τα νέας γενιάς δίκτυα 5G. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα ομαδοποίησης τομέων. Με την ομαδοποίηση επηρεάζονται τα δικαιώματα πρόσβασης σε τομείς (χωρίς πρόσθετο έλεγχο ταυτότητας). Ο χειριστής/ιδιοκτήτης/ενοικιαστής τομέων διαθέτει δυνατότητες διαχείρισης που περιλαμβάνουν: τη διαχείριση βάσει πολιτικής, τη διαμόρφωση, τις λειτουργίες ασφαλείας, τη λογιστική παρακολούθηση και την παρακολούθηση επιδόσεων του εκάστοτε τομέα. Γίνεται αλυσιδωτή τοποθέτηση των τομέων (δημιουργία του τομέα από άκρη σε άκρη από τους “οριζόντια” ενωμένους υπό-τομείς). Με τη λειτουργία πλάνου χρήστη (UPF): χειρίζεται την κίνηση του πλάνου χρήσης κάθε χρήστη, π.χ. δρομολόγηση και προώθηση της κυκλοφορίας, επιθεώρηση κυκλοφορίας και αναφορά χρήσης, χειρισμός. Έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά με το δίκτυο πυρήνα 3GPP (CN) για την παροχή υπηρεσιών. Επιπλέον, ο τεμαχισμός δικτύων υποστηρίζει τις κάθετες βιομηχανικές εφαρμογές, ώστε να επεκταθεί η αγορά της βιομηχανίας ασύρματης επικοινωνίας και βελτιώνει περαιτέρω την ικανότητα των

συσκευών και την εμπειρία των χρηστών. Οι Επιχειρησιακές Δαπάνες (OPEX) είναι αρκετά χαμηλές καθώς εξαιτίας του τεμαχισμού διαμοιράζονται στους τομείς.

### Αδυναμίες

Υπάρχουν, όμως, και αρκετές αδυναμίες που έχει η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής αυτής. Κάθε μισθωτής θα πρέπει να έχει κάποιες δυνατότητες διαχείρισης για να λειτουργήσει αποτελεσματικά τον τομέα του ή τους τομείς που του αναλογούν. Οι κόμβοι δικτύου/συσκευές υψηλής ικανότητας μοιράζονται τους πόρους τους (π.χ. υπολογισμοί, επικοινωνία, αποθήκευση) για να ενισχύσουν τις δυνατότητες των λιγότερο ικανοποιημένων κόμβων/συσκευών δικτύου. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η ύπαρξη κοινών λειτουργιών (CSS) δημιουργεί επίσης κάποια προβλήματα. Οι περιορισμοί των υπηρεσιών CSS μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη συνολική λειτουργικότητα και την ευελιξία ενός τομέα CSS/DSS. Ακόμη, σε ένα περιβάλλον πολλαπλών τμημάτων απαιτεί ένα σύνολο λειτουργιών που δεν υπάρχουν σε αρχικά δίκτυα μη τεμαχισμένα σε τομείς. Από την άποψη του χρήστη, αυτές οι λειτουργίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν την ανακάλυψη, την επιλογή, τη συνδρομή και τον έλεγχο ταυτότητας. Τέλος, μια βασική αδυναμία είναι το κόστος των κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX) για την ανάπτυξη του εξοπλισμού που απαιτεί αρκετά χρήματα.

### Ευκαιρίες

Το εξωτερικό περιβάλλον προσφέρει αρκετές ευκαιρίες για την ανάδειξη και επικράτηση της αρχιτεκτονικής αυτής. Αρχικά, ο τεμαχισμός στο δίκτυο επιτρέπει τη δημιουργία πολλών, πλήρως ανεπτυγμένων εικονικών δικτύων σε μια κοινή υλική υποδομή, διατηρώντας παράλληλα την απομόνωση/ανεξαρτησία μεταξύ των δικτύων αυτών. Η ανάγκη για δημιουργία δικτύων στην ίδια περιοχή με ίδια κάλυψη αλλά διαφορετικές υπηρεσίες και παρόχους ευνοεί την αρχιτεκτονική τεμαχισμού δικτύου. Ακόμη, η ανάγκη πρόσβασης σε υπηρεσίες δικτύωσης είναι αυξημένη, ειδικά σε μικρούς παρόχους με χαμηλό λειτουργικό και διαχειριστικό κόστος. Επιπλέον, είναι σημαντική η ανάγκη των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων για νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες που προσφέρουν οικονομικά αποδοτικές και ευρέως διαθέσιμες υπηρεσίες συνδεσιμότητας μέσω του χρονικά εξαρτώμενου επιμερισμού του εύρους ζώνης, της ενεργειακής αποδοτικότητας του δικτύου και της υψηλής επιβίωσης αποκατάστασης με συμπιεσμένο εύρος ζώνης. Τέλος, εξυπακούεται η ανάγκη παροχής όλο και



περισσότερων υπηρεσιών δικτύωσης σε ένα περιβάλλον με μη διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων.

### Απειλές

Βέβαια, υπάρχουν και απειλές, όπως ότι λόγω της συστέγασης δεδομένων, υπάρχει πολλές φορές κίνδυνος σε ζητήματα ασφάλειας. Ακόμη, τυχόν βλάβη στη φυσική υποδομή επηρεάζει όλα τα δίκτυα/τομείς. Πολλές φορές δεν δύναται η πρόσβαση στο φυσικό εξοπλισμό για τυχόν αλλαγές, π.χ. στρέψη κάποιας κεραίας, κάτι που αρκετοί πάροχοι επιθυμούν. Τέλος, ο φόβος για πιθανά προβλήματα σε επίπεδο λογισμικού αποτρέπει τους παρόχους να χρησιμοποιήσουν αυτή την αρχιτεκτονική.

## Cloud-RAN

Στη συνέχεια της ανάλυσης μας, σειρά έχει η αρχιτεκτονική Cloud-RAN, όπου και σε αυτή θα δούμε αρκετές δυνατότητες και ελάχιστες αδυναμίες. Ακολουθούν οι Δυνατότητες, Αδυναμίες, Ευκαιρίες και Απειλές, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Δυνατότητες

Η Cloud-RAN μπορεί να υποστηρίξει πλήρως κατακεντρωμένα και συγκεντρωμένα δίκτυα ή τον συνδυασμό κεντρικών και κατακεντρωμένων δικτύων με συνεργατικό τρόπο, που μπορούν να αναπτύξουν πυκνά ετερογενή δίκτυα με ευφυείς και εύελκτους κόμβους. Με τη συγκέντρωση των πόρων της βάσης ζώνης και των υψηλότερων στρωμάτων, μπορεί να σχηματιστεί μια δεξαμενή, έτσι ώστε το δίκτυο να χειρίζεται δυναμικά τους πόρους επεξεργασίας και να αναπτύσσει κατακεντρωμένα τις μονάδες εκπομπής καθώς και την κεραία. Ακόμη, η σηματοδότηση ελέγχου μπορεί να παραδοθεί από τους σταθμούς εκπομπής (macro cells) και η μετάδοση δεδομένων χρήστη μπορεί να παραδοθεί από μικρά στοιχεία εκπομπής (small cells) με αυτοματοποιημένο σύστημα κίνησης, επιτρέποντας την προσέγγιση εικονικού πομποδέκτη στην κινητή πρόσβαση, η οποία μπορεί να επιλέξει έναν κατάλληλο πομπό και δέκτη από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις πομπού/δέκτη. Το BBU αποτελείται από προγραμματιζόμενους επεξεργαστές υψηλής απόδοσης και από την τεχνολογία οπτικοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη η “πλήρως κεντρική” αρχιτεκτονική C-RAN έχει τα πλεονεκτήματα της εύκολης αναβάθμισης και της επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου. Επίσης, έχει καλύτερες δυνατότητες για υποστήριξη λειτουργίας πολλαπλών προτύπων, μέγιστου επιμερισμού πόρων και είναι πιο βολικό για την υποστήριξη της επεξεργασίας σημάτων συνεργασίας με πολλούς σταθμούς βάσης. Υπάρχει δυνατότητα εύκολης επέκτασης, διότι ο κάτοχος του δικτύου χρειάζεται μόνο να εγκαταστήσει νέες μονάδες RRH και να τις συνδέσει στην βάση BBU για να επεκτείνει την κάλυψη του δικτύου ή να χωρίσει την κυψέλη εκπομπής για να βελτιώσει τη χωρητικότητα. Ακόμη, είναι δυνατή η αναβάθμιση των προτύπων της διεπαφής με το λογισμικό μόνο. Διαφορετικά από την παραδοσιακή κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική BS, το C-RAN διασπά τη στατική σχέση μεταξύ RRH και BBU. Κάθε RRH δεν ανήκει σε κανένα συγκεκριμένο φυσικό BBU. Επίσης, μπορούν να αναπτυχθούν μικρότερες κυψέλες εκπομπής με χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης, ενώ η ποιότητα κάλυψης δικτύου δεν επηρεάζεται. Η ενέργεια που

χρησιμοποιείται για τη μετάδοση σήματος μειώνεται, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μείωση της κατανάλωσης ρεύματος στο RAN και για την επέκταση του χρόνου αναμονής της μπαταρίας του UE. Τέλος, επειδή η βάση BBU είναι ένας κοινός πόρος μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού εικονικών BS, αυτό σημαίνει ένα πολύ υψηλότερο ποσοστό χρησιμοποίησης των πόρων επεξεργασίας και η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί. Όταν ένα εικονικό BS είναι αδρανές τη νύχτα και το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος επεξεργασίας του δεν είναι απαραίτητο, μπορεί να απενεργοποιηθεί επιλεκτικά, χωρίς να επηρεαστεί το δίκτυο και η κάλυψή του. Δεδομένης αυτής της κατάστασης, η ανάπτυξη CRAN, η οποία προσομοιώνει μεγάλο μέρος των λειτουργιών RAN σε τυπικούς επεξεργαστές γενικής χρήσης (GPP), θεωρείται ως ένας σημαντικός τεχνολογικός παράγοντας για τη μείωση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO) που συνδέεται με το RAN. Το ποσό της επένδυσης και το κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης (OAM) αναμένεται να μειωθούν γρήγορα, χάρη στις τεχνολογίες σύννεφου που ωριμάζουν και στην εμπειρία ανάπτυξης. Επειδή οι BBU και ο εξοπλισμός υποστήριξης τοποθεσιών συγκεντρώνονται σε μερικές μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις, είναι πολύ πιο εύκολη η κεντρική διαχείριση και λειτουργία, εξοικονομώντας μεγάλο μέρος του κόστους οργάνωσης και διαχείρισης που συνδέεται με τον μεγάλο αριθμό θέσεων BS σε ένα παραδοσιακό δίκτυο RAN. Δεύτερον, αν και ο αριθμός των RRH δεν μπορεί να μειωθεί σε μια αρχιτεκτονική C-RAN, η λειτουργικότητά του είναι απλούστερη, το μέγεθος και η κατανάλωση ενέργειας μειώνονται και μπορούν να μοιραστούν σε πόλους, με ελάχιστη υποστήριξη και διαχείριση χώρου. Το RRH απαιτεί μόνο την εγκατάσταση των βοηθητικών συστημάτων τροφοδοσίας κεραίας, επιτρέποντας στους ιδιοκτήτες του δικτύου να επιταχύνουν την κατασκευή του για να αποκτήσουν το πλεονέκτημα της πρώτης κίνησης. Έτσι, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να κερδίσουν μεγάλη έκπτωση από την ενοικίαση του χώρου καθώς και την οργάνωση/διαχείριση. Στη C-RAN, οι εικονικές BS μπορούν να συνεργαστούν σε μια μεγάλη φυσική βάση BBU και μπορούν εύκολα να μοιράζονται στο σύστημα τα δεδομένα σηματοδότησης, κίνησης και κατάστασης καναλιών ενεργών UE. Είναι πολύ πιο εύκολο να εφαρμοστεί η κοινή επεξεργασία και ο προγραμματισμός για να μετριαστεί η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών (ICI) και να βελτιωθεί η φασματική απόδοση. Το C-RAN είναι επίσης κατάλληλο για μη ομοιόμορφα κατανεμημένη κίνηση, λόγω της ικανότητας εξισορρόπησης φορτίου στην κατανεμημένη βάση BBU. Παρόλο που η υπηρεσία RRH αλλάζει δυναμικά σύμφωνα με την κίνηση των

UE, το BBU που εξυπηρετεί βρίσκεται ακόμα στην ίδια BBU ομάδα. Καθώς η κάλυψη μίας βάσης BBU είναι μεγαλύτερη από την παραδοσιακή BS, η μη ομοιόμορφα κατανεμημένη κίνηση που παράγεται από UE μπορεί να διανεμηθεί σε ένα εικονικό BS, το οποίο κάθεται στην ίδια βάση BBU. Με την ενεργοποίηση της τεχνολογίας έξυπνης εξόδου στο C-RAN, η αυξανόμενη κίνηση στο διαδίκτυο από έξυπνα τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές μπορεί να εκφορτωθεί από το βασικό δίκτυο των φορέων εκμετάλλευσης. Τα οφέλη είναι τα εξής: μειωμένη επιστρεφόμενη κίνηση και κόστος, μειωμένη κυκλοφορία δικτύου πυρήνα και κόστος αναβάθμισης δικτυακής πύλης, μειωμένη καθυστέρηση στους χρήστες.

### Αδυναμίες

Στις αδυναμίες παρατηρούμε ότι γενικά η αρχιτεκτονική RAN αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος των κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX –αυτό είναι πέρα από το κόστος του ίδιου του φάσματος. Η συντήρηση, η πιθανή χρήση των γραμμών δικτύου μισθωμένων δικτύων μεταφοράς και η βελτιστοποίηση του δικτύου προσθέτουν σημαντικές πρόσθετες επιχειρησιακές δαπάνες. Μια άλλη σημαντική πρόκληση για το C-RAN είναι αυτή της ασφάλειας όσον αφορά την ιδιοτικότητα των χρηστών και τα έμπιστα μέρη. Καθώς οι πόροι μοιράζονται μεταξύ των BBU, η παραβίαση της ιδιοτικότητας και η πρόσβαση στα υποθετικά ασφαλή δεδομένα είναι μια πιθανότητα, ειδικά σε μια τέτοια κατανεμημένη αρχιτεκτονική. Επιπλέον, τα μέρη θεωρούνται αξιόπιστα στη C-RAN, συμπεριλαμβανομένων των BBU και RRU. Τέτοιες υποθέσεις ενδέχεται να είναι άκυρες, ιδίως λόγω του μεγάλου αριθμού χρηστών που έχουν εγγραφεί σε τέτοια συστήματα. Ένας εκτεθειμένος χρήστης μπορεί να επωφεληθεί από ένα τέτοιο μεγάλο, εικονικό σύστημα, για να παραβιάσει και να απειλήσει το σύστημα. Ως εκ τούτου, εκτός από τις ευπάθειες που υπάρχουν στα παραδοσιακά κυψελοειδή συστήματα, το C-RAN παρουσιάζει μια άλλη πρόκληση ασφάλειας που δεν ήταν σημαντική πριν. Το κύριο μειονέκτημά του είναι η απαίτηση υψηλού εύρους ζώνης μεταξύ του BBU, αλλά και η μεταφορά του σήματος προς τις κεραιές εκπομπής. Επειδή η επεξεργασία της βασικής ζώνης είναι ενσωματωμένη στο RRH, έχει λιγότερη ευελιξία στην αναβάθμιση και λιγότερη ευκολία για την επεξεργασία πολύπλοκων σημάτων που απαιτούνται από τις κεραιές εκπομπής.

### Ευκαιρίες

Το εξωτερικό περιβάλλον προσφέρει αρκετές ευκαιρίες για την ανάδειξη και την επικράτηση της αρχιτεκτονικής αυτής. Η διαχείριση ισορροπίας φορτίου και ο συντονισμός παρεμβολών μεταξύ μεμονωμένων μικρών ευέλικτων κυψελών μπορεί να γίνει από την κεντρική τοποθεσία, όπου μπορεί να φιλοξενοούνται αρκετές δεκάδες σταθμοί βάσης με την ικανότητα να κατανέμονται δυναμικά οι πόροι επεξεργασίας σε σταθμούς με υψηλή κίνηση και βάσει ζήτησης μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας. Επίσης, οι ανάγκες για αρχιτεκτονικές δικτύων με δυνατότητα εύκολης επέκτασης χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε προσθήκες εξοπλισμού είναι ένα πλεονέκτημα. Όπως αναμενόταν, τόσο στις παραδοσιακές όσο και στις προτεινόμενες περιπτώσεις εφαρμογής του δικτύου, το OPEX είναι σημαντικά μικρότερο από το CAPEX και η συντριπτική πλειοψηφία των TCO οφείλεται στο CAPEX. Επιπλέον, συγκρίνοντας το κόστος, είναι προφανές ότι με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική αντί για την παραδοσιακή, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές μειώσεις OPEX και CAPEX. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο κύριος συντελεστής CAPEX για έναν διαχειριστή δικτύου είναι το κόστος του φυσικού εξοπλισμού. Για να μειωθεί αυτό το κόστος στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική υιοθετείται η χρήση της τεχνολογίας οπτικοποίησης και η ανταλλαγή πόρων μεταξύ των φυσικών υποδομών. Ωστόσο, είναι σαφές ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, στην οποία χρησιμοποιούνται τα VBS, αποδίδεται σημαντική μείωση CAPEX που φθάνει σχεδόν το 70%, με βάση τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου κόστους. Το αποτέλεσμα ξεπερνά τις προβλέψεις για τη μείωση του CAPEX, υιοθετώντας αυτές τις τεχνολογίες αιχμής. Κάθε κατηγορία κόστους συγκρίνεται με το αντίστοιχο κόστος του παραδοσιακού συστήματος αρχιτεκτονικής. Η βιομηχανία, η ακαδημαϊκή κοινότητα και τα ερευνητικά έργα ευθυγραμμίζουν τις στρατηγικές τους, προς την υιοθέτηση των προαναφερθέντων προηγμένων τεχνολογιών στην τοποθέτησή τους για τα νέα δίκτυα 5G [24].

### Απειλές

Η ύπαρξη πιο απλών σε εφαρμογή και με μικρότερη απαίτηση κεφαλαίου αρχιτεκτονικών αποδυναμώνουν την επικράτηση της C-RAN. Η καινοτομία των υπηρεσιών cloud, που ακόμη δεν την εμπιστεύονται πλήρως οι πάροχοι, ειδικά για βασικές υποδομές όπως τα ασύρματα δίκτυα τους και τέλος η ανάγκη για εξοικονόμηση κόστους στο CAPEX και OPEX ταυτόχρονα, αποτελούν απειλές για τη C-RAN.

## Small cells

Η αρχιτεκτονική small cells είναι η πιο διαδεδομένη σε περιπτώσεις επέκτασης δικτύων σε περιοχές όπου είναι δύσκολο να εγκατασταθούν μεγάλοι σταθμοί βάσης. Ακολουθούν οι Δυνατότητες, Αδυναμίες, Ευκαιρίες και Απειλές, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Δυνατότητες

Οι παράγοντες στο εσωτερικό περιβάλλον, οι οποίοι ευνοούν την επικράτηση αυτής της αρχιτεκτονικής είναι το γεγονός πως οι κεραιές είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που αναπτύσσονται σε εγκαταστάσεις macro cell και συχνά εγκαθίστανται πάνω σε κτίρια, στέγες και δομές δημόσιων δικαιωμάτων (ROW), συμπεριλαμβανομένων των κολόνων του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του φωτισμού και άλλων κατάλληλων επιφανειών. Ο εξοπλισμός εκπομπής που συνοδεύει την κεραιά μπορεί να είναι αρκετά μικρός σε μέγεθος. Αυτός ο εξοπλισμός μπορεί να βρίσκεται στο ROW ή σε άλλη δημόσια ή ιδιωτική ιδιοκτησία. Αυτές οι διευκολύνσεις συμβάλλουν στη συμπλήρωση ή στην ενίσχυση της κάλυψης των πύργων εκπομπής και στην προσθήκη χωρητικότητας σε περιοχές με μεγάλη ζήτηση. Η υλοποίηση ενός δικτύου μικρών κυψελών μπορεί να θεωρηθεί ως οικονομικά αποδοτική επένδυση για τους παρόχους και τους πελάτες του. Είναι εύκολο στη διαχείριση λόγω της ανάπτυξης συστημάτων ενοποιημένης διαχείρισης. Οι μικρές κυψέλες τοποθετούνται συχνά σε φώτα και πινακίδες δρόμου, έτσι ώστε να μην υπάρχουν περιοριστικές απαιτήσεις που ορίζονται από ιδιοκτήτες της τοποθεσίας (π.χ. ταρατσες, στύλοι δήμου κλπ.), άρα έχουν και πολύ χαμηλό βάρος σε σχέση με άλλα συστήματα κεραιών. Οι μικρές κυψέλες παρέχουν κάλυψη σε επίπεδο δρόμου και βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Βελτιώνουν την κάλυψη σε μικρές περιοχές με χαμηλή ισχύ εξόδου και παρέχουν αξιόπιστη και αποτελεσματική κάλυψη και χωρητικότητα. Ακόμη, έχουν πολύ μικρό αποτύπωμα στον χώρο.

### Αδυναμίες

Βέβαια, υπάρχουν και παράγοντες που δεν την ευνοούν, όπως είναι η απαίτηση των παρόχων ασύρματων δικτύων, οι μικρές κυψέλες που αναπτύσσονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές να παρέχουν επαρκή χωρητικότητα σε σημεία με υψηλή ζήτηση, ενώ κάθε πάροχος θέλει να εγκατασταθεί η δική του εγκατάσταση για να

καλύπτει την ίδια πυκνή περιοχή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συστάδες μικρών κυψελών που υποβαθμίζουν την αισθητική της περιοχής. Η εγκατάσταση και η λειτουργία εγκαταστάσεων μικρών κυψελών ενδέχεται να επηρεάσει την υπάρχουσα τεχνολογία, όπως τα σήματα ασύρματης επικοινωνίας και άλλες δημοτικές τεχνολογίες σε κοντινή απόσταση. Υπάρχει επίσης ο κίνδυνος να εμποδιστεί ο εξοπλισμός εδάφους σε σχέση με κάποιες μικρές εγκαταστάσεις κυψελών που παρεμποδίζουν τα δικαιώματα των πολυσύχναστων πόλεων. Οι προσπάθειες για την επιτάχυνση της εγκατάστασης τέτοιων μικρών εγκαταστάσεων έχουν επικεντρωθεί στο επίπεδο της τοπικής αυτοδιοίκησης για την επανεξέταση και τον έλεγχο των μικρών κυψελωτών εγκαταστάσεων ή για τη συλλογή δίκαιων ενοικίων για τη χρήση της δημόσιας περιουσίας. Οι εγκαταστάσεις μικρών κυψελών καλύπτουν γενικά πολύ μικρότερες γεωγραφικές περιοχές –μετρούμενες σε εκατοντάδες μέτρα– από τους παραδοσιακούς πύργους εκπομπής, που μπορούν να καλύψουν αρκετά χιλιόμετρα προς κάθε κατεύθυνση.

Ακόμη, μερικές αδυναμίες είναι, ο αβέβαιος χρόνος εγκατάστασης λόγω της απόκτησης του χώρου και της τοποθέτησής τους. Επιπλέον, το Backhaul εξακολουθεί να αποτελεί δαπανηρό και πολύπλοκο πρόβλημα για τους παρόχους. Απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια που συχνά δεν είναι διαθέσιμη στο σημείο εγκατάστασης. Η μικρή εμβέλεια των μικρών κυψελών κυμαίνεται με μέγιστο από 2 έως 10 χιλιόμετρα. Τέλος, η κύρια ιδέα του πρωτοκόλλου είναι η χρήση κυψελών για την αναμετάδοση πακέτων εντοπισμού διαδρομής. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο ACR, ολόκληρη η περιοχή δρομολόγησης χωρίζεται σε τετράγωνα του ίδιου μεγέθους, που ονομάζονται κύτταρα. Το πρωτόκολλο ACR απαιτεί δύο στρατηγικές δρομολόγησης: μία για πυκνά δίκτυα και μία για αραιά δίκτυα.

### Ευκαιρίες

Παράγοντες στο εξωτερικό περιβάλλον που ευνοούν την ανάπτυξη αυτής της αρχιτεκτονικής είναι αρχικά η ανάγκη για κάλυψη πολυσύχναστων περιοχών που απαιτούν επιπλέον πόρους χωρητικότητας δικτύου. Η ανάγκη για κάλυψη αστικών περιοχών αλλά και εσωτερικών χώρων σε κτήρια όπως εμπορικά κέντρα που δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση σταθμών βάσης. Ακόμη, η ανάγκη για εξοπλισμό και υποδομές με χαμηλή ανάγκη συντήρησης και μέγιστη απόδοση. Τέλος, τα αρκετά

διαθέσιμα σημεία για εγκατάσταση (στύλοι, φωτιστικά δρόμων, τσιμεντένιες κολόνες, κ.α.).

### Απειλές

Βέβαια, υπάρχουν και παράγοντες στο εξωτερικό περιβάλλον που δεν ευνοούν την ανάπτυξη της, όπως είναι η νομοθεσία, που γίνεται αυστηρότερη στα θέματα εγκατάστασης συστημάτων κεραιών σε αστικά κέντρα και γενικά σε κατοικημένες περιοχές, όπου έχουν εφαρμογή τα small cells. Ακόμη, οι νέες τεχνολογίες εκπομπής στους σταθμούς βάσης πολλές φορές παύουν να έχουν ανάγκη αναμετάδοσης από small cells. Τέλος, λόγω της έλλειψης χώρων τοποθέτησης κεραιών, το κόστος ενοικίου είναι πολύ υψηλό.



## Relays

Στη συνέχεια της ανάλυσης μας σειρά έχει η αρχιτεκτονική των Relays. Ακολουθούν οι Δυνατότητες, Αδυναμίες, Ευκαιρίες και Απειλές, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Δυνατότητες

Παρατηρείται ότι η μέθοδος της αναμετάδοσης παρουσιάζεται ως μέσο για τη μείωση του κόστους ανάπτυξης των υποδομών δικτύων. Δείχνεται επίσης ότι μέσω της εκμετάλλευσης της χωρικής ποικιλομορφίας, η αναμετάδοση πολλαπλών σταθμών μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα σε κυψελοειδή δίκτυα. Ακόμη, ο ιστός στον οποίο είναι τοποθετημένος ο αναμεταδότης δεν χρειάζεται να είναι τόσο υψηλός όσο σε έναν πύργο εκπομπής, μειώνοντας έτσι τα λειτουργικά έξοδα όπως το κόστος μίσθωσης πύργου και συντήρησής του από τον πάροχο. Οι αναμεταδότες δεν έχουν καλωδιακή σύνδεση με το backhaul. Αντ' αυτού, αποθηκεύουν τα δεδομένα που λαμβάνονται ασύρματα και τα προωθούν στα τερματικά του χρήστη και αντιστρόφως. Έτσι, το κόστος του συστήματος που χρησιμεύει ως διασύνδεση μεταξύ του BS και του ενσύρματου δικτύου μπορεί να εξαλειφθεί για ένα αναμεταδότη. Εάν η πυκνότητα των αναμεταδοτών σε μια κυψέλη είναι μέτρια υψηλή, τα περισσότερα τερματικά είναι σημαντικά πιο κοντά σε ένα ή περισσότερους αναμεταδότες από ό,τι στον BS. Αυτό σημαίνει ότι η απώλεια διάδοσης από το BS σε ένα τέτοιο τερματικό είναι μεγαλύτερη από ό,τι από ένα κοντινό αναμεταδότη προς το τερματικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στις συνδέσεις μεταξύ των αναμεταδοτών και των τερματικών, με αποτέλεσμα την πιθανή επίλυση του προβλήματος κάλυψης για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε μεγαλύτερες κυψέλες. Άλλο ένα θετικό είναι η δυνατή ταυτόχρονη μετάδοση τόσο από το BS όσο και από τους αναμεταδότες, με την αύξηση της παραγωγικής ικανότητας να μπορεί επίσης να επιτευχθεί είτε αξιοποιώντας την αποδοτικότητα επαναχρησιμοποίησης είτε τη χωρική ποικιλομορφία. Οι συνδέσεις αναμεταδότη προς χρήστη μπορούν να χρησιμοποιούν ένα διαφορετικό (χωρίς άδεια) φάσμα (π.χ., IEEE 802.11x) από ό,τι οι συνδέσεις BS προς χρήστη (παραχωρούμενο φάσμα με επιπλέον κόστος), αποδίδοντας σημαντικά κέρδη από εξισορρόπηση φορτίου μέσω αναμεταδοτών. Σε σύγκριση με τα δίκτυα ad hoc, τα δίκτυα που χρησιμοποιούν αναμετάδοση μέσω της σταθερής υποδομής δεν χρειάζονται

πολύπλοκα κατανεμημένους αλγόριθμους δρομολόγησης, διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία να μετακινούνται οι αναμεταδότες καθώς αλλάζουν τα πρότυπα δρομολόγησης με την πάροδο του χρόνου. Αξίζει να δοθεί έμφαση στη βασική διαφορά μεταξύ των θεμελιωδών στόχων των συμβατικών ad hoc δικτύων και των προαναφερθέντων σταθερών δικτύων που βασίζονται σε υποδομές. Ενώ ο καθοριστικός στόχος των ad hoc δικτύων είναι η ικανότητα να λειτουργούν χωρίς υποδομή, ο στόχος στους τελευταίους τύπους είναι η παροχή πολύ υψηλής κάλυψης και απόδοσης δεδομένων.

Ακόμη, το ασύρματο σύστημα πολυμέσων (WMS), είναι ένα παράδειγμα μιας νέας αρχιτεκτονικής δικτύου που βασίζεται σε σταθερούς αναμεταδότες. Ενσωματωμένοι αμφίδρομοι ενισχυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε συστήματα 2G και συστήματα 3G. Τα περισσότερα υπάρχοντα και τυποποιημένα συστήματα σχεδιάστηκαν για αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ κεντρικού BS και κινητών σταθμών που συνδέονται άμεσα με αυτά. Η πρόσθετη κυκλοφορία επικοινωνίας μεταξύ ενός κινητού τερματικού και ενός αναμεταδότη που ενδιάμεσα εισάγεται σε μια σύνδεση μεταξύ του κινητού τερματικού και του BS απαιτεί πρόσθετους φασματικούς πόρους, που πρέπει να διανεμηθούν –έναν από τους παράγοντες που μέχρι τώρα εμπόδισαν την ανάπτυξη έξυπνων αναμεταδοτών. Το ETSI HiperLAN2, στην οικιακή επέκτασή του περιέχει έναν ad hoc τρόπο λειτουργίας των συστημάτων που βασίζονται στο TDMA και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την εισαγωγή αναμετάδοσης δεδομένου ότι αυτό το σχήμα επιτρέπει την εύκολη κατανομή πόρων στους συνδέσμους κινητών προς αναμετάδοση. Κοινή σε όλες τις τεχνικές αναμετάδοσης που συζητήθηκαν μέχρι τώρα είναι η λειτουργία αποθήκευσης και προώθησης των κόμβων σε μια αλυσίδα αναμετάδοσης.

Όπως τα συμβατικά συστήματα μετεγκατάστασης, τα συστήματα συνεταιρισμών επωφελούνται από την εξοικονόμηση απώλειας διαδρομής. Επιπλέον, μπορούν να αναμένονται τα εξής κέρδη: (1) Κέρδος ισχύος λόγω του γεγονότος ότι κάθε ένας από τους αναμεταδότες μπορεί να προσθέσει επιπλέον ισχύ εκπομπής που συνδυάζεται στον ακροδέκτη προορισμού. (2) Κέρδος μακρο-διαφορικότητας, που επιτρέπει την καταπολέμηση της σκίασης. (3) Κέρδος ποικιλομορφίας παρουσία εξασθένισης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ενοποίηση πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) μπορεί να οδηγήσει σε προηγμένα δίκτυα multihop με υψηλή φασματική απόδοση.

### Αδυναμίες

Οι αναλογικοί αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται αυξάνουν το επίπεδο θορύβου και υποφέρουν από τον κίνδυνο αστάθειας λόγω του σταθερού κέρδους τους, γεγονός που έχει περιορίσει την εφαρμογή τους σε συγκεκριμένα σενάρια. Επιπλέον, απαιτείται συνήθως μεγάλο ενοίκιο ειδικά σε χώρους που η ζήτηση είναι μεγάλη. Τέλος, δεν αποτελεί αρχιτεκτονική δόμηση ολοκληρωμένης υποδομής δικτύου παρά μόνο χρησιμοποιείται για επέκταση υπαρχόντων ασυρμάτων δικτύων.

### Ευκαιρίες

Η βασική ιδέα της συνεργατικής αναμετάδοσης είναι να προχωρήσει ένα βήμα περαιτέρω, αξιοποιώντας δύο βασικά χαρακτηριστικά του ασύρματου μέσου: τη φύση της μετάδοσης και την ικανότητά του να επιτύχει ποικιλομορφία μέσω ανεξάρτητων καναλιών. Ακόμη, η ανάγκη για επέκταση ασυρμάτων δικτύων σε περιοχές όπου η κάλυψη των σταθμών βάσης είναι δύσκολη και η μη χρήση καλωδίων είναι επιθυμητή, δίνουν βήμα στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής αυτής.

### Απειλές

Απειλή για την ανάπτυξη αυτής της αρχιτεκτονικής αποτελεί κυρίως η ύπαρξη της αρχιτεκτονικής των small cells, που είναι παρόμοια αλλά με περισσότερες δυνατότητες. Με τη small cells αρχιτεκτονική μπορεί να στηθεί ολόκληρη υποδομή ασύρματου δικτύου και όχι μόνο επέκταση, με παρόμοιο κόστος μεταξύ των δύο αρχιτεκτονικών.

## Cognitive radio

Στη συνέχεια της ανάλυσης μας σειρά έχει η αρχιτεκτονική Cognitive radio, ίσως η πιο καινοτόμα και άρα πιο σπάνια εφαρμόσιμη. Ακολουθούν οι Δυνατότητες, Αδυναμίες, Ευκαιρίες και Απειλές, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Δυνατότητες

Η αρχιτεκτονική CR μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε μελλοντικά κυψελοειδή συστήματα. Για παράδειγμα, η συσσωμάτωση καναλιού (που ονομάζεται επίσης συσσωμάτωση φορέα) είναι μια από τις βασικές τεχνικές που υιοθετήθηκαν στο Advanced LON (LTE). Οι έννοιες για τη βελτίωση της χρήσης του ραδιοφάσματος και της διαχείρισης του φάσματος θεωρητικά είναι καλύτερες. Ωστόσο, στην πράξη, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι πάντα υπάρχουν δαπάνες που σχετίζονται με την εκμετάλλευση ευκαιριών ραδιοφάσματος. Επιπλέον, υπάρχει ευπαθής περίοδος ανίχνευσης του φάσματος και δεν υπάρχει λόγος να απονέμονται στα PU τα προνόμια του ραδιοφάσματος, εκτός εάν υπάρχουν κάποια κίνητρα. Είναι επιτακτική ανάγκη να κατανοήσουμε ποια είναι η πραγματική αξία των ευκαιριών ραδιοφάσματος και ποιες οικονομικές και επιχειρηματικές οριακές συνθήκες πρέπει να εξεταστούν. Έχει προταθεί μια προσέγγιση για την κατανομή του δυναμικού φάσματος που βασίζεται στην τιμολόγηση, όχι μόνο για τη βελτιστοποίηση της συνολικής χρήσης του φάσματος, αλλά και για την καταπολέμηση της συμπαιγνίας μεταξύ εγωιστικών SU. Η συμπεριφορά συμπαιγνίας μεταξύ των SU μπορεί να επιδεινώσει σοβαρά την αποτελεσματικότητα των ασύρματων δικτύων. Υπάρχουν τρία διαφορετικά μοντέλα τιμολόγησης (ισορροπία αγοράς, ανταγωνιστικά και συνεταιριστικά) μέσω της θεωρίας των παιχνιδιών μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών και των SU έχουν ερευνηθεί. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των PU (ή των παρόχων υπηρεσιών) και των SU που μπορούν να υιοθετήσουν την χρήση του φάσματος παρατηρώντας τις διακυμάνσεις στην τιμή και την ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρονται από τις PU (ή παρόχους υπηρεσιών) μπορεί να διαμορφωθεί ως εξελικτικό παιχνίδι.

### Αδυναμίες

Το να γίνουν νοητικά τα ραδιοκύματα και τα ασύρματα δίκτυα, δεν είναι καθόλου απλό και απαιτεί συνεργατική προσπάθεια από διάφορες ερευνητικές κοινότητες,

συμπεριλαμβανομένης της θεωρίας των επικοινωνιών, της μηχανικής δικτύωσης, της επεξεργασίας σήματος, της θεωρίας παιγνίων, του σχεδιασμού κοινού λογισμικού, του υλικού τομέα της κεραίας αλλά ακόμη και του σχεδιασμού ραδιοσυχνοτήτων. Το ραδιοφάσμα, το οποίο απαιτείται για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, είναι ένας φυσικά περιορισμένος πόρος. Με αυτόν τον τρόπο, μόνο οι εκχωρημένοι (αδειοδοτημένοι) χρήστες έχουν το δικαίωμα να εκμεταλλευτούν το εκχωρημένο φάσμα και άλλοι χρήστες δεν επιτρέπεται να το χρησιμοποιούν, ανεξάρτητα από το αν οι χρήστες με άδεια χρήσης το χρησιμοποιούν ή όχι. Με τον πολλαπλασιασμό των ασύρματων υπηρεσιών τις τελευταίες δεκαετίες, σε πολλές χώρες, το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου φάσματος έχει διατεθεί πλήρως, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα το πρόβλημα της ανεπάρκειας του φάσματος. Για να διατηρηθεί η βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας ασύρματων επικοινωνιών, θα πρέπει να αναπτυχθούν καινοτόμες λύσεις για τη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης του ραδιοφάσματος. Επομένως, η αναγνώριση του φάσματος θεωρείται ένα από τα κρίσιμα στοιχεία του σχεδιασμού CRN.

### Ευκαιρίες

Το πιο απλό κίνητρο μπορεί να είναι η κατανομή των κερδών από τον μηχανισμό επιμερισμού του φάσματος. Συνεπώς, τα οικονομικά της διαχείρισης του φάσματος αναδύονται ως ένα κρίσιμο ζήτημα για τη ρεαλιστική ανάπτυξη των CRN, εξισορροπώντας τα συμφέροντα μεταξύ των PU και των χρηστών CR. Η κατανομή φάσματος μεταξύ μιας PU και πολλαπλών SU μπορεί να διατυπωθεί ως ένας ανταγωνισμός αγοράς ολιγοπωλίου και χρησιμοποιεί ένα μη συνεργάσιμο παιχνίδι για να εκτελέσει την κατανομή φάσματος για τα SU.

Ο μηχανισμός δημοπράτησης έχει υιοθετηθεί στην τιμολόγηση του ραδιοφάσματος μεταξύ του δημοπράτη (δηλαδή του παρόχου υπηρεσιών) και των SU για να μεγιστοποιήσει τα έσοδα του παρόχου υπηρεσιών, ενώ ικανοποιεί τις απαιτήσεις QoS των SU. Ένας νέος αποδοτικός μηχανισμός για πλειστηριασμό φάσματος πολλαπλών κερδών μπορεί να βελτιώσει αποτελεσματικά τη χρήση του φάσματος με στρατηγικές τιμολόγησης ανθεκτικές στις συμπράξεις μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών και των SU. Επειδή η συμπεριφορά αθέμιτης συμπαιγνίας μεταξύ των SU μπορεί να μειώσει τα έσοδα των παρόχων υπηρεσιών, αντιμετωπίζει την τιμολόγηση φάσματος σε ένα CRN όπου πολλοί πάροχοι υπηρεσιών ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να

προσφέρουν ευκαιρίες πρόσβασης σε φάσμα στις SU υπό περιορισμένο QoS για τις PU. Η αρχική δοκιμή για την εξέταση και των τεσσάρων μερών που εμπλέκονται σε δραστηριότητες CRN (PU, χρήστες CR, φορείς εκμετάλλευσης και ρυθμιστικές αρχές για να εξασφαλιστεί η συνολική αποτελεσματικότητα χρήσης φάσματος) δίνεται προκειμένου να διασφαλιστεί η ισχυρή λειτουργία των CRN που υποστηρίζουν τα πρακτικά ή οικονομικά συμφέροντα κάθε μέρους. Ένα γενικό πλαίσιο για δίκαιες δημοπρασίες διπλού φάσματος έχει προταθεί για την ενίσχυση της οικονομικής βιωσιμότητας του OSA και, σε αυτό το πλαίσιο, πολλά μέρη μπορούν να εμπορεύονται φάσμα με βάση τις ατομικές τους ανάγκες. Το προτεινόμενο πλαίσιο αποσκοπεί στη διασφάλιση της καλύτερης χρήσης του ραδιοφάσματος, ενώ παράλληλα καθιστά τις δημοπρασίες οικονομικά ισχυρές.

Οι αρχικές λύσεις για SU έχουν αναπτυχθεί για να ανταγωνίζονται επιτυχώς μεταξύ τους στις περιορισμένες και χρονικά μεταβαλλόμενες ευκαιρίες ραδιοφάσματος που βασίζονται σε δημοπρασία, δεδομένης της έμπειρης δυναμικής στο ασύρματο δίκτυο. Η λειτουργία των SU σε ένα αυτο-οργανωτικό (συνήθως ad hoc) δίκτυο έχει εξεταστεί για την προσαρμοστική και αποτελεσματική κατανομή των δυνατοτήτων μετάδοσης και του φάσματος μεταξύ των χρηστών CR ανάλογα με το περιβάλλον, χωρίς να διαταράσσει τις PU.

### Απειλές

Το μεγάλο κόστος του εξοπλισμού που απαιτούν τα δίκτυα CR αλλά και η τεχνογνωσία είναι παράγοντες που αναστέλλουν την ανάπτυξη αυτής της αρχιτεκτονικής καθώς απαιτεί μεγάλες αλλαγές στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις των παρόχων.

## NFV

Τέλος αναλύουμε την αρχιτεκτονική NFV. Ακολουθούν οι Δυνατότητες, Αδυναμίες, Ευκαιρίες και Απειλές, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Δυνατότητες

Η δυνατότητα δημιουργίας ενός εικονικού δικτύου πάνω από ένα φυσικό δίκτυο, επιτρέποντας σε ένα μεγάλο αριθμό δικτύων διαφόρων παρόχων/ενοικιαστών να τρέχουν σε ένα φυσικό δίκτυο (φυσική υποδομή) αποτελούμενη από πολλά διασυνδεδεμένα ικριώματα ή συστοιχίες ικριωμάτων σε ένα ή πολλαπλά κέντρα δεδομένων, αν είναι απαραίτητο. Τα τρία βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής VNF είναι: α) Φυσικό υλικό, β) εικονικό επίπεδο διαχειριστή και γ) εικονική μηχανή. Ως αποτέλεσμα, ένα συγκεκριμένο υλικό μπορεί να φιλοξενήσει περισσότερα από ένα VM. Ο μέγιστος αριθμός VM που μπορούν να φιλοξενοούνται σε μια φυσική υποδομή εξαρτάται από τους πόρους που είναι διαθέσιμοι και το ποσό των πόρων που χρησιμοποιούνται από κάθε VM. Το βασικό πλεονέκτημα των αρχιτεκτονικών VNF και SDN είναι ότι ένας εξυπηρετητής COTS γενικής χρήσης μπορεί να ενσωματωθεί σε δίκτυα κλάσεων επιχειρηματικών δραστηριοτήτων για τη διαχείριση και τον υπολογισμό μεγάλων δεδομένων. Ακόμη και η επεξεργασία φυσικών επιπέδων των κυψελοειδών δικτύων κινητής τηλεφωνίας μπορεί να υλοποιηθεί σε αυτούς τους διακομιστές COTS10. Αυτό είναι ένα μεγάλο βήμα για τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών καθώς έτσι θα μετασχηματίσει ολόκληρη η αρχιτεκτονική των κυψελοειδών δικτύων. Θα μειωθούν δραματικά οι επενδύσεις κεφαλαίου και θα μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, προσφεύγοντας σε κέντρα δεδομένων που βασίζονται σε cloud. Πολλαπλοί ενοικιαστές θα μπορούν να μοιράζονται δομές βασισμένες σε cloud υποδομές, στις αρχιτεκτονική SDN και NFV, για τη βελτίωση των περιθωρίων κέρδους και την επίτευξη μειωμένων δαπανών για της υποδομές τους. Επιπλέον, εμφανίζεται γενικά χαμηλότερο CAPEX και OPEX, αυξημένη ελαστικότητα όσον αφορά την αυξομείωση του πλήθους του δικτύου, αυξημένη ευελιξία εξυπηρέτησης για την υποστήριξη νέων υπηρεσιών, βελτιωμένη λειτουργική απλότητα και ταχύτερη καινοτομία, εξαιτίας ενός δικτύου που ελέγχεται από λογισμικό, το οποίο εξαλείφει την ανάγκη για αλλαγές υλικού.

Υπάρχουν επίσης ισχυρές ενδείξεις ότι εκτός από την απλή εξοικονόμηση κεφαλαίου, το NFV μπορεί επίσης να είναι ένας βιώσιμος δημιουργός εσόδων. Το NFV συμβάλλει επίσης στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας συλλογής, ανάλυσης και λήψης επιχειρηματικών αποφάσεων σχετικών με τα ασύρματα δίκτυα.

Η σύγκριση κόστους και κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ δύο εντελώς διαφορετικών τεχνολογιών είναι αναμφίβολα πολύ περίπλοκη, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές πτυχές που αφορούν συγκεκριμένα το υλικό. Ωστόσο, ήδη γνωρίζουμε από τους βιομηχανικούς εμπειρογνώμονες ότι οι νέες πλατφόρμες διακομιστών που βασίζονται σε COTS έχουν εξελιχθεί, ώστε να γίνουν πιο ισχυρές, για να μιμηθούν το υλικό δικτύου ειδικού σκοπού όσον αφορά τις ταχύτητες επεξεργασίας πακέτων και να καταναλώσουν λιγότερη ισχύ. Το σχετικό κόστος και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για τον πάροχο υπηρεσιών στο δίκτυο SDN/NFV εξαρτάται από το πόσο ισχυρό είναι το VM και ταυτόχρονα πόσο οικονομικό και ενεργειακά αποδοτικό είναι. Ωστόσο, όταν το VM αρχίζει να υποστηρίζει περισσότερες συνδέσεις από τον δρομολογητή 4G, το κόστος του δικτύου SDN/NFV πέφτει αισθητά. Όταν το πραγματικό κόστος ενοικίασης ενός VM είναι χαμηλότερο από το πραγματικό κόστος κατοχής ενός δρομολογητή 4G, το κόστος δικτύου για τον πάροχο υπηρεσιών είναι επίσης σημαντικά χαμηλότερο. Όταν το VM είναι πολύ ισχυρό και υποστηρίζει π.χ. 2000 συνδέσεις, το κόστος ενοικίασης VM στο δίκτυο SDN/NFV μειώνεται σημαντικά. Η τεχνολογία SDN/NFV πρέπει να προσελκύσει την παραδοσιακή εξειδικευμένη τεχνολογία υλικού, ιδιαίτερα όταν η τεχνολογία 4G είναι πιο ισχυρή. Έτσι, αυξάνουμε σταδιακά τη δύναμη της τεχνολογίας 4G και βλέπουμε πώς αυτό θα επηρέαζε το σχετικό κόστος κατανομής του δικτύου SDN/NFV. Ωστόσο, εξακολουθούμε να διαπιστώνουμε ότι το σχετικό κόστος μίσθωσης των VM στο δίκτυο SDN/NFV εξοικονομεί πολύ μεγάλο κόστος για τον πάροχο υπηρεσιών. Αυτό θα ήταν το κλειδί για την επιτυχία της τεχνολογίας οπτικοποίησης [28].

### Αδυναμίες

Προφανώς βλέπουμε ότι το δίκτυο SDN/NFV κοστίζει περισσότερο εάν τα VM δεν είναι αρκετά ισχυρά, ώστε να έχουν περισσότερες δυνατότητες ανάπτυξης. Το NFV είναι συνάρτηση του SDN και συνεπώς υποφέρει από ορισμένους από τους ίδιους περιορισμούς. Όπως και το SDN, το NFV έχει ακόμα κάποιο τρόπο να γίνει απόλυτα αξιόπιστο όταν αναπτύσσεται σε επίπεδο επιχείρησης. Αλλά με τις εξελίξεις που



έχουν ήδη ξεκινήσει, δεν θα περάσει πολύς καιρός πριν η πραγματικότητα του NFV κατακτήσει την τόλμη της ιδέας πίσω από αυτό. Ορισμένες από τις άλλες συγκεκριμένες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η NFV είναι: (α) Πρέπει να συνυπάρχουν σε ένα υβριδικό περιβάλλον που ενσωματώνεται σε cloud δίκτυα αλλά και με φυσικές συσκευές. (β) Σε αντίθεση με τα συμβατικά περιβάλλοντα πληροφορικής, το NFV απαιτεί τη διαχείριση της πληροφορίας αφηρημένα. (γ) Τα περιβάλλοντα NFV είναι πιο δυναμικά από τα παραδοσιακά, τα οποία ενδέχεται να απαιτούν κλιμάκωση με πρόσθετα χαρακτηριστικά. (δ) Το NFV απαιτεί επίσης μια επανευθυγράμμιση της διαδικασίας, έτσι ώστε η φυσική και η εικονική υποδομή να μπορούν να διαχειρίζονται ταυτόχρονα. Από τη σκοπιά της βελτιστοποίησης του δικτύου, η δρομολόγηση αλυσίδων VNF σε ένα δίκτυο φορέων συνεπάγεται βασικές καινοτομίες που καθιστούν το πρόβλημα δρομολόγησης αλυσίδας VNF μοναδικό σε σχέση με την κατάσταση της τεχνολογίας.

#### Ευκαιρίες

Η ανάγκη δημιουργίας δικτύων με όσο το δυνατόν λιγότερη χρήση εξοπλισμού και εγκαταστάσεων αλλά και όσο το δυνατόν λιγότερη κατανάλωση ενέργειας αποτελούν βασικό κίνητρο ανάπτυξης της NFV. Το ίδιο βασικό κίνητρο είναι και η ανάγκη για αυξανόμενη διαχείριση, αξιοπιστία και απόδοση των συστημάτων στις υποδομές δικτύων. Η επέκταση δικτύων αλλά και δημιουργία νέων υποδομών αναπτύσσοντας εφαρμογές σε μορφή cloud αποτελεί μια ευκαιρία ανάπτυξης και εδραίωσης της NFV.

#### Απειλές

Η έλλειψη τεχνογνωσίας και εμπειρίας πάνω σε εφαρμογές λογισμικού αποτρέπουν τους παρόχους να υιοθέτησαν πλήρως την αρχιτεκτονική NFV. Ακόμη, η ανάγκη ισχύος και μεγάλης χωρητικότητας δικτύου σε περιοχές με πολύ ζήτηση για να καλυφθούν με την αρχιτεκτονική NFV απαιτούν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και συντήρησης από ότι οι άλλες αρχιτεκτονικές (Relays, Small cells).

## Σύνοψη τεχνικών

Παρακάτω, συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε αρχιτεκτονικής που περιγράψαμε στην παρούσα εργασία. Αυτή η απεικόνιση προφανώς βοηθάει στο να επιλεγθεί κάθε φορά η κατάλληλη μέθοδος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
<b>Network slicing</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συστέγαση δεδομένων</li> <li>• Γρήγορη ανάπτυξη με χαμηλό κόστος</li> <li>• Πλήρης διαχείριση</li> <li>• Δυνατότητα απομόνωσης</li> <li>• Δυνατότητα τεμαχισμού</li> <li>• Δυνατότητα ομαδοποίησης</li> <li>• Συμβατότητα με 2G/3G/4G</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απαιτήση γνώσεων διαχείρισης</li> <li>• Κοινοί πόροι</li> <li>• Θέματα ασφαλείας</li> <li>• Ο τεμαχισμός απαιτεί επιπλέον λειτουργίες</li> <li>• Κόστος ανάπτυξης εξοπλισμού</li> </ul>
<b>Cloud-RAN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καταναμημένα δίκτυα ή συνδυασμός με κεντρικά</li> <li>• Δυναμικός χειρισμός πόρων</li> <li>• Εύκολη αναβάθμιση</li> <li>• Εύκολη επέκταση της χωρητικότητας</li> <li>• Μειωμένες απαιτήσεις ενέργειας</li> <li>• Εξέλιξη τεχνολογίας cloud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλό κόστος κεφαλαίου</li> <li>• Ακριβή συντήρηση και επέκταση</li> <li>• Θέματα ασφαλείας</li> <li>• Απαιτήση μεγάλου εύρους ζώνης μεταξύ BBU</li> <li>• Κακή εμπιστοσύνη στην αξιοπιστία του cloud</li> </ul>
<b>Small cells</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μικρές κεραιές</li> <li>• Απλή εγκατάσταση</li> <li>• Εύκολη διαχείριση</li> <li>• Βελτιωμένη κάλυψη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Παρεμβολές</li> <li>• Υποβάθμιση αισθητικής</li> <li>• Αργή διαδικασία αδειοδότησης</li> <li>• Κόστος ενοικίου</li> </ul>
<b>Relays</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ενίσχυση επιδόσεων</li> <li>• Μειωμένα λειτουργικά έξοδα</li> <li>• Απουσία καλωδιακής σύνδεσης</li> <li>• Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων</li> <li>• Απλοί αλγόριθμοι δρομολόγησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αύξηση θορύβου</li> <li>• Αστάθεια λειτουργίας</li> <li>• Υψηλό ενοίκιο</li> <li>• Απλή επέκταση υπάρχοντος δικτύου</li> </ul>
<b>Cognitive radio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Βελτίωση χρήσης ραδιοφάσματος</li> <li>• Μηχανισμός δημοπρασίας φάσματος</li> <li>• Καλές επιδόσεις σε ad hoc δίκτυα</li> <li>• Διαφορετικές επιλογές τιμολογιακής πολιτικής</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διεπιστημονική συνεργασία</li> <li>• Δαπάνες ραδιοφάσματος</li> <li>• Περιορισμένο φάσμα</li> <li>• Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης εξοπλισμού</li> </ul>

**NFV**

- Εικονικό δίκτυο
- Πολλαπλοί χρήστες στην ίδια υποδομή
- Υπολογιστική επεξεργασία δικτύου
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας
- Αυξημένη λειτουργικότητα
- Ευελιξία
- Ανοχή στις αλλαγές χρηστών
- Αυξημένο κόστος όταν τα VM είναι υπολογιστικά λιγότερο ισχυρά
- Υβριδική λειτουργία
- Πληροφοριακά συστήματα
- Εν γένει άγνωστο σύστημα με ρίσκο

## Κεφάλαιο 4:

### Συμπεράσματα

Από τα όσα έχουν αναφερθεί στο σύνολο της εργασίας, παρατηρούμε πως οι αρχιτεκτονικές με τις περισσότερες δυνατότητες και πλεονεκτήματα από την πλευρά της εφαρμογής τους για τη μείωση του κόστους και της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων είναι κυρίως η αρχιτεκτονική Network slicing (τεμαχισμός δικτύου), η αρχιτεκτονική των αναμεταδοτών (Relays) και επίσης αυτή των Small cells, καθώς έχουν πολλά πλεονεκτήματα απέναντι στις υπόλοιπες αρχιτεκτονικές νέας γενιάς, και αποδίδουν περισσότερο (σχέση κόστους/αποτελέσματος).

Για παράδειγμα, η αρχιτεκτονική network slicing παρέχει τη δυνατότητα του κατ' επιλογή τεμαχισμού του δικτύου, κάτι που φέρει διάφορα πλεονεκτήματα (γρήγορη ανάπτυξη, συστέγαση, εύκολη διαχείριση με δυνατότητες ομαδοποίησης ή επιπλέον τεμαχισμού και συμβατότητα με παλιές τεχνολογίες). Αντιθέτως, τα μειονεκτήματα αυτής (κοινοί πόροι, ασφάλεια, κόστος ανάπτυξης εξοπλισμού) είναι διαχειρίσιμα, με σωστό σχεδιασμό του δικτύου.

Οι αρχιτεκτονικές των Small cell και των Relays είναι επίσης αποδοτικές, καθώς και οι δύο είναι εύκολες στην εγκατάσταση σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο κάτι που συνεπάγεται μειωμένο κόστος επένδυσης. Τα μειονεκτήματά τους, από την άλλη πλευρά, είναι σχετικά λίγα και έχουν κυρίως να κάνουν με προβλήματα εγκατάστασης του εξοπλισμού, ο οποίος πρέπει να γίνει σε αστικές περιοχές.

Αντίθετα, οι υπόλοιπες αρχιτεκτονικές (Cloud-RAN, Cognitive radio, NFV) έχουν αναπτυχθεί για να αντικαταστήσουν μελλοντικά τις προηγούμενες και όχι άμεσα. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός πως βασίζονται κυρίως σε εικονικές τεχνικές ανάπτυξης του δικτύου, κάποιες φορές ακόμη και με τη χρήση υπηρεσιών cloud, ή στην ύπαρξη δικτύου τύπου ad hoc, και όχι με την υλική ανάπτυξη αυτών. Χρειάζονται, δηλαδή, την ύπαρξη ενός φυσικού δικτύου, πάνω στο οποίο στη συνέχεια θα λειτουργούν. Σε αυτή τη φάση, η ανάπτυξη του δικτύου υποδομής κοστίζει αρκετά, και γι' αυτό οι επενδύσεις στις παραπάνω αρχιτεκτονικές δεν

γίνονται αυτή τη στιγμή, αλλά είναι πολύ πιθανό να κατακτήσουν τις επικοινωνίες στο μέλλον

Κλείνοντας την εργασία, αναφέρουμε το εξής ενδιαφέρον στοιχείο: Στη χώρα μας, όπως μπορούμε να δούμε και στο site της EETT [keraies.eett.gr](http://keraies.eett.gr), τα τελευταία χρόνια εγκαθίστανται όλο και περισσότερες Εγκαταστάσεις Κατασκευών Κεραιών Χαμηλής Ηλεκτρομαγνητικής Περιβαλλοντικής Όχλησης (ΕΚΚΧΟ), συχνά σε αστικά κέντρα, όπου η εγκατάσταση σταθμών βάσης είναι αρκετά δύσκολη ή και ανέφικτη. Αυτό γίνεται για επέκταση του δικτύου σε περιοχές όπου οι σταθμοί βάσης δεν μπορούν να καλύψουν αλλά και για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου σε σημεία με μεγάλη ζήτηση. Συχνά παρατηρείται και η συνεγκατάσταση ή και ο διαμοιρασμός συστημάτων κεραιών (κυρίως ιστών και οικίσκων εξοπλισμού) μεταξύ δύο ή περισσότερων παρόχων, κατά βάση για λόγους μείωσης του κόστους κτήσης και κόστους λειτουργίας (CAPEX, OPEX). Αυτό είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής των αρχιτεκτονικών Small cell και Relay. Η αρχιτεκτονική Network slicing εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα WiFi, όπως για παράδειγμα το πρόγραμμα OTE WiFi Fon, το οποίο ουσιαστικά διαχωρίζει σε δύο διαφορετικά και ανεξάρτητα δίκτυα το δίκτυο του πελάτη, ο οποίος ενεργοποιεί την υπηρεσία και έτσι δίνει κομμάτι των πόρων της σύνδεσης του μέσω του νέου και ξεχωριστού και πλήρως ανεξάρτητου δικτύου που τρέχει πάνω στον ίδιο εξοπλισμό. Βέβαια το Network slicing εφαρμόζεται και στις περιπτώσεις των εικονικών παρόχων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας (Mobile Virtual Network Operator, MVNO) που χρησιμοποιούν τις υποδομές του δικτύου κινητής τηλεφωνίας άλλου παρόχου, όσον αφορά κυρίως το κομμάτι των κεραιών και των σταθμών βάσης, καθώς συνήθως έχουν δικές τους υποδομές όσον αφορά τα κεντρικά συστήματα υποστήριξης των υπηρεσιών που παρέχουν. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κινητή τηλεφωνία της εταιρίας Cyta Hellas, η οποία λειτουργούσε μέχρι πρόσφατα ως MVNO χρησιμοποιώντας τις υποδομές της Vodafone. Με αυτό τον τρόπο, μείωνε σημαντικά το κόστος λειτουργίας της αλλά και ο πάροχος των υποδομών μείωνε το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού του λόγω του ενοικίου που εισέπραττε από τον MVNO. Όσο περνάει ο καιρός και εξελίσσεται η τεχνολογία, αναμένεται να εισάγονται περισσότερο και οι αρχιτεκτονικές νέας γενιάς που διεξοδικά περιγράφηκαν στην εργασία, στον τομέα των ασύρματων δικτύων.

## Βιβλιογραφία

1. M. Samsuzzaman, M. S. Uddin, T. Islam, S. Bappi, S. Sulaiman, “Comparing WiMax and other Technology for Broad band Wireless Access (BWA),” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 605-615, 2012
2. S. Van Rossem, M. Peuster , L. Conceicao, H. R. Kouchaksaraei, W. Tavernier, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester “A Network Service Development Kit Supporting the End-to-End Lifecycle of NFV-based Telecom Services,” *IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks*, 2017
3. Y.-C. Liang, K.-C. Chen, G. Ye Li, P. Mahonen, “Cognitive Radio Networking and Communications: An Overview,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60, 7, 2011
4. Δ. Τσάμη, *Ασύρματα Δίκτυα 4<sup>ης</sup> Γενιάς (4G)*, Διπλωματική Εργασία, ΑΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα αυτοματισμού, 2014
5. Γ. Σφέτσας, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, Τμήμα ηλεκτρολογίας, 2011
6. Γ. Καλάτζης, *Ασύρματα Δίκτυα*, Διπλωματική Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, Τμήμα διαχείρισης πληροφοριών, 2005
7. A. Raniwala and T. Chiueh, *Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network*, Dissertation Thesis, Stony Brook University, Computer Science Department, 2005
8. C. Ravichandiran and V. Vaithyanathan, “An Incisive SWOT Analysis of Wi-Fi, Wireless Mesh, WiMAX and Mobile WiMAX Technologies,” *International Conference on Education Technology and Computer*, 2009
9. C. So-In, R. Jain, A.-K. Al Tamimi, “A Scheduler for Unsolicited Grant Service (UGS) in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks,” *Application Working Group of WiMAX Forum*, 2010
10. R. Jain, *Internet 3.0: Ten Problems with Current Internet Architecture and Solutions for the Next Generation*, Washington University, Department of Computer Science and Engineering, 2006
11. A. Durrezi and R. Jain, *Asynchronous Transfer Mode (ATM)*
12. I. Saarinen, G. Coppola, A. Polydoros, J. L. Garcia, M. Lobeira, P. Dallas, M. Gertou, R. Cusani, and G. Razzano, “High Bit Rate Adaptive WIND-FLEX

- Modem Architecture for Wireless Ad-Hoc Networking in Indoor Environments,” 2002
13. G. Brown, *Cloud ran the next generation mobile network architecture*. Huawei reading reports, 2017
  14. K. Chen and R. Duan, *C-RAN The Road Towards Green RAN White Paper*, China Mobile Research Institute, 2011
  15. A. Reznik, L. M. Contreras Murillo, Y. Fang, W. Featherstone, M. Filippou, F. Fontes, F. Giust, Q. Huang, A. Li, C. Turyagyenda, C. Wehner, Z. Zheng, “Cloud RAN and MEC: A Perfect Pairing, *ETSI France*, 2018
  16. R. Arnold, V. Bonneau, J. Bott, M. Djurica, A. Holtzer, T. Plückebaum, T. Ramahandry, S. Tas, C. Wernick, “Implications of the emerging technologies Software-Defined Networking and Network Function Virtualization on the future Telecommunications Landscape,” *European Commission DG Communications Networks*, 2016
  17. Q. Chen, X. Wang, Y. Lv, “An overview of 5G network slicing architecture,” *6<sup>th</sup> International Conference on Computer-Aided Design, Manufacturing, Modeling and Simulation*, 2018
  18. *White Paper 3-End to End Network Slicing*, Wireless world research forum, 2018
  19. S. Kuklinski, L. Tomaszewski, T. Osinski, A. Ksentini, P. A. Frangoudis, E. Cau, M. Corici, “A reference architecture for network slicing,” *EU-Japan project 5G*, 2018
  20. M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, S. Matsuoka, “Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, 2009
  21. R. Prasad, F. J. Velez, “WiMAX Networks Techno-Economic Vision and Challenges,” *Springer*, 2010
  22. B. Naudts, M. Kind, S. Verbrugge, D. Colle, and M. Pickavet, “How Can a Mobile Service Provider Reduce Costs with Software-Defined Networking?,” *European Commission under the 7<sup>th</sup> Framework research program projects SPARC and UNIFY*
  23. C. Bouras, P. Ntarzanos, A. Papazois, “Cost Modeling for SDN/NFV Based Mobile 5G Networks,” *8<sup>th</sup> International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, 2016

24. Vilicom LTD, *UMTS Network Design & Cost Estimation for National UMTS900, UMTS1800 & UMTS2100 Networks*, 2008-2009
25. R. Pabst, B. H. Walke, and D. C. Schultz, H. Yanikomeroglu, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D. D. Falconer, and G. P. Fettweis, "Relay-Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio," *IEEE Communications Magazine*, 2004
26. Municipal Action Guide, *Small Cell Wireless Technology in Cities*, National League of Cities N.L.C, 2018
27. K. Almustafaa and M. Alenezi, "Cost Analysis of SDN/NFV architecture over 4G Infrastructure," *Elsevier*, 2017
28. B. Addis, D. Belabed, M. Bouet, and S. Secci, "Virtual Network Functions Placement and Routing Optimization," *HAL*, 2015
29. T. Salman *Cloud RAN: Basics, Advances and Challenges A Survey of C-RAN Basics, Virtualization, Resource Allocation, and Challenges*, 2016
30. X. Du and D. Wu, *Adaptive Cell-Relay Routing Protocol for Mobile ad hoc Networks*
31. <https://www.techopedia.com/definition/5268/base-station-bs> (11/2018)
32. <https://www.annese.com/blog/wireless-lan-controllers> (11/2018)
33. <http://users.sch.gr/pepoudi/site/pages/intro.html> (12/2018)
34. <https://www.asd-usa.com/wireless-networks/project-budget/> (12/2018)
35. <https://www.sdxcentral.com/sdn-nfv-use-cases/network-virtualization/> (01/2019)
36. <https://www.rcrwireless.com/20160711/network-infrastructure/small-cells-tag31-tag99/> (01/2019)
37. <https://www.optanix.com/pros-and-cons-of-network-function-virtualization-in-a-nutshell/> (01/2019)
38. <https://epixeirein.gr/2009/07/31/swot-analysis-efarmogi/> (02/2019)
39. [http://www.ekeflog.econ.uoa.gr/uploads/media/3\\_SWOT.pdf](http://www.ekeflog.econ.uoa.gr/uploads/media/3_SWOT.pdf) (02/2019)
40. <http://keraies.eett.gr> (02/2019)