

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

Θέμα διπλωματικής Εργασίας:
**Μελέτη & Σύγκριση Τεχνο - Οικονομικών Λύσεων για Δίκτυα 5G και
εξής».**

Καϊσούδης Φώτιος

ΑΜ: 236062

Επιβλέπων καθηγητής: Καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας,

Πάτρα, 2021

© Copyright συγγραφέας Καϊσούδης Φώτιος, 2021

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλω να εκφράσω τη βαθιά μου συγκίνηση, τη χαρά, την ευγνωμοσύνη και την αγάπη που κατάφερα και ολοκλήρωσα με επιτυχία τις προπτυχιακές μου σπουδές αλλά και όσους συνέβαλαν στην προσπάθεια αυτή. Στην διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων βίωσα θετικές και αρνητικές στιγμές, οι οποίες συνετέλεσαν στην καλλιέργεια του πνεύματός μου και στην ψυχική μου ωρίμανση. Τέλος, θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλου τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μπούρα και τη συνεργάτιδά του Α. Κόλλια για τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση τους. Τα σχόλια και οι υποδείξεις τους αποτέλεσαν πολύτιμα εφόδια.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών και ιδιαίτερα τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ.κ. Χ. Μπούρα, Ι. Γαροφαλάκη και Κ. Βλάχο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους γνωστούς και φίλους για όλες αυτές τις στιγμές που βιώσαμε στην διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ το αφιερώνω στην οικογένειά μου που με τον δικό της τρόπο με βοήθησε οικονομικά και ψυχολογικά στην περάτωση των φοιτητικών μου σπουδών.

*Προέκυψε δημοσίευση με τίτλο «Comparison of Techno-Economic Solutions for 5G Networks and beyond.»

Περίληψη

Η πέμπτη γενιά (5G) προβλέπει μια κοινωνία που είναι διαρκώς διασυνδεδεμένη με τεράστιο αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών, οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν, επιτρέποντας χαμηλό χρόνο καθυστέρησης, μεγάλο όγκο κίνησης δεδομένων και βελτιωμένη ποιότητα εμπειρίας. Η έλευση του 5G ενθαρρύνει τους παρόχους και τους επενδυτές να αναπτύξουν καινοτόμες υπηρεσίες, οι οποίες μπορούν να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των καταναλωτών. Ωστόσο, η βιωσιμότητα μιας νέα υπηρεσίας διερευνάται από οικονομική σκοπιά. Ως εκ τούτου, χρειάζονται αποτελεσματικές τεχνικές για την οικονομική αξιολόγηση τέτοιων υπηρεσιών. Αυτό το έγγραφο αναλύει τις τεχνολογίες 5G και τις αξιολογεί μέσω τεχνο-οικονομικής ανάλυσης βασισμένες σε μοντέλα τιμολόγησης. Συγκεκριμένα, κύριοι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του κόστους είναι το CAPEX και το OPEX με την σύγκριση των οποίων αποφαινεται η βιωσιμότητα της επένδυσης. Επιπλέον με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν το 5G αποτελεί κερδοφόρα επένδυση λόγω χαμηλού κόστους και της αύξησης της μέσης κατανάλωσης δεδομένων που αναλογούν σε κάθε καταναλωτή. Τέλος χρησιμοποιώντας τις μετρικές εκτίμησης κόστους προκύπτει ότι η επαναχρησιμοποίηση των υπαρχόντων τοποθεσιών κυψέλης είναι λιγότερο πολυδάπανη στην ανάπτυξη ενός πυκνού δικτύου μακροκυψελών.

Λέξεις κλειδιά: 5G, Τεχνο-οικονομικά μοντέλα, Software Defined Networks (SDN), Network Function Virtualization (NFV), Device to Device communications (D2D), Internet of Things (IoT), Cognitive Radio (CR), mmWave, Internet of Everything (IoE), Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT, WiFi-HaLow, LPWAN, LPLAN, C-IoT, Femtocell, mu-MIMO, Total Cost of Ownership (TCO), Price Elasticity of Demand (PED), CAPEX, OPEX, MaBS, PBS, FBS, LTE, GSM, IP, M2M, NOMA, QoS, QoE, RAN, RAT

Abstract

The fifth generation (5G) envisions a society that is constantly interconnected with a huge number of interconnected devices, anywhere and anytime. The developed technologies play an important role, allowing low latency, a large volume of data traffic, and improved quality of services. The advent of 5G encourages providers and investors to develop innovative services that can meet consumer demands. However, the viability of a new service is being investigated from an economic perspective. Therefore, effective techniques are needed for the financial evaluation of such services. This paper analyzes 5G technologies and evaluates them through techno-economic analysis based on mathematical models and pricing models. In particular, the main factors used to estimate the cost are CAPEX and OPEX, which compare the viability of the investment. Besides, based on the results obtained, 5G is a profitable investment due to its low cost and the increase in the average data consumption of each consumer. Finally, using metrics, it is found that reusing existing sites is less costly in developing a dense macro-cell network.

Keywords: 5G, Techno-economic models, Software Defined Networks (SDN), Network Function Virtualization (NFV), Device to Device communications (D2D), Internet of Things (IoT), Cognitive Radio (CR), mmWave, Internet of Everything (IoE), Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT, WiFi-HaLow, LPWAN, LPLAN, C-IoT, Femtocell, mu-MIMO, Total Cost of Ownership (TCO), Price Elasticity of Demand (PED), CAPEX, OPEX, MaBS, PBS, FBS, LTE, GSM, IP, M2M, NOMA, QoS, QoE, RAN, RAT

Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων.....	3
Λίστα Πινάκων	5
Ακρωνύμια.....	7
1. Εισαγωγή	14
2. Ιστορική αναδρομή στην κινητή τηλεφωνία	16
2.1 Σύντομη αναφορά στις γενιές δικτύων.....	16
2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά γενιών 1G – 5G.....	18
2.3 Δίκτυα 1G.....	19
2.4 Δίκτυα 2G - 2.5G.....	22
2.5 Δίκτυα 3G.....	25
2.5.1 Βασικά τμήματα δικτύου 3G.....	25
2.6 Δίκτυα 4G.....	26
2.7 Τεχνολογία LTE	28
2.8 Δίκτυα 6G.....	31
3. Δίκτυα 5G.....	34
3.1 Κύριοι τεχνικοί στόχοι για τα συστήματα 5G	34
3.2 Τεχνολογία mu – MIMO	36
3.3 Τεχνολογία Femtocell.....	38
3.4 Τεχνολογίες NFV και SDN	41
3.4.1 Η ανάγκη για νέα αρχιτεκτονική/διανομή δικτύου για λειτουργίες κινητών δικτύων	42
3.4.2 Προτεινόμενη τεχνική λύση για μείωση εξάρτησης από κατασκευαστές και διαμοιρασμό δικτύωσης	43
3.4.3 Ποιοτική αξιολόγηση των κοστών ορισμένου δικτύου λογισμικού και διανομή δικτύου.....	44
3.4.4 Δαπάνες κεφαλαίου (Κεφαλαιουχικές δαπάνες).....	45
3.4.5 Λειτουργικά έξοδα.....	46
3.5 Τεχνολογία Cognitive Radio	47
3.6. Τεχνολογία mmWave	50
3.7 Το 5G Διαδίκτυο και σημαντικότερες εφαρμογές του	60
4. Τεχνο – οικονομική μελέτη δικτύων 5G	63
4.1 Προδιαγραφές τεχνολογιών Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT, WiFi-HaLow	63
4.1.1 Sigfox	63
4.1.2 LoRaWAN.....	66
4.1.3 NB-IoT	67
4.1.4 WiFi-HaLow (IEEE802.11ah)	68

4.2 Χαρακτηριστικές κόστους -χωρητικότητας συστημάτων LPWAN, LPLAN, C-IoT	69
4.2.1 Περιγραφή σεναρίου	69
4.2.2 Απαίτηση κυκλοφορίας	69
4.2.3 Διαστασιολόγηση δικτύου	70
4.2.4 Ανάλυση Δομής Κόστους.....	72
4.3 Μελέτη περιπτώσεων οικονομοτεχνικής μελέτης.....	84
4.3.1 Οικονομοτεχνική μελέτη της πόλης της Σανγκάης	84
4.3.2 Οικονομοτεχνική μελέτη των πόλεων Jakarta, Surabaya, Medan.....	104
5. Συμπεράσματα.....	113
6. Μελλοντικές εξελίξεις	118
6.1 Η εφαρμογή ασύρματης μεταφοράς ενέργειας στο NOMA.....	120
6.2 Ο συνδυασμός NOMA και CRN	121
6.3 Παροχή ασφάλειας για το NOMA.....	122
6.4 Εφαρμογές του NOMA σε άλλες επικοινωνίες 5G.....	122
6.5 Αναδυόμενες εφαρμογές NOMA πέραν του 5G	123
Βιβλιογραφία	125

Εικόνα 24: Προβλεπόμενη τιμή και όγκος κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης 5G χρησιμο-

π

Ε

Εικόνα 26: Προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX για BS / AP διαφορετικών RAT που

α

Ε

Εικόνα 27: Προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX για επαναχρησιμοποίηση τοποθε-

α

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Ε

Λίστα Πινάκων

Π

Π

ύ

Π

Π

ί

Π

ν

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Π

Πίνακας 10: Εκτιμήσεις του συνόλου ποσού έκπτωσης σε παρούσα αξία για την ανά-

Πίνακας 12: Κεφαλαιουχικές δαπάνες και χωρητικότητα σε Femto σταθμούς βάσης με

Πίνακας 13: CAPEX και χωρητικότητα για τοποθεσίες μακροκυψελών με συνάθροιση

.....

.....

.....

Ακρωνύμια

- 2.5G: 2,5 (Second and a half generation) γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας (GPRS)
- 2.75G: 2.75G γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας (EDGE)
- 3G: Τρίτη γενιά (Third generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 4G: Τέταρτη γενιά (Fourth generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 4G-RAN: 4G - Radio Access Network
- 5G: Πέμπτη γενιά (Fifth generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- ACI: Adjacent-channel interference
- ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line
- ALOHA: Additive Links On-line Hawaii Area
- AMPS: Advanced Mobile Phone System – Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας
- AP: Access Point
- ARPU: Average revenue per user
- BS: Base Station – Σταθμός Βάσης
- BigCom: - Big communications
- CAPEX: Capital Expenditure
- CCI: Co-channel interference
- CDMA: Code Division Multiple Access
- CEPT: European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
- CN: Core Network
- CoMP: Coordinated Multipoint
- CP: Control Plane
- CRD: Cognitive Radio Devices
- CRN: Cognitive Radio Networks
- CSD: Circuit Switched Data

- CSS: Chirp Spread Spektrum
- D2D: Device to Device
- D-AMPS: Digital - AMPS
- DAS: Distributed Antenna Systems
- DCN: Data Center Network
- DL: Downlink
- DOS: Disk Operating System
- DPC: Density Parity Check
- DS: Distributed System
- DSL: Digital Subscriber Loop/Line
- EDGE: Enhanced Data rates for GSM Evolution
- eMBB: Enhanced Mobile Broadband
- eMBB - Plus: Enhanced Mobile Broadband - Plus
- eMBMS: Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services
- eNB: NodeB
- EPC: Evolved Packet Core - Εξελιγμένοι πυρήνες πακέτων
- EPS: Evolved Packet System
- eMTC: Enhanced Machine Type Communications
- EV-DO: Evolution-Data Optimized
- FAP: Femto Access Point
- FBS: Femto Base Station – Σταθμού βάσης Femto
- FDMA: Frequency Division Multiple Access
- GGSN: Gateway GPRS Support Node
- GPRS: General Packet Radio Service
- GSM*: Global System for Mobile communications
- GSM: Groupe Special Mobile

- HNBs: Home NodeBs – Οικιακά NodeBs
- HSCSD: High Speed Circuit Switched Data
- HSPA: High Speed Packet Access
- iDEN: Integrated Digital Enhanced Network
- IMT-Advanced: International Mobile Telecommunications-Advanced
- IoE: Internet of Everything
- IoT: Internet of Things
- IP: Internet Protocol
- IP-PBX: Internet Protocol Private Branch Exchange
- IS-95: Interim Standard – 95
- IS-136: Interim Standard -136
- ISM: Industrial, Scientific, Medical
- ITU: International Telecommunication Union - Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
- ITU-R: International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
- LAS-CDMA: Large Area Synchronized CDMA
- LIPA: Local IP Access
- LORA: Long Range
- LORAWAN: Long Range Wide Area Network
- LOS: Line-of-Sight
- LPLAN: Low-Power Local-Area Network
- LPWAN: Low-Power Wide-Area Network
- LTE: Long Term Evolution
- LTE-SAE: LTE - System Architecture Evolution
- M2M: Machine to Machine
- MaBS: Macro Base Station
- MC-CDMA: Multi-Carrier – CDMA

- MetBS: Metro Base Station
- MiBS: Micro Base Station
- MIMO: Multiple Input Multiple Output
- mMIMO: Massive MIMO
- MME: Mobility Management Entity
- MMS: Multimedia Messaging Service
- mmWave: millimeter Wave
- MT: Mobile Terminal
- MTC: Machine Type Communications
- mMTC: massive Machine Type Communications
- Network-LMDS: Local Multipoint Distribution System
- NFV: Network Function Virtualization
- NLOS: Non - LOS
- NOMA: Non-Orthogonal multiple access
- NMT: Nordic Mobile Telephone
- NTT: Nippon Telegraph and Telephone
- OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- OFDMA: Orthogonal frequency-division multiple access
- OMN: Operator Mobile Network
- OPEX: Operational Expenditure
- PBCH: Physical Broadcast Channel
- PBS: Pico Base Station
- PCRF: Policy and Charging Rules Function
- PDA: Personal Digital Assistant
- PDC: Personal Digital Cellular
- PDCCH: Physical Downlink Control Channel

- PDN-GW: Packet Data Network Gateway
- PDSCH: Physical Downlink Shared Channel
- PED: Price Elasticity of Demand
- PHS: Personal Handy-phone System
- PHY: Physical
- PLE: Path Loss Exponent
- PLS: Physical Layer Security
- QoE: Quality of Everything
- QoS: Quality of Service
- RAN: Radio Access Networks
- RAT: Radio Access Technology
- RBS: Radio Base Station
- RF: Radio Frequency
- RIPA: Remote IP Access
- RNC: Radio Network Controller
- ROI: Return on Investment
- RRM: Radio Resource Management
- SAE-GW: System Architecture Evolution - GateWay
- SCFDMA: Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access
- SDN: Software Defined Network
- SDR: Software Defined Radio
- SFBC: space frequency block code
- SG: Serving GPRS
- SGSN: Serving GPRS Support Node
- SIC: Successive Interference Cancellation
- SIM: Subscriber Identity Module

- SMS: Short Message Service
- SOP: Spectrum Opportunity
- SU: Secondary User
- SWIPT: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
- TCO: Total Cost of Ownership
- TDMA: Time Division Multiple Access
- TMA: Tower Mounted Amplifier
- TS: Transportation Systems
- UAV: Unmanned Aerial Vehicle
- UCDC: - Unconventional data communications
- UDN: Ultra - Dense Networks
- UE: User Equipment – Εξοπλισμός χρήστη
- UICC: Universal Integrated Circuit Card
- UL: Uplink
- UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
- UNB: Ultra NarrowBand
- UP: User Plane
- URLLC: Ultra-reliable low-latency communications
- USIM: Universal Subscriber Identity Module
- eUTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access
- VLC: Visible Light Communications
- VMN: Virtual Mobile Network
- WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access
- WiDEN: Wideband Integrated Digital Enhanced Network
- WS: White Space
- WWW: Wireless World Wide Web

Εισαγωγή

Το Fifth-Generation (5G) αποτελεί κομβικό σημείο στην εξέλιξη των ευρυζωνικών κινητών δικτύων. Αρχικά, θα παίξει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά δεδομένων κινητής τηλεφωνίας με κύριο σκοπό την παροχή υψηλότερων δυνατοτήτων σε μεμονωμένες κινητές ραδιοκυψέλες. Από την άλλη πλευρά, δεν γίνεται σωστή χρήση των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και αυτό φαίνεται από την ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων από τους χρήστες. Για αυτό το λόγο το δίκτυο 5G προσφέρει αρκετές καινοτόμες λύσεις που προσφέρουν αύξηση της κίνησης των δεδομένων. Επίσης, εξαιτίας της αύξησης της κίνησης δεδομένων οι πάροχοι κινητών τηλεπικοινωνιών πασχίζουν να ομαλοποιήσουν την τεράστια ζήτηση με γρήγορους και σε πολλές τοποθεσίες συνδέσμους δεδομένων παρέχοντας ταχύτερα και μεγαλύτερα ασύρματα δίκτυα [72].

Είναι γνωστό ότι σχεδόν όλοι οι άνθρωποι είναι συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο και ο επόμενος στόχος είναι η σύνδεση των μηχανών και των συσκευών που θα είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο των πραγμάτων. Για παράδειγμα, αρκετές υπηρεσίες θα επικεντρωθούν στις απαιτήσεις της βιομηχανίας, οι διαδικασίες παραγωγής θα αυτοματοποιηθούν και αρκετές καινοτόμες εφαρμογές όπως οι έξυπνες οικίες, η επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα θα ωφελήσουν την ιδιωτική ζωή των ανθρώπων [72].

Η τεχνολογία 5G δίνει την δυνατότητα υποστήριξης σχεδόν άπειρων καινοτομιών και χρήσεων. Το 5G είναι αναμφισβήτητο το δίκτυο του μέλλοντος και υποστηρίζει περισσότερες νέες υπηρεσίες πέρα από την απλή ψηφιακή τηλεφωνία και το ασύρματο Internet. Το 5G αποτελεί ένα πρότυπο επικοινωνίας και όχι απλά ένα ασύρματο πρότυπο. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η ψηφιακή σχέση μεταξύ ανθρώπων και μηχανών εξελίσσεται ραγδαία, απαιτούνται ισχυρές υποδομές και τα κατάλληλα δίκτυα. Η αύξηση του όγκου των δεδομένων απαιτεί ταχύτερη μεταφορά δεδομένων. Συνεπώς, το μελλοντικό δίκτυο 5G είναι απαραίτητο να αντιμετωπίσει το τεράστιο και περίπλοκο φάσμα απαιτήσεων, διότι παρέχει τα θεμέλια για την υποστήριξη μιας ευρείας γκάμας εφαρμογών επικοινωνίας [72].

Το τρέχον πρότυπο κινητών επικοινωνιών είναι γνωστό ως Long Term Evolution διότι τους προσφέρει επαρκή ταχύτητα δεδομένων για διάφορες εφαρμογές όπως ενημέρωση καιρού σε κινητά, συνομιλία μέσω εφαρμογών ανταλλαγής μηνυμάτων και ροή

ειδήσεων. Η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα Fourth-Generation LTE Advanced (4G-LTE

A

d

v

a

n

c

e

d

είναι στα 300 Mbps και του 4G-LTE είναι στα 150 Mbps, το οποίο είναι χρήσιμο για

Με χρήση της τεχνολογίας 5G εξυπηρετούνται ταυτόχρονα αρκετές διαφορετικές γρήγορες λήψεις μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων. Παρόλα αυτά, ο ερχομός του 5G δεν εφαρμόζεται. Όμως για να εξυπηρετηθούν όλες αυτές εφαρμογές εφαρμόζεται ο τεμαχισμός συνεπάγεται ότι ήρθε το τέλος του LTE αλλά αντίθετα θα αποτελέσει μια αναβάθμιση δικτύου, δηλαδή ο διαχωρισμός του δικτύου σε μεμονωμένα επίπεδα. Οι τεχνολογίες που θα επεκτείνει το υπάρχον δίκτυο με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη λειτουργία και των βασίζεται ο τεμαχισμός δικτύου είναι η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου Network δύο τεχνολογιών που θα οδηγήσει σε υψηλότερες χωρητικότητες και ταχύτητες διαδυσυνδυασμό πραγματικών δυνατοτήτων δικτύου για τη δημιουργία τομέων εικονικού δικτύου. Επίσης πέρα από τους δισεκατομμύρια ανθρώπους που χρησιμοποιούν ήδη κινητό κτύου κατόπιν ζήτησης, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων δυνατοτήτων και καινοτομιών Διαδίκτυο θα συνδεθούν περισσότερα από 100 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές για συγκεκριμένους πελάτες [72].

και το δίκτυο 5G αποτελεί λύση στις απαιτήσεις της ψηφιοποίησης [72].

2. Ιστορική αναδρομή στην κινητή τηλεφωνία

2.1 Σύντομη αναφορά στις γενιές δικτύων

Είναι γνωστό ότι ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων αποτελεί βασικό θεμέλιο που θα συμβάλλει στην εξέλιξη της ανθρωπότητας και της ίδιας της τεχνολογίας. Η ανθρωπότητα δεν θα βρισκόταν στο σημείο που βρίσκεται τώρα αν δεν υπήρχαν τα κανάλια επικοινωνίας και μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας σε διάφορες κινητές συσκευές έχει εξελιχθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες. Ξεκινώντας με το τότε επαναστατικό First Generation (1G) μέχρι το 4G του σήμερα και το 5G στο εγγύς μέλλον. Αλλά τι έχει αλλάξει πραγματικά; και ποιες είναι οι βασικές αρχές οδήγησης αυτής της ασύρματης τεχνολογίας επικοινωνίας; Πρώτα από όλα, το G στο "4G" ή "5G" σημαίνει γενιά και ο αριθμός είναι απλώς μια αναπαράσταση της εξέλιξης της τεχνολογίας. Επί του παρόντος, χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας 4^{ης} γενιάς.

Τα κινητά ασύρματα δίκτυα τα τελευταία χρόνια έχουν εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό. Η κινητή ασύρματη έξοδος (G - Generation) σημαίνει ότι κάθε γενιά παρουσιάζει μια αλλαγή στη φύση του συστήματος, την ταχύτητα, την τεχνολογία και τη συχνότητα. Κάθε γενιά ακολουθεί κάποια πρότυπα και κάποιες τεχνικές που τη διαφοροποιούν από την προηγούμενη. Το πρώτο φορητό κινητό τηλέφωνο εισήχθη από την εταιρεία Motorola το 1973. Το πρώτο εμπορικό αυτοματοποιημένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησε από την Nipparξη του συστήματος Nordic Mobile Telephone (NMT) στη Δανία, τη Φινλανδία, τη Νορβηγία και τη Σουηδία, 1981. Μετά από αυτό ξεκινά η εξέλιξη μιας γενιάς ασύρματης επικοινωνίας μέσω κινητού. Το δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας πρώτης γενιάς ήταν αναλογικό και μόνο για φωνητικές κλήσεις [1].

Η Second Generation (2G) αποτελεί μια ψηφιακή τεχνολογία που υποστηρίζει και μηνύματα κειμένου πέρα από την ομιλία. Κατά τη διάρκεια αυτής της γενιάς, που διήρκεσε αρκετά από το 1980 έως το 2003, σημειώθηκαν αρκετές εξελίξεις στο ίδιο το φάσμα όπως το Global System for Mobile communications (GSM), το General Packet Radio Service και το Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE). Πιο συγκεκριμένα:

G
l
o
b
a
l
S

Η γενιά 5G δικτύων είναι ακόμη σε πρωταρχικά στάδια και η τεχνολογία της που ήταν προγραμματισμένη να εμφανιστεί στην αγορά στους Ολυμπιακούς αγώνες του Τόκυο το καλοκαίρι του 2020, πήρε αναβολή λόγω έλευσης του κορωνοϊού (Covid-19). Τα μελλοντικά δίκτυα 5G θα υποστηρίζουν γρηγορότερες ταχύτητες που θα κυμαίνονται από 1 ρες, λόγω τεράστιων αριθμών νέων συσκευών που θα εισέλθουν εξαιτίας του Internet of λαπλών συσκευών και υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων. Το 5G παρουσιάζει έναν πραγματικό ασύρματο κόσμο - Wireless World Wide Web (WWWW), ενώ το Sixth-Generation λυψη. Το Seventh-Generation (7G) ασχολείται με την περιαγωγή στο διάστημα [1], [4].

Τεχνικά χαρακτηριστικά γενιών 1G – 5G

Η εξέλιξη των δικτύων από την εποχή της ηλεκτρικής τηλεγραφίας έως στα σημερινά δίκτυα ήταν σταδιακή σε μεγάλο βαθμό. Τα σύγχρονα δίκτυα βασίζονται στο Internet κτύου είναι ευρέως διαδεδομένη και αρκετές υπηρεσίες εξυπηρετούνται, όπως cloud com- ξηση των ταχυτήτων των ρυθμών δεδομένων, οι οποίες κυμαίνονται από περίπου 10 kilo- θιστά εφικτή την τεχνολογία 5G [1].

Η ανάπτυξη του 5G είχε στόχο στην αύξηση της απόδοσης δίνοντας την κατάλληλη προσοχή σε κάποια χαρακτηριστικά, για παράδειγμα ο εξαιρετικά χαμηλός χρόνος καθυστέρησης (Latency), η μεγάλη αξιοπιστία, ο εξαιρετικά γρήγορος ρυθμός δεδομένων και η συνδεσιμότητα καθώς και η πυκνότητα, δηλαδή τον αριθμό των ανθρώπων και των συσκευών που είναι ταυτόχρονα συνδεδεμένοι. Επιπλέον, μελετώνται τεχνολογίες δικτύωσης

ή
m
a
s
s
i
v
e
M
I

Το κυψελοειδές σύστημα πέμπτης γενιάς έθεσε σε λειτουργία Internet of Everything

I
o
E
P
a
r
t

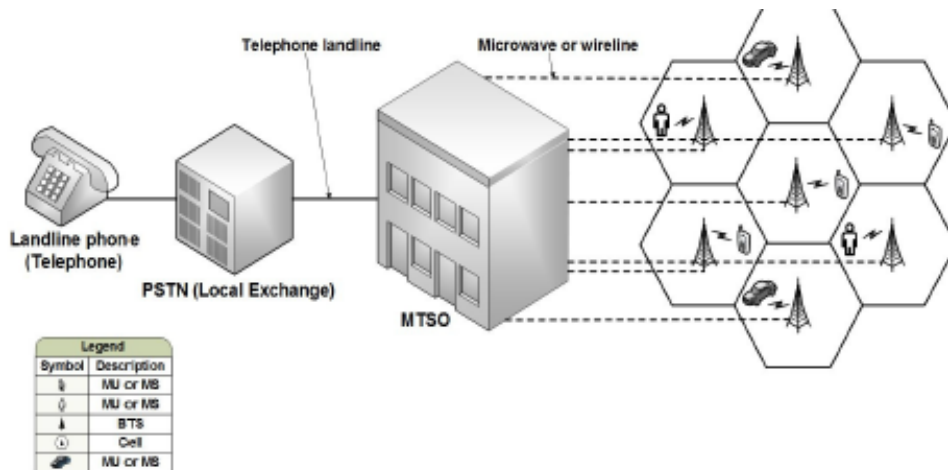
Το 5G αποτελεί μια ολοκληρωμένη ασύρματη επικοινωνία, εισάγοντας σε ένα τέλειο πραγματικό ασύρματο κόσμο - World Wide Wireless Web (WWWW). Οι τεχνολογίες 5G περιλαμβάνουν όλες τις προηγμένες δυνατότητες που καθιστούν την τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G πιο ισχυρή και σε τεράστια ζήτηση στο εγγύς μέλλον. Οι χρήστες μπορούν να συνδέσουν τα κινητά τηλέφωνα τεχνολογίας 5G με το φορητό υπολογιστή τους για να αποκτήσουν ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Ορισμένες από τις εφαρμογές που επωφελούνται από τη φορητή συνδεσιμότητα είναι αυτοματισμοί στο σπίτι, απάντηση έκτακτης ανάγκης, έξυπνες αγορές, έξυπνες μεταφορές, ασφάλεια διαχείρισης προϊόντων και ηλεκτρονικά βιβλία [4]. Στην πέμπτη γενιά, η αρχιτεκτονική δικτύου αποτελείται από ένα τερματικό χρήστη, ο οποίος έχει καθοριστικό ρόλο στη νέα αρχιτεκτονική και έναν αριθμό ανεξάρτητων, αυτόνομων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης Radio Access Technology (RAT). Το σύστημα κινητής τηλεφωνίας 5G είναι μοντέλο με βάση όλα τα IP πρότυπα που αφορά τη διαλειτουργικότητα ασύρματων και κινητών δικτύων. Σε κάθε ένα από τα τερματικά, καθεμία από τις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RAT) θεωρείται ως σύνδεσμος το IP με τον εξωτερικό κόσμο του Διαδικτύου. Στο 5G δίκτυο επιλύονται τα προβλήματα των συχνοτήτων και διάφορα θέματα διαχείρισης φάσματος. Τα τερματικά 5G ενδέχεται να έχουν ασύρματου συστήματος 5G λειτουργεί σχεδόν αποκλειστικά με mmWave και επιτρέπει ετερογενείς υπηρεσίες συνδέσεις καθορισμένες από λογισμικό. Επίσης, θα έχουν διαφορετικά σχήματα υπηρεσιών IoE είναι μέχρι στιγμής ελλιπής. Παρόλα αυτά, τα διαθέσιμα συστήματα 5G μόρφωσης και ελέγχου σφαλμάτων [1], [4]. υποστηρίζουν βασικές υπηρεσίες IoE με αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλού λανθάνοντος χρόνου Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC) όπως αυτοματισμός εργασίας [1].

Δίκτυα 1G

Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας πρώτης γενιάς είναι μια αναλογική τεχνολογία που αναπτύχθηκε το 1980. Χρησιμοποιήθηκε για φωνητικές υπηρεσίες και βασί-

στηκε σε μια τεχνολογία που ονομάζεται Advanced Mobile Phone System (AMPS). Ο σχεδιασμός του συστήματος AMPS υιοθέτησε την τεχνολογία πρόσβαση πολλαπλής συχνότητας διαίρεσης Frequency-division multiple access (FDMA) με την χωρητικότητα του καναλιού να είναι στο 30KHz και η ζώνη συχνοτήτων στα 824-894MHz. Υποστηρίζει ταχύτητες έως 2.4 kbps. Το 1988, στο AMPS εκχωρήθηκε ένα επιπλέον εύρος ζώνης 10MHz που ονομάζεται Expanded Spectrum, το οποίο αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στο Σικάγο με επιφάνεια εξυπηρέτησης 2.100 τετραγωνικών μιλίων. Το AMPS κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1982. Το 1G αποτελεί την πρώτη γενιά ασύρματης τεχνολογίας που βασίζεται σε κυψέλες. Τα δίκτυα 1G ήταν αναλογικά και πραγματοποίησαν απλές τηλεφωνικές κλήσεις. Εκείνη την εποχή το 1979, η NTT στην Ιαπωνία ξεκίνησε το πρώτο αυτοματοποιημένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο για εμπορική χρήση. Οι ΗΠΑ παρουσιάζουν το πρώτο δίκτυο 1G για συστήματα Motorola DynaTAC Mobile Frequency Division συχνότητας Frequency Modulation (FM) χρησιμοποιήθηκε ως σχήμα διαμόρφωσης για τη μεταφορά της φωνητικής κίνησης [1],[4].

Όσον αφορά τα σκανδιναβικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας 1G, το NMT είναι ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που καλύπτει πρώτα τις πέντε σκανδιναβικές χώρες, τη Δανία, τη Φινλανδία, τη Νορβηγία, τη Σουηδία και την Ισλανδία και αργότερα ορισμένες άλλες χώρες. Το NMT έχει δύο παραλλαγές με βάση τις ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας, γνωστές ως NMT-450 και NMT-900 αντίστοιχα. Το NMT-450 αναπτύχθηκε για να δημιουργήσει ένα συμβατό τηλεφωνικό σύστημα στις σκανδιναβικές χώρες το 1995. Αρχικά, το NMT-450 στόχευε στην ανάπτυξη μακροκυψελών (macro-cells) στη ζώνη 450 MHz για να παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη και αργότερα τροποποιήθηκε για να λειτουργεί στη ζώνη 900 MHz λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και την περιορισμένη ισχύ μετάδοσης. Η χρήση των NMT συστημάτων εφαρμόστηκε αρχικά στη Νορβηγία και στη Σουηδία και στη συνέχεια τα συστήματα αυτά βελτιώθηκαν με την προσθήκη υπηρεσιών ανά κράτος. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται μια τυπική κυψελοειδή αρχιτεκτονική 1G AMPS. Το γεγονός ότι τα δίκτυα 1G βασίζονται σε αναλογικά σήματα ή αλλιώς τεχνολογία πρωτοκόλλου (FM) σημαίνει ότι έχουν ευαισθησία στις παρεμβολές, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση στην ποιότητα των κλήσεων [1], [3].



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική 1G AMPS [1]

Επιπλέον, τα αναλογικά σήματα δεν κρυπτογραφούνται με αποτέλεσμα την έλλειψη ασφαλείας. Η τεχνολογία επικοινωνίας 1G έχει αρκετά αρνητικά χαρακτηριστικά όπως περιορισμένη χωρητικότητα, το οποίο συνεπάγεται μειωμένος αριθμός συνδρομητών, μεγάλο μέγεθος τηλεφώνου, κακή ποιότητα φωνής, μικρή διάρκεια ζωής μπαταρίας και αναξιόπιστη παράδοση, δηλαδή συχνή διακοπή κλήσεων. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει κάθε γενιά (δηλ. 1G έως 5G) σε όρους ονοματολογίας, βασικών χαρακτηριστικών και στόχων απόδοσης, όπως ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, τα διαθέσιμα πρότυπα, το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση κ.λπ..

Πίνακας 1: Σύνοψη πλεονεκτημάτων/μειονεκτημάτων διαφόρων ασύρματων γενεών [4]

1G	2G/2.5 G	3G	4G	5G
Έναρξη/Ανάπτυξη				
	1980/1999	1990/2002	2000/2010	2015-2020
Χαρακτηριστικά				
<p>-Χρήση αναλογικών ραδιοσημάτων.</p> <p>Υπηρεσίες Αναλογική φωνητική υπηρεσία. Καμία υπηρεσία δεδομένων.</p>	<p>-Χρήση ψηφιακών ραδιοσημάτων.</p> <p>-Κωδικοποιημένη φωνή σε ψηφιακά σήματα.</p> <p>G S M</p> <p>Υποστηριζόμενες ψηφιακές φωνητικές υπηρεσίες, SMS, ανταλλαγή μηνυμάτων, GPRS, υπηρεσίες MMS, υπηρεσίες κίνησης, υπηρεσίες κίνησης, υπηρεσίες κίνησης.</p>	<p>Γρήγορος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων. Βελτιωμένη φασματική απόδοση. Μεγάλη χωρητικότητα δικτύου.</p> <p>Υπηρεσίες: Βελτιωμένη υποστήριξη ήχου, ροής βίντεο, τηλεδιάσκεψης. Περιήγηση στο Web με υψηλότερες ταχύτητες, υποστήριξη</p>	<p>-Συγκεντρωμένα δεδομένα και φωνή μέσω IP.</p> <p>-Πλήρως μεταβαλλόμενο πακέτο δικτύου.</p> <p>-Υψηλότερο εύρος ζώνης για παροχή υπηρεσιών πολυμέσων σε χαμηλότερο κόστος (έως 100Mbps).</p> <p>Υπηρεσίες: Βελτιωμένος ήχος, ροή βίντεο, IP τηλεφωνία, υψηλής ευκρίνειας κινητή τηλεόραση</p>	<p>-Ταυτόχρονη πρόσβαση σε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες - πλήρης ασύρματη επικοινωνία (ασύρματος παγκόσμιος ιστός,</p> <p>Υπηρεσίες: Δυναμική πρόσβαση σε πληροφορίες. Φορητές συσκευές με δυνατότητες AI.</p>

Δίκτυα 2G- 2.5G

Τα δίκτυα 1G είχαν αρκετούς περιορισμούς που καθιστούσε δύσκολη την περαιτέρω εξάπλωση της τεχνολογίας. Ο στόχος που αφορούσε την κινητή επικοινωνία είναι η ευρεία διάδοσή της στους ανθρώπους, το οποίο προϋποθέτει να είναι να είναι διαλειτουργική, δηλαδή να χρησιμοποιείται διεθνώς από όλους τους ανθρώπους και προσιτή, δηλαδή φθηνότερα κινητά τηλέφωνα και συνδρομές υπηρεσιών. Σε αντίθεση με την σποραδική και ανταγωνιστική ανάπτυξη των κυψελοειδών δικτύων 1G, η έλευση της τεχνολογίας κινητής επικοινωνίας 2G πραγματοποιήθηκε με προγραμματισμένο και συνεργατικό τρόπο. Έχουν προκύψει προσπάθειες συνεργασίας από τις ευρωπαϊκές χώρες με τη δημιουργία και το έργο

R

2

GSM: Το 1982, η ομάδα εργασίας GSM (Group Special Mobile) συγκροτήθηκε από την Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών CEPT για να εναρμονίσει τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός δημόσιου συστήματος κινητών επικοινωνιών στη ζώνη των 900 MHz.

Ε

δ

η Το GSM αποτέλεσε την κυρίαρχη τεχνολογία 2G που πέρασε στα περισσότερα μέρη του κόσμου και συνέχισε να εξυπηρετεί το 80% της αγοράς κινητής τηλεφωνίας τις επόμενες δεκαετίες. Το ισοδύναμο των ΗΠΑ είναι το IS-54, επίσης γνωστό ως Digital-AMPS, το οποίο αργότερα αντικαταστάθηκε από το IS-136. Το 1991 η Radiolinja (τόρα Elisa) ξεκίνησε το πρώτο δίκτυο GSM στη Φινλανδία. Σε περιπτώσεις όπου το εύρος ζώνης των 900 MHz χρησιμοποιήθηκε και για τα συστήματα 1G και 2G στην Ευρώπη, τα συστήματα 1G έκλεισαν για να κάνουν χώρο για τα συστήματα 2G. Το 1992, για πρώτη φορά, η υπηρεσία δεδομένων εισήχθη στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας εκτός από τη φωνή, δηλαδή την υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων Short Message Service (SMS), η οποία υποστηρίζει ρυθμό δεδομένων 9,6kbps [1].

θ

8 Το πρώτο SMS εστάλη από τον μηχανικό Neil Papworth στις 3 Δεκεμβρίου 1992, όπου πληκτρολόγησε το "Merry Christmas" από έναν υπολογιστή στον τότε διευθύνοντα σύμβουλο της Vodafone Richard Jarvis σε ένα ακουστικό Orbitel 901. Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας δεύτερης γενιάς είναι μια ψηφιακή τεχνολογία που παρουσιάζει

ή

n

Ξ

π

i

στηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιεί ψηφιακά σήματα για μετάδοση φωνής και έχει ταχύτητα 64kbps. Το εύρος ζώνης του 2G είναι 30-200KHz. Το 2G παρέχει υπηρεσίες όπως γραπτά μηνύματα SMS, μηνύματα εικόνων και μηνύματα Multimedia

M
e
s
s

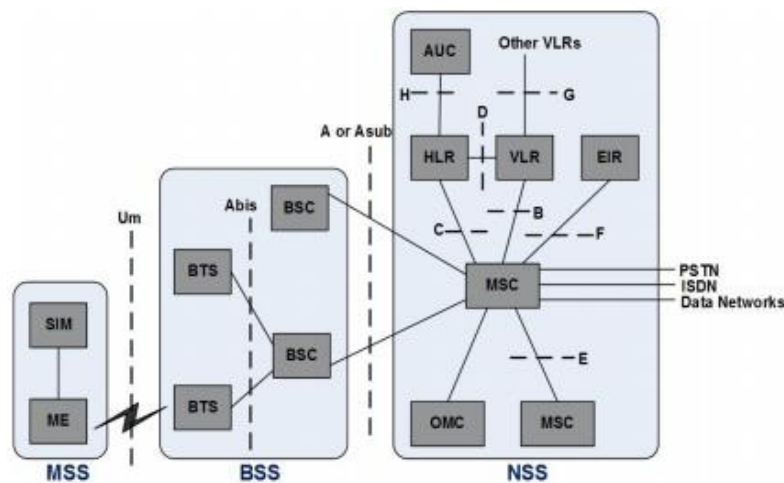
Χρησιμοποιούνται τεχνολογίες Tower Mounted Amplifier (TMA) όπως GSM, Personal Digital Cellular (PDC), Integrated Digital Enhanced Network (iDEN), Interim Standard-136 (IS-136) και CDMA όπως IS-95. Το GSM είναι το πιο κοινό πρότυπο 2G για κινητά τηλέφωνα. Το 2G εμπορευματοποιήθηκε στο πρότυπο GSM στη Φινλανδία το 1991. Η τεχνολογία GSM ήταν η πρώτη που υποστήριξε τη διεθνή περιαγωγή. Αυτό έδωσε την δυνατότητα στους χρήστες της ασύρματης κινητής τηλεφωνίας να μπορούν διεκπεραιώνουν φωνητικές κλήσεις από οποιαδήποτε κράτος απολαμβάνοντας την υψηλή χωρητικότητα και ποιότητα. Συστήματα που βασίζονται στην τεχνολογία TDMA έχουν γίνει οι κυρίαρχες ασύρματες τεχνολογίες 2G. Η τεχνολογία CDMA παρέχει καθαρότερη ποιότητα φωνής με λιγότερο θόρυβο περιβάλλοντος, λιγότερες διακοπές κλήσεων, αυξημένη ασφάλεια, μεγαλύτερη αξιοπιστία και μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου. Τα συστήματα 2G που σχεδιάστηκαν τη δεκαετία του 1980 εξακολουθούσαν να χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές MMS). Χρησιμοποιεί σήματα ψηφιακής μορφοποίησης όπως το Time Division Multiple Access (TDMA) και το Code Division Multiple Access (CDMA). Το TDMA επιτρέπει τα σήματα να χωρίζονται σε χρονικά διαστήματα. Το CDMA παρέχει σε κάθε χρήστη έναν μοναδικό κωδικό για επικοινωνία μέσω ενός φυσικού καναλιού πολλαπλών [3].
Οι τηλεφωνικές δικτύων 2G παρείχαν υψηλές ταχύτητες επικοινωνίας δεδομένων. Όλα τα μοντέλα που ανήκουν σε αυτήν τη γενιά ήταν ψηφιακά εμπορικά. Η δεύτερη γενιά ασύρματων συστημάτων κινητής επικοινωνίας σημείωσε τεράστια επιτυχία λόγω της επαναστατικής τεχνολογίας και των υπηρεσιών που έφερε στους χρήστες της. Εκτός από την υψηλή ποιότητα φωνητικής υπηρεσίας, η παγκόσμια κινητικότητα υπήρξε ένας ισχυρός και επιτακτικός λόγος για τους χρήστες να αγοράσουν τερματικά 2G. Τα πρότυπα δεύτερης γενιάς είναι τα GSM, iDEN, Digital-AMPS (D-AMPS), IS-95, PDC, Circuit Switched Data (CSD), Personal Handy-phone System (PHS), GPRS, High Speed Circuit Switched Data (HSCSD) και Wideband Integrated Digital Enhanced Network (WiDEN). Τα τρία κύρια πλεονεκτήματα των δικτύων 2G έναντι των προκατόχων τους είναι τα ακόλουθα [6]:

- Οι τηλεφωνικές συνομιλίες κρυπτογραφήθηκαν ψηφιακά.

- Αποτελεσματικότερη χρήση του ασύρματου φάσματος συχνοτήτων που επιτρέπει περισσότερους χρήστες ανά ζώνη συχνοτήτων.
- Υπηρεσίες δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, ξεκινώντας με μηνύματα SMS.

Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται μια τυπική αρχιτεκτονική 2G GSM. Μετά την έναρξή της, η εποχή 2G εξελίχθηκε δραστικά από το GSM σε γενική υπηρεσία ραδιοφωνικών πακέτων (GPRS) και αύξησε τους ρυθμούς δεδομένων για την εξέλιξη του GSM μέσω του ρισσότερα όσον αφορά τις υπηρεσίες δεδομένων, την ποιότητα των υπηρεσιών Quality of έχει μειονεκτήματα, όπως ζητήματα παρεμβολών λαμβάνοντας υπόψη την παρεμβολή του καναλιού Co-channel interference (CCI) ή άλλων παρεμβολών καναλιού όπως Adjacent-

c
h
a
n
n
e
l
i
n
t
e
r
f
e
r
e
n
c



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική 2G GSM [1]

Όσον αφορά το επίπεδο ασφάλειας στο GSM σημαντικό ρόλο έχουν ο έλεγχος ταυτότητας, η κρυπτογράφηση και η ανωνυμία. Ο έλεγχος ταυτότητας και η κρυπτογράφηση διεκπεραιώνονται μέσω των αλγοριθμικών μηχανισμών A3, A8 (και οι δύο εφαρμόζονται εξαιτίας της επαναχρησιμοποιούμενης συχνότητας, της παλμικής φύσης του TDMA και της στην SIM που σημαίνει Subscriber Identity Module) και A5, όμως υπάρχουν μειονεκτηματικής καμπύλης αποσύνθεσης κάτω από δυσμενείς εκτάσεις, τοπογραφικές ή ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν διαλείπουσα διακοπή κλήσεων ή ολική αποτυχία [5].

απουσία προστασίας, Disk Operating System – (DOS) είναι γνωστό ότι αποτελούν αδυναμίες των ρυθμίσεων ασφαλείας στο GSM [1].

Δίκτυα 3G

2.5.1 Βασικά τμήματα δικτύου 3G

Το σύστημα ασύρματης τηλεφωνίας τρίτης γενιάς παρουσιάστηκε το 2000. Ο στόχος των συστημάτων 3G ήταν να προσφέρουν αυξημένους ρυθμούς δεδομένων από 144kbps σε 384kbps σε ευρυζωνική σύνδεση και 2Mbps σε τοπική κάλυψη. Το 3G προσφέρει προηγμένες υπηρεσίες σε χρήστες σε σύγκριση με το 1G και το 2G. Το 3G σε συνδυασμό με τη φωνητική επικοινωνία προσφέρει αρκετές υπηρεσίες όπως βίντεο και τηλεόρασης, πρόσβαση στο διαδίκτυο, υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, video streaming, φαξ και η οίηση των χαρτών για τους οδηγούς και το εύρος ζώνης του ανέρχεται στα 15-20MHz.

Το 3G συνεισφέρει με τα ειδικά ψηφιακά δίκτυα στην παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών και πολυμέσων. Η αρχιτεκτονική 3G υποστηρίζει βελτιωμένο ρυθμό δεδομένων και QoS. Υπηρεσίες όπως η παγκόσμια περιαγωγή και η βελτιωμένη ποιότητα φωνής είναι σημαντικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 3G. Ένα μικρό μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης, τα 3G User Equipment (UE) καταναλώνουν σημαντικά περισσότερη ισχύ σε σύγκριση με τα περισσότερα μοντέλα 2G. Επιπλέον, το 3G Unικόνα 3 είναι συμβατό με προηγούμενες γενεές κυψελοειδών ασύρματων τεχνολογιών μέσω της δυνατότητάς του να υπάρχει σε συνδυασμό με την παλαιά τεχνολογία GSM ή AMPS. Η εξέλιξη από το UMTS μέσω της πρόσβασης πακέτων υψηλής ταχύτητας High Speed P

a

c

k

e

t

A

c

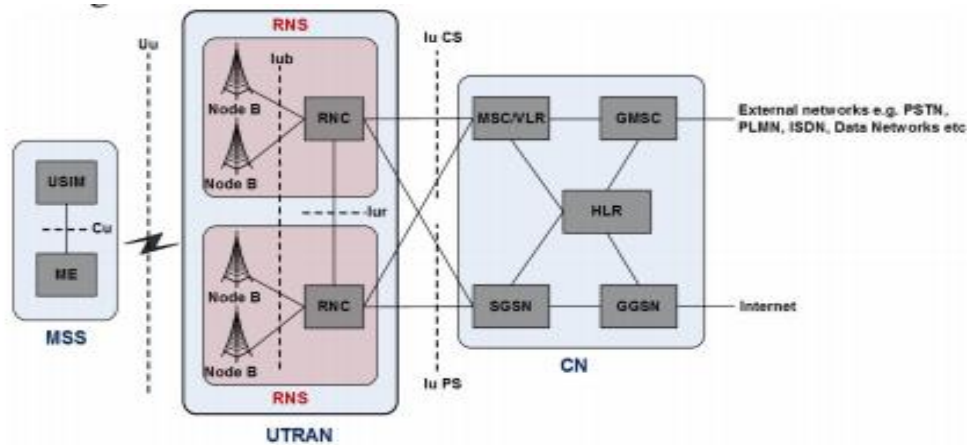
c

e

s

s

(HSPA) και του εξελισσόμενου HSPA (HSPA +) παρείχε περαιτέρω βελτιωμένη απόδοση δικτύου από άκρο σε άκρο και τελικά οδήγησε στην ανάπτυξη της επόμενης γενιάς δικτύων, δηλαδή των δικτύων 4G [1], [7].



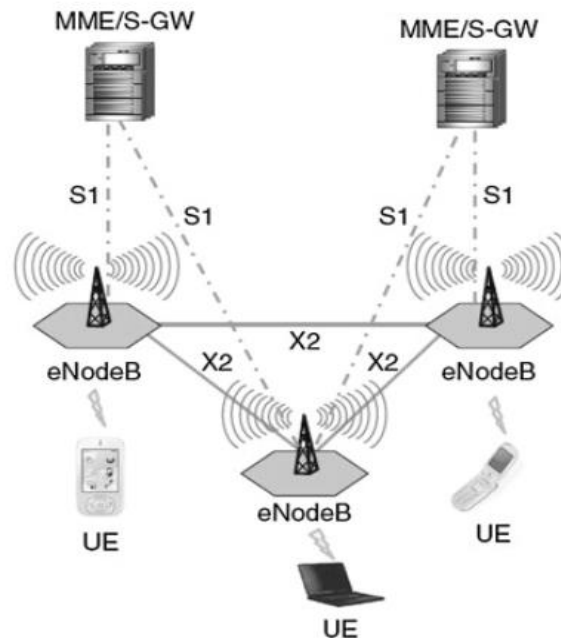
Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική 3G UMTS [1]

Δίκτυα 4G

Το τέταρτης γενιάς κινητό σύστημα εισήχθη στα τέλη του 2010 και ολόκληρο το δίκτυο βασίζεται σε IP. Ο σκοπός της τεχνολογίας 4G είναι η προσφορά υπηρεσιών γρήγορης ταχύτητας, άριστης ποιότητας, μεγάλου εύρους χωρητικότητας, φερέγγυας ασφάλειας, φωνής, δεδομένων και πολυμέσα σε χαμηλές τιμές. Ο λόγος για τη μετάβαση σε όλες τις IP είναι να υπάρχει μια κοινή πλατφόρμα για όλες τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής [4].

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική της, το δίκτυο 4G-LTE έχει σχεδιαστεί με σκοπό την παροχή υποστήριξης για μετακίνηση πακέτων με απρόσκοπτη κινητικότητα, QoS και ελάχιστη καθυστέρηση, δίνοντας την δυνατότητα στην υποστήριξη όλων των υπηρεσιών όπως δεδομένων, φωνής και πολυμέσων μέσω συνδέσεων πακέτων. Χρησιμοποιώντας μόνο δύο τύπους κόμβων, δηλαδή τον ενισχυμένο κόμβο B (eNB ή eNodeB) και την οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (MME - Mobility Management Entity) ή την αρχιτεκτονική συστήματος (SAE GW - System Architecture Evolution Gateway), ορίζεται μια εξαιρετικά βελτιωμένη αρχιτεκτονική 4G - Radio Access Network (RAN) για το LTE όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, το UE ή το κινητό τηλέφωνο συνδέεται ασύρματα στο eNB (Evolved Node B) ή 4G BS. Όλα τα πρωτόκολλα ραδιοφώνου, διαχείριση κινητικότητας, συμπίεση κεφαλίδας, κρυπτογράφηση, αξιόπιστη παράδοση πακέτων και όλες οι αναμεταδόσεις πακέτων διαχειρίζονται από το eNB, καθώς ο ελεγκτής ασύρματου δικτύου Radio Network Controller (RNC) ενσωματώνεται στο τελευταίο. Από την πλευρά του ελέγχου, το eNB ενσωματώνει λειτουργίες όπως έλεγχος εισαγωγής και διαχείριση πόρων ραδιοσυχνότητας Radio Resource Management (RRM). Το Core Network (CN)

απλοποιείται διαχωρίζοντας τα επίπεδα χρήστη και ελέγχου (UP και CP). Τα eNB επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μια διασύνδεση X2 ενώ τα eNB επικοινωνούν με το MME στο επίπεδο ελέγχου και/ή SAE (System Architecture Evolution) στο επίπεδο χρήστη χρησιμοποιώντας μια διεπαφή S1.



Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική 4G LTE [8]

Το MME/SAE ονομάζεται εξελιγμένος πυρήνας πακέτου Evolved Packet Core Η ελαχιστοποίηση του λανθάνοντος χρόνου, οι αναβαθμίσεις τεχνικών στις πολλαπλές εισόδους πολλαπλών εξόδων συστημάτων (Multiple-Input and Multiple-Output - MIMO) μέσω διάφορων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης RATs¹ όπως η πολλαπλή πρόσβαση ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας Orthogonal frequency-division multiple access

f
r
e
q
u
e
n
c
y

¹ Υποκείμενη μέθοδος φυσικής σύνδεσης για ένα δίκτυο επικοινωνίας με βάση το ραδιόφωνο. Πολλά μοντέρνα κινητά τηλέφωνα υποστηρίζουν πολλές RAT σε μία συσκευή όπως Bluetooth, Wi-Fi και GSM

i
v
i
s

τιώσεις αφορούν τους τομείς της πολλαπλής διανομής και του περιορισμού των παρεμβολών. Το 3GPP Release 12/13 ορίζει πολλές βασικές δυνατότητες και απαιτήσεις για ενεργειακά αποδοτικούς υπολογιστές, LTE για δημόσια ασφάλεια, επικοινωνία έκτακτης ανάγκης και υπηρεσίες εντοπισμού, όπως επικοινωνία τύπου μηχανής Machine Type Communication και εξελιγμένη υπηρεσία μετάδοσης πολυμέσων Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service

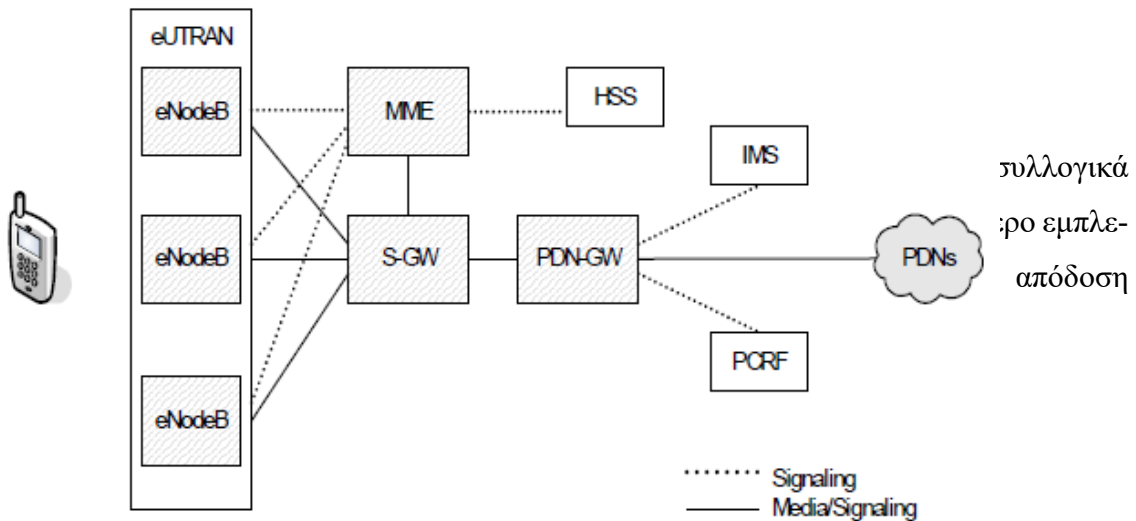
e

r

2.7 Τεχνολογία LTE

i Το LTE αποτελεί την τελευταία τεχνολογία που αξιοποιεί την ασύρματη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας και δικτύωση κινητής τηλεφωνίας. Ο σχεδιασμός του LTE πηγάζει από τα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, τα οποία συνέβαλαν στην βελτίωση της χωρητικότητας και της ταχύτητα του δικτύου με την εφαρμογή νέων τεχνικών διαμόρφωσης. Αυτό το πρότυπο αναπτύχθηκε από το 3GPP. Οι κυψελοειδείς πάροχοι ανταγωνίζονται τους παραδοσιακούς ευρυζωνικούς παρόχους, προσφέροντας πρόσβαση σε ευρυζωνικές υπηρεσίες και κινητά και υπηρεσίες IP, όπως πολυμέσα, βίντεο, μουσική, κοινή χρήση βίντεο στους φορητούς υπολογιστές, Personal Digital Assistant (PDA), έξυπνα τηλέφωνα κ.λπ.. Η παροχή αυτών γίνεται μέσω των δικτύων πρόσβασης όπως HSPA, Evolution-Data Optimized παρόμοιες ταχύτητες με τις σημερινές υπηρεσίες Asymmetric Digital Subscriber Line τεχνολογίες δίνουν στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας σημαντικά βελτιωμένες ταχύτητες δεδομένων, χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και αυξημένη χωρητικότητα [1],[2].

Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία Orthogonal Frequency Division Multiplexing ως τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης μαζί με τις προηγμένες τεχνολογίες κεραιών. Όταν άρχισε να αναπτύσσεται η διεπαφή ραδιοφώνου, προέκυψε ότι έπρεπε να αναβαθμιστεί η αρχιτεκτονική του συστήματος. Επομένως, εκτός από το LTE, αναπτύχθηκε από το 3GPP μια αρχιτεκτονική επίπεδου δικτύου που βασίζεται σε IP όπως παρουσιάζεται στην επόμενη Εικόνα 5. Στο Επίπεδο χρήστη User Plane (UP) του EPS, για παράδειγμα, υπάρχουν μόνο δύο τύποι κόμβων (σταθμοί βάσης και πύλες), ενώ στα τρέχοντα ιεραρχικά δίκτυα υπάρχουν τέσσερις τύποι (κόμβος B, RNC, (SGSN (Serving GPRS Support Node) , GGSN



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική δικτύου υψηλού επιπέδου LTE [15]

Μια άλλη απλοποίηση είναι ο διαχωρισμός του Control Plane (CP), με ένα ξεχωριστό στοιχείο δικτύου διαχείρισης κινητικότητας. Μια βασική διαφορά του EPS σε σχέση με τα τρέχοντα δίκτυα είναι ότι αξιοποιεί μόνο την κίνηση πακέτων. Αυτή η αρχιτεκτονική ορίζεται ως μέρος του SAE. Η αρχιτεκτονική LTE – SAE έχει σχεδιαστεί για αποτελεσματική υποστήριξη της χρήσης μαζικής αγοράς οποιασδήποτε υπηρεσίας που βασίζεται σε IP. Η αρχιτεκτονική βασίζεται σε μια εξέλιξη του υπάρχοντος κεντρικού δικτύου GSM/WCDMA, με απλοποιημένες λειτουργίες και ομαλή, οικονομικά αποδοτική ανάπτυξη [1],[4].

Το UE είναι η συσκευή που εφαρμόζεται στον τελικό χρήστη για επικοινωνία. Συνήθως είναι μια συσκευή χειρός όπως ένα έξυπνο τηλέφωνο ή μια κάρτα SIM όπως αυτές που χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή σε 2G και 3G τεχνολογίες. Το UE περιέχει επίσης το Universal Subscriber Identity Module (USIM) που είναι μια ξεχωριστή οντότητα από το υπόλοιπο UE, το οποίο συχνά ονομάζεται Terminal Equipment (TE). Το USIM είναι μια εφαρμογή τοποθετημένη σε μια έξυπνη κάρτα με δυνατότητα αφαίρεσης που ονομάζεται και τον έλεγχο ταυτότητας του χρήστη και για την εξαγωγή κλειδιών ασφαλείας για την προστασία της μετάδοσης της ραδιοεπαφής. Λειτουργικά το UE είναι μια πλατφόρμα για

εφαρμογές επικοινωνίας, οι οποίες σηματοδοτούν το δίκτυο για την εγκατάσταση, τη συντήρηση και την κατάργηση των συνδέσμων επικοινωνίας που χρειάζεται ο τελικός χρήστης. Αυτό περιλαμβάνει λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας, όπως παραδόσεις και αναφορά της θέσης των τερματικών, και σε αυτές οι λειτουργίες UE εκτελούνται σύμφωνα με τις οδηγίες του δικτύου. Το πιο σημαντικό για το UE είναι η παροχή της διεπαφής χρήστη στον τελικό χρήστη [15].

Ο μόνος κόμβος στην Εξελιγμένη Καθολική Επίγεια Ασύρματη Πρόσβασης με την ασύρματη δικτύωση. Συνήθως, τα eNodeBs διανέμονται σε όλη την περιοχή κάλυψης των δικτύων, τα οποία είναι τοποθετημένα κοντά στις ασύρματες κεραιές. Ένα αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι τα περισσότερα από τα τυπικά πρωτόκολλα που εφαρμόζονται στον σημερινό ασύρματο ελεγκτή RNC μετακινούνται στο eNodeB. Το eNodeB είναι επίσης υπεύθυνο για συμπίεση κεφαλίδας, κρυπτογράφηση και αξιόπιστη παράδοση πακέτων. Στο επίπεδο ελέγχου, λειτουργίες όπως έλεγχος εισαγωγής και διαχείριση πόρων ραδιοφώνου ενσωματώνονται επίσης στο eNodeB. Τα οφέλη της συγχώνευσης RNC και Node-B περιλαμβάνουν μειωμένο χρόνο καθυστέρησης με λιγότερα hops και διανομή του φορτίου επεξεργασίας RNC. Η βασική διαμόρφωση αρχιτεκτονικής συστήματος, η λειτουργία υψηλού επιπέδου του S-GW (Serving Gateway) είναι η διαχείριση σήραγγας και η εναλλαγή του UP. Το S-GW είναι μέρος της υποδομής δικτύου που διατηρείται κεντρικά σε χώρους λειτουργίας [1],[15].

Το S-GW δεν έχει σημαντικό ρόλο στις λειτουργίες ελέγχου. Είναι υπεύθυνο μόνο για τους δικούς του πόρους και τους εκχωρεί βάσει αιτημάτων από άλλες οντότητες δικτύου, όπως MME, PDN-GW ή Policy and Charging Rules Function (PCRF), οι οποίες με τη σειρά τους ενεργούν ως προς την ανάγκη δημιουργίας, τροποποίησης ή εκκαθάρισης φορέων για το UE. Αν το αίτημα ελήφθη από το PDN-GW ή το PCRF, το S-GW θα μεταδώσει επίσης την εντολή στο MME έτσι ώστε να μπορεί να ελέγξει το κανάλι στο eNodeB. Ομοίως, όταν αρχίζει να στέλνει το MME το αίτημα στο S-GW θα ενεργοποιήσει είτε το PDN-GW είτε το PCRF. Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε UE σε συνδεδεμένη λειτουργία, το S-GW μεταδίδει τα δεδομένα μεταξύ eNodeB και PDN-GW. Όμως, όταν ένα UE βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας, οι πόροι στο eNodeB απελευθερώνονται και η διαδρομή δεδομένων τερματίζεται στο S-GW. Η λήψη των πακέτων δεδομένων θα γίνει στα κανάλια S-GW και PDN-GW, στα οποία θα αποθηκευτούν τα πακέτα και στη συνέχεια

η σελιδοποίηση του UE θα αρχίσει αφού ζητηθεί από το MME. Η σελιδοποίηση θα προκαλέσει την επανασύνδεση του UE, και όταν τα κανάλια επανασυνδεθούν, τα αποθηκευμένα πακέτα θα σταλούν. Το S-GW θα παρακολουθεί τα δεδομένα στα κανάλια και μπορεί επίσης να συλλέγει δεδομένα που απαιτούνται για στατιστικούς λόγους και για την χρέωση των συνδρομητών [1],[15].

Δίκτυα 6G

Είναι γεγονός ότι με τη χρήση των κυψελοειδών ασυρμάτων δικτύων 5G επιτυγχάνονται τεράστιες δυνατότητες. Όμως σε τι γίνεται στην περίπτωση δικτύων 6G, δηλαδή τι δυνατότητες λείπουν από τις τεχνολογίες LTE και 5G έτσι ώστε να συμπεριληφθούν στο τρόπους για τη διαμόρφωση, τον ορισμό, το σχεδιασμό και τον προσδιορισμό σημαντικών βασικών τεχνολογιών που επιτρέπουν την έναρξη προς ένα σύστημα «πέρα από 5G» ή 6G. Τα ακόλουθα πέντε αναμενόμενα σενάρια εφαρμογών θα υποστηρίζονται από επικοινωνίες

e
M
B
B
P
l
u
s
Το Enhanced Mobile Broadband-Plus (eMBB-Plus) στο 6G θα αντικαταστήσει το αντίστοιχο 5G του eMBB και θα προσφέρει υπηρεσίες υψηλής ποιότητας Quality of Everything *B*. Πέρα από τα βασικά στοιχεία που θα την απαρτίζουν όπως βελτιστοποίηση δικτύου, παράδοση μηνυμάτων είναι επιτακτικό να συλλέγει μεγάλες ποσότητες δεδομένων για την διεύθυνση των λειτουργιών. Άλλα χαρακτηριστικά είναι η ακρίβεια τοποθέτησης σε εσωτερικό χώρο και μια παγκόσμια συμβατή σύνδεση μεταξύ διαφορετικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, με προστιτή τιμή για τους συνδρομητές δικτύου. Επίσης πρέπει να σχεδιαστεί μια στρατηγική για υπηρεσίες επικοινωνίας eMBB-Plus χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια, το απόρρητο των συνδρομητών δικτύου.

u *T*

h

i

r

e

a

ασήμαντη όπως παρατηρείται από μερικά μοντέλα διάδοσης. Αυτή η κατάσταση προβλέπει αλλαγή στο μοντέλο 6G 3D-InteCom, το οποίο υπογραμμίζει την ανάγκη για ριζική αλλαγή από δύο σε τρεις διαστάσεις, μέσω των οποίων πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ύψη των κόμβων επικοινωνίας. Μερικές από τις αξιοσημείωτες τεχνολογίες που έχουν ήδη ενσωματώσει αυτήν τη διάσταση είναι δορυφορικά, μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα Unmanned έχει σχεδιαστεί για ασύρματες επικοινωνίες 2D που προέρχονται από τη στοχαστική γεωμετρία και τη θεωρία γραφημάτων, χρειάζεται αναπροσαρμογή στο περιβάλλον 6G. Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της επικοινωνίας μιας συσκευής, το οποίο πραγματοποιείται με πλήρεις διαστάσεις αρχιτεκτονικές MIMO, αποτρέποντας έτσι την ανάγκη για μια διαφορετική προσέγγιση για την επίτευξη βελτιστοποίησης δικτύου.

U

n

c

H
o

o
h

l
v

e

g
h

f

a

B

h
h

i
a

f

communications: Οι ολογραφικές επικοινωνίες είναι ένα χαρακτηριστικό που θα δώσει ζωντανία στην εποχή των 6G. Ένα ολόγραμμα είναι μια τεχνολογία 3D που χειρίζεται τις ακτίνες φωτός που ακτινοβολούνται σε ένα αντικείμενο και στη συνέχεια καταγράφει το προκύπτων μοτίβο παρεμβολών χρησιμοποιώντας μια συσκευή εγγραφής. Στην πραγματικότητα, η μετάδοση τρισδιάστατων εικόνων χωρίς στερεοφωνική φωνή δεν επαρκεί για την απεικόνιση ανθρώπινων χαρακτηριστικών. Στην εποχή των 6G, ο επαναδιαμορφώσιμος στερεοφωνικός ήχος θα παρακινήσει την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας για να χρησιμοποιείται στη λήψη αρκετών φυσικών προσώπων σε κάθε σύνθεση, δηλαδή η αλληλεπίδραση μεταξύ οντοτήτων θα είναι πιο ελεύθερη. Τα ολογραφικά δεδομένα αναμένεται να καταναλώνουν μεγάλο εύρος ζώνης και πρέπει να παραδίδονται μέσω αξιόπιστων συνδέσμων δικτύου.

a

ανάγκες αυτών των τεχνολογιών. Σε αυτήν την περίπτωση ο σχεδιασμός νέων συστημάτων φυσικού στρώματος Physical (PHY) θα ενισχύσει την εφαρμογή των σχεδίων συστημάτων σηματοδότησης και της πολυπλεξίας κυματομορφής. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι ο τρόπος σχεδιασμού διαδικασιών, όπως buffering, ουρές, προγραμματισμός, παράδοση και πρωτόκολλα που θα ικανοποιούν τις ανάγκες των δικτύων ικανοποιήσουν αυτές τις ανάγκες.

b

o

n

d

c

o

m

m

u

n

i

c

a

t

i

o

n

s

Η ανθρωποκεντρική επικοινωνία αναμένεται να είναι ένας από τους κύριους παράγοντες της επικοινωνίας 6G. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία θα συμμετάσχουν και οι πέντε ανθρώπινες αισθήσεις του ανθρώπου. Ένα παράδειγμα αυτής της τεχνολογίας είναι το έργο «επικοινωνία μέσω αναπνοής» (communication through breath), στο οποίο διάφορα όργανα θα είναι σε θέση να διαβάζουν το ανθρώπινο βιολογικό προφίλ. Συνεπώς, μια τέτοια τεχνολογία διευκολύνει τη διάγνωση ασθενειών, την ανίχνευση συναισθημάτων, τη συλλογή βιολογικών χαρακτηριστικών και την απομακρυσμένη αλληλεπίδραση με το ανθρώπινο σώμα. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος επικοινωνίας ικανών να μιμείται τις πέντε ανθρώπινες αισθήσεις απαιτεί διεπιστημονικές ερευνητικές συνεργασίες [17].

Δίκτυα 5G

Κύριοι τεχνικοί στόχοι για τα συστήματα 5G

Το κινητό ασύρματο δίκτυο πέμπτης γενιάς υποστηρίζεται από Large Area Synchro-

n

i

z

e

d

C

o

d

e

D

i

v

i

s

i

o

n

M

u

l

κ

β

l

δ

α

υ

ρ

ξ

ρ

α

μ

h

h

Το κινητό ασύρματο δίκτυο πέμπτης γενιάς υποστηρίζεται από Large Area Synchro-

n

i

z

e

d

C

o

d

e

D

i

v

i

s

i

o

n

M

u

l

κ

β

l

δ

α

υ

ρ

ξ

ρ

α

μ

h

h

Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των τωρινών δικτύων με το 5G οφείλει να είναι κάτι διαφορετικό από την αυξημένη μέγιστη απόδοση. Άλλες απαιτήσεις περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων [9]:

- Καλύτερη κάλυψη και υψηλά ποσά δεδομένων διαθέσιμα στην κυψέλη.
- Χαμηλότερη κατανάλωση μπαταρίας.
- Πολλές ταυτόχρονες διαδρομές μεταφοράς δεδομένων.
- Ρυθμός δεδομένων 1Gbps.
- Μεγαλύτερη ασφάλεια καναλιού.
- Υψηλότερη φασματική απόδοση σε επίπεδο συστήματος.

W

Εφαρμογές με τεχνητή νοημοσύνη, διότι θα αυξηθούν οι αισθητήρες που επικοινωνούν με κινητά τηλέφωνα και θα βοηθήσουν τον άνθρωπο στην καθημερινή του ζωή.

Εκτός από την επέκταση της λειτουργίας σε υψηλότερες συχνότητες, υπάρχουν πολλά άλλα βασικά στοιχεία τεχνολογίας που σχετίζονται με την εξέλιξη στην ασύρματη πρόσβαση 5G [9]:

Μετάδοση πολλαπλών κεραιών: Η μετάδοση πολλαπλών κεραιών ήδη έχει σημαντικό ρόλο στα τωρινά συστήματα επικοινωνίας αλλά ο ρόλος της θα είναι σημαντικότερος στην εποχή του 5G. Η χρήση πολλαπλών κεραιών για διαμόρφωση δέσμης στον πομπό ή στον δέκτη η και στα δύο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα έτσι ώστε να αποφευχθούν οι χειρότερες συνθήκες διάδοσης σε υψηλότερες συχνότητες.

υ

ρ

ξ

ρ

α

μ

h

h

s

eb.

κόμβων δικτύου και μεταβαλλόμενες συνθήκες κίνησης. Όμως, η λιτή μετάδοση είναι χρήσιμη για όλα τα είδη εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών μακροεντολών.

Διαχωρισμός χρήστη / ελέγχου: Ο διαχωρισμός των δεδομένων που παραδίδονται από τον χρήστη και της λειτουργικότητας ελέγχου συστήματος οφείλει να είναι επεκτάσιμος σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων και RAT. Για παράδειγμα, η λειτουργικότητα ελέγχου συστήματος που αφορά ένα πυκνό επίπεδο βασισμένο σε μια υψηλής συχνότητας ασύρματης πρόσβασης είναι εφικτή μέσω κάποιου επιπέδου επικάλυψης LTE. Ο διαχωρισμός χρήστη/ελέγχου αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο για μελλοντικές εφαρμογές ασύρματης πρόσβασης που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στο beamforming και στην μεταφορά δεδομένων του χρήστη. Συνεπώς αν συνδυαστεί η λιτή σχεδίαση με έναν κατάλληλο διαχωρισμό της μεταφοράς δεδομένων του χρήστη και της βασικής λειτουργικότητας συνδεσιμότητας του συστήματος θα οδηγήσει σε έναν πολύ καλό βαθμό βελτιστοποίησης δικτύου που θα εστιάζει στις συσκευές των ενεργών ασύρματων συνδέσεων στο δίκτυο.

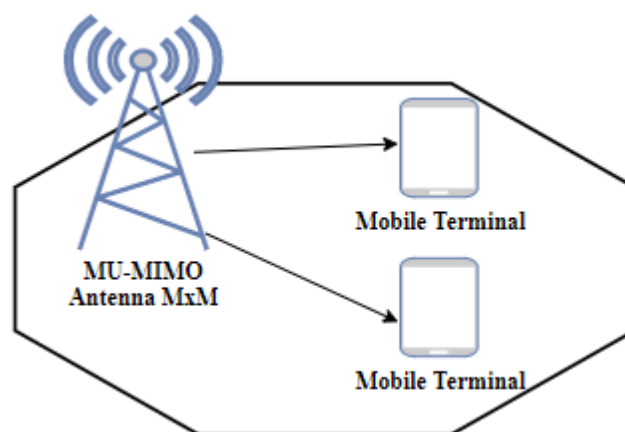
Άμεση επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή: Η άμεση επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή Device to Device (D2D) αποτελεί επέκταση των προδιαγραφών LTE. Η υποστήριξη του D2D περιλαμβάνει τα δεδομένα του χρήστη και επικοινωνία peer-to-peer απευθείας μεταξύ συσκευών με σκοπό τη χρήση κινητών συσκευών ως ρελέ για την επέκταση της κάλυψης δικτύου. Η επικοινωνία D2D στα 5G δίκτυα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της συνολικής λύσης ασύρματης επικοινωνίας. Η δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας οφείλει να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του ασύρματου δικτύου πρόσβασης μέσω επέκτασης.

Ευέλικτη χρήση φάσματος: Οι πάροχοι εκπέμπουν σε ένα συγκεκριμένο φάσμα για το οποίο έχουν αδειοδοτηθεί. Αυτό αποτελεί θεμέλιο για την κινητή επικοινωνία στα 5G δίκτυα, διότι οι φορείς εκμετάλλευσης προσφέρουν υψηλής ποιότητας συνδεσιμότητα σε περιβάλλον ελεγχόμενης πρόσβασης. Η απόκλιση των παρόχων από τη συμβατική αδειοδότηση φάσματος αναφέρεται σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz. Στις ζώνες υψηλής συχνότητας, δίνεται η κατάλληλη προσοχή στην ευρεία ζώνη μετάδοσης, διότι είναι δύσκολο να βρεθούν αρκετά μεγάλα μπλοκ φάσματος έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάλογες απαιτήσεις σε εύρη ζώνης όταν υπάρχουν αρκετοί πάροχοι[9].

Τεχνολογία mu – MIMO

Η ραγδαία ανάπτυξη της ασύρματης κινητής επικοινωνίας οδήγησε στην εκρηκτική αύξηση του αριθμού των κινητών τηλεφώνων των χρηστών και της κλίμακας των σχετικών κλάδων. Επομένως, το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας οφείλει να πληροί τον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, την υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος και να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά το εύρος ζώνης. Λόγω της έλλειψης πόρων στο φάσμα ασύρματου δικτύου, είναι πολύ σημαντικό να βελτιωθεί η χρήση του φάσματος συστήματος. Η τεχνολογία MIMO αξιοποιεί τους περιορισμένους πόρους με στόχο την κάλυψη της ζήτησης των χρηστών, όμως εξαιτίας της μη επάρκειας κεραιών στο σταθμό βάσης του συστήματος MIMO προκαλούνται προβλήματα στην απόδοση του συστήματος. Ως μία από τις βασικές τεχνολογίες του μελλοντικού 5G, η τεχνολογία MIMO οφείλει να καλύπτει τις ανάγκες των μελλοντικών ασύρματων εταιρειών, να βελτιώνει την αποδοτικότητα του φάσματος, την ικανότητα καναλιών του συστήματος επικοινωνίας, την αξιοπιστία των συνδέσεων και του ρυθμού δεδομένων [1],[11].

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται μια γενικευμένη αρχιτεκτονική mu-MIMO. Αν ο αριθμός των κεραιών είναι ίσος με 4, 8, 16 τότε η τεχνολογία ονομάζεται MIMO. Σε περίπτωση που υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός κεραιών σε κάθε πομποδέκτη π.χ. 128, 256 κ.λπ. τότε ονομάζεται mu-MIMO ή Massive MIMO και αποτελεί μια από τις βασικές τεχνολογίες 5^{ης} γενιάς κινητών δικτύων.



Εικόνα 6: Μια γενικευμένη αρχιτεκτονική mu-MIMO.

Το σύστημα Distributed Antenna System (DAS) περιέχει έναν αριθμό κεραιών που θεωρούνται ως κόμβοι και είναι συνδεδεμένοι σε ένα μέσο μετάδοσης π.χ. οπτικές ίνες και υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού με το πρότυπο 802.11 έτσι ώστε να γίνει αποτελεσματικότερο. Όπως αναφέρεται στο [11], δύο κεραιές ανά όροφο ενός κτηρίου καταφέρνουν

να ανταποκριθούν επαρκώς καλύπτοντας τον όροφο ενός συγκροτήματος διαμερισμάτων ή ενός μη πυκνοκατοικημένου κτιρίου. Ωστόσο, είναι απαραίτητη προϋπόθεση να προστεθεί ο κατάλληλος αριθμός κεραιών στην περίπτωση που τα μέρη είναι μεγαλύτερα με σκοπό την πλήρη κάλυψη. Από την προαναφερθείσα προτεινόμενη λύση προκύπτουν σημαντικά οφέλη όπως υψηλή κάλυψη, αποδοτικότητα ισχύος, επεκτασιμότητα κ.λπ. και για αυτό αποτελεί μια καλή εναλλακτική λύση για δίκτυα 5G. Το DAS περιλαμβάνει δύο βασικές δομές. Η πρώτη βασική δομή είναι ένας σταθμός βάσης BS και ένα καταναμημένο σύστημα

D

στην εικόνα 7 παρουσιάζεται ένα βασικό μοντέλο αρχιτεκτονικής που αφορά τη δομή DAS. Οι κεραιές ανά όροφο πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο και πρέπει να έχει ένα μεγάλο αριθμό πομποδεκτών σε κάθε όροφο. Σε ένα κτήριο όλος ο εξοπλισμός συνδέεται με οπτική ίνα, η οποία είναι συνδεδεμένη με την εξωτερική κεραία στην κορυφή του κτιρίου με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών με την κεραία του σταθμού βάσης BS και την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών του κτιρίου και του εξωτερικού κόσμου.

t

e

d

S

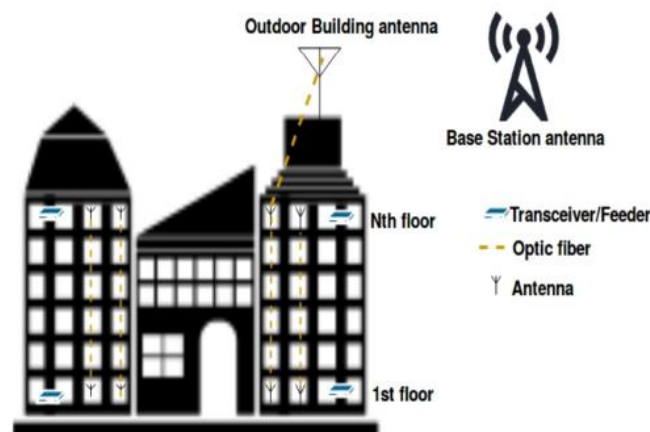
y

s

t

e

m



και η δεύτερη βασική δομή είναι ένας αριθμός κεραιών που αντιπροσωπεύει το DS μαζί με έναν αριθμό πομποδεκτών που διευκολύνουν τη μετάδοση.

Στη συνέχεια αναλύονται τα μοντέλα τιμολόγησης που αναπτύχθηκαν για την τεχνο-οικονομική σύγκριση. Γενικά, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας Total Cost of Ownership (TCO) μιας τεχνολογίας θα χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες δαπανών:

- **Κεφαλαιουχικές δαπάνες (Capital Expenditure - CAPEX):** είναι το κεφάλαιο που δαπανάται για την αγορά νέου εξοπλισμού, νέας τοποθεσίας κυψέλης και αποτελεί στην πραγματικότητα μια αρχική επένδυση σε μια τεχνολογία, ένα προϊόν ή μια υπηρεσία.

- **Λειτουργικές δαπάνες (Operating Expenditure - OPEX):** αφορά τα λειτουργικά έξοδα, δηλαδή είναι ο αναγκαίος προϋπολογισμός σε καθορισμένη περιοδική βάση, όπως συντήρηση, κόστος λειτουργίας, κόστος κατανάλωσης ενέργειας κ.λπ.

Είναι γνωστό ότι οι δύο κατηγορίες δαπανών που προαναφέρθηκαν είναι αποκλίνουσες και για αυτό εφαρμόστηκε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία όπως αναφέρεται στο [11], η οποία συμβάλλει στη διαμόρφωση και των δύο δαπανών. Για να εκτιμηθεί το ετήσιο κόστος θεωρείται το CAPEX ως επένδυση και το κεφάλαιό του αποκτήθηκε μέσω δανείου. Επιπλέον, θα πρέπει να συμπεριληφθεί ότι το αντίστοιχο ετήσιο κόστος αφορά τις δόσεις για την αποπληρωμή του δανείου. Θεωρείται ότι το P είναι το ποσό των χρημάτων που δαπανώνται για το δάνειο και αποπληρώνεται ετησίως, το r είναι το επιτόκιο και το n αναφέρεται στην διάρκεια αποπληρωμής δόσεων σε χρόνια. Οπότε χρησιμοποιώντας τον επαναλαμβανόμενο τύπο πληρωμής, η πληρωμή δόσης θα ήταν: $A = P \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$

Τεχνολογία Femtocell

Τα femtocells ονομάζονται ως Home NodeBs (HNBs) ή Femto Access Point (FAP) και είναι σταθμοί μετάδοσης χαμηλής ισχύος γύρω στα 100 mW ή λιγότερο, οι οποίοι τοποθετούνται σε εσωτερικούς χώρους, όπως οικίες, εταιρίες και hotspot. Τα femtocells χρησιμοποιούν το αδειοδοτούμενο φάσμα και παρέχουν υπηρεσίες φωνής, δεδομένων σε συνδρομητές κινητών τηλεφώνων επιτρέποντας την σύνδεσή τους στο διαδίκτυο μέσω του κεντρικού δικτύου του φορέα παροχής υπηρεσιών αξιοποιώντας την ευρυζωνική σύνδεση μέσω ADSL καλωδίου ως backhaul. Οι συνδρομητές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία

f
e
m
t
o
c
e
l
l

απολαμβάνουν εξαιρετική ποιότητα φωνητικής κλήσης και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, όλοι οι κόμβοι μεταδίδουν με το ίδιο επίπεδο ισχύος εξαιτίας της βελτιωμένης κάλυψης ραδιοσυχνοτήτων Radio Frequency (RF). Επίσης πέρα από την επέκταση της κάλυψης, τα femtocells μειώνουν την κίνηση ενός δικτύου μακροκυμελών² και αυξάνοντας σημαντικά την χωρητικότητα του δι-

Για να μειωθεί το κόστος ανάπτυξης των femtocells συνήθως σχεδιάζονται με λίγο ή χωρίς προγραμματισμό ραδιοσυχνοτήτων RF. Αυτό όμως έχει ως απαίτηση τα femtocells να αυτορυθμίζονται ή αυτο-οργανώνονται από μόνα τους, δηλαδή να είναι σε θέση να διαχειρίζονται κατάλληλα τους διαθέσιμους ασύρματους πόρους, όπως συχνότητα ή χρονικά διαστήματα κωδικών λειτουργίας και κωδικοποίησης καθώς και ισχύ εξόδου RF, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών σε συνδρομητές που δεν χρησιμοποιούν τεχνολογία femto. Η διαχείριση παρεμβολών τόσο σε downlink (DL) όσο και σε uplink (UL) είναι ένα βασικό στοιχείο για την εξασφάλιση επιτυχούς ανάπτυξης ενός femtocell [14].

Η ανάπτυξη των femtocell αναπτύσσεται πάνω από 10 χρόνια και έχει αποδεχτεί από την τεχνολογική κοινότητα. Περισσότεροι από 10 σημαντικοί αερομεταφορείς παγκοσμίως (π.χ. Sprint, Verizon και AT&T στις Ηνωμένες Πολιτείες, Vodafone στην Ευρώπη, Softbank στην Ιαπωνία) έχουν αρχίσει εμπορικές εφαρμογές οικιακών femtocell και περισσότεροι από 50 άλλοι φορείς βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Ταυτόχρονα, το πρόγραμμα Συνεργασίας Τρίτης Γενιάς (3GPP⁴) και οι πάροχοι τυποποίησης 3GPP2 έχουν τυποποιήσει τα (WCDMA - Wideband-CDMA)/(LTE) και CDMA femtocells, αντίστοιχα. Ορισμένες βασικά τεχνολογικά σημεία που έχουν ολοκληρωθεί ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν [14]:

- Συνολική αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει την συγχώνευση ενός δικτύου femto με ένα δίκτυο μακροεντολών.
- Λειτουργίες πρόσβασης/ελέγχου ταυτότητας: Οι λειτουργίες των femtocells είναι οι ακόλουθες: "open" (πρόσβαση για όλους τους χρήστες), "closed" (πρόσβαση σε ένα περιορισμένο σύνολο χρηστών) ή "hybrid" (συνδυασμός ανοιχτού και κλειστού) για την κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων ανάπτυξης [14].
- Διαχείριση παρεμβολών και άλλες τεχνικές αυτο-οργάνωσης για να διασφαλιστεί η συνύπαρξη των femtocells και macrocells.
- Πρωτόκολλο λειτουργίας, διαχείρισης και διοίκησης Operations, administration, and

σταθμό κινητής τηλεφωνίας χαμηλής ισχύος, που καλύπτει μια περιορισμένη περιοχή όπως ένα εμπορικό κέντρο, ένα ξενοδοχείο ή έναν κόμβο μεταφοράς.

⁴ Ειδικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός με ονομασία 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), ο οποίος έχει ως βασική αρμοδιότητα την παρακολούθηση και καθοδήγηση των εξελίξεων στη συγκεκριμένη τεχνολογική περιοχή

m

- Ενημέρωση του δικτύου femto υποστηρίζοντας διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης femto και αποτελεσματική ανακάλυψη χρηστών femtocell όταν μετακινούνται από περιοχή macro σε περιοχή femto, επιτρέποντας νέες υπηρεσίες ζώνης femto.

g
L
e
o
m
c
e

Οι εμπορικές εφαρμογές multi-femto επικεντρώνονται σε μεγάλες επιχειρήσεις, μεγάλα καταστήματα, εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια και άλλους δημόσιους χώρους. Εκτός από τη φωνή και τα δεδομένα τα εμπορικά femtocells είναι επίσης γνωστά ως εταιρικά (OAM) που επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση μεγάλων εφαρμογών. femtocells, τα οποία προορίζονται να υποστηρίξουν λειτουργίες όπως Internet Protocol pri-

f A
e c
m c
t e
o s

Σχεδιασμός και εγκατάσταση κάλυψης – Τα γραφεία των επιχειρήσεων μπορούν να κερδίσουν από μικρά έως μεγάλα γραφεία με διαφορετικές διατάξεις δαπέδου όπως τοπική ή απομακρυσμένη πρόσβαση σε κάποιο εταιρικό δίκτυο όπως εκτυπωτές, διαγραφεία, καμπίνες και μεγάλους ανοιχτούς χώρους. Για αυτό το λόγο προτείνεται κάποιο σχέδιο με στόχο την κάλυψη εταιρικών εγκαταστάσεων που ομοιάζουν με εταιρικές εφαρμογές WiFi. Λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια δαπέδου μιας επιχείρησης και την κάλυψη που παρέχεται από ένα femtocell, το οποίο είναι συνήθως της τάξης των 5000-10000 ft², ανάλογα με τη δομή του κτιρίου της επιχείρησης και τη διάταξη του δαπέδου, ένας τεχνικός έχει τη δυνατότητα επιλογής του απαιτούμενου αριθμού femtocells. Είναι βασικό να ειπωθεί ότι για την μείωση προγραμματισμού και εγκατάστασης RF τα femtocells οφείλουν να ενσωματώσουν επαρκείς δυνατότητες αυτονομίας.

v

Διαχείριση παρεμβολών και αυτορρύθμιση - Η διαχείριση παρεμβολών και η αυτορρύθμιση δεν είναι εύκολη στις multi-femto επιχειρήσεις, κυρίως λόγω [14]:

π
ί
σ

⁵ Πτυχή σχεδιασμού υλικού που καθορίζει και καθορίζει το μέγεθος, το σχήμα και άλλες φυσικές προδιαγραφές των εξαρτημάτων, ιδιαίτερα στα ηλεκτρονικά

ς

χ
α

- Σημαντικά υψηλότερη μεταβολή των συνθηκών RF σε μια επιχείρηση. Για παράδειγμα, η ισχύς του macro σήματος μπορεί να κυμαίνεται κατά 20-30 dB σε μια επιχείρηση.
- Ίσως να είναι αναγκαία μεγαλύτερη γειτονική περιοχή κάλυψης σε σύγκριση με τα οικιακά femtocells.
- Στις αναπτύξεις "κλειστής πρόσβασης", όπως η χρήση του femtocell περιορίζεται μόνο σε εταιρικούς χρήστες, υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβούν παρεμβολές DL στους αρμόδιους χρήστες όταν τα macrocells μοιράζονται το ίδιο κανάλι συχνότητας RF.

Οι χρήστες femto παρεμβάλλονται στην άκρη της κάλυψης femtocell επηρεάζοντας το macro UL. Τόσο τα προβλήματα παρεμβολών DL όσο και UL μειώνονται περιορίζοντας την κάλυψη κάθε femtocell σε ~ 464-650 m² και αυξάνοντας τον αριθμό των femtocells για κάλυψη ενός δαπέδου. Η μικρότερη κάλυψη ανά femtocell μειώνει σημαντικά τη διαρροή RF και συνεπώς τις παρεμβολές έξω από το κτίριο. Επιπλέον, η διαχείριση παρεμβολών απαιτεί επίσης ένα επίπεδο συντονισμού για τη μείωση της ανισοροπίας ισχύος T_x ⁶ μεταξύ των γειτονικών femtocells. Οι μεγάλες διαφορές ισχύος T_x πρέπει να περιορίζονται για να αποφευχθούν προβλήματα ανισοροπίας DL-UL που προκύπτουν όταν γειτονικά femtocells έχουν πολύ διαφορετικά ίχνη κάλυψης. Η παρεμβολή UL στο δίκτυο μακροκυψελών αντιμετωπίζεται περιορίζοντας το εύρος ζώνης ενός femtocell, έτσι ώστε οι χρήστες να μην μεταδίδουν υπερβολική ισχύ T_x και συνεπώς ελέγχουν την αύξηση του θορύβου στο femtocell [14].

Διαχείριση Κινητικότητας - Η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών στα femtocells σε μια επιχείρηση είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή μιας απρόσκοπτης εμπειρίας φωνής και δεδομένων στους χρήστες.

Τεχνολογίες NFV και SDN

Η τεχνολογία NFV σκοπεύει να μεταφέρει τις εφαρμογές δικτύου και των τηλεπικοινωνιών που στην παρούσα κατάσταση λειτουργούν αποκλειστικά από συγκεκριμένες πλατφόρμες σε υποδομή τύπου cloud NFV. Οι συσκευές που χρησιμοποιεί ο χρήστης αυξάνονται με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απαιτήσεις των χρηστών σε θέματα όπως υψηλός

6

Η ισχύς T_x είναι ένα μέτρο του πόσο ισχυρά μεταδίδεται το σήμα. Η καλύτερη ρύθμιση είναι το ελάχιστο απαραίτητο επίπεδο για να διατηρηθεί το σήμα με τα όρια της τοποθεσίας του WiFi.

ρυθμός bit, υψηλή διαθεσιμότητα, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή απόδοση σε ετερογενώς συγκλίνοντα περιβάλλοντα συνδεσιμότητας. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν περιορισμοί μερικοί από αυτούς είναι ο ακριβός εξοπλισμός και σύνθετα πρωτόκολλα ελέγχου. Αυτό όμως έχει αντίκτυπο στην καινοτομία νέων υπηρεσιών, στη δημιουργία νέων αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών γενικότερα. Τέλος, η δικτύωση καθορίζεται από το λογισμικό εργαλεία για το μέλλον του IoT [12] [13].

Καταρχάς, η χρησιμοποίηση των δύο τεχνολογιών SDN και NFV για τη δυναμική ανάπτυξη εικονικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας Virtual Mobile Network (VMN) είναι σημαντική. Οι τεχνολογίες SDN και NFV αναπτύσσονται με στόχο την απόκτηση επεκτασιμότητας, να είναι οικονομικά αποδοτικές και να παρέχουν ευελιξία για την ανάπτυξη VMN. Επίσης οι συγκεκριμένες τεχνολογίες δίνουν πρόσβαση στο VMN να ελέγχει με ευελιξία τον εικονικό πυρήνα του κινητού δικτύου τους εξετάζοντας το φορτίο κίνησης, το RAN και το EPC. Δεύτερον, η τεχνολογία Data Center Network (DCN) με κύριο χαρακτηριστικό τη χαμηλή καθυστέρηση αποτελεί μια σημαντική λύση αφού επιτρέπει τη διαχείριση πολύπλοκων συστημάτων και συμβάλλει στην ανάπτυξη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας [12].

Τρίτον, για να διαχειριστούν τις υπηρεσίες ζήτησης και των πολλών φορέων εκμετάλλευσης υπηρεσιών δικτύου κινητής τηλεφωνίας προτείνεται η αρχιτεκτονική Full - Soft-υπηρεσία (Anything as a Service - XaaS) με στόχο την παροχή εικονικού πυρήνα και εικονικού δικτύου ραδιοπρόσβασης που αφορά τα VMNs και να διασφαλίσει την ανεξαρτησία μεταξύ των VMNs. Επομένως, η αρχιτεκτονική Full-SDMN είναι πολύ καλή επιλογή για τους παρόχους αφού συμβάλλει στην επέκταση των δικτύων τους και επίσης περιλαμβάνει τις εφαρμογές ελεγκτή SDN και τις λειτουργίες επιπέδου δεδομένων. Τέλος, και η φυσική υποδομή θεωρείται ως υπηρεσία, αφού προσφέρει πλεονεκτήματα όπως υψηλή επεκτασιμότητα και χαμηλού κόστους υπηρεσίες [10],[12], [13].

Η ανάγκη για νέα αρχιτεκτονική/διανομή δικτύου για λειτουργίες κινητών δικτύων

Το 2011 παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στην κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, ενώ τα μέσα έσοδα ανά συνδρομητή ήταν σταθερά ή μειώνονταν. Παράλληλα, σημειώθηκε μείωση στις τιμές εξοπλισμού κατά 10% έως 20% με αρνητικό αντίκτυπο στην

κερδοφορία, με αποτέλεσμα οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας να μην έχουν τα ανάλογα κεφάλαια για επέκταση και ανάπτυξη νέων υπηρεσιών. Αυτό όμως επηρεάζει αρνητικά τους παρόχους, διότι δεν τους δίνεται η δυνατότητα να παρέχουν τις κατάλληλες υποδομές, έτσι ώστε καλύψουν τις ανάγκες ζήτησης όπως εύρος ζώνης και ταχύτητα. Επομένως εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι δύσκολο να επενδυθούν κεφάλαια από τους παρόχους δικτύου είναι πρέπον να μειωθεί το κόστος για την ανάπτυξη δικτύου [10]. Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι οι συσκευές διαδικτύου που αυξάνουν το κόστος. Αρκετά μεγάλο ποσοστό του σημερινού εξοπλισμού δικτύου είναι εξειδικευμένο και μονολιθικό. Τέλος, οι πάροχοι οφείλουν να ανταποκριθούν στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών αναπτύσσοντας νέες υπηρεσίες και δυνατότητες. Από την άλλη, εμποδίζεται η καινοτομία διότι μέχρι να υλοποιηθούν και να ολοκληρωθούν οι εξοπλισμοί που χρειάζονται για την ανάπτυξη του δικτύου μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα [10].

Αυτή η αναντιστοιχία μεταξύ των κανονιστικών απαιτήσεων και της ζήτησης από τους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας για ενεργό κοινή χρήση πόρων οδήγησε σε αναθεώρηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Διαχωρίζοντας τη λογική του ελέγχου και της προώθησης, είναι δυνατόν να επιβληθεί ανεξάρτητος έλεγχος διαχείρισης ανά φορέα στην υποδομή που διαμοιράζονται διαφορετικοί φορείς. Αυτό επιτρέπει σε κάθε πάροχο να προσφέρει διαφορετικές υπηρεσίες και να διεγείρει τον βαθμό ανταγωνισμού και δίνει την δυνατότητα στους νεοεισερχόμενους παρόχους να εισέλθουν στην αγορά χωρίς τεράστιες επενδύσεις σε φυσικές υποδομές [10].

Προτεινόμενη τεχνική λύση για μείωση εξάρτησης από κατασκευαστές και διαμοιρασμό δικτύωσης

Η αρχιτεκτονική SDN είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου όπου (1) η προώθηση διαχωρίζεται από τον έλεγχο του δικτύου και (2) υπάρχει αρκετή ελευθερία επιλογής στον προγραμματισμό της λογικής προώθησης. Η λογική του δικτύου εστιάζεται σε ελεγκτές SDN που βασίζονται σε λογισμικό, οι οποίοι κρατούν ενήμερη την κατάσταση του δικτύου. Ο ελεγκτής SDN γνωρίζει την τοπολογία του φυσικού δικτύου είτε μέσω αλγορίθμων ανακάλυψης είτε από βάσεις δεδομένων. Με άλλα λόγια, το SDN διασπά το δίκτυο όπως το λειτουργικό σύστημα διαχωρίζει τις εφαρμογές από το υλικό [10]. Το OpenFlow θεωρείται ως ενεργοποιητής του SDN. Συγκεκριμένα είναι ένα πρότυπο επικοινωνίας που βρίσκεται μεταξύ των επιπέδων ελέγχου και προώθησης μιας αρχιτεκτονικής SDN. Η τεχνολογία

δρομολογητές και switches. Τα πακέτα δρομολογούνται μέσα από τα switches και το λογισμικό συνεισφέρει στην λειτουργία τους. Τέλος το OpenFlow αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την διεκπεραίωση των απαιτήσεων της αγοράς και των δυνατοτήτων δικτύου, αφού επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και προώθησης και συμβάλλει στην μείωση της εξάρτησης από τους προμηθευτές εξοπλισμού [10].

Η εικονικοποίηση δικτύου (Network virtualization) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί τους φυσικούς πόρους σε ένα δίκτυο διασπώντας τους με τον κατάλληλο τρόπο σε μικρότερα κομμάτια για την επίτευξη κάποιου στόχου. Αυτά τα κομμάτια ουσιαστικά είναι οι συσκευές και είναι απομονωμένες από τα άλλα κανάλια. Η εικονικοποίηση δικτύου συμβάλλει στον διαμοιρασμό της ίδιας φυσικής υποδομής στα απομονωμένα λογικά δίκτυα που έχουν ανεξάρτητους μηχανισμούς διεθύνσεων και προώθησης [10]. Η εικονικοποίηση δικτύου σημαίνει διαχωρισμός των πόρων σε μικρότερα κομμάτια (slice) και οι πάροχοι δικτύου ελέγχουν και διαχειρίζονται ανεξάρτητοι τα slice τους. Τα slice περιλαμβάνουν ασύρματους σταθμούς βάσης Radio Base Station (RBS), δρομολογητές και συνδέσεις Ethernet εικονικοποιημένη δικτύωση. Η εικονικοποίηση δικτύου διαφοροποιεί τις υπηρεσίες και αυξάνει το ανταγωνισμό.

Ποιοτική αξιολόγηση των κοστών ορισμένου δικτύου λογισμικού και διανομή δικτύου
Ακολουθούν τρία σενάρια σύμφωνα με το [10]:

- Κλασικό σενάριο: Μεμονωμένες συσκευές δικτύου στενά συνδεδεμένες σε κατανεμημένη αρχιτεκτονική και με έλεγχο δικτύου.
- Σενάριο SDN: Χρησιμοποιώντας το OpenFlow ως μέσω επικοινωνίας που αφορά μια κεντροποιημένη αρχιτεκτονική με έλεγχο δικτύου διαχωρισμένη από την προώθηση.
- Σενάριο κοινής χρήσης: Χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή FlowVisor για εικονικοποίηση και κοινή χρήση δικτύου μεταξύ πολλαπλών παρόχων.

Σε έναν πάροχο δικτύου το κόστος μιας επένδυσης περιλαμβάνει την αγορά περιοχής και κτιρίων για την στέγαση του προσωπικού, την υποδομή δικτύου για δρομολογητές οπτικών ινών και IP και το λογισμικό όπως το σύστημα διαχείρισης δικτύου. Το OPEX αφορά τα λειτουργικά έξοδα και δεν συμβάλλει στην υποδομή. Συγκεκριμένα, αντιπροσωπεύει το κόστος συντήρησης της εταιρείας, δηλαδή τα κόστη των τεχνικών και εμπορικών

λειτουργιών, διαχείρισης κ.λπ. Μια επισκόπηση των μειώσεων κόστους για τα σενάρια που εξετάζονται δίνεται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί:

Πίνακας 2: Επισκόπηση των μειώσεων κόστους [10]

	CAPEX	OPEX									
		telco ειδικά για το δίκτυο που είναι σε λειτουργία και λειτουργεί					OPEX εγκατάσταση εξοπλισμού			Γενικό OPEX	
		Τηλεπικοινωνιακό κόστος υποδομής	Συντήρηση	Επισκευή	Παροχή υπηρεσιών	Τιμολόγηση και γρέωση	Επιχειρησιακός σχεδιασμός δικτύου	Εμπορία	Πρώτη φορά εγκατάσταση	Εκ των προτέρων προγραμματισμός	Μη τηλεπικοινωνιακό κόστος υποδομής
Κλασικό σενάριο	0	0	0	0	0				0		
SDN σενάριο	-1	-1	-1	-1	-1				-1		
Κοινόχρηστο σενάριο	-2	-2	-2	-2	-1				-1		

0 Καμία επίδραση στο κόστος
 Δεν θεωρείται

-1 Μείωση κόστους
 -2 Επιπλέον μείωση κόστους

Δαπάνες κεφαλαίου (Κεφαλαιουχικές δαπάνες)

Όσον αφορά το σενάριο SDN, οι συσκευές δεν απαιτούν περίπλοκες λειτουργίες, που σημαίνει ότι της καθιστά φθηνότερες και απλούστερες. Οι συσκευές δικτύου ελέγχονται από μια σύνθετη λογική ελέγχου που εκπονείται από μια εξωτερική συσκευή. Το κόστος κεφαλαίου θα αυξηθεί εξαιτίας του κόστους των ελεγκτών OpenFlow, των καρτών δικτύου και των πομποδεκτών. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση του SDN συμβάλλει στον έλεγχο της κίνησης τους δικτύου και αυτό συνεπάγεται μείωση της ζήτησης χωρητικότητας και των κεφαλαιουχικών δαπανών.

Η κοινή χρήση ενός βασικού ραδιοφωνικού σταθμού συνδράμει στην παροχή ωφελειών σε ένα κινητό δίκτυο. Όμως, εξαιτίας της κοινής χρήσης του εξοπλισμού δικτύου και της συμφόρησης κίνησης ένα μέρος του εξοπλισμού θα αφαιρεθεί οπότε τα ποσοστά χρήσης θα αυξηθούν. Η κίνηση θα είναι συγκεντρωμένη οπότε τα κοινά κέρδη θα βρίσκονται στο κεντρικό δίκτυο και κάθε πάροχος έχει την δυνατότητα χρησιμοποίησης εξολοκλήρου του εξοπλισμού του [10].

Οι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωση του κόστους κεφαλαίου εφαρμόζοντας την τεχνολογία SDN είναι:

- Η ανάπτυξη απλών συσκευών δικτύου διότι επιτυγχάνεται μείωση των δαπανών.
- Πρόσθετοι εξοπλισμοί όπως ελεγκτές OpenFlow, κάρτες δικτύου και πομποδέκτες.

- Ο κατάλληλος αριθμός switches που διαχειρίζεται ένας ελεγκτής OpenFlow.
- Το κατάλληλο σημείο τομής μεταξύ της χωρητικότητας του δικτύου και της πραγματικής ζήτησης.

Λειτουργικά έξοδα

Σχετικά με το σενάριο SDN το κόστος υποδομής του θα μειώνεται σταδιακά σε επίπεδο ενέργειας και ψύξης αφού η κατανάλωση ισχύος από το επίπεδο ελέγχου στα switches δεν θα υφίσταται. Ακόμη ένα πλεονέκτημα του SDN είναι καλύτερη δρομολόγηση κίνησης αφού υπάρχει ελάττωση του αριθμού των συσκευών δικτύου και της κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, και το ενεργειακό κόστος θα είναι μικρότερο από το σενάριο κοινής χρήσης ως απόρροια της περισσότερης χρησιμοποίησης του εξοπλισμού δικτύου. Στο κλασικό σενάριο χωρίς ελεγκτές OpenFlow οι ενέργεια που καταναλώνεται είναι περισσότερη. Τέλος, το κόστος συντήρησης στο σενάριο κοινής χρήσης, διαμοιράζεται μεταξύ πολλών παρόχων [10].

Στο σενάριο SDN υπάρχει δυνατότητα μείωσης του κόστους επισκευής λόγω δοκιμών πριν από την κυκλοφορία, πράγμα που σημαίνει μειώσει του αριθμού των σφαλμάτων. Το κόστος επισκευής μικραίνει περισσότερο σε περίπτωση κοινής χρήσης εξοπλισμού, αφού κάθε πάροχος συντηρεί ένα μέρος του δικτύου. Βασικό μειονέκτημα του SDN αποτελεί η αποτυχία του ελεγκτή OpenFlow με αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση του δικτύου.

Το κόστος υπηρεσίας μειώνεται αφού το SDN αυτορυθμίζεται. Είναι βασικό να υπάρχει το κατάλληλο προσωπικό που θα συνδράμει ενεργά στη διαχείριση, τη δημιουργία, την τροποποίηση και συντήρηση του δικτύου. Επίσης το SDN μικραίνει το ποσό της χειροκίνητης ρύθμισης με απόρροια λιγότερα σφάλματα και μειωμένες διακοπές λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον θα υπάρξει σημαντική διαφορά στο κόστος της πρώτης εγκατάστασης του εξοπλισμού δικτύου. Το SDN συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός υψηλότερο επίπεδο καινοτομίας με ταχύτερους χρόνους επανάληψης και μεγαλύτερη συχνότητα δοκιμής. Επιπρόσθετα, με βάση το γεγονός ότι το SDN παρέχει μεγαλύτερες δυνατότητες δοκιμής και μειώνεται ο αριθμός των συσκευών που ενημερώνονται. Τέλος στο περιβάλλον δικτύου υπάρχει δυνατότητα προσομοίωσης που συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός εικονικού περιβάλλοντος, στο οποίο αντιμετωπίζονται άμεσα και διορθώνονται πιθανά λάθη σφαλμάτων και ταυτόχρονα εκπαιδεύεται προσωπικό σε συνθήκες εικονικού περιβάλλοντος που βασίζεται στην πραγματικότητα πριν εργαστούν στο δίκτυο [10].

Τεχνολογία Cognitive Radio

Στη σημερινή χρονική περίοδο η τεχνολογία δικτύωσης δεν είναι ευέλικτη, δηλαδή δεν προσαρμόζεται εύκολα στις αλλαγές συνθηκών με αποτέλεσμα τη μικρή απόδοση. Άλλος προβληματικός παράγοντας είναι η παρούσα κατανομή φάσματος, στην οποία γίνεται κατασπατάληση των πόρων σε κάποιο αριθμό επιχειρηματικών μοντέλων. Γενικά, εκτός από λίγων εξαιρέσεων, δεν υπάρχει ευελιξία στα στοιχεία του δικτύου, τα οποία είναι το πεδίο εφαρμογής, η κατάσταση και οι δυνατότητες απόκρισης και σημαίνει ότι δεν μπορούν να πάρουν έξυπνες αποφάσεις. Συνεπώς οι μηχανισμοί προσαρμογής είναι υπεύθυνοι μόνο στην περίπτωση εμφάνισης προβλήματος. Όμως αυτό έχει αρνητικές συνέπειες στην παροχή ευφυϊών και αποδοτικών λύσεων σε σχέση με τα επιχειρηματικά μοντέλα και την οικολογική δικτύωση. [16].

Τα Γνωστικά Ασύρματα Δίκτυα γνωστά ως Cognitive Radio Networks (CRN) αποδίδουν μεγαλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος διότι εκμεταλλεύονται τα σημεία του φάσματος που χρησιμοποιούνται λιγότερο ή καθόλου. Στους μη αδειοδοτημένους χρήστες παρέχεται πρόσβαση στο φάσμα, αρκεί η παρεμβολή τους να είναι μηδαμινή. Από αυτό προκύπτει ότι είναι επιτακτική ανάγκη ότι οι νέες τεχνολογίες επικοινωνίας και δικτύωσης να κάνουν αποδοτικότερη χρήση του φάσματος σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές που θα βοηθήσουν στην αύξηση του φάσματος [16].

Η λειτουργία των δικτύων CRN στηρίζεται στη χρήση γνωστικών ραδιοφωνικών συσκευών Cognitive Radio Devices (CRD), οι οποίες έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν αυτόματα κάποιες παραμέτρους όπως ζώνη συχνοτήτων, κυματομορφής και ισχύς μετάδοσης ανάλογα με το περιβάλλον, αποφυγή σημείων συμφόρησης και εκμετάλλευση τμημάτων του φάσματος. Είναι γνωστό ότι η Γνωστική Διαδικασία γνωστή ως Control Plane (CP) συμβάλλει στη συλλογή σχετικών πληροφοριών, στη μηχανική μάθηση, στο συλλογισμό και στη λήψη αποφάσεων. Για να εκτελεστούν οι αποφάσεις της Γνωστικής Διαδικασίας υπάρχουν ρυθμιζόμενες ραδιοφωνικές πλατφόρμες όπως το λογισμικό Software Defined R

a Ο όρος «cognitive radio» ή στα ελληνικά «σύστημα γνωστικών επικοινωνιών» ορί-
d
στηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Mitola στη διδακτορική του διατριβή στο Royal
i
των όρων σύστημα γνωστικών επικοινωνιών που λειτουργούν με βάση το λογισμικό SDR
o

και του συστήματος γνωστικών επικοινωνιών. Το SDR αποτελείται από μια ομάδα από ραδιοσυχνότητες, στις οποίες οι περισσότερες από τις ενδιάμεσες ραδιοσυχνότητες μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή, για να συγκριθούν με την κλασική τεχνολογία ραδιοφώνου, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία στη λειτουργία ραδιοφώνου. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα γνωστικών επικοινωνιών (CR) σχετίζεται με τον έλεγχο που συμβάλλει στο SDR για να καθοριστεί ο τρόπος λειτουργίας καθώς και τις απαραίτητες παραμέτρους που θα εφαρμοστούν στη συγκεκριμένη κατάσταση δικτύωσης [16].

H

C

P

ελέγχει το CRN δίκτυο. Το CRN αποτελεί μια οντότητα που εξετάζει προσεκτικά τις πληροφορίες περιβάλλοντος που συλλέγει, τις επεξεργάζεται και λαμβάνοντας αυτές υπόψη αποφασίζει τις κατάλληλες ρυθμίσεις που χρειάζονται για την συγκεκριμένη περίπτωση. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται ακολουθούν ένα σύνολο πολιτικών και ενός προφίλ εισαγωγής. Όλα όσα προαναφέρθηκαν αφορούν διαφορετικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, οι οποίοι εφαρμόζονται σε διαφορετικά επίπεδα στη στοίβα πρωτοκόλλων Transmission Control Protocol (TCP) ραδιοπρόσβασης, ζώνης συχνοτήτων, ισχύς μετάδοσης και σχήμα διαμόρφωσης. Στο επίπεδο IP όλες αυτές οι αποφάσεις αφορούν την δρομολόγηση, που είναι πολυδιάστατου τύπου ad-hoc. Με τον όρο «πολυδιάστατο» είναι η διαδρομή από άκρο σε άκρο (end-to-end) του δικτύου, η οποία εφαρμόζεται με διαφορετικούς τρόπους, δηλαδή με κεντρικοποιημένο ή κατακεντρωμένο τρόπο και έχουν θετικές και αρνητικές συνέπειες το καθένα. Είναι πρόβλημα να επισημανθεί τόσο το CRD όσο και το CRN διαμοιράζονται το ίδιο CP, παρόλο που έχουν διαφορετικούς αλγορίθμους και καθήκοντα. Στο CRN εφαρμόζεται μια σημαντική τεχνική, η οποία είναι η διασταυρούμενη σχεδίαση (cross-layer design) και αφορά την ανταλλαγή πληροφοριών σε διαφορετικά επίπεδα στη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP με στόχο την βελτίωση της απόδοσης. Όμως, η δυνατότητα ανάπτυξης του δικτύου και η ευελιξία ίσως περιοριστούν. Σημαντικός παράγοντας για το CRD και το CRN είναι ότι το CR δίνει την δυνατότητα στη χρήση του προσωρινά αχρησιμοποίητου φάσματος το λεγόμενο Spectrum Opportunity (SOP) ή White Space (WS), η οποία ενεργοποιείται από τον Δευτερεύοντα Χρήστη Secondary User (SU), στην περίπτωση που ο Πρωτεύον Χρήστης Primary User συγκεκριμένο SOP τότε ο SU αναγκάζεται να μετακινηθεί σε ένα άλλο SOP ώστε διατηρήσει την τρέχουσα επικοινωνία. Οι συσκευές του συστήματος γνωστικών επικοινωνιών

ε

- ί • Multi-band
- ν • Multi-channel
- α • Multi-mode
- ι • Multi-standard
 - Multi-service

σ

χ Τα CRD και CRN χαρακτηρίζονται ως πολύπλοκα, αφού είναι σχεδιασμένα να λειτουργήσουν σε αυτές τις καταστάσεις. Οι λειτουργίες που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση είναι τέσσερις και είναι [16]:

ι

α • *Ανίχνευση φάσματος*, κάθε στοιχείο του CR να έχει τη δυνατότητα της μέτρησης, της αίσθησης, της μάθησης και της γνώσης ενός σύνολο παραγόντων που σχετίζονται με το ασύρματο περιβάλλον όπως διαθεσιμότητα φάσματος και ισχύος, χαρακτηριστικά ραδιοφωνικού καναλιού και υποδομή δικτύου. Οι ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι για την ανίχνευση φάσματος είναι η ανίχνευση ενέργειας, η κυματομορφή, η παρεμβολή και η πρόβλεψη.

ε

ς • *Διαχείριση φάσματος*, επιτρέπει την διαλογή των βέλτιστων δυνατοτήτων φάσματος (SOPs) από τα διαθέσιμα, με στόχο τον καλύτερο σχηματισμός διαδρομής από άκρο σε άκρο για μια SU επικοινωνία δεδομένου κάποιου QoS/QoE. Αυτό όμως για να γίνει οφείλει πρώτα να χαρακτηρίσει και να μοντελοποιήσει τα SOPs και απαιτεί καλή γνώση της συμπεριφοράς των PU.

ο

ν • *Κοινή χρήση φάσματος*, για παράδειγμα όταν αρκετά SUs χρειάζεται να μοιραστούν το διαθέσιμο φάσμα την ίδια χρονική περίοδο ή πιο γενικά να δοθούν οι κατάλληλες λύσεις όταν συμβούν στο CRN σε περίπτωση προβλήματος. Για να έχουν πρόσβαση οι SU πρέπει να γίνει με βάσει κάποιου κανόνα. Γενικά στο φάσμα υπάρχουν δύο κατηγορίες μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης, οι οποίες είναι η πρόσβαση στο φάσμα και η κατανομή πόρων. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μηχανισμών ελέγχου που συμβάλλουν στην επίλυση αυτών των προβλημάτων όπως υβριδικοί μηχανισμοί, συνεργατικοί ή μη συνεργατικοί μηχανισμοί και επικάλυψης ή μη επικαλυπτόμενης πρόσβασης.

ο

κ

ρ

ί

ν

ο

- *Κινητικότητα φάσματος*, σχετίζεται με την αλλαγή καναλιού επικοινωνίας όταν οι συνθήκες λειτουργίας είναι μεταβαλλόμενες. Αυτό συμβαίνει όταν ένας SU επιβάλλεται να αλλάξει ζώνη συχνοτήτων εξαιτίας έλευσης του PU, που χρειάζεται το συγκεκριμένο κανάλι επικοινωνίας. Η κινητικότητα φάσματος εφαρμόζεται σε εξελιγμένους μηχανισμούς ελέγχου, οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων TCP και IP με στόχο του καλύτερου QoS και QoE χωρίς να ληφθούν υπόψη οι μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Συνοψίζοντας, οι τέσσερις λειτουργίες χρειάζονται για την επικοινωνία σε CRN δίκτυο. Επί του πρακτέου, ένα CRD οφείλει να εκπληρώνει τα ακόλουθα [16]:

- Προσδιορισμός των διαθέσιμων SOPs, επιλέγοντάς τα με συγκεκριμένα κριτήρια.
- Δυναμική επιλογή της διαδρομής προς έναν συγκεκριμένο προορισμό CRD.
- Να προσαρμόζει τις παραμέτρους ανάλογα όπως είναι η ισχύς, η συχνότητα, το κανάλι και ο κώδικας.
- Πολυδιάστατη δρομολόγηση και βελτιστοποίηση ανάλογα με τις συνθήκες δικτύου.
- Δεν παρεμβαίνει στις τρέχουσες επικοινωνίες PU.
- Παροχή μέτρων ασφαλείας.

Συνοψίζοντας, το CRD εκτιμάται ότι θα χρησιμοποιηθεί δυναμικά για όλους τους τύπους διαθέσιμων πόρων επικοινωνίας με στόχο την αποφυγή παρεμβολών με PUs και SUs. Επίσης, οι λειτουργίες αυτές επηρεάζουν τα συμφέροντα του συνδρομητή και του παρόχου δικτύου. Ο συνδρομητής προτιμάει υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών που του παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης, μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή παροχής υπηρεσιών, αξιοπιστία, ασφάλεια, QoS και QoE.

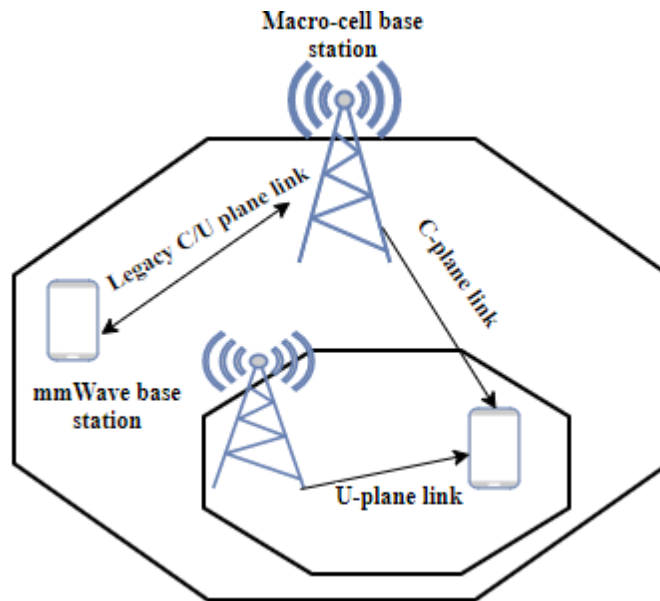
3.6. Τεχνολογία mmWave

Στον ερχομό της 5^{ης} γενιάς των ασύρματων δικτύων πρόσβασης αρκετοί τομείς της βιομηχανίας ασύρματων δικτύων βρίσκονται σε δύσκολη θέση εξαιτίας της ζήτησης κίνησης που ολοένα αυξάνεται με αρνητική συνέπεια στην απόδοση του ασύρματου δικτύου. Η εξασφάλιση υψηλών ρυθμών δεδομένων και χαμηλής καθυστέρησης δεν επαρκεί για τους απαιτητικούς πελάτες. Είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν προηγμένες λύσεις που θα αντιμετωπίσουν τον μεγάλο αριθμό αιτημάτων εφαρμογών του χρήστη, έτσι ώστε

να μειωθεί το πρόβλημα της έλλειψης ασύρματων πόρων. Για αυτό το λόγο αρκετοί ακαδημαϊκοί ερευνητές και βιομηχανικές εταιρίες ενδιαφέρονται να διερευνήσουν συχνότητες πάνω από τα 5GHz. Συνεπώς, μια καινοτόμα τεχνολογία που αποτελείται από επικοινωνίες κυμάτων χιλιοστόμετρου (mmWave) και παρέχουν δύο πλεονεκτήματα [32],[33]:

- Η κατάλληλη διαχείριση των μη αδειοδοτούμενων πρόσθετων ζωνών φάσματος.
- Τεράστιο εύρος ζώνης μέχρι 1GHz για την παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων για τους απαιτητικούς συνδρομητές.

Εδώ και αρκετά χρόνια χρησιμοποιείται η τεχνολογία σημείο σε σημείο (point-to-point) Wavenet από διαφορετική οπτική γωνία. Συγκεκριμένα ο σχεδιασμός του δικτύου ασύρματης πρόσβασης RAN ανοίγει νέες προκλήσεις καθώς η τεχνολογία mmWave RAN ενδέχεται να επηρεαστεί αρνητικά από δύο παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με σοβαρές απώλειες διάδοσης σε συνδυασμό με ένα δυσμενές περιβάλλον. Ο πρώτος παράγοντας αφορά την αδυναμία που παρουσιάζουν οι επικοινωνίες mmWave στο να διαχέονται γύρω από εμπόδια συστοιχιών κεραιών με αρκετό αριθμό εξαρτημάτων τοποθετημένων σε μικρό χώρο, τόσο στο σταθμό βάσης (BS) όσο και στον κινητό τερματικό χρήστη Mobile Terminal (MT). Επομένως, η ερευνητική προσπάθεια επικεντρώνεται προς την κατεύθυνση της χρήσης προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) με στόχο την εστίαση της συνολικής ακτινοβολημένης ισχύος σε πολύ μικρές γωνίες, έτσι ώστε να αυξηθεί το εύρος μετάδοσης, δηλαδή να αυξηθεί το εύρος κάλυψης των κυψελών ώστε να εντοπίζονται εύκολα οι τερματικοί χρήστες όταν κινούνται εντός της περιοχής κάλυψης. Για να εφαρμοστούν αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται συστήματα μικροκυψελών mmWave για την κάλυψη μερικών εκατοντάδων μέτρων [35], [36]. Ωστόσο, η ενσωμάτωση των συστημάτων μικροκυψελών mmWave στις τρέχουσες αρχιτεκτονικές RAN έχει περιορισμούς. Συγκεκριμένα, ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν προηγμένες τεχνικές beamforming, η ανάπτυξη μικροκυψελών συστημάτων mmWave εμφανίζει αρνητικές συνέπειες όπως διακοπές λειτουργίας, απώλειες σήματος λόγω της υψηλής εξασθένησης και της παρουσίας εμποδίων λαμβάνοντας υπόψη και τα ανθρώπινα σώματα, τα οποία εμποδίζουν σοβαρά τη διάδοση του σήματος [32].



Εικόνα 8: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής διαίρεσης C- / U-επιπέδου σε δίκτυα mmWave RAN.

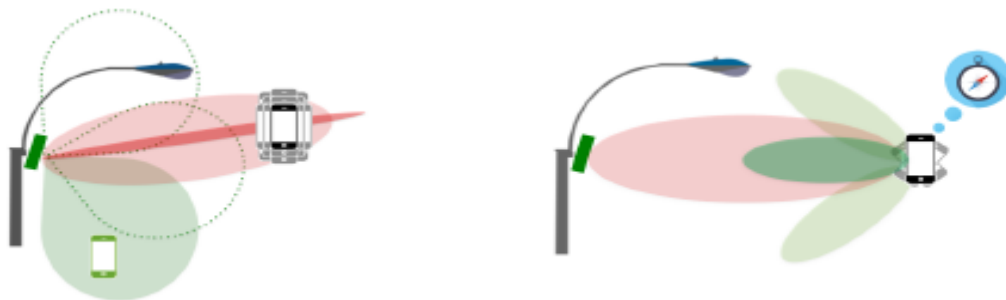
Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα προτείνεται μια κυψελοειδής αρχιτεκτονική που υποστηρίζεται σε ετερογενή στρώματα και ενοποιεί το πρότυπο SDN και τη λειτουργική διάσπαση μεταξύ του επιπέδου χρήστη (επίπεδο-U) και του επιπέδου ελέγχου (επίπεδο-C). Το επίπεδο χρήστη U δίνει τη δυνατότητα στους ελεγκτές να εκτελούν κεντρικές λειτουργίες δικτύου όπως κατανομή πόρων, beam steering κ.λπ. Το επίπεδο ελέγχου C εξασφαλίζει μια πλήρη κάλυψη σχετικά με την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης με παλαιού τύπου συστήματα (legacy) BS, που είναι συνήθως συστήματα μακροκυψελών και προσφέρει κανάλια υψηλής χωρητικότητας μέσω μικροκυψελών mmWave, τα οποία θέτονται σε λειτουργία κατά την απαίτηση του χρήστη [37], όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Παρόλο που η τεχνολογία mmWave καινοτομεί στην ασύρματη πρόσβαση, οι εγκαταστάσεις δικτύου πρόσβασης που χρησιμοποιούν την τεχνολογία mmWave παρουσιάζουν περισσότερη πολυπλοκότητα στις απαραίτητες λειτουργίες δικτύου. Τα σήματα συγχρονισμού που εκπέμπονται από αρχιτεκτονικές δικτύου παλαιού τύπου πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα έτσι ώστε οι κατευθύνσεις των σημάτων mmWave που εκπέμπονται από τον πομπό και τον δέκτη πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένα χωρικά. Συνεπώς, η περιοχή της κυψέλης θα πρέπει να σαρωθεί προς όλες τις κατευθύνσεις τόσο από τον πομπό όσο και από τον δέκτη. Όσον αφορά τις διαδικασίες ανακάλυψης που δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά θα δημιουργήσουν μεγάλη καθυστέρηση στην πρόσβαση των χρηστών, επηρεάζοντας αρνητικά τις διαδικασίες παράδοσης και την ποιότητα των υπηρεσιών χρήστη [32], [38].

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, η συλλογή πληροφοριών τοποθεσίας χρήστη γίνεται από το επίπεδο ελέγχου C με βάση τις διαθέσιμες διαδικασίες ανακάλυψης, περιορίζοντας την καθυστέρηση πρόσβασης. Επίσης τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας από την πλευρά BS και MT προκύπτουν από την σύγκριση των αποδόσεων των διαφορετικών αλγορίθμων ανακάλυψης, τα οποία αν συνδυαστούν με την ανακρίβεια των πληροφοριών τοποθεσίας ενδέχεται προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη διαδικασία ανακάλυψης κυψελών. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, προτείνεται η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων που θα περιλαμβάνει πληροφορίες που σχετίζονται με το περιβάλλον της εκάστοτε γεωγραφικής περιοχής με στόχο την αύξηση της απόδοσης των λειτουργιών των κυψελών που θα υποστηρίζουν δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας των πληροφοριών που αφορούσαν προηγούμενες ανακαλύψεις κυψελών.

Οι λειτουργίες ελέγχου των παλαιών τύπων συστημάτων θεωρούν ότι τα αιτήματα υπηρεσίας συλλέγονται και εξυπηρετούνται από την ίδια οντότητα δικτύου για παράδειγμα ένας σταθμός βάσης, από την άλλη οι λειτουργίες διαχείρισης πόρων αφαιρούνται από τον λειτουργικό διαχωρισμό προσφέροντας μια πλήρη πρόσβαση δικτύου σε μια ανεξάρτητη οντότητα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον χρήστη έτσι ώστε να ξεκινήσει η ενεργοποίηση των στοιχείων του δικτύου δεδομένων που είναι απαραίτητα με σκοπό να βρεθεί μια λύση που εξασφαλίζει τη βέλτιστη χρήση των πόρων του συστήματος. Παρόλα αυτά, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν αποδοτικότεροι αλγόριθμοι κατατομής πόρων, διότι η διαχείριση πόρων γίνεται περίπλοκη. Επίσης, ανεξαρτήτως του λειτουργικού διαχωρισμού δεν γίνεται να ανατεθούν ορισμένες λειτουργίες ελέγχου χαμηλού επιπέδου σε ξεχωριστή σύνδεση σηματοδότησης με διαφορετικό σταθμό βάσης και μια από αυτές είναι η διαδικασία ανακάλυψης κυψελών σε mmWave RAN, η οποία είναι σημαντική, διότι χρειάζεται μια κατευθυντική σάρωση και εισάγει καθυστέρηση πρόσβασης [32].

Ένας απλός τρόπος ανακάλυψης κυψελών που προτείνεται είναι η σάρωση όλων των πιθανών διαμορφώσεων κεραίας και παράλληλα η αναζήτηση ενός κομβικού σημείου μεταξύ του mmWave BS και του χρήστη. Όλη αυτή η διαδικασία καταναλώνει αρκετό χρονικό διάστημα με σκοπό να υπάρξει καθυστέρηση της φάσης συγχρονισμού. Με τις σημερινές τεχνολογίες κεραιών υπάρχει η δυνατότητα της χρήση πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων κεραίας [39], το οποίο σημαίνει ότι υπάρχουν διαφορετικά πλάτη δέσμης (beamτικές κατευθύνσεις κατάδειξης).

Η επιλογή πλάτους δέσμης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στη διαδικασία ανακάλυψης κυψελών. Αρχικά τα μεγάλα πλάτη δέσμης παρέχουν γρηγορότερη σάρωση στον περιβάλλοντα χώρο αφού υπάρχουν λιγότερα switches, αλλά ανακαλύπτουν σχετικά πιο εύκολα τους κοντινούς χρήστες. Από την άλλη τα μικρά πλάτη δέσμης έχουν την δυνατότητα κάλυψης απομακρυσμένων χρηστών, όμως για την σάρωση ολόκληρου του περιβάλλοντος είναι αναγκαίος ένας μεγάλος αριθμός αλλαγών διαμορφώσεων κεραίας. Όπως προκύπτει για την καλύτερη αξιοποίηση της διαδικασίας ανακάλυψης είναι πρέπον να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ ταχύτητας και του εύρους της χωρικής εξερεύνησης. Όπως παρατηρείται στο αριστερό τμήμα της Εικόνας 9, η πράσινη ευρύτερη δέσμη εξερευνάει τον περιβάλλοντα χώρο με μερικούς διακόπτες διαμόρφωσης, παρόλα αυτά είναι σε θέση να καλύψει μόνο τον πράσινο χρήστη. Αντίθετα, η απόσταση που απέχει ο μαύρος χρήστης είναι μεγαλύτερη και προσεγγίζεται από μια λεπτότερη δέσμη την κόκκινη, αφού δεν είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από την πράσινη δέσμη. Συνεπώς για να καλυφθεί το ίδιο γωνιακό εύρος χρειάζονται αρκετά switches ώστε να εντοπιστεί ο χρήστης [32].



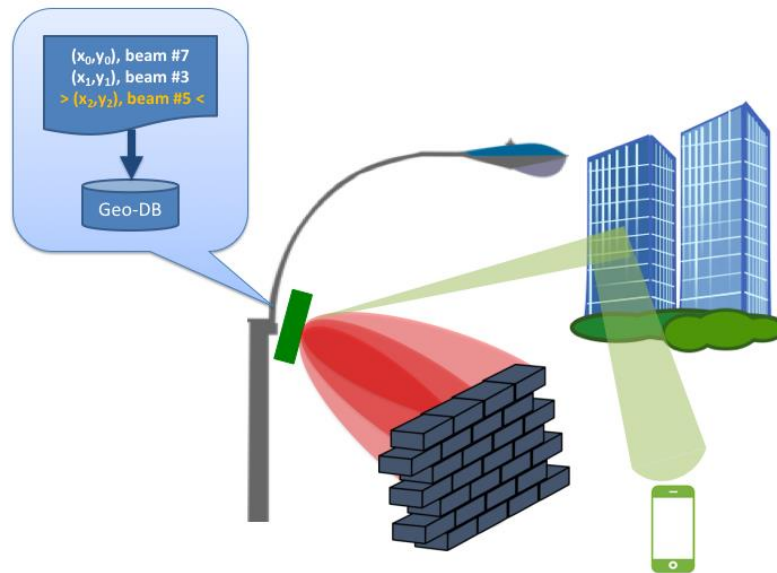
Εικόνα 9: Παραδείγματα ανακάλυψης κυψελών με βάση την κατεύθυνση [32]

Οι πληροφορίες του περιβάλλοντος αποτελούν σημαντικό παράγοντα που πρέπει να δοθεί η ανάλογη προσοχή. Ένα παράδειγμα οφέλους αποτελεί η διαδικασία ανακάλυψης κυψελών όταν αποκτούνται πληροφορίες σχετικά με τα mmWave και MTs. Οι πληροφορίες που είναι χρήσιμες που συμβάλλουν στην βελτίωση της διαδικασίας πρόσβασης είναι οι θέσεις του τερματικού, οι προβλέψεις οφέλους του καναλιού, η χωρική κατανομή χρηστών και οι διαμορφώσεις κεραίων που είχαν συνεισφέρει επιτυχώς σε προηγούμενες προσβάσεις. Στην ιδανική περίπτωση, για να ανακαλυφθούν το mmWave BS και ο χρήστης πρέπει το περιβάλλον να προσφέρει ακριβείς πληροφορίες έτσι ώστε να χρειαστεί μια λεπτή δέσμη και η ανακάλυψη να γίνει σε ένα μόνο βήμα. Πρακτικά είναι αδύνατον να αποφευχθεί η ανακρίβεια των πληροφοριών περιβάλλοντος και για αυτό χρησιμοποιούνται μόνο για τον περιορισμό του χώρου αναζήτησης και τον περιορισμό του χρόνου αναζήτησης [32].

Συνεπώς, η ανάπτυξη ενός προηγμένου αλγορίθμου ανακάλυψης θα συμβάλλει στην βέλτιστη επιλογή των πιο επιτυχημένων διαμορφώσεων, μειώνοντας τον αριθμό των προσπαθειών ακόμη και όταν οι πληροφορίες περιβάλλοντος περιέχουν σφάλματα. Για παράδειγμα, το αριστερό τμήμα της Εικόνας 9 παρουσιάζει ένα μαύρο χρήστη που επηρεάζεται από μη ακριβείς πληροφορίες θέσης. Ο αλγόριθμος ανακάλυψης πρέπει να έχει την δυνατότητα επιλογής που κυμαίνεται από μια πολύ στενή έως μια μεγάλης εμβέλειας δέσμης για να συνεισφέρει στην αύξηση του κέρδους προς την εκτιμώμενη θέση του χρήστη και την επιλογή ενός μεγάλου πλάτους δέσμης έτσι ώστε να κερδηθεί περισσότερη ακρίβεια έναντι των σφαλμάτων τοποθεσίας και μείωση του κόστους στην ενέργεια που δαπανήθηκε στον χρήστη. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η τοποθεσία του χρήστη στην επιτάχυνση της ανακάλυψης σε συνδυασμό με τις πληροφορίες περιβάλλοντος. Γνωρίζοντας την τοπολογία του δικτύου, το BS εκμεταλλεύεται την τοποθεσία του χρήστη και κατευθύνει τις ακτίνες προς το μέρος όπου εκτιμήθηκε ότι υπάρχει ο χρήστης, αλλά αυτό δεν είναι εφικτό από την πλευρά του χρήστη. Τα μόνα που μπορούν να εκτιμηθούν από την πλευρά του χρήστη είναι η θέση και ο προσανατολισμός του. Συγκεκριμένα, ο προσανατολισμός αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, αφού μια μικρή ανακρίβεια επηρεάζει σοβαρά τις πληροφορίες περιβάλλοντος, όπως φαίνεται στο δεξιό τμήμα της Εικόνας 9. Για παράδειγμα μια περιστροφή της συστοιχίας κεραιών MT ενέχει τον κίνδυνο να κατευθύνει τον δέκτη να εστιάσει σε λανθασμένες κατευθύνσεις, εξαιτίας ενός διαφορετικού συστήματος αναφοράς. Επιπλέον, περιορισμένη υπολογιστική ισχύς και η περιορισμένη ενέργεια που διατίθενται στο MT σε σχέση με το BS ελαχιστοποιούν σημαντικά την πολυπλοκότητα των εφαρμοζόμενων αλγορίθμων ανακάλυψης. Επομένως, είναι φανερό ότι χρειάζονται νέες στρατηγικές για την αντιμετώπιση της κατευθυντικότητας από την πλευρά του χρήστη, οι οποίες μπο-

ο Τέλος, εξαιτίας των αναπόφευκτων φαινομένων σκίασης, τα εμπόδια που παρουσιάζουν στατική ή σχεδόν στατική συμπεριφορά έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση ανακάλυψης κυψελών. Από τη μία πλευρά, η υψηλή συχνότητα που προσπίπτει σε κάθε αντικείμενο όπως ανθρώπινα σώματα, αυτοκίνητα, δέντρα, έπιπλα κ.λπ. συμπεριφέρεται ως άδιαφανές εμπόδιο με αποτέλεσμα τη μη διάδοση σημάτων μέσω αυτού. Από την άλλη πλευρά, το κανάλι διάδοσης mmWave έχει μια ψευδο-οπτική φύση. Οι επίπεδες επιφάνειες θεωρούνται ως κάτοπτρα [44], που σημαίνει ότι δημιουργούνται ανακλαστικές διαδρομές όπου το σήμα προέρχεται από μη αποδεκτή διαδρομή και αποτελεί μια χρήσιμη εναλλακτική λύση όπως υποστηρίζεται από τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν

στο [45]. Επομένως, αν οι χωρικές λύσεις προσανατολισμού σχεδιαστούν κατάλληλα επωφελούνται ακόμη και οι κρυμμένοι χρήστες παρέχοντάς τους εξαιρετική συνδεσιμότητα χωρητικότητας αξιοποιώντας αντανακλαστικές διαδρομές για να ξεπεραστούν τα εμπόδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10 [32].



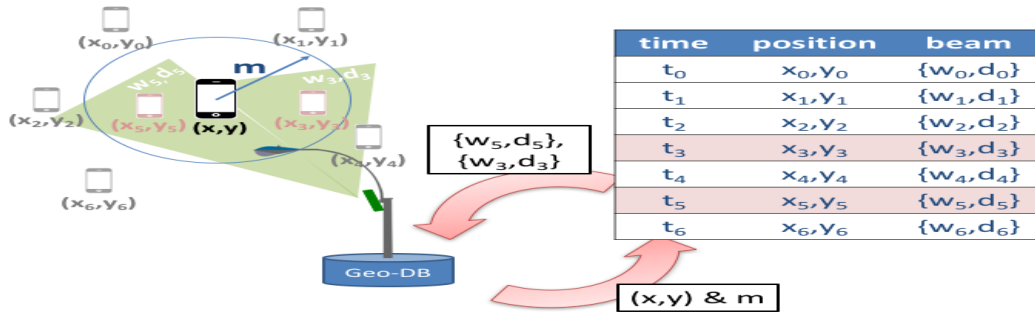
Εικόνα 10: Διαχείριση ανακλαστικών διαδρομών με χρήση της γεωγραφικής βάσης δεδομένων περιβάλλοντος [32].

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η χρησιμοποίηση των ανακλαστικών διαδρομών μειώνει την απόδοση των βασικών αλγορίθμων ανακάλυψης κυψελών που βασίζονται σε πληροφορίες θέσης, εξαιτίας της διαθεσιμότητας της δέσμης LOS. Όταν η δέσμη LOS συναντήσει εμπόδιο, ο αλγόριθμος αναζητά και άλλες κεραιές μέχρι να επιτευχθούν οι εργασίες συγχρονισμού, με αποτέλεσμα η αρχική διαδικασία ανακάλυψης κυψελών να γίνεται δυσκολότερη. Επίσης, η αποθήκευση πληροφοριών που σχετίζεται με το ιστορικό των προσπαθειών ανά τοποθεσία χρήστη σε μια βάση δεδομένων περιβάλλοντος συμβάλλει στην εξαγωγή πληροφοριών που αφορούν τις πιθανές διαμορφώσεις για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Συνεπώς, αν για παράδειγμα είχε γίνει στο παρελθόν μια επιτυχημένη αναζήτηση και στο παρόν η αναζήτηση έχει αποτύχει τότε χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος έξυπνης ανακάλυψης, προφανώς χρησιμοποιώντας την βάση δεδομένων από όπου αντλούνται τα δεδομένα, βρίσκοντας την λύση και μειώνοντας τον χρόνο ανακάλυψης. Η βάση δεδομένων που έχει πληροφορίες περιβάλλοντος αξίζει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία διότι συμβάλλει στην επιτάχυνση της διαδικασίας ανακάλυψης κυψελών σε mmWave RAN εγκαταστάσεις σύμφωνα με το [46].

Οι προηγμένοι αλγόριθμοι ανακάλυψης επηρεάζονται από τα εμπόδια με αποτέλεσμα να καθυστερούν. Οι αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε οι ακτίνες των σταθμών βάσεων να επικεντρώνονται στην τοποθεσία που βρίσκεται ο χρήστης, υποθέτοντας συνθήκες LOS. Όμως, υπάρχει η περίπτωση που η ανακλώμενη ακτίνα να μην συγκλίνει με τη διαδρομή LOS και συνεπώς θα ήταν χρήσιμο να αναζητηθούν όλες οι υποψήφιας ακτίνες των σταθμών βάσης πριν ανακαλυφθεί αυτή που καλύπτει τον χρήστη. Από πλευράς του χρήστη, οι ακτίνες επηρεάζονται λιγότερο από τις αποκλίσεις της διαδρομής LOS. Τέλος, μια ακόμη αρνητική συνέπεια στις αποκλίσεις των ακτινών είναι η επιμήκυνση των διαδρομών με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών διαδρομής και για αυτό χρειάζονται στενότερες ακτίνες για την κάλυψη αυτών [32].

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα των εμποδίων συνοψίζεται ως μετατόπιση σφάλματος μεταξύ της άμεσης ακτίνας του σταθμού βάση που καλύπτει την τοποθεσία του χρήστη και της πραγματικής ακτίνας του σταθμού βάσης που χρησιμοποιείται για να ανακαλύψει τον χρήστη. Με βάση όσα προαναφέρθηκαν ο αλγόριθμος χαρακτηρίζεται ντετερμινιστικός επιτρέποντας την στιγμή που ανακαλυφθεί ο χρήστης, να αποθηκεύσει την πραγματική διαμόρφωση δέσμης στο DB σε όρους τριάδων $\{f(x, y), w, d\}$ όπου βάση όπου w το πλάτος της δέσμης d η κατεύθυνση της δέσμης. Με αυτόν τον τρόπο επιταχύνεται η διαδικασία ανακάλυψης, αφού γίνεται εκμετάλλευση των προηγούμενων προσπαθειών [32].

Η χρήση των πληροφοριών της γεωγραφικής βάσης δεδομένων δεν είναι απλή και για το σκοπό αυτό, παρουσιάζεται μια ρύθμιση εύρους m . Επίσης αυτή η ρύθμιση γίνεται για λόγους αξιοπιστίας της πληροφορίας που βρίσκεται στην βάση δεδομένων. Για παράδειγμα ένας νέος χρήστης ζητά πρόσβαση από μια συγκεκριμένη τοποθεσία έστω $p = (x', y')$, όπου το m αναφέρεται στη μέγιστη απόσταση από το p και τα δεδομένα αντλούνται από την βάση δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Στη φάση ανακάλυψης όλες οι δέσμες διαμορφώσεων έγκυρων καταχωρίσεων που βρίσκονται στη βάση δεδομένων ταξινομούνται με βάση την απόστασή τους. Τέλος, υπάρχει περίπτωση μια διαμόρφωση δέσμης να επιλέγεται από πολλές καταχωρήσεις και επιπλέον η διαμόρφωση δέσμης ενεργοποιείται μόνο μία φορά και επιλέγεται αυτή με την πλησιέστερη καταχώριση [32].



Εικόνα 11: Παράδειγμα ρύθμισης εύρους m στη βάση δεδομένων γεωγραφικού περιβάλλοντος [32].

Το εύρος m σχετίζεται άμεσα με την χωρική συσχέτιση του προβλήματος με τα εμπόδια. Εάν το m είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες της βάσης δεδομένων δεν χρησιμοποιούνται πλήρως. Οι μόνοι κερδισμένοι είναι οι χρήστες αρκεί να είναι κοντά στην τοποθεσία για να ωφεληθούν από τις προηγούμενες προσπάθειες που έχουν αποθηκευτεί στην βάση δεδομένων. Από την άλλη πλευρά αν το m είναι πολύ μεγάλο τότε υπάρχει κίνδυνος εισαγωγής σφαλμάτων που αλλοιώνουν τις πληροφορίες [32].

Τα κυψελοειδή συστήματα mmWave λειτουργούν στη ζώνη των 30-300 GHz και αποτελούν υποψηφία για τα κυψελοειδή συστήματα 5G υποστηρίζοντας υψηλές ταχύτητες. Όμως, η χρήση του mmWave παρουσιάζει κάποια εμπόδια διάδοσης, τα οποία είναι απώλεια διαδρομής εξαιτίας υψηλής συχνότητας φορέα, η μειωμένη διασπορά που συμβάλει στην ελάττωση της διαθέσιμης ποικιλομορφίας, η αύξηση μπλοκαρίσματος και η ισχύς του θορύβου εξαιτίας της χρήσης μεγάλου εύρους ζώνης. Αναλυτικότερα ισχύουν τα ακόλουθα

Απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου: εξαρτάται από τη συχνότητα φορέα f_c και η αύξηση της συχνότητάς του ελαττώνει το μέγεθος της κεραίας με αποτέλεσμα το διάφραγμα της οπής της κεραίας μικραίνει με συντελεστή $\lambda^2/4\pi$, ενώ η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου αυξάνεται με f_c^2 . Επομένως, αν αυξηθεί η συχνότητα φορέα f_c από 3 σε 30 GHz τότε θα προστεθεί περισσότερη απώλεια ισχύος στα 20 dB ανεξάρτητα από την απόσταση πομπού-δέκτη. Όμως ακόμη και αν αυξηθεί συχνότητα μπορεί να διατηρηθεί ένα σταθερό διάφραγμα κεραίας στο ένα άκρο του συνδέσμου που θα αποτρέψει την απώλεια ελεύθερης διαδρομής από το να μεταβληθεί. Τέλος, η διατήρηση ενός σταθερού διαφράγματος στην κεραία και στα δύο άκρα της θα ελαττώσει την απώλεια ελεύθερης διαδρομής με f_c^2 [36].

Μπλοκάρισμα: Τα σήματα μικροκυμάτων είναι λιγότερο ευαίσθητα στα μπλοκαρίσματα, αλλά εξασθενούν εξαιτίας της περίθλασης. Αντίθετα, τα mmWave κύματα εκθέτουν

πρισματική διάδοση με αποτέλεσμα η περίθλαση να μειώνεται σε σχέση με τα σήματα μικροκυμάτων, καθιστώντας τα πολύ πιο ευαίσθητα σε μπλοκαρίσματα. Σύμφωνα με το [36], η αύξηση της απόστασης του πομπού και του δέκτη αυξάνει την απώλεια διαδρομής στα

d

B

d

e

c

Ατμοσφαιρική απορρόφηση και βροχή: Ακόμη ένα βασικό εμπόδιο στις επικοινωνίες mmWave είναι η εξασθένηση εξαιτίας της βροχής, του φυλλώματος των δέντρων και της ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Μια εκτίμηση που αφορά την ατμοσφαιρική εξασθένηση εξαιτίας απορρόφησης του αέρα ή ισχυρής βροχής κυμαίνεται μεταξύ 10-20 dB/km. ~~Υπό την διάδοση του οπτικού σήματος, αλλά σε περίπτωση μη οπτικής επαφής κατέρχεται το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω της χρήσης κυψελών μικρού μεγέθους.~~

στα 40 dB/decade με πρόσθετη απώλεια μπλοκαρίσματος των 15-40 dB [36]. Συνεπώς, το ~~Στον Πίνακα 3 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά διάδοσης των επικοινωνιών~~ σύνολο των συνδέσεων θα μεταβληθεί από αξιοποιήσιμο σε μη αξιοποιήσιμο βάσει της κανάλια LOS και NLOS, την εξασθένηση της βροχής στα 200 m και την απορρόφηση οξυ-παρουσίας μπλοκαρισμάτων.

γόνου στα 200 m. Όπως φαίνεται οι ζώνες των 28 GHz και 38 GHz στο εύρος των 200 m εμφανίζουν σημαντική μείωση εξαιτίας της χαμηλής εξασθένησης βροχής και της απορρόφησης οξυγόνου, όμως η επίδρασή τους είναι κρίσιμη στις ζώνες 60 GHz και 73 GHz [36].

Από τον Πίνακα 3 αποφαίνεται ότι η μετάδοση NLOS εμφανίζει επιπλέον απώλεια διάδοσης σε σύγκριση με τη μετάδοση LOS και στις τέσσερις κατηγορίες [36].

Πίνακας 3 Τα χαρακτηριστικά των επικοινωνιών mm-wave σε διάφορες ζώνες [71], [133].

Ζώνη Συχνότη- των	PLE		Μείωση Βροχής 200m		Απορρόφηση Οξυγόνου 200m
	LOS	NLOS	5 mm/h	25 mm/h	
28 GHz	1.8~1.9	4.5~4.6	0.18 dB	0.9 dB	0.04 dB
38 GHz	1.9~2.0	2.7~3.8	0.26 dB	1.4 dB	0.03 dB
60 GHz	2.23	4.19	0.44 dB	2 dB	3.2 dB
73 GHz	2	2.45~2.69	0.6 dB	2.4 dB	0.09 dB

Για αντιμετωπιστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα το mmWave μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες όπως το Massive MIMO και τις femto κυψέλες, τα οποία συμβάλλουν στην επίτευξη ενός βέλτιστου συστήματος [133].



Εικόνα 12: Η αρχιτεκτονική του 5G I-IoT [31]

Η

αύξηση του αριθμού των συσκευών αυξάνει την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων με αποτέλεσμα την καθυστέρηση όσον αφορά τη δημιουργία ομάδων και τη διαγραφή δεδομένων. Επίσης οι πιο ισχυρές συσκευές εμφανίζουν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Γενικά, η πολυπλοκότητα είναι το κυρίαρχο ζήτημα που οφείλει να λυθεί σε συστήματα 5G. Η χρήση κωδικοποίησης δικτύου έχει συμβάλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας των μεταδόσεων πολλαπλής διανομής [73] χωρίς πρόσθετες απαιτήσεις πόρων, όμως υπάρχει το πρόβλημα της πολυπλοκότητας λόγω της μεγάλης ποσότητας συσκευών MTC που εμφανίζουν περιορισμένη μπαταρία. Το I-IoT διαθέτει ένα πολύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών και το προτεινόμενο 5G αυτόματο. Μερικές πιθανές εφαρμογές έχουν ως εξής [31]:

Ευφυής μεταφορά: Τα δεδομένα από τα συστήματα μεταφοράς Transportation (TS) γίνονται διάχυτα. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην βελτίωση του TS, στην ελάττωση της συμφόρησης, των καυσίμων και των οικονομικών είναι η αξιοπιστία και η ευφυΐα. Στα 5G δίκτυα, θα αυξηθούν οι αισθητήρες και οι συσκευές παρακολούθησης σε οχήματα, τρένα, δρόμους και σιδηροδρόμους. Με την χρησιμοποίηση διάφορων μεθόδων βαθιάς και ενισχυτικής μάθησης συλλέγονται και αναλύονται τα δεδομένα από τους αισθητήρες και τις συσκευές παρακολούθησης, όπως ανίχνευση εμποδίων, παρακολούθηση δεικτών κατάστασης σε μια αγροτική καλλιέργεια κ.λπ. και στην συνέχεια κατασκευάζονται μοντέλα πρόβλεψης που συνεισφέρουν στην υπέρ της ανθρωπότητας.

Ευφυής υγειονομική περίθαλψη: Η εφαρμογή του 5G I-IoT στην υγειονομική περίθαλψη, θα συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωσή της. Οι χαρακτηριστικές τιμές του νοσηλευόμενου παρακολουθούνται και τα δεδομένα του, συλλέγονται και επεξεργάζονται σε πραγματικό χρόνο με ευφυείς αλγόριθμους, όπως αναγνώρισης προσώπου, αναγνώριση χειρονομίας, παρακολούθηση στόχων και μερικές άλλες τεχνολογίες. Σε περίπτωση μη φυσιολογικών συνθηκών το κέντρο επεξεργασίας ενημερώνει τους νοσηλευτές και γιατρούς αυτόματα μέσω κάποιου συστήματος ενημέρωσης για βοήθεια ή την πραγματοποίηση απομακρυσμένης θεραπείας, αποτελώντας βασικό πλεονέκτημα του 5G I-IoT.

Ευφυής γεωργία: Είναι απαραίτητη, διότι συμβάλλει στην ανάπτυξη και στην αύξηση της παραγωγής υγιεινών προϊόντων και στην πρόληψή τους σε περίπτωση εμφάνισης πιθανή βλάβης στις καλλιέργειες. Στο 5G I-IoT, η συλλογή των δεδομένων από αγροτικές περιοχές γίνεται μέσω μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων UAV και άλλες διάφορες συσκευές ανίχνευσης και θα υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω έξυπνων αλγορίθμων στο κέντρο επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένης της αντιστοίχισης εικόνων μέσω deep-learning, την αναγνώριση υφής, την αναγνώριση φυτικών ασθενειών, την ανίχνευση και ταξινόμηση καλλιεργειών και ούτω καθεξής. Με βάση το παράδειγμα που προαναφέρθηκε προκύπτει αν η ανάπτυξη των καλλιεργειών είναι υγιής ή όχι και μεταδίδεται αυτόματα μέσω GPS έτσι ώστε να γνωρίζουν τι ενέργειες χρειάζονται για τις καλλιέργειες.

Τεχνο – οικονομική μελέτη δικτύων 5G

Προδιαγραφές τεχνολογιών Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT, WiFi-HaLow

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών όπως HaLow, όπως φαίνονται στον Πίνακα 4 [74].

Sigfox

Το Sigfox αποτελεί μια από τις σημαντικές λύσεις low-power wide-area network πολλές διαφορετικές χώρες του κόσμου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ιδιόκτητη και χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά στενής ζώνης Ultra-Narrow Band (UNB) που λειτουργεί στα 868MHz στην Ευρώπη και 915 MHz στη Βόρεια Αμερική. Το Sigfox χρησιμοποιεί binary τεχνολογίας Sigfox είναι ότι εξασφαλίζει χαμηλό επίπεδο θορύβου το οποίο συνεπάγεται ότι η αρχιτεκτονική σχεδιασμού κεραίας είναι απλή που σημαίνει ότι επιτυγχάνεται χαμηλή κατανάλωση ισχύος στον πομπό και υψηλή ευαισθησία στο δέκτη οδηγώντας στην κάλυψη μιας μεγάλης έκτασης περιοχής. Ωστόσο, μέσω της χρήση της τεχνολογίας UNB αυξήθηκε η κάλυψη περιοχών και η διάρκεια ζωής των μπαταριών. Μια συσκευή Sigfox εκπέμπει σε ρυθμό 100bps στην ανερχόμενη ζεύξη με half-duplex τρόπο και έχει περιορισμό μετάδοσης. Μια συσκευή μεταδίδει 140 μηνύματα ανερχόμενης ζεύξης ανά ημέρα (uplink). Όμως, για την αξιοπιστία λήψεις μηνυμάτων το μήνυμα επαναλαμβάνεται τρεις φορές από τη συσκευή με διαφορετική συχνότητα και χρόνο το οποίο εξασφαλίζει ότι το 95% των μηνυμάτων θα ληφθεί.

Πίνακας 4: Προδιαγραφές τεχνολογιών [74]

	Sigfox	
Ζ ώ ν η Σ υ- χ ν ό τ η		

Μ Η		
Σ υ- σ κ ε υ ή Χ ω ρ η τι κ ό- τ η τ α/ κ υ- ψ έ λ η		
Φ ά σ μ α		
Δ ια μ ό ρ φ ω σ η		
S u b- c h a n n el		

B W (H z)		
X ω ρ η τι κ ό- τ η τ α		
U L P a yl o a d (B yt es)		
D L P a yl o a d (B yt es)		
P υ θ μ ό ς Δ ε- δ ο- μ		

έ- ν ω ν (b p s)		
D u t y C y c l e/ T x R e s t r i c t i o n	140 μηνύματα/ημέρα	
A μ φί δ ρ ο- μ ο ς	Half Duplex	

Επίσης στο Sigfox το μέγιστο μέγεθος ενός μηνύματος που μπορεί να σταλεί είναι πλατφόρμα και το σύστημα OSS/BSS (Operations Support System / Business Support System) σφέρει δωρεάν συνδρομή περιαγωγής σε οποιαδήποτε χώρα με αποτέλεσμα την μείωση των δαπανών στα κεντρικά δίκτυα [74].

Το LoRaWAN χρησιμοποιεί την τεχνολογία φυσικού στρώματος του Long Range

L
o
R
a

που διαμορφώνεται στη ζώνη SubGHz χρησιμοποιώντας ιδιόκτητες τεχνικές φάσματος. Παρόλα αυτά, η συμβολή του LoRaWAN έγκειται στο ότι παρέχει αμφίδρομη μετάδοση σήματος UNB σε ένα κανάλι με σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης με συνέπεια η μετάδοση να παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και επιτυγχάνει χαμηλά επίπεδα θορύβου. Το LoRaWAN χρησιμοποιεί έξι Spreading Factors (SF) από SF7 έως SF12 με σκοπό την αντιμετώπιση διαφορετικών επιπτώσεων που διενεργούνται σε διαφορετικά εύρη. Ο συντελεστής διασποράς συμβάλει στην επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων, όμως με κόστος το εύρος κάλυψης και αντιστρόφως. Η απόδοση που προσφέρεται από το LoRaWAN κυμαίνεται από 300bps έως 50 kbps λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος ζώνης του καναλιού και το SF και επίσης προσφέρεται 251 byte μέγιστο μέγεθος μηνύματος [75]. Όπως στο Sigfox έτσι και στις συσκευές LoRaWAN δεν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ συσκευών και κυψέλης, διότι όταν όλες οι γειτονικές κυψέλες λάβουν ένα σήμα τότε το σύστημα OSS/BSS απορρίπτει τα πολλαπλά μηνύματα. Βέβαια το ποσοστό επιτυχίας παράδοσης μηνυμάτων βελτιώνεται χάρη στους διπλότυπους δέκτες. Επιπλέον, η κάλυψη μεγάλου μέρους των απαιτήσεων εφαρμογών IoT και LoRaWAN παρέχονται τρεις κατηγορίες συσκευών. Αντίθετα, εξαιτίας του κανονιστικού περιορισμού στη χρήση της μη αδειοδοτούμενης ζώνης το LoRa σημαίνει ότι η μετάδοση γίνεται σε 36 δευτερόλεπτα / ώρα ανά συσκευή σε κάποιο κανάλι. Σε αντίθεση με το Sigfox, το στάδιο ανάπτυξης του LoRaWAN είναι ακόμη πρώιμο διότι βασίζεται σε λύσεις ανοιχτής πλατφόρμας [74].

IoT

Το 3GPP πρότυπο τυποποιείται στο NB-IoT και κυκλοφόρησε στις 13 Ιουνίου του Ταυτόχρονα με το 3GPP πρότυπο κυκλοφόρησαν και άλλες δύο τεχνολογίες, οι οποίες είναι το eMTC που ενδυναμώνει το LTE και το Extended Coverage-GSM-IoT (EC-GSM-IoT) που έχει σχεδιαστεί με σκοπό την βελτίωση του GSM. Το NB-IoT θεωρείται ως ένα νέο πρότυπο που στηρίζεται στις υπάρχουσες προδιαγραφές τεχνολογίας 3GPP. Ένα πλεονέκτημα των κυψελοειδών συστημάτων σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες LPWAN είναι εξαιτίας της μη διάθεσης κανονισμού κύκλου λειτουργίας και η λειτουργία τους γίνεται σε μη αδειοδοτούμενες ζώνες. Οι στόχοι του 3GPP που αφορούν NB-IoT είναι η περαιτέρω

μείωση κόστους που παρέχει το eMTC καθώς και η εκτεταμένη κάλυψη (164dB). Επίσης άλλα χαρακτηριστικά που υποστηρίζονται από το NB-IoT είναι μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (10 χρόνια), ο μεγάλος αριθμός συσκευών (50000 ανά κυψέλη), παρέχεται μειωμένος ρυθμός δεδομένων αναλογικά με το εύρος ζώνης, υποστήριξη κινητικότητας και περαιτέρω βελτιστοποιήσεις πρωτοκόλλου. Επιπρόσθετα, υποστηρίζεται ένας τρόπος μετάδοσης space frequency block code (SFBC) για physical broadcast channel (PBCH), φυσική της απόδοσης του. Είναι γνωστό ότι η επέκταση της τεχνολογίας NB-IoT θα περιλαμβάνει μεθόδους εντοπισμού, υπηρεσίες πολλαπλής διανομής κ.λπ. [75]. Τέλος το NB-IoT ποιεΐται στην ζώνη των 868 MHz. Το NB-IoT καταλαμβάνει ένα μπλοκ πόρων συστήματος

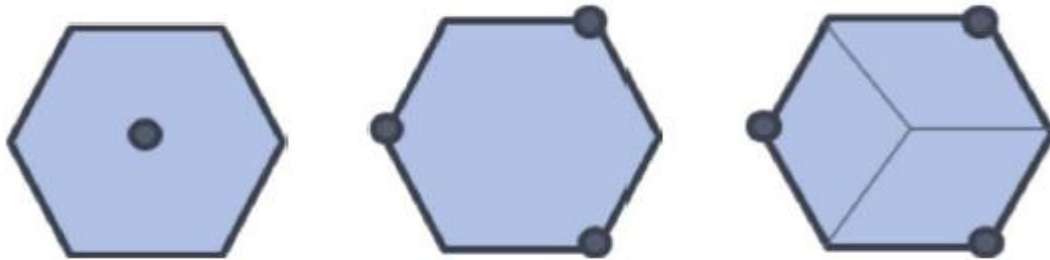
W
i
F Η Wi-Fi Alliance εισήγαγε ένα νέο πρότυπο IEEE 802.11ah ή με άλλη γνωστή ονομασία ως WiFi-HaLow και αφορά την επικοινωνία αισθητήρων IoT, τα οποία καταναλώνουν χαμηλά ποσά ενέργειας και υποστηρίζουν μεγαλύτερη κάλυψη χωρητικότητας μιας περιοχής. Ολοένα και περισσότερες MAC δημιουργούνται με σκοπό την υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών αισθητήρων, την παροχή ενός εκτεταμένου εύρους λειτουργίας και την κατανάλωση λιγότερης ενέργειας σε σχέση με τα υπάρχοντα πρότυπα Wi-Fi [76]. Βασικό και μοναδικό χαρακτηριστικό του WiFi-HaLow είναι ότι ο αριθμός των συσκευών που υποστηρίζονται ανέρχονται στις 8191 συσκευές και σχετίζονται με ένα σημείο πρόσβασης Access Point (AP). Η τεχνολογία WiFi-HaLow υποστηρίζει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σχέση με άλλες τεχνολογίες low-power wide-area (LPWA) που ανέρχονται σε τουλάχιστον 100kbps, το οποίο συμβάλει στην χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χρησιμοποιούνται συχνότερες φορέα SubGHz με εύρος μετάδοσης έως 1 km σε εξωτερικούς χώρους [77]. Ωστόσο, οι συσκευές στις ζώνες SubGHz επιβάλλεται να τηρούν το μέγιστο όριο κύκλου λειτουργίας που ανέρχεται στα 2.8% στην Ευρώπη υποστηρίζοντας επιπλέον τις δυνατότητες Listen Before Talk (LBT) και Adaptive Frequency Agility (AFA) [77]. Τέλος η βελτιστοποίηση του χρόνου διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας επιτυγχάνεται με ένα μεγάλος αριθμός συσκευών και επίσης το WiFi-HaLow μειώνει την κατανάλωση ενέργειας μέσω του μηχανισμού του χρόνου αφύπνισης στόχου (TWT – Target Wake Time) [74], [76].

4.2 Χαρακτηριστικές κόστους-χωρητικότητας συστημάτων LPWAN, LPLAN, C-IoT

Σε αυτό το υποκεφάλαιο συγκρίνονται το κόστος και η χωρητικότητα των συστημάτων LPWAN, low-power local area network (LPLAN) και Cellular-IoT (C-IoT). Στην συνέχεια θα αναλυθούν η διαστασιολόγηση ενός δικτύου και οι αναλύσεις κόστους [74].

Περιγραφή σεναρίου

Θεωρείται μια αστική περιοχή 100 km^2 και μια πόλη στην οποία όλες οι έξυπνες υπηρεσίες την θεωρούν ως επίκεντρο. Τα σημεία πρόσβασης LPWAN και LPLAN θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση του κόστους ανάπτυξης και λειτουργίας δικτύων με το κόστος των λύσεων που προκύπτουν από το C-IoT. Τα δύο αυτά σημεία πρόσβασης χρησιμοποιούνται για την δημιουργία νέων τοποθεσιών κυψελών ή οι τοποθεσίες κυψελών ενοικιάζονται από κάποιον πάροχο. Τέλος ορίζονται τα ακόλουθα: η ζώνη SubGHz κυμαίνεται μεταξύ 700MHz-900MHz και ορίζεται ένα αυτόνομο σύστημα C-IoT που χρησιμοποιεί τη μη αδειοδοτούμενη ζώνη.



Εικόνα 13: Απεικονίζονται τρεις διαφορετικοί τύποι κυψελών με τις ακόλουθες ονομασίες (Omni directional, 3-RAT

Απαίτηση κυκλοφορίας

Οι ανάπτυξη των υπηρεσιών IoT οδήγησε στην κατανάλωση μικρότερης ποσότητας δεδομένων σποραδικά σε σχέση με τις παραδοσιακές υπηρεσίες δεδομένων συνεπώς προκύπτει ότι δεν μπορεί να παρατηρηθεί η κατάλληλη οριακή κατάσταση ενός IoT συστήματος επικοινωνίας που βασίζεται στη χρήση δεδομένων ενός χρήστη κατά τη διάρκεια ενός μήνα. Επίσης θα συμπεριληφθούν τα ακόλουθα: η χρήση δεδομένων ανά χρήστη και ανά ημέρα και η χρήση on-air ανά συσκευή και ανά ημέρα μαζί με τον χρήστη ανά μονάδα περιοχής. Με βάση τα προηγούμενα ορίζεται η ακόλουθη μονάδα μέτρησης η οποία είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα περιοχής (μηνύματα/ km^2) ανά ημέρα υπηρεσίας. Έπειτα τίθεται ως παράδειγμα η πυκνότητα πληθυσμού της Στοκχόλμης με πληθυσμό στα 3597 άτομα/ km^2 και στην συνέχεια θα εφαρμοστούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 1) μόνο το 5% του πληθυσμού θα έχει αισθητήρες στην αρχή του έτους και 2) 10% στο τέλος του έτους,

που σημαίνει ότι η πυκνότητα των συσκευών IoT θα αντιστοιχεί στους 40 αισθητήρες για κάθε άτομο. Τέλος θεωρείται ότι οι αισθητήρες ανήκουν στις υπηρεσίες διαχείρισης, μέτρησης και παρακολούθησης όπως έξυπνες επικοινωνίες με οχήματα, έξυπνος χώρος στάθμευσης, έξυπνη διαχείριση αποβλήτων και έξυπνος φωτισμός πόλης [74].

Διαστασιολόγηση δικτύου

Όσον αφορά την διαστασιολόγηση δικτύου ορίστηκαν μόνο οι τεχνολογίες που έχουν εύρος κάλυψης τουλάχιστον 1 km. Θεωρούνται τα παρακάτω: οι τεχνολογίες Sigfox και NB-IoT θα υπάρχουν τρεις τομείς ανά κυψέλη και για το LoRaWAN και το WiFi-δίκτυο θα χρησιμοποιηθεί η μέση χωρητικότητα που βασίζεται στην ευρετική μέθοδο διαστασιολόγησης [74].

Κάλυψη και χωρητικότητα

Χρειάζεται αποτύπωση θεωρητικής απόδοσης και της χωρητικότητας της συσκευής, λαμβάνοντας υπόψη την κατάλληλη χωρητικότητα επιπέδου σύνδεσης που αναφέρεται στα

1) Χωρητικότητα συσκευής (συσκευές αισθητήρα ανά κυψέλη): αναφέρεται στον αριθμό των συσκευών που υποστηρίζονται από έναν ασύρματο σταθμό.

2) Χωρητικότητα δεδομένων ανά κυψέλη και ανά ημέρα: Η χωρητικότητα δεδομένων για uplink υπολογίζεται ως:

- όπου N_{channels} είναι ο αριθμός καναλιών που διατίθενται για μετάδοση ζεύξης.
- R_{data} είναι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να ληφθεί ανά κανάλι. είναι ο συντελεστής που αφορά τον προσδιορισμό του ρυθμού υποβάθμισης του ρυθμού δεδομένων. είναι ο αριθμός τομέων ανά κυψέλη. είναι οι ώρες μιας ημέρας που μετατρέπονται σε δευτερόλεπτα και είναι 24 ώρες * 3600 δευτερόλεπτα.

Μετάδοσης μηνύματος ανά κυψέλη και ανά ημέρα: υπολογίζεται ως «time on air»:

h

- όπου p_{cc} είναι το ποσοστό των πόρων που διατίθενται για το κανάλι ελέγχου.

είναι το ποσοστό επιτυχίας πακέτου για μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης.

Επιπλέον εξαιτίας του κανονισμού που δεν επιτρέπει την συσκευή να μεταδίδει σε μη αδειοδοτούμενη ζώνη, για αυτό το λόγο θεωρείται ότι η μέγιστη μετάδοση συσκευής πραγματοποιεί έλεγχο εγκυρότητας όταν απαιτηθεί μια υπηρεσία που ενδέχεται να είναι από κάποιο συγκεκριμένο σύνολο τεχνολογίας.

Παρατηρώντας την εικόνα 13 απεικονίζονται τρεις τύποι στρατηγικών ανάπτυξης κυψελών και αφορά το εύρος κάλυψης κυψελών. Στη συνέχεια κάποια χαρακτηριστικά των τεχνολογιών LoRaWAN και WiFi-HaLow είναι ότι κεραίες τους είναι πανκατευθυντικές, δηλαδή οι μεταδόσεις γίνονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Το Sigfox πραγματεύεται τρία σενάρια κυψέλης, χωρίς όμως την ύπαρξη τομέα μέσα σε μία κυψέλη, που σημαίνει ότι έστω ότι μια συσκευή μεταδίδει ένα πακέτο προς όλους τους σταθμούς βάσης που βρίσκονται εντός εμβέλειας τότε όταν ληφθεί το πακέτο από τους σταθμούς βάσης θα προωθηθεί στο σύστημα OSS/BSS, στο οποίο θα ελεγχθεί από το BSS, ο οποίος θα αποφασίσει εάν το πακέτο θα κρατηθεί ή θα απορριφθεί. Συνεπώς η συγκεκριμένη στρατηγική ανάπτυξης κυψέλης συμβάλει στην αύξηση του QoS, του ρυθμού προσβασιμότητας και της σύνδεσης διαθεσιμότητας, χωρίς να επηρεάζει τη συνολική χωρητικότητα μηνυμάτων ή δεδομένων μιας κυψέλης. Οι τεχνολογίες Cellular-IoT αναφέρονται στην κατηγοριοποιημένη κυψέλη που σημαίνει ότι μια αύξηση σε κάποιον τομέα βελτιώνει την απόδοση σε χωρητικότητα και εύρος κάλυψης.

Πίνακας 5: Εύρος κάλυψης περιοχής [74].

	Αστικός	Προαστιακός	Αγροτικός

Η εκτίμηση του εύρους των κυψελών που προκύπτει από την απώλεια μονοπατιού
p
a
t
h
l
o
s
s
, υπολογίζεται με βάση τα δεδομένα που απορρέουν από την ευαισθησία του δέκτη, της ισχύος μετάδοσης, του κέρδους της κεραίας στον δέκτη και στον πομπό που είναι ειδικευμένα για κάθε τεχνολογία. Επιπλέον, για την εξασθένηση Urban outdoor to indoor και την

Ανάλυση Δομής Κόστους

Για να εκτιμηθούν οι συνολικές δαπάνες ενός δικτύου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη το CAPEX και το OPEX που συνδέονται άμεσα με την τεχνολογία RAN. Στον Πίνακα 6 αναφέρονται τα βασικά στοιχεία που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Τα δεδομένα κόστους πάρθηκαν από τις ακόλουθες πηγές είναι για το NB-IoT προέρχεται από το METIS-II [75]

Πίνακας 6: Κατανάλωση Κόστους [74].

			IoT	
Κ ό σ τ ο ς Ε ξ ο π λ ι σ μ ο ύ (Κ €				
Κ ό σ τ ο ς Ε γ κ α τ ά σ τ α σ η ς (Κ				

€				
Κ ό σ τ ο ς Φ ά σ μ α τ ο ς				
Κ ό σ τ ο ς τ ο π ο θ ε σ ί α ς κ υ ψ έ λ η ς (Κ €				
Κ ό σ τ ο ς Ε γ κ α τ				

ά σ τ α σ η μ ε τ ά δ ο σ η ς (Κ €				
Μ ί σ θ ω σ η τ ο π ο θ ε σ ί α ς κ υ ψ έ λ η ς (Κ € / έ τ ο ς				
Κ ό σ				

τ ο ς Η λ ε κ τ ρ ι κ ή ς Ε ν έ ρ γ ε ι α ς (Κ € / έ τ ο ς				
Κ ό σ τ ο ς Μ ε τ ά δ ο σ η ς (Κ € / έ τ ο ς				

Κ ό σ τ ο ς Δ ε ι τ ο υ ρ γ ί α ς & Σ υ ν τ ή ρ η σ η ς (σ ε σ χ έ σ η μ ε τ ο			
--	--	--	--

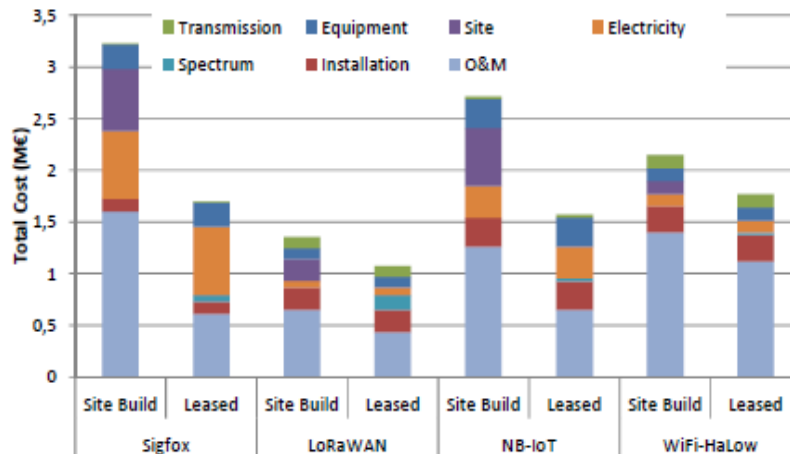
Για να εκτιμηθεί το κόστος υπολογισμού της επένδυσης και λειτουργίας χρησιμοποιείται το Net Present Value analysis (NPV). Επίσης θεωρείται ότι το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι 10%. Συνεπώς, το NPV κατά τη διάρκεια των N ετών είναι:

=

- Το C_y αντιπροσωπεύει την ετήσια συνολική ροή του έτους y .

- Το r αντιπροσωπεύει το προεξοφλητικό επιτόκιο.
- Το y αντιπροσωπεύει την περίοδο λειτουργίας του δικτύου σε έτη.
- Το N αντιπροσωπεύει τον αριθμό των απαιτούμενων σταθμών βάσης.

Στην ανάλυση NPV θεωρήθηκαν οι ακόλουθοι παράγοντες: 1) το μέσο χρηματικό εισόδημα ανά συσκευή είναι 70 € ετησίως με απόσβεση 5% για κάθε έτος και 2) το OPEX αυξάνεται 5% κάθε χρόνο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτό το υποκεφάλαιο αφορούν τις επενδύσεις και τις διαδικασίες συντήρησης για χρονική περίοδο 10 ετών με μηδενικό επιτόκιο. Επιπρόσθετα εξετάζεται το σχέδιο μιας αστικής έξυπνης πόλης της Σουηδίας και το Compound Annual Growth Rate (CAGR) με ποσοστό διείσδυσης να είναι στο 57% σε όλες τις εκ το προτέρων παγιωμένες περιπτώσεις. Επίσης ορίζονται τα ακόλουθα: το ποσοστό δραστηριότητας των συσκευών και το ωφέλιμο μέγεθος φορτίου ανέρχεται σε 5 μηνύματα/ημέρα και 12 byte ωφέλιμου φορτίου ανά μήνυμα σε χαμηλή δραστηριότητα κίνησης. Όσον αφορά την υψηλή δραστηριότητα κίνησης, θεωρείται ότι η μετάδοσης των μηνυμάτων από τους αισθητήρες γίνεται συχνότερα με ρυθμό 300 μηνύματα/ημέρα και κάθε μήνυμα έχει μέγεθος 300 bytes και η πυκνότητα της συσκευής είναι 40 φορές της πυκνότητας του πληθυσμού.

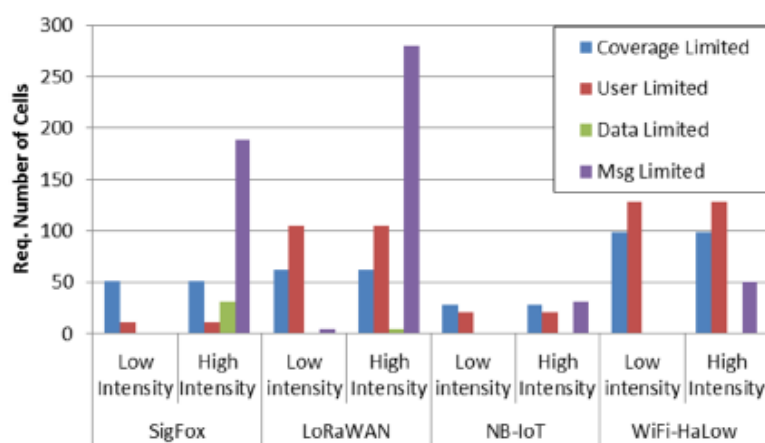


Εικόνα 14: Παράδειγμα κόστους κατασκευής κυψέλης και μια νέα περίπτωση εισόδου στην αγορά έναντι χρηματοδοτικής μίσθωσης περιέχοντας χαμηλή πυκνότητα συσκευών και χαμηλή δραστηριότητα κίνησης με ρυθμό διείσδυσης συσκευής σε 5% και CAGR στο

Η εικόνα 14 απεικονίζει ένα παράδειγμα που αφορά μια νέα περίπτωση εισόδου στην αγορά έναντι χρηματοδοτικής μίσθωσης και την ανάλυση κόστους CAPEX και OPEX που πραγματοποιείται για την κατασκευή κυψελών [74]. Επίσης, συμπεριλαμβάνονται ως έξοδα του CAPEX το κόστος κατασκευής ή μίσθωσης κυψέλης, ο εξοπλισμός του δικτύου, η εγκατάσταση και ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση εξοπλισμού μετάδοσης και το φάσμα.

Στο OPEX συμπεριλήφθηκαν το κόστος ισχύος, η μίσθωση κυψέλης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι περιορισμοί κάθε τεχνολογίας που απεικονίζεται στην εικόνα 15. Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τον απαραίτητο αριθμό κυψελών και ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την ένταση δραστηριότητας κίνησης. Όπως παρατηρείται, το Sigfox περιορίζεται στο εύρος κάλυψης όταν βρίσκεται στην περίπτωση χαμηλής έντασης κίνησης, δηλαδή τα δεδομένα που στέλνονται από τις συσκευές περιοδικά είναι μόνο 12 byte κάθε ώρα. Ταυτόχρονα όμως η τεχνολογία Sigfox περιορίζεται και σε μηνύματα υψηλής έντασης κίνησης, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού αισθητήρων που εκπέμπουν κάθε 10 λεπτά. Οι ίδιοι παράγοντες ισχύουν και για το LoRaWAN, δηλαδή υπάρχει περιορισμός τόσο σε χαμηλή ένταση κίνησης όσο και σε στην υψηλή και αφορούν τις συσκευές και δεδομένα αντίστοιχα. Σχετικά με το NB-IoT είναι και αυτό περιορισμένο ως προς το εύρος κάλυψης και ως προς τα μηνύματα. Τέλος το WiFi-HaLow χρησιμοποιείται πάντα στη συσκευή με περιορισμένο τρόπο και στις δύο περιπτώσεις ζήτησης κυκλοφορίας ή κίνησης [74].



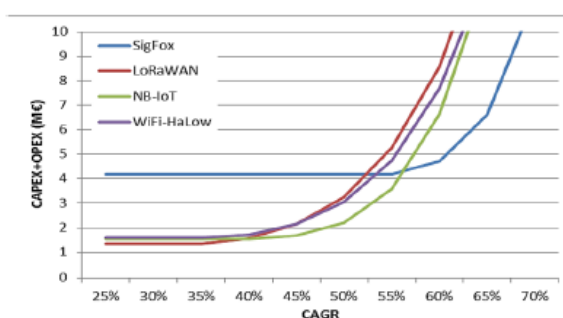
Εικόνα 15: Ένταση δραστηριότητας κίνησης με τον απαραίτητο αριθμό σταθμού βάσεων ή σημείων πρόσβασης [74].

Από δύο προοπτικές έχει γίνει η ανάλυση κόστους και είναι [74]:

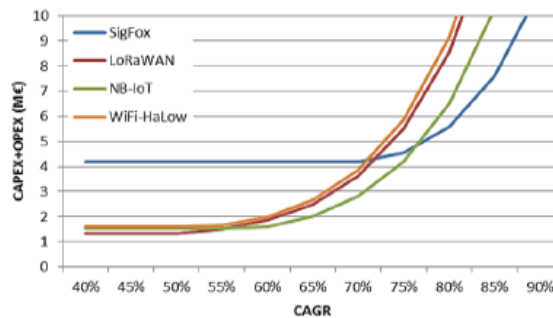
- *Το CAGR στο κόστος*: οι περισσότεροι από τους σταθμούς βάσης είναι περιορισμένοι στη συσκευή, για αυτό το λόγο έχει δοθεί η κατάλληλη προσοχή για την ανάπτυξη των συγκεκριμένων συσκευών.

- Διάστημα δραστηριότητας προς κόστος: αντιπροσωπεύει τον τρόπο με τον οποίο θα εκτιμηθεί το κόστος έτσι ώστε να φθάσει μια συγκεκριμένη αναλογία δραστηριότητας υπηρεσίας.

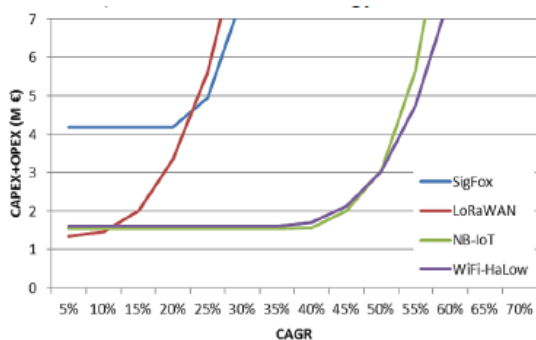
Στην εικόνα 16 απεικονίζονται οι σχέσεις CAGR που αφορούν το κόστος για την υπόθεση ενός παρόχου εκμετάλλευσης και ο πάροχος διαθέτει τοποθεσίες κυψελών για επαναχρησιμοποίηση και η απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών σε μια αστική περιοχή για τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας είναι στα 500m. Επίσης, εξαιτίας του σχεδιασμού δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν όλες οι τοποθεσίες κυψελών.



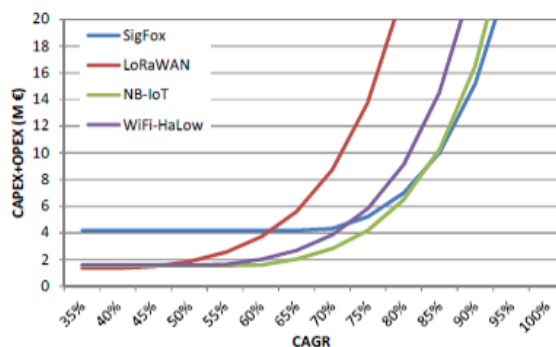
α) Κυκλοφορία: Χαμηλή, Στρατηγική: Δημιουργία ιστότοπου



β) Κυκλοφορία: Χαμηλή, Στρατηγική: Μίσθωση



γ) Κυκλοφορία: Υψηλή, Στρατηγική: Δημιουργία ιστότοπου.



δ) Κυκλοφορία: Υψηλή, Στρατηγική: Μίσθωση

Εικόνα 16: Εν ενεργεία σενάριο για τις σχέσεις CAGR που αφορούν το κόστος για την υπόθεση ενός παρόχου εκμετάλλευσης, που εικάζεται ότι διαθέτει υφιστάμενες τοποθεσίες κυψελών- Σενάριο Incumbent [74].

Ο πίνακας 7 απεικονίζει τον αριθμό των τοποθεσιών κυψέλης που κάθε κυψελοειδή τεχνολογία μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει. Επίσης, ο πάροχος θα επαναχρησιμοποιήσει τις υπάρχοντες τοποθεσίες κυψελών για να καλύψει τη ζήτηση που θα προκύψει και στη συνέχεια θα αναζητήσει νέες τοποθεσίες κυψελών για κατασκευή. Οι τρεις τεχνολογίες που είναι ωφέλιμες για ανάπτυξη είναι οι LoRaWAN, NB-IoT και Sigfox, διότι απαρτίζονται από τρία εύρη ρυθμού ανάπτυξης: το χαμηλό, το μεσαίο και το υψηλό ρυθμό, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη μιας οικιακής τοποθεσίας κυψέλης που πραγματοποιείται με το WiFi-HaLow ίσως να επιτύχει το χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης από τα υπόλοιπα

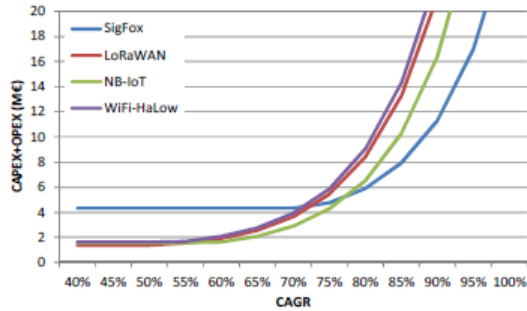
κυψελοειδή συστήματα, αρκεί το κόστος κατασκευής κυψέλης να είναι χαμηλότερο από τα κυψελοειδή συστήματα που προαναφέρθηκαν[74].

Πίνακας 7: Αριθμός επαναχρησιμοποιούμενων κυψελών ανά κυψελοειδές σύστημα [74].

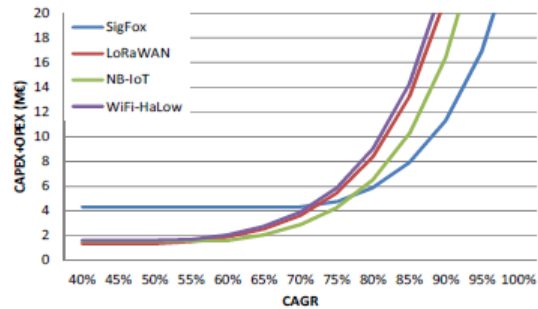
			IoT	
Β Σ έ κ τ α σ η				
Ε π α ν α χ ρ η σ ι μ ο π ο ι ο ύ μ ε ν ε ς τ ο π ο θ ε σ ί ε ς κ υ ψ ε λ				

Ω			
ν			

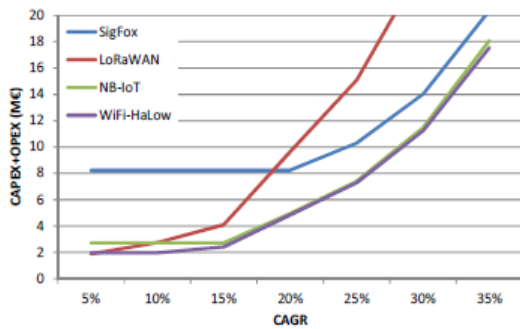
Η εικόνα 17 παρουσιάζει ένα παρόμοιο σενάριο και τείνει να μοιάζει όπως το σενάριο Greenfield. Σε αυτό το σενάριο, θεωρήθηκε ότι ο πάροχος είναι ο νεοεισερχόμενος στην αγορά και θα αναπτύξει ένα δίκτυο από το μηδέν.



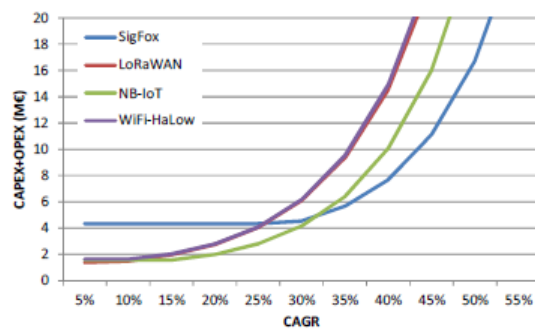
α) Κυκλοφορία: Χαμηλή, Στρατηγική: Δημιουργία ιστότοπου



β) Κυκλοφορία: Χαμηλή, Στρατηγική: Μίσθωση



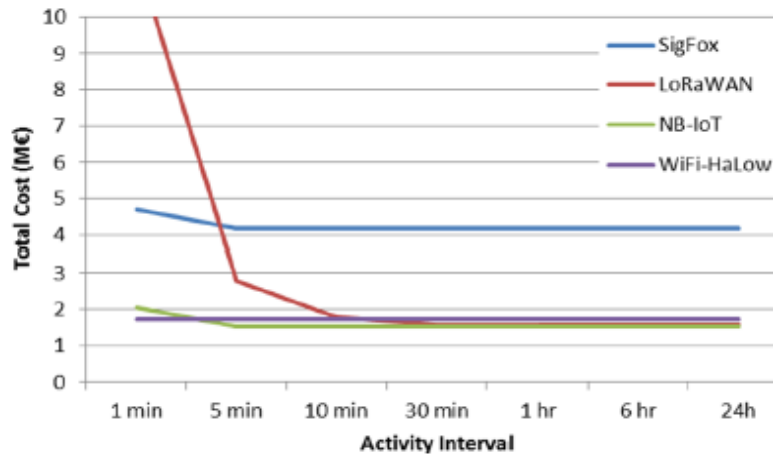
γ) Κυκλοφορία: Υψηλή, Στρατηγική: Δημιουργία ιστότοπου



δ) Κυκλοφορία: Υψηλή, Στρατηγική: Μίσθωση

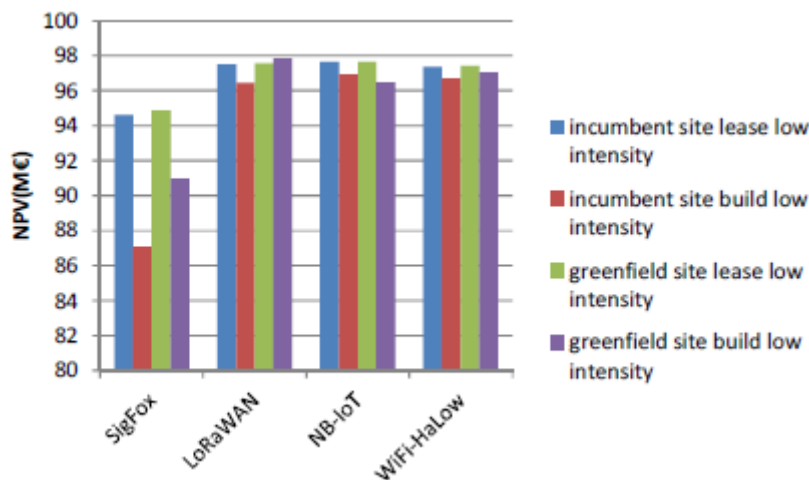
Εικόνα 17: Σενάριο Greenfield [74].

Η εικόνα 18 απεικονίζει το μέσο χρονικό διάστημα δραστηριότητας ως προς το κόστος. Το χρονικό διάστημα δραστηριότητας της συσκευής επηρεάζει τη λειτουργία του κόστους όταν χρονικό διάστημα δραστηριότητας βρίσκεται στο χρονικό διάστημα λεπτών με αποτέλεσμα το κόστος αυξάνεται εκθετικά. Εξαιτίας της περιορισμένης χωρητικότητας και του μεγάλου χρόνου μετάδοσης παρατηρείται ότι το LoRaWAN φθάνει στα όριά του σε χρονικό διάστημα δραστηριότητας 10 λεπτών και υπόλοιπες τεχνολογίες Sigfox και NB-IoT φτάνουν στα όριά τους σε χρονικό διάστημα δραστηριότητας πέντε λεπτών. Αντίθετα το WiFi-HaLow υποστηρίζει κάθε λεπτό δραστηριότητας χωρίς να ξεπεράσει τα όρια κόστους και αυτό οφείλεται στη μεγάλη χωρητικότητα δεδομένων και στο μικρό χρόνο μετάδοσης μηνυμάτων.



Εικόνα 18: Μέσο διάστημα δραστηριότητας συσκευών αναλογικά με το κόστος [74].

Η εικόνα 19 απεικονίζει το NPV της χαμηλής έντασης κυκλοφορίας. Η ανάλυση NPV έχει πραγματοποιηθεί για 10 χρόνια, υποθέτοντας ότι οι επενδύσεις πραγματοποιούνται σε ένα έτος με προεξοφλητικό επιτόκιο 10% και Average revenue per user (ARPU) ανά χρήστη είναι 70€ με συντελεστή διάβρωσης 5% ετησίως.



Εικόνα 19: NPV [74].

Ανακεφαλαιώνοντας, η ανάλυση περιέχει μόνο περιπτώσεις αστικής περιοχής όπου η περιοχή κάλυψης είναι 100 km². Οι πάροχοι εκμετάλλευσης επαναχρησιμοποιούν ορισμένες υπάρχοντες τοποθεσίες κυψελών διότι το ποσό ανάπτυξης που απαιτείται είναι παρόμοιο και είναι σε θέση να προσπαθήσουν να επιτύχουν έναν πιο σημαντικό ρυθμό ανάπτυξης από τους παρόχους που χρησιμοποιούν το σενάριο Greenfield [74].

Από τον Πίνακα 6 προκύπτει ότι το LoRaWAN σε περίπτωση αστικής περιοχής το κόστος εγκατάστασης κυψελών και εγκατάστασης σε κτίριο είναι χαμηλότερο σε σχέση με

το WiFi-HaLow. Συνεπώς, όταν ένας νεοεισερχόμενος πάροχος εισέλθει την αγορά αναπτύσσοντας το δίκτυο από την αρχή το LoRaWAN αποτελεί σημαντική λύση για μικρούς επενδυτές που στοχεύουν σε μικρό ποσοστό κερδών. Τα ίδια ισχύουν όταν και στην περίπτωση χαμηλής έντασης κίνησης. Συγκρίνοντας τα δύο σενάρια διαπιστώνεται ότι τα μεγάλη πυκνότητα συσκευών, αντίστοιχα. Όμως, το WiFi-HaLow αποτελεί σημαντική λύση σε περίπτωση που κάποιος ενδιαφερόμενος επενδυτής στοχεύει σε κυκλοφορία υψηλής έντασης και αυτό συμβαίνει διότι το WiFi-HaLow έχει μεγάλη χωρητικότητα μικρό κόστος ανάπτυξης. Συνολικά, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κόστος ανάπτυξης της τεχνολογίας επικοινωνιών IoT μπορεί να αντιστοιχηθεί αναλογικά στην πυκνότητα των χρηστών που υποστηρίζεται από την εκάστοτε τεχνολογία [74].

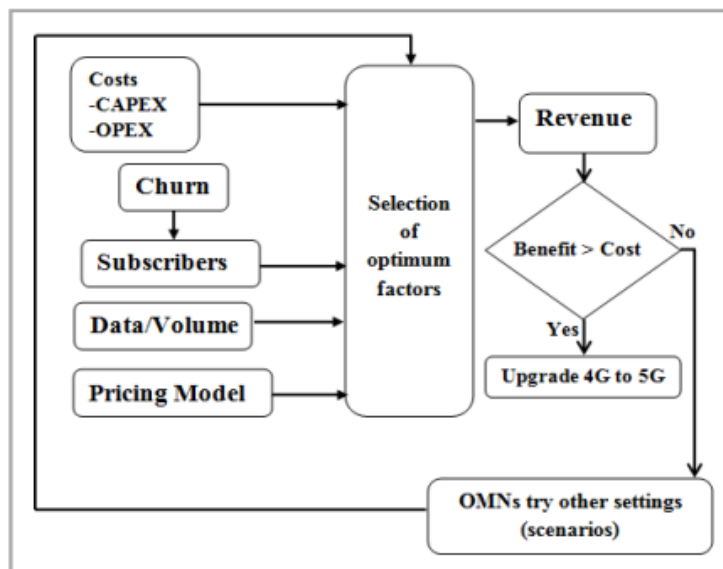
Από την σχέση κόστους και την ένταση ρυθμού μετάδοσης μηνύματος απορρέει το συμπέρασμα ότι όταν ρυθμός μετάδοσης μηνύματος είναι στα όριά του και δεν χρειάζεται επιπλέον επένδυση σε ραδιοφωνικές εφαρμογές. Μελλοντικά η αποστολή μηνυμάτων μιας υπάρχουσας τεχνολογίας αλλάζει με την πάροδο των ετών, το οποίο σημαίνει ότι η υπάρχουσα υπηρεσία έχει φθάσει στα όριά της. Όμως αυτό δίνει ένα βαθμό ελευθερίας στους παρόχους υπηρεσιών, διότι πετυχαίνουν καλύτερα ερευνητικά αποτελέσματα από την συλλογή δεδομένων που γίνονται. Τέλος η εκτίμηση κόστους κυψελοειδών συστημάτων, η εκμίσθωση κυψέλης και η πρόβλεψη των χρηστών αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την μελλοντική επιχειρηματική δραστηριότητα κάποιου επενδυτή αφού εξασφαλίζουν ανάλογα την τεχνολογία επιλογής την κατάλληλη επεκτασιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα μέσω των υπηρεσιών που προσφέρουν [74].

Συνοψίζοντας, με βάση όσα προαναφέρθηκαν το LoRaWAN αποτελεί λύση χαμηλού κόστους σε σχέση με τα υπόλοιπα κυψελοειδή συστήματα όταν ο ρυθμός ανάπτυξης συσκευών είναι χαμηλός και η μετάδοση μηνυμάτων σπάνια. Επιπλέον, το NB-IoT και το και για υψηλό ρυθμό ανάπτυξης. Επιπρόσθετα, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση του κόστους των τεχνολογιών επικοινωνίας IoT. Συγκεκριμένα, αν κάποιος πάροχος επενδύσει σε ψηφιακές υπηρεσίες ψυχαγωγίας τότε οικονομικά αποδοτική λύση αποτελεί το WiFi-HaLow παρόλο που το κόστος λει-

Μελέτη περιπτώσεων οικονομοτεχνικής μελέτης

4.3.1 Οικονομοτεχνική μελέτη της πόλης της Σανγκάης

Οι επενδυτές χρησιμοποίησαν τα femtocells ως εργαλείο με σκοπό τη μείωση του κόστους δικτύου για τις κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις και για να καθορίσουν όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις που αφορούν την σύνταξη ενός γενικού πλαισίου που θα περιλαμβάνει τις οικονομικές αναλύσεις διαφορετικών τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών δικτύου πρόσβασης, καθώς και για την έκθεση συγκεκριμένων ζητημάτων που σχετίζονται με την τεχνοοικονομική αξιολόγηση ενός δικτύου. Στη συνέχεια η ανάλυση επικεντρώνεται στην ανάλυση κόστους και οφέλους έτσι ώστε οι Operator Mobile Network (OMNs) να ελέγξουν εάν η μετάβαση σε δίκτυο 5G συμβάλλει στο να κερδίσουν ή να χάσουν χρήματα οι επενδυτές. Επίσης εξετάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο που αφορά τα έσοδα και την πρόβλεψη κόστους. Επιπλέον, για την ανάλυση και σύγκριση των απαιτούμενων παραμέτρων χρειάζεται να οριστεί μια γεωγραφική περιοχή. Στην Εικόνα 20 που ακολουθεί, περιγράφετε ένα μοντέλο μελέτης που αφορά τον τρόπο με τον οποίο ξεκινάει η ανάλυση της διαδικασίας. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των συνδρομητών είναι οι χρήστες των κινητών τηλεφώνων, οι οποίοι έχουν εγγραφεί μέσω Subscriber Identity Module (κάρτα SIM) για να αποκτήσουν πρόσβαση στις υπηρεσίες (φωνή, δεδομένα) [18].



Εικόνα 20: Μοντέλο μελέτης υψηλού επιπέδου [18]

Κάνοντας σύγκριση τους συνολικού κόστους ιδιοκτησίας TCO με τα εισπραχθείσα κέρδη προκύπτει το σημείο απόφασης. Επίσης αν το TCO είναι μικρότερο από την απόδοση της επένδυσης Return on Investment (ROI) η επένδυση χαρακτηρίζεται ως κερδοφόρα.

Επιπλέον, οι OMN επιθυμούν την μεγιστοποίηση των κερδών τους ορίζοντας τις κατάλληλες τιμές και όρους και από την άλλη οι χρήστες επιθυμούν να αποκτήσουν την υπηρεσία με την μικρότερη τιμή. Η περιοχή που επιλέχθηκε για την ανάλυσή της είναι η πόλη Σαγκάη της Κίνας με έκταση 6.340,5 km² και πληθυσμό που αγγίζει τα 25 εκατομμύρια και αποτελεί μια από τις πιο κατοικημένες πόλεις του κόσμου με πυκνότητα 3.854 άτομα ανά km² σύμφωνα με το [19]. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την πόλη προκύπτει ότι το 95% του πληθυσμού βρίσκεται στην αστική περιοχή και μόνο το 5% στην αγροτική περιοχή. Επιπρόσθετα, από μια έρευνα που διενεργήθηκε [20] κατέληξε στο συμπέρασμα ότι σε κάθε 100 άτομα αναλογούν περίπου 128 κινητά τηλέφωνα που σημαίνει αναλογικά ότι υπάρχουν 30 εκατομμύρια συνδρομητές και αυτό συνεπάγεται ότι υπερβαίνει τον αριθμό των πολιτών που είναι 25 εκατομμύρια. Όσα προαναφέρθηκαν συμβαίνουν εξαιτίας των αλλοδαπών εργαζομένων και μεταναστών που έχουν εγκατασταθεί στη Σαγκάη και η πλειοψηφία από αυτούς διαθέτει κινητό με διπλή κάρτα SIM.

Η συγκεκριμένη περιοχή αναλύθηκε σε τέσσερα διαφορετικά μέρη:

- Το πρώτο μέρος αφορά την πρόβλεψη του αριθμού των χρηστών.
- Το δεύτερο μέρος αφορά τον ρυθμό μετακίνησης από πάροχο σε πάροχο ή αλλιώς που χρειάζεται για την εκτίμηση των του δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G.
- Το τρίτο μέρος αφορά την στρατηγική τιμολόγησης και προτείνεται ένα νέο μοντέλο που είναι συμβατό με την επόμενη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας.
- Το τελευταίο μέρος αφορά την εκτίμηση των CAPEX και OPEX για διαφορετικές κατηγορίες σταθμών βάσης (BS) για διαφορετικά σενάρια.

Προβλεπόμενος αριθμός χρηστών

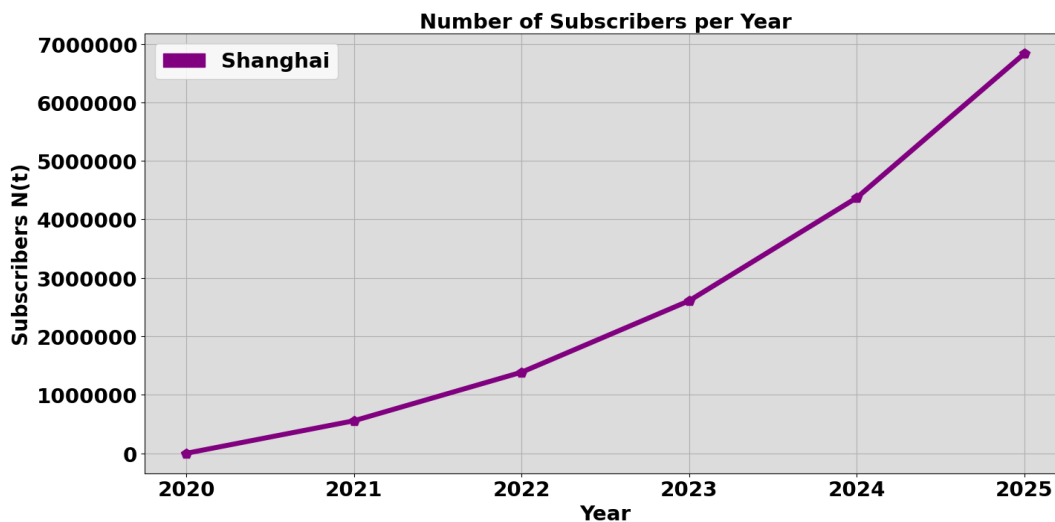
Για την συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε το μοντέλο Bass διότι επεξηγεί καλύτερα το σύστημα πρόβλεψης της αγοράς που αφορούν τους τύπους υπηρεσιών ή προϊόντων. Επιπλέον, οι βιομηχανίες τηλεπικοινωνιών παίζουν σημαντικό ρόλο στην διάδοση των υπηρεσιών και των προϊόντων και για αυτόν τον λόγο πιστεύεται ότι ο αριθμός των μελλοντικών χρηστών θα εξαρτηθεί από τις δυνατότητες του πληθυσμού, τον ρυθμό ανάπτυξης και τους συντελεστές απομίμησης και εκτιμάται σύμφωνα με τον τύπο που φαίνεται παρακάτω [18]:

$$N(t) = M \frac{1 - e^{-t(p+q)}}{1 + \frac{q}{p} e^{-t(p+q)}} \quad (4)$$

- Το M είναι η χωρητικότητα αγοράς (Market Capacity).
- Το $p > 0$ είναι ο συντελεστής καινοτομίας και συμβολίζει την πιθανότητα στην έ-
ν
- Το $q \geq 0$ είναι ο συντελεστής απομίμησης το οποίο αναφέρεται στο μέγεθος των
ρ
- Το $N(t)$ είναι ο αριθμός των συνδρομητών τη στιγμή t .

Χρησιμοποιώντας τον τύπο (4) και θέτοντας του κατάλληλους συντελεστές που προ-
κύπτουν από την πολιτική διάδοσης τηλεπικοινωνιών στην Κίνα και αφορούν την Σανγκάη
είναι:

- Η χωρητικότητα αγοράς θεωρείται ότι είναι $M = 50$ εκατομμύρια.
- Ο συντελεστής καινοτομίας θέτετε σε $p = 0.009$.
- Ο συντελεστής απομίμησης θέτετε σε $q = 0.42$.



Εικόνα 21: Πρόβλεψη αριθμού συνδρομητών για 6 χρόνια [18].

Το αποτέλεσμα αποτυπώνεται στην Εικόνα 21. Στην συνέχεια παρατηρώντας της
συγκεκριμένη εικόνα ο αριθμός των συνδρομητών ή adopters κυμαίνεται σε χαμηλά επί-
πεδα έως το 2021, όμως η εισχώρηση των innovators (καινοτόμων) θα αλλάξει σταδιακά

δ

ρ

7 δ

Ένας adopter είναι πρώιμος πελάτης μιας δεδομένης εταιρείας, προϊόντος ή τεχνολογίας
Οι adopters (υιοθέτες) μπορούν να ταξινομηθούν ως innovators (καινοτόμοι) ή ως imitators (μιμητές) και
η ταχύτητα και ο χρόνος υιοθέτησης εξαρτάται από τον βαθμό καινοτομίας τους και τον βαθμό απομίμη-
σης μεταξύ των adopters.

τ

ώ

α

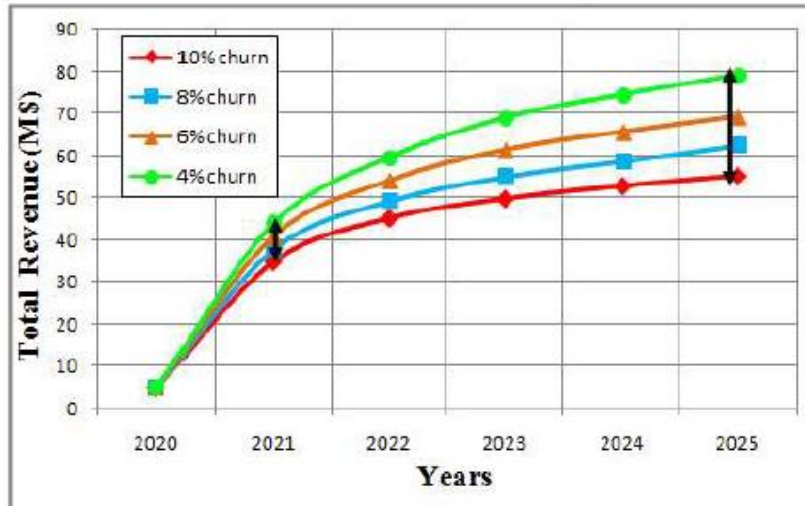
το σκηνικό τοπίο με την υιοθέτηση της νέας τεχνολογίας με αποτέλεσμα ο αριθμός των imitators (μιμητών) να λάβει εκθετική μορφή.

C
 h Ένα σημαντικό σημείο για την ανάλυση της αγοράς είναι ο ρυθμός μετακίνησης από πάροχο σε πάροχο ή churn rate, το οποίο αναφέρεται στο ποσό των συνδρομητών που στάματησαν την υπηρεσία 5G από κάποιον πάροχο για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για τον υπολογισμό του churn rate χρησιμοποιείται μια τυπική οικονομική μέθοδος που είναι η εξής:

- Ο όρος N_{year} είναι ο προβλεπόμενος αριθμός συνδρομητών.
- Ο όρος CR_{year} είναι ένας ρυθμός με τον οποίο ο συνδρομητής αλλάζει από πάροχο σε πάροχο κατά τη διάρκεια ενός έτους.
- Ο όρος $\text{Outflow}_{\text{year}}$ είναι ο αριθμός των συνδρομητών που εγκατέλειψαν την συγκεκριμένη χρονιά.

Η γνώση του μεγέθους του churn rate αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τον υπολογισμό των εσόδων που χάθηκαν αλλά και των εσόδων που κερδήθηκαν από τους υπάρχοντες συνδρομητές για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, εκτιμάται ότι ο ρυθμός μετακίνησης από πάροχο σε πάροχο θα κυμαίνεται στο διάστημα μεταξύ και 10%, δηλαδή για το αισιόδοξο σενάριο αντιστοιχεί το ποσοστό 4% και για το απαισιόδοξο σενάριο αντιστοιχεί το ποσοστό 10%. Συνεπώς από την Εικόνα 22 παρατηρούνται οι συνέπειες που έχει το churn rate στο κέρδος.

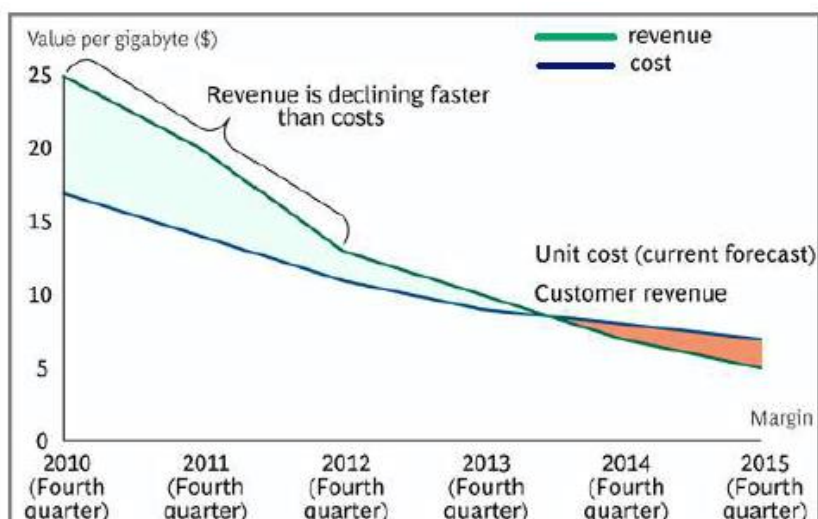
Συνοψίζοντας με όσα προαναφέρθηκαν και παρατηρώντας την Εικόνα 22 προκύπτει ότι η επίδραση του churn rate κατά τη χρονική περίοδο ενός έτους είναι πολύ χαμηλή, αλλά το τελευταίο έτος παρατηρείται οι επιδράσεις είναι αξιοσημείωτες για τα κέρδη. Συμπερασματικά σημαίνει ότι η αποχώρηση ενός συνδρομητή συνεπάγεται ζημία σε μελλοντικά κέρδη αλλά και στους πόρους που δαπανήθηκαν για την απόκτηση των συνδρομητών.



Εικόνα 22: Οι επιδράσεις του churn rate στα κέρδη. [18]

Είναι γεγονός ότι η ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων έχει αντίκτυπο στην δημιουργία αρκετών οικονομικών ζητημάτων αν δεν εφαρμοστεί μια αποτελεσματική στρατηγική τιμολόγησης. Με βάση την έρευνα που έγινε στο [21], η στρατηγική που ακολούθηθηκε από τους παρόχους αφορά μοντέλα φόρτισης όγκου (volume-charging models) με ποσοστό χρήσης στο 89%. Όμως η συγκεκριμένη στρατηγική είναι συμφέρουσα μόνο για μικρά πακέτα υπηρεσιών όπως 1 GB, 3 GB ή 10 GB ανά μήνα και δεν είναι καθόλου ευνοϊκή για δίκτυα 5G όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.

Για την αντιμετώπιση των οικονομικών ζητημάτων σχεδιάστηκαν καινοτόμες και ευέλικτες στρατηγικές τιμολόγησης, οι οποίες συμβάλλουν στην αύξηση των εσόδων, που προέρχονται από την αυξανόμενη χρήση των δεδομένων, από το οποίο επωφελούνται οι στις ευρυζωνικές υπηρεσίες και αρκετοί φανατικοί συνδρομητές επιθυμούν την αγορά ευρυζωνικής υπηρεσίας με τις πιο προηγμένες επιλογές. Μια διαφορετική άποψη παρουσιάζεται στο [23], στο οποίο πιστεύεται ότι για να επιτευχθεί αύξηση της κερδοφορίας σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή της υπηρεσίας. Τέλος στο [24], προτείνεται μια πιο ανθρωποκεντρική προσέγγιση με διάφορες τεχνικές με γνώμονα τον πελάτη με στόχο την καλύτερη εκτίμηση των προσφορών της αγοράς και την βελτίωση της αποτελεσματικότητας.



Εικόνα 23: Τα δεδομένα κινητής τηλεφωνίας ενδέχεται να μην είναι κερδοφόρα (πηγή: "Το τέλος της κερδοφορίας",

Για αυτό το λόγο παρουσιάζεται μια υβριδική στρατηγική τιμολόγησης που αποτελεί τον συνδυασμό βάσης όγκου και βάσης αξίας ή volume-based και value-based αντίστοιχα. Συγκεκριμένα και σύμφωνα με το [25], είναι πρέπον πριν από την εφαρμογή της στρατηγικής βάσης όγκου να χρησιμοποιείται πρώτα η στρατηγική βάση αξίας διότι με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται καλύτερα οι ανάγκες του καταναλωτή. Πρώτον, ο προσδιορισμός των διάφορων παραμέτρων που αφορούν την στρατηγική τιμολόγησης βάση αξίας είναι ο χρόνος, η ταχύτητα και τα δεδομένα. Δεύτερον, οι παράμετροι που αφορούν την στρατηγική βάση όγκου είναι η τοποθεσία, ο χρόνος χρήσης και το περιεχόμενο. Συνεπώς, για να επιτευχθεί αύξηση των κερδών οι OMNs πρέπει να αυξηθούν τα κέρδη της αγοράς κινητής τηλεφωνίας, οι OMNs πρέπει να καταλήξουν σε μια συγκεκριμένη τιμή των υπηρεσιών χρησιμοποιώντας δύο προσεγγίσεις: την διαφάνεια και την απλότητα του δικτύου παρά τις απαιτήσεις του και εφαρμόζοντας την ελαστικότητα τιμής ζήτησης Price Elasticity of Demand (PED). Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα πρέπει οι συνδρομητές να είναι σε θέση να γνωρίζουν και να παρακολουθούν συχνά την κατανάλωση των δεδομένων τους. Για παράδειγμα ένα βίντεο εισπράττει κέρδη για δεδομένη χρονική διάρκεια ώρας ή λεπτού αποτελεί έναν εύκολο τρόπο που βοηθάει τους πελάτες ελέγξουν το επίπεδο κατανάλωσής τους. Συνεπώς, ο χρόνος χρησιμοποιείται ως παράμετρος για τον όγκο και το περιεχόμενο που καταναλώνεται ως παράμετρος για την αξία. Ο Πίνακας 8 που ακολουθεί δείχνει το υβριδικό μοντέλο τιμολόγησης.

Πίνακας 8: Υβριδικό μοντέλο τιμολόγησης που χρησιμοποιούν τα περιεχόμενα χρηστών

Παράμετροι με βάση την αξία	Παράμετροι με βάση τον όγκο	Υβριδικό μοντέλο
-----------------------------	-----------------------------	------------------

Χρόνος χρήσης	Δεδομένα	Η ροή δεδομένων εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιείται (περιορισμένο κατά την διάρκεια της ημέρας, απεριόριστο το βράδυ και το Σαββατοκύριακο)
	Ταχύτητα	Η ταχύτητα εξαρτάται από το χρόνο χρήσης (υψηλή και χαμηλή ταχύτητα παρέχεται ανάλογα την ώρα)
	Χρόνος	Ο χρόνος εξαρτάται από τον χρόνο χρήσης (2 ώρες/ημέρα, 4 ώρες/βράδυ, 6 ώρες/Σαββατοκύριακο)
Περιεχόμενο	Δεδομένα	Οι κάποιες εφαρμογές έχουν ανώτατο φράγμα ροής δεδομένων (Απεριόριστο «Youtube» τη νυχτερινή ώρα)
	Ταχύτητα	Η ταχύτητα εξαρτάται από την εφαρμογή που χρησιμοποιείται
	Χρόνος	Ο χρόνος εξαρτάται από συγκεκριμένες εφαρμογές (2 ώρες βίντεο / ημέρα, 4 ώρες βίντεο / βράδυ)
Τοποθεσία	Δεδομένα	Η ροή δεδομένων εξαρτάται από την τοποθεσία π.χ. οικιακό δίκτυο)
	Ταχύτητα	Η ταχύτητα εξαρτάται από την τοποθεσία (Ανάλογα την τοποθεσία σε κάποια μέρη έχουν υψηλή ταχύτητα και σε άλλα χαμηλή)
	Χρόνος	Η χρονική διάρκεια σύνδεσης εξαρτάται από την τοποθεσία

Οι πάροχοι είναι χρήσιμο να συλλέγουν δεδομένα σχετικά με το κόστος των υπηρεσιών τους, διότι συμβάλλει στην καλύτερη αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συνδρομητών ως προς τις τιμές των υπηρεσιών που παρέχονται, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο και την αβεβαιότητα. Συνεπώς, για την πρόβλεψη των πωλήσεων των δεδομένων που βασίζονται στον όγκο τους και για τον καθορισμό των τιμών τους προτάθηκαν δύο οικονομικές έννοιες οι οποίες είναι ελαστικότητα τιμών όγκου και ελαστικότητα όγκου εσόδων. Ελαστικότητα τιμής του όγκου $E_V(P)$: είναι ανάλογος με την τιμή ελαστικότητας της ζήτησης και ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή στον πραγματικό όγκο V ανά ποσοστιαία μεταβολή στην τιμή μονάδας P . Οπότε ισχύει:

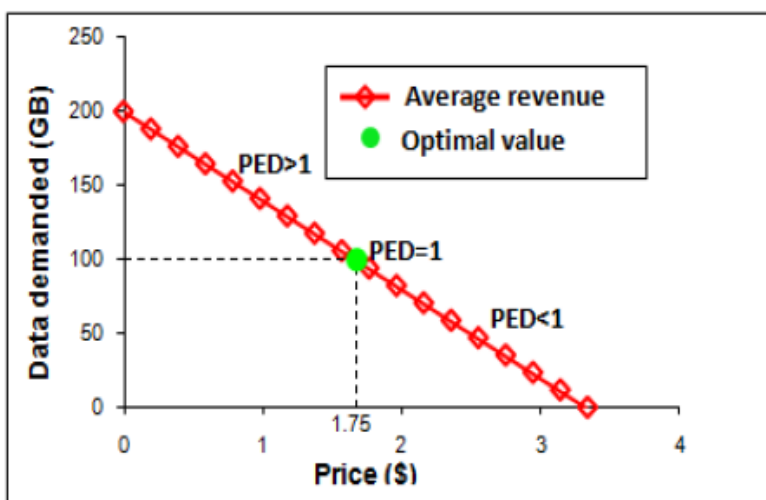
Όταν η τιμή ελαστικότητας ζήτησης είναι κατά απόλυτη τιμή μικρότερη του ένα σημαίνει ότι είναι ανελαστική, δηλαδή οι μεταβολές που πραγματοποιούνται στην τιμή έχουν μικρό αντίκτυπο στον όγκο της απαιτούμενης υπηρεσίας. Από την άλλη πλευρά όταν η ελαστικότητα τιμής ζήτησης είναι μεγαλύτερη του ένα σημαίνει ότι είναι ελαστική και αυτό έχει ως συνέπεια οι μεταβολές που γίνονται στην τιμή έχουν μεγάλο αντίκτυπο. Ο όγκος ελαστικότητας εσόδων $E_R(V)$ ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή εσόδων R (χρέωση) ανά ποσοστιαία μεταβολή στον πραγματικό όγκο \bar{V} . Οπότε ισχύει:

→

/

—

Για τον πάροχο ισχύει ότι αν το $E_R(V) > 1$ σημαίνει ότι η αύξηση της ζήτησης του όγκου επηρεάζει την αύξηση των κερδών. Για τον συνδρομητή ισχύει ότι αν το $E_V(P) < 1$ σημαίνει ότι η αύξηση της ζήτησης του όγκου συμβάλλει στην μείωση των τιμών των υπηρεσιών και αντίστροφα. Από την Εικόνα 24 διαπιστώνεται ότι μια μείωση στις τιμές των υπηρεσιών π.χ. φωνητικές κλήσεις ή δεδομένα συνήθως οδηγεί σε μεγαλύτερη ζήτηση της ποσότητας που απαιτείται από τους συνδρομητές λόγω της χαμηλής ζήτησης και αντίστροφα.



Εικόνα 24: Προβλεπόμενη τιμή και όγκος κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης 5G χρησιμοποιώντας $E_V(P)$ και $E_R(V)$ [18].

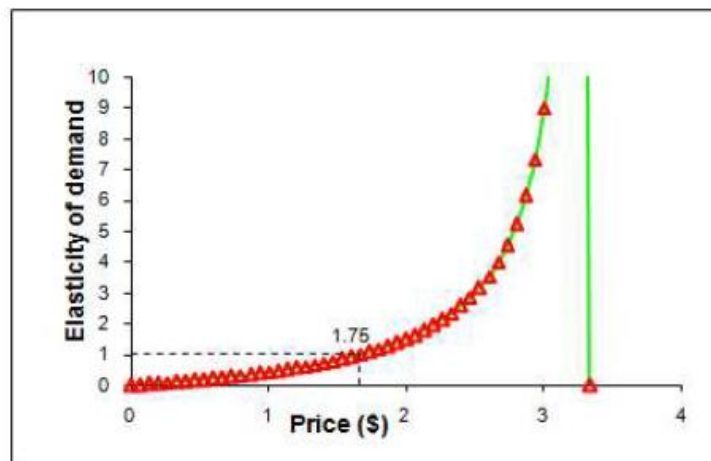
Στον Πίνακα 9 φαίνεται κατά πόσον οι τιμές πώλησης επιδρούν στην κερδοφορία εφαρμόζοντας τους τύπους (6) και (7). Κατά το [26] προκύπτει ότι ακόμα η απόκτηση και κατασκευή κυψελών το κόστος δικτύου δεν ξεπερνάει το 1\$/Gigabit. Για την περίπτωση που αναλύεται, θεωρείται ότι το κόστος είναι κατά μέσο όρο 0.75 \$ ανά GB. Σύμφωνα με το Πίνακα 9 παρατηρείται ότι το κέρδος της πώλησης 100 GB που αντιστοιχεί σε ποσό 100 \$ είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό 140 GB που είναι 35 \$. Όμως θεωρώντας ότι το 4G LTE προσφέρει 10 GB ανά συνδρομητή ανά μήνα με την ίδια τιμή ανά GB με το 5G, διαπιστώνεται ότι το περιθώριο κέρδους 10 GB 4G LTE είναι αντίστοιχο με αυτό τον 100 GB δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G.

Πίνακας 9 Επίδραση της αξίας και του όγκου στο κέρδος για 5G Mobile Broadband [18].

--	--	--	--

--	--	--	--	--

Από όλα αυτά προκύπτει ότι η τεχνολογία 5G είναι καλύτερη από την 4G διότι προσφέρει αύξηση στη μέση κατανάλωση δεδομένων και χαμηλότερο κόστος. Επίσης, παρατηρείται ότι η ζήτηση ποσότητας μειώνεται όταν αυξάνεται η τιμή. Από την άλλη, τα κέρδη των παρόχων μεγιστοποιούνται όταν η τιμή του PED είναι ακριβώς ίσο με 1, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25 Τιμή και ελαστικότητα της ζήτησης [18].

Πρόβλεψη και ανάλυση κόστους

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) είναι τα κεφάλαια που επενδύονται από μια επιχείρηση για την αγορά εξοπλισμού ή υπηρεσιών και συμβάλλουν στην παραγωγή κέρδους. Οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) αφορούν το κόστος που δαπανάται για την διαχείριση και συντήρηση μιας επιχείρησης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται δύο σενάρια ανάπτυξης:

Σενάριο 1: Αγορά νέου εξοπλισμού σταθμών βάσης BS μέσω της ανάπτυξης νέας τεχνολογίας RAT με νέο σύστημα κεραίας και εξοπλισμού με στόχο την υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το CAPEX του backhaul οπτικών ινών.

Σενάριο 2: Στους ήδη υπάρχοντες BS προστίθενται νέοι φορείς και εξοπλισμοί και στο υπάρχον RAT και δημιουργούνται BSs με σκοπό την υποστήριξη του προηγούμενου RAT. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται αναβάθμιση λογισμικού για την αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης backhaul στο hotspot layer⁹. Για μια κλάση BS i , οι συνολικές δαπάνες C_i προεξοφλούνται ως:

- Ο όρος $(\alpha)_{k,i}$ είναι το άθροισμα των εξόδων που πραγματοποιήθηκαν εντός του έτους k της BS κλάσης i .
- Ο όρος β είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο.

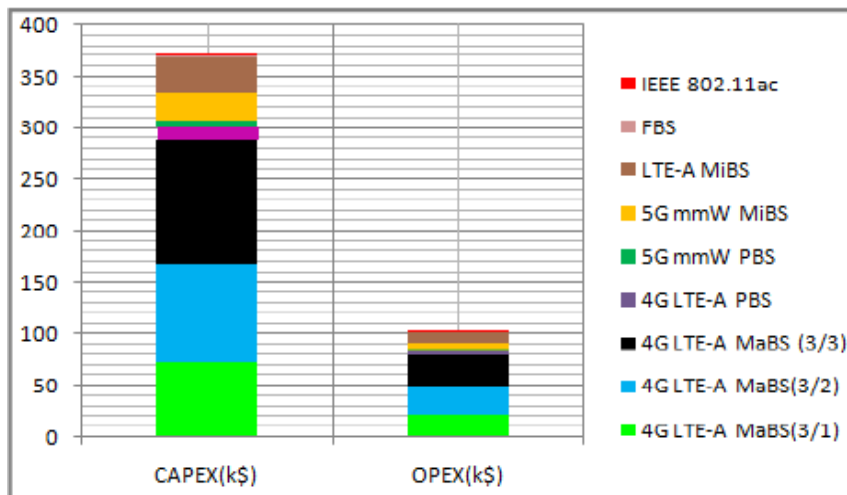
Στην συνέχεια θεωρούνται ότι το $k = 6$ έτη και $\beta = 10\%$ και ότι όλοι οι σταθμοί βάσης εγκαταστάθηκαν κατά τη διάρκεια του πρώτου χρόνου. Επιπλέον κατά με το [30], το κόστος ανάπτυξης ενός νέου κυψελοειδούς Macro Base Station (MaBS) σε αστική περιοχή είναι 110 k\$ και το κόστος προσθήκης ασύρματων εξοπλισμών ανέρχεται στα 10 k\$ υποστηρίζοντας 3 τομείς που εκπέμπουν στα 5-20 MHz, αποδίδοντας συνολικά 120 k\$. Επίσης, το κόστος του MaBS για 1 φορέα είναι 20 k\$ και η προσθήκη τομέων ανά φορέων είναι 5 k\$ σύμφωνα με το [27]. Όμως η ανάπτυξη ενός MaBS έχει κόστος 30 k\$ ετήσιο

Η επαναχρησιμοποίηση του υπάρχοντος MaBS [30] χρειάζεται το ποσό 30 k\$ ετησίως. Επιπρόσθετα, το κόστος των κυψελοειδών σταθμών Micro Base Station (MiBS) και το κόστος μετάδοσης σήματος ανά PBS είναι 2 k\$ ανά PBS κατά το [27]. Για την δημιουργία τοποθεσιών κυψελών MiBS και PBS απαιτούνται 10 k\$ και 2 k\$ αντίστοιχα. Κατά το [28] οι κεφαλαιουχικές και οι λειτουργικές δαπάνες του σταθμού βάσης Femto (FBS) ανέρχονται σε 1.1 k\$ και 0.5 k\$ αντίστοιχα και για το WI-FI AP IEEE 802.1ac οι δαπάνες ανέρχονται σε 1.05 k\$ CAPEX και 0.14 k\$ OPEX. Παρόλα αυτά, επιτεύχθηκε μείωση του ανάπτυξη προτύπων 5G και την μείωση του CAPEX κατά 30% που αφορά μοντέλα για

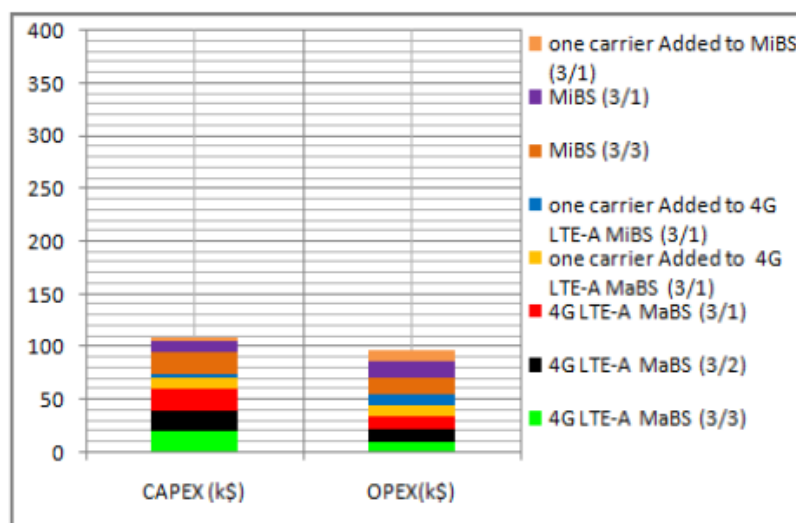
9

Η τεχνολογία hotspot είναι ένας τρόπος φόρτωσης και προβολής μεγάλης ποσότητας αντικειμένων, ενώ επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση. Όταν χρησιμοποιείται hotspot, αντί να εμφανίζονται χιλιάδες ξεχωριστά αντικείμενα, εμφανίζεται ένα μόνο επίπεδο που περιέχει εικόνες όλων αυτών των αντικειμένων. Στην κορυφή του επιπέδου με εικόνες αντικειμένων, υπάρχει ένα άλλο επίπεδο με πληροφορίες σχετικά με αυτά τα αντικείμενα και τα όριά τους. Αυτό το επίπεδο επιτρέπει στα αντικείμενα να είναι διαδραστικά. Επιπλέον, οι πληροφορίες λαμβάνονται από το διακομιστή μόνο για τα αντικείμενα που βρίσκονται στο πλακίδιο στο οποίο βρίσκεται ο δρομέας του ποντικιού.

την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων κατά την περίοδο 2017-2025 [81]. Επομένως προκύπτει ότι οι CAPEX και OPEX δαπάνες για 5G Millimeter Wave (5G mmW) τοποθεσίες κυψελών είναι 30% χαμηλότερη σε σύγκριση με 4G LTE-A RAT. Για να αποδειχθεί αν αποτελεί επικερδής επένδυση με τις ελάχιστες δαπάνες θεωρείται η περίπτωση μονοπωλίου. Στις Εικόνες 26 και 27 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX διαφορετικών BS για το σενάριο 1 και το σενάριο 2 αντίστοιχα, και το συνολικό μειωμένο κόστος απεικονίζεται στον Πίνακα 10, σύμφωνα με τον τύπο (8).



Εικόνα 26: Προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX για BS / AP διαφορετικών RAT που σχετίζονται με νέα κυψέλη (σενάριο 1) [18].



Εικόνα 27: Προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX για επαναχρησιμοποίηση κυψελών (σενάριο 2) [18].

Από τις δύο προηγούμενες εικόνες συνεπάγεται ότι όταν συγκριθούν τα δύο σενάρια, είναι σαφές ότι η επαναχρησιμοποίηση τοποθεσίας κυψέλης είναι σημαντικά χαμηλότερη για το CAPEX αφού επωφελούνται οι πάροχοι διότι κερδίζουν χρήματα αλλά από την σύγκριση των δύο OPEX προκύπτει ότι δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές, δηλαδή είναι σχεδόν όμοια.

Πίνακας 10: Εκτιμήσεις του συνόλου ποσού έκπτωσης σε παρούσα αξία για την ανάπτυξη BS με χρήση τεχνολογίας mmWave και IEEE 802.11ac [18].

Τύπος κυψέλης / RAT	
MaBS (3 φορείς)	
MaBS (2 φορείς)	
MaBS (1 φορέας)	

Εκτίμηση της δημιουργούμενης ζήτησης κίνησης

Ο όγκος δεδομένων ανά συνδρομητή δεν σχετίζεται με το σενάριο ανάπτυξης και παραγόμενη κίνηση δικτύου είναι ανάλογη με την πυκνότητα πληθυσμού ρ . Για αυτόν τον λόγο, προτείνεται το μοντέλο κίνησης δικτύου που παρουσιάζεται στο [82] για την εκτίμηση της ζήτησης της κίνησης για 1 km^2 στη Σαγκάη ως εξής:

- Το N_{dh} είναι ο αριθμός των ωρών της ημέρας που υπάρχει έντονη κινητικότητα απασχόλησης.
- Το N_{md} είναι ο αριθμός των ημερών του μήνα.
- Το $\varphi(t)$ είναι το ποσοστό των ενεργών συνδρομητών για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα t χρησιμοποιώντας $\varphi(t) = 100\%$ για τον υπολογισμό της ζήτησης κίνησης δικτύου στις ώρες με τον περισσότερό φόρτο εργασίας σε Gbps / km^2 .

Το D_k είναι η μέση ζήτηση δεδομένων ανά μήνα .

Κατά το [83] θεωρείται το $N_{dh} = 9$ για ένα μήνα ή 30 ημέρες. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το αποτέλεσμα της Εικόνας 21 που αφορά με τον αριθμό των συνδρομητών, ορίζεται μια πιο ακραία κατοικημένη περιοχή ή με σχεδόν διπλάσιο αριθμό κατοίκων με $\rho = 7.708$ κάτοικοι/ km^2 . Επίσης, με βάση το [27] λαμβάνεται υπόψη μόνο η κίνηση κατερχόμενης ζεύξης. Από τον Πίνακα 11 προκύπτει η εκτιμώμενη απόδοση των ενεργών συνδρομητών όταν εργάζονται ώρες αιχμής στη Σαγκάη, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συνδρομητές κατανέμονται ομοιόμορφα σε μια κυψέλη.

Πίνακας 11: Προδιαγραφή ζήτησης κυκλοφορίας (GBPS km^2) [18].

Μηνιαία ζήτηση

Παρατηρώντας τον Πίνακα 11 το επίπεδο ζήτησης που αντιστοιχεί στο μέσο όρο των ποσοστών δεδομένων χρήστη είναι 2.59 Mbps και πάρθηκε κατά τη διάρκεια των 8 ωρών εργασίας. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι χρειάζεται 20 Gbps/km² απόδοσης σύμφωνα με τον τύπο (6).

Μοντελοποίηση επενδύσεων δικτύου

Για την μοντελοποίηση επενδύσεων δικτύου θα εφαρμοστούν διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης εσωτερικών χώρων χρησιμοποιώντας διαφορετικές κλάσεις BS σε διαφορετικά μεγέθη φάσματος με στόχο την επίτευξη του ρυθμού 20 Gbps σε 1 km². Στη συνέχεια, για κάθε κατηγορία σταθμού βάσης θα γίνει σύγκριση του συνολικού μειωμένου κόστους, το εύρος κάλυψης και το μέγεθος της χωρητικότητας. Όμως, το σημαντικό πρόβλημα για αυτά τα σενάρια είναι οι απώλειες διείσδυσης όταν για παράδειγμα υπάρχει εμπόδιο π.χ. τοίχος δημιουργία ενός πυκνότερου δικτύου 2.6 GHz ή να αναπτυχθεί δίκτυο χρησιμοποιώντας φάσμα 10MHz και 0.8 GHz εντός ζώνης με στόχο την μεγιστοποίηση της εσωτερικής κάλυψης. Κατά το [79] για να επιτευχθεί η αντιμετώπιση της 12 dB εξασθένησης είναι απαραίτητη η δημιουργία 5 φορές πυκνότερου δικτύου με συχνότητα ζώνης στα 2.6 GHz. Από την άλλη, απαιτείται διπλασιασμός των τοποθεσιών που θα εγκατασταθούν οι BS όταν χρησιμοποιηθεί μόνο το φάσμα 10 MHz στη ζώνη 0.8 GHz εξαιτίας προβλήματος χωρητικότητας. Έπειτα, θα αναλυθούν οι προδιαγραφές ανάπτυξης που αφορούν το MaBS λαμβάνοντας υπόψη τη συγκέντρωση φορέα (carrier aggregation) και της απώλειας διείσδυσης λόγω εμποδίου. Επίσης, θα αποσαφηνιστούν τα σενάρια ανάπτυξης που αφορούν τον αριθμό των FBS ανά όροφο και τον αριθμό των χρηστών ανά FBS. Επιπλέον, ορίζονται τα ακόλουθα δεδομένα τα οποία είναι: η εσωτερική μέση φασματική απόδοση 6.6 bps / Hz και το φάσμα στα 20 MHz για FBS.

Πίνακας 12: Κεφαλαιουχικές δαπάνες και χωρητικότητα σε Femto σταθμούς βάσης με χρήση προτύπου WI-FI IEEE

Ανάπτυξη FBS/Wi-Fi	Αριθμός Τοποθεσιών Κυψ	
	FBS	

όροφο		
όροφο		
όροφο		
4 χρήστες/BS		
8 χρήστες/BS		
χρήστες/FBS		
32 χρήστες/FBS		
4 χρήστες/FBS		

Πίνακας 13: CAPEX και χωρητικότητα για τοποθεσίες μακροκυμελών με συνάθροιση φορέων και διείσδυσης απώλειας τσίχους[18].

Α- νά πτ υξ η B S σε να ρί ου	Αριθμός Τοποθεσιών Κυψελής
N έ ο	
E π α ν	
N έ ο M a	

B S L T E - A (0 .8 κ α 2. 6 G H z)	
E π α ν	
N έ ο M a B S L T E - A (0 .8 G H z)	
E π α ν	
N έ ο M a B S L T	

Λαμβάνοντας υπόψη την κάλυψη και την χωρητικότητα των κυψελοειδών συστημάτων ισχύουν ότι το MaBS LTE-A καλύπτει 1.02 km^2 με 228 Mbps, το 5G mmW PBS καλύπτει 0.001 km^2 με 4245 Mbps, το FBS καλύπτει $0,008 \text{ km}^2$ με 132 Mbps και το Wi-Fi και 13 συνοψίζονται τα κόστη και οι χωρητικότητες που αφορούν τις προαναφερθείσες κυψελοειδής τεχνολογίες που ικανοποιούν το 20 Gbps/km^2 . Από τους πίνακες 12 και 13 συμπεραίνεται ότι η ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού νέων κυψελών είναι πολύ δαπανηρή και κυμαίνεται στα 17.5 M\$ για 175 τοποθεσίες κυψελών, αλλά η επαναχρησιμοποίηση των υπάρχοντων κυψελών οδηγεί σε λιγότερο δαπανηρή ανάπτυξη ακόμα και όταν πρέπει να είναι πολλές τοποθεσίες κυψελών εξοπλισμένες με νέο RAT και το κόστος κυμαίνεται στα χαμηλότερο κόστος, αλλά δεν έχει μεγάλο εύρος κάλυψης. Επιπρόσθετα δίνοντας και την ανάλογη σημασία στην εξασθένηση των 13.6 dB λόγω εμποδίου είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν 797 mmW τοποθεσίες κυψελών μέσα στο κτίριο για την κάλυψη περιοχής 1 km^2 με στόχο την πυκνότερη εσωτερική χρήση όπως στο [85]. Συνεπώς, οι συνολικές κεφαλαιουχικές δαπάνες θα είναι υψηλές με κόστος 75.71 M\$. Τέλος, το MaBS με αρχιτεκτονική συνάθροισης φορέα του LTE-A RAT αποτελεί μια αποτελεσματική στρατηγική διότι υπάρχει μικρή πυκνότητα κυψελών γύρω στους 58 ανά km^2 [18].

Ως πιο οικονομική επιλογή αποτελεί η ανάπτυξη νέων τοποθεσιών κυψέλης με συνάθροιση φορέα σε σχέση με τις υπόλοιπες επιλογές. Επίσης, αποτελεσματική λύση για τους παρόχους αποτελεί η επαναχρησιμοποίηση των κυψελών διότι εξασφαλίζεται υψηλή απόδοση και κάλυψη με συχνότητα φορέα 0.8 GHz και 10 MHz για την επίτευξη του 20 κυψελών του MaBS με συνάθροισης φορέα που κοστολογείται στα 1.77 M\$ και την επαναχρησιμοποίηση του MaBS με απώλειες λόγω εμποδίου με κόστος 1.76 M\$. Επιπλέον,

χρησιμοποιώντας το FBS και το Wi-Fi IEEE 802.11ac επιτυγχάνεται σημαντική οικονομική βελτίωση αρκεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός χρηστών σύμφωνα με Πίνακα 12 [18].

Συνοψίζοντας, το σημαντικό πρόβλημα του δικτύου 5G είναι το μικρό εύρος κάλυψης με χρήση μικροκυψελών όπως femtocells, picocells που προορίζονται για συστήματα 5G mmW και Wi-Fi. Από την άλλη πλευρά, οι τοποθεσίες μακροκυψελών¹⁰ παρουσιάζουν περιορισμένη χωρητικότητα. Η λύση σε αυτά τα δύο προβλήματα, είναι ο συνδυασμός των τοποθεσιών μακροκυψελών ή MaBS και των femtocells, 5G mmW PBS ή Wi-Fi με στόχο την επίτευξη της κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ κόστους, χωρητικότητας και κάλυψης

Η Ινδονησία είναι μια χώρα με πληθυσμό που υπερβαίνει τα 323,5 εκατομμύρια ανθρώπων και με υψηλό αριθμό κινητών τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων, αφού ο συνολικός πληθυσμός ήταν 268,2 εκατομμύρια άνθρωποι στο τέλος του τέταρτου τριμήνου το 2018 του πληθυσμού της Ινδονησίας είναι συνδρομητές σε ευρυζωνικές κυψελοειδής συνδέσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους συνδρομητές [49]. Η ανάπτυξη του δικτύου 4G LTE συνεχίζει να αναπτύσσεται και εκτιμάται ότι θα φτάσει σε όλες τις περιοχές της Ινδονησίας έως το τέλος του 2019 [50]. Επίσης η αναβάθμιση του δικτύου 5G αποτελεί αναπόφευκτη συνέχεια αφού ολοκληρωθεί η ανάπτυξη του 4G LTE. Τέλος οι μεγαλύτερες πόλεις της Ινδονησίας απαιτούν υψηλή χωρητικότητα δικτύου και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων [51],[52].

Η αναβάθμιση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου 5G στην Ινδονησία θα πραγματοποιηθεί το 2020 [132]. Η προδιαγραφή 5G για βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή χρήση προτάθηκε από το ITU-R M.2083-0 [53] και προσφέρει ταχύτητα από 1 Gigabit ανά δευτερόλεπτο (Gbps) έως το μέγιστο ρυθμό δεδομένων 20 Gbps. Η αναβάθμιση του δικτύου αφορά την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ταχύτητα, χωρητικότητα και ρυθμού δεδομένων στις μεγάλες πόλεις όπου υπάρχει μεγάλης συμφόρηση. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι ανάγκες τριών πόλεων της Ινδονησίας και θα υπολογιστούν οι ανάγκες για περαιτέρω επενδύσεις σε δίκτυα 5G. Βασικό σημείο αποτελεί το εξαετές σχέδιο μοντελοποίησης για τα έτη 2020-2025 που αφορά τις απαραίτητες προβλέψεις για την αναβάθμιση του δικτύου 5G [52].

10

Με την εκρηκτική αύξηση της κατανάλωσης κινητής τηλεφωνίας και την επιταχυνόμενη ανάπτυξη του 5G, οι ασύρματοι πάροχοι καλούνται να προσθέσουν χωρητικότητα και να ενισχύσουν την απόδοση του δικτύου για να παραμείνουν μπροστά από τον ανταγωνισμό στη διαδρομή ανάπτυξης 5G. Η προσθήκη νέων τοποθεσιών μακροκυψελών και ο εκσυγχρονισμός υφιστάμενων τοποθεσιών κυψέλης είναι βασικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Οικονομοτεχνική μελέτη των πόλεων Jakarta, Surabaya, Medan

Τεχνολογίες Δικτύου 5G

Η τεχνολογία τηλεπικοινωνιών 5G είναι περισσότερο απαιτητική σε κινητή ευρυζωνικότητα σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες επικοινωνιών. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών International Telecommunication Union (ITU) και τις συστάσεις του ITU-R M.2083-0 [53], τα ακόλουθα είναι απαραίτητα για ένα δίκτυο 5G [52]:

- Ρυθμός Δεδομένων: 1 Gbps - 20 Gbps.
- Latency: 1 ms.
- Mobility: 500 km/h.
- Ρυθμός δεδομένων εμπειρίας χρήστη: 10 Mbps - 100 Mbps
- Απόδοση φάσματος: 1x-3x φορές περισσότερο από International Mobile Telecommunications (IMT) - Advanced.
- Πυκνότητα σύνδεσης: 10⁵–10⁶ συσκευές/km².
- E
- Χωρητικότητα κυκλοφορίας περιοχής: 0.1 Mbps/m² έως 10 Mbps/m².

ε

Εξέταση των ζωνών συχνοτήτων 5G στην Ινδονησία

Το φάσμα συχνοτήτων είναι ο πιο σημαντικός πόρος στην τεχνολογία ασύρματων τηλεπικοινωνιών, καθώς και για ένα δίκτυο 5G.

Κατά το [54], η τεχνολογία 5G εφαρμόζεται σε συχνότητες χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ζώνης.

- Η συχνότητα χαμηλής ζώνης εκπέμπεται σε χαμηλότερη συχνότητα δηλαδή γύρω στο 1 GHz. Αυτή δίνει ευρεία κάλυψη με στόχο την παράκαμψη εμποδίων, ιδιαίτερα επωφελούνται οι τοποθεσίες μακροκυβελών και είναι κατάλληλη για IoT.
- Η συχνότητα μεσαίας ζώνης εκπέμπεται γύρω στα 1.6 GHz. Είναι χρήσιμη διότι υποστηρίζει υψηλότερες ταχύτητες σε σχέση με τις συχνότητες της χαμηλής ζώνης.
- Η συχνότητα υψηλής ζώνης εκπέμπεται σε συχνότητες μεγαλύτερες από 6 GHz.

ο

σ

η

Οι βέλτιστες συχνότητες που είναι κατάλληλες για την τεχνολογία 5G στην Ινδονησία είναι χαμηλής ζώνης στα 700 MHz, μεσαίας ζώνης στα 3.5 GHz και υψηλής ζώνης με συχνότητα 26 GHz και 28 GHz [55].

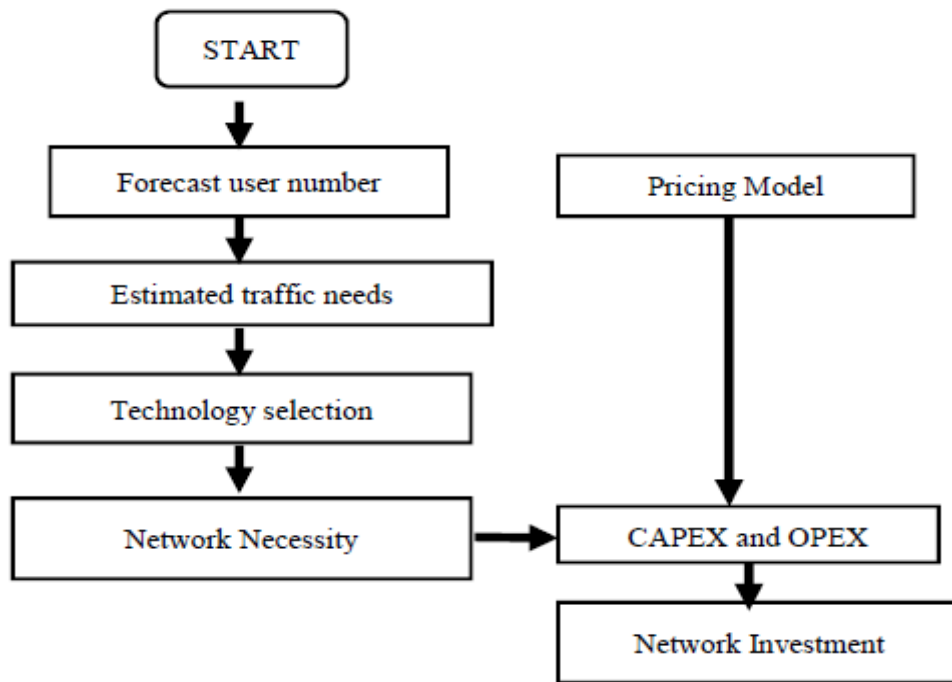
Τεχνο-οικονομικά χαρακτηριστικά στις κύριες πόλεις της Ινδονησίας

Η ανάπτυξη και αναβάθμιση του δικτύου 5G στην Ινδονησία αναλύεται σε τεχνικές και οικονομικές πτυχές. Το πρώτο περιλαμβάνει τον αριθμό των προβλεπόμενων συνδρομητών, την χωρητικότητα και την εκτίμηση του ρυθμού δεδομένων. Το δεύτερο περιλαμβάνει τις κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες ή CAPEX και OPEX. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν οι απαιτήσεις στην κίνηση δεδομένων και οι αντιμετώπιση προβλημάτων συμφόρησης [51]. Οι πόλεις που χρησιμοποιήθηκαν για μοντελοποίηση είναι η Jakarta, η Surabaya και η πόλη του Medan. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζεται ο πληθυσμός κάθε πόλης την χρονική περίοδο του 2017 με την Jakarta να είναι η πόλη με τον υψηλότερο πληθυσμό και αμέσως ακολουθεί η πόλη Surabaya και τέλος η πόλη Medan. [52].

Πίνακας 14: Μεγέθη και πληθυσμοί στις πόλεις Jakarta, Surabaya και Medan [56] [57] [58]

Περιοχή/Πόλη	Μέγεθος(Km²)	Πληθυσμός Κατοίκων
Jakarta	662.33	10.374.235
Surabaya	326.81	3.074.883
Medan	265.10	2.247.425

Η Εικόνα 28 απεικονίζει την μέθοδο του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, πρώτον προβλέπεται ο αριθμός των μελλοντικών συνδρομητών. Δεύτερον εκτιμούνται οι απαραίτητες ανάγκες σχετικά με την κίνηση του διαδικτύου, τρίτον το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιήθηκε και τέλος τις απαραίτητες ανάγκες σε εξοπλισμό δηλαδή σταθμούς βάσης. Επίσης το μοντέλο Bass εφαρμόζεται για την πρόβλεψη των συνδρομητών. Τέλος χρησιμοποιούνται οι τιμές CAPEX και OPEX για την κοστολόγηση των επενδύσεων με βάση αναφορών της εκάστοτε περιοχής. Το διάγραμμα ροής σχεδιάζεται ως εξής [52]:

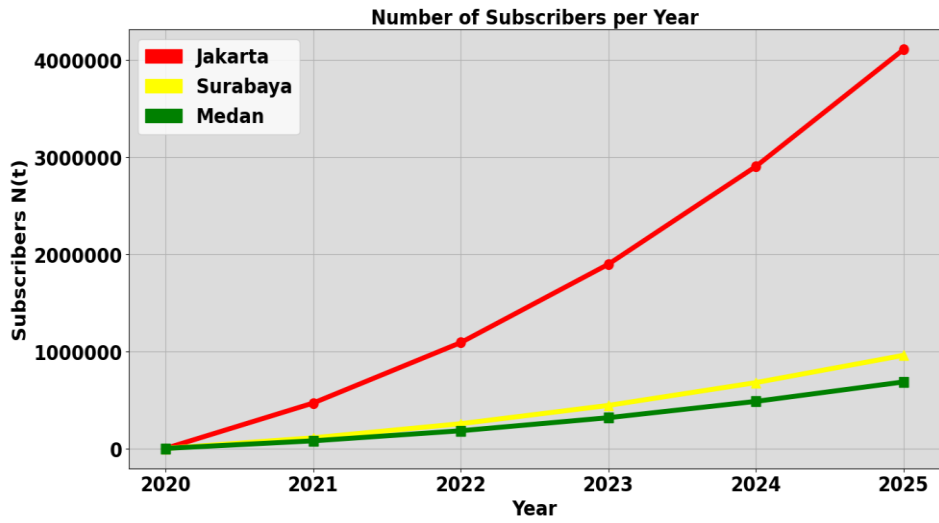


Εικόνα 28: Μέθοδος Αλγορίθμου [52].

Πρόβλεψη αριθμού συνδρομητών στην αγορά

Το μοντέλο Bass προβλέπει τον αριθμό των συνδρομητών μιας αγοράς [59], [18]. Συγκεκριμένα, ο πληθυσμός της Jakarta ανέρχεται στα 10.3 εκατομμύρια [56]. Όμως, εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχουν αρκετοί κάτοικοι που έχουν δύο αριθμούς στην κατοχή τους και σε συνδυασμό με τους κατοίκους των γύρων περιοχών η τιμή του M θέτεται σε 15 εκατομμύρια. Αντίστοιχα για τις πόλεις Surabaya και Medan οι τιμές του M ανέρχονται σε 5 εκατομμύρια και 2.5 εκατομμύρια κάτοικοι [57], [58].

Η Ινδονησία περιλαμβάνεται στην κατηγορία "Αναπτυσσόμενη Ασία" [59], και εφαρμόζοντας τον τύπο (4) με τις αντίστοιχες τιμές $p = 0.0267$ και $q = 0.3356$ [60]. Ακολουθεί η εικόνα 29 και ο Πίνακας 15 με τα αποτελέσματα.



Εικόνα 29: Αποτελέσματα πρόβλεψης για την αγορά τηλεπικοινωνιών από το 2020 έως το 2025 [52].

Πίνακας 15: Αποτελέσματα πρόβλεψης για την αγορά τηλεπικοινωνιών από το 2020 έως το 2025 [52].

N (t) J a k a r t a	0	467.620
N (t) K o t a S u r a b a y a	0	109.111
N (0	77.937

t) K o t a M e d a n		
---	--	--

3.2 Μοντέλο τιμολόγησης

Για την τιμολόγηση των 5G δικτύων είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός μοντέλου τιμολόγησης με στόχο την απόκτηση κέρδους. Κατά το [61] και όπως προαναφέρθηκε, το 89% των παρόχων χρησιμοποιούν το μοντέλο τιμολόγησης βάση όγκου και σύμφωνα με το [62] δεν υπήρχαν τα κατάλληλα έσοδα με κορύφωση του προβλήματος το 2015 όπου τα λειτουργικά έξοδα υπερβαίνουν τα έσοδα που εισπράττονταν από την πώληση των υπηρεσιών. Επίσης η τιμολόγηση αποτελεί βασικό κριτήριο για την κερδοφορία κατά το [63]. Τέλος ακολουθείται η υβριδική τιμολόγηση με κόστος 1.75 \$ ανά GB και χωρητικότητα

Επιλογή τεχνολογίας - Αναγκαιότητα δικτύου

Οι ζώνες συχνοτήτων 5G στην Ινδονησία είναι η συχνότητα χαμηλής ζώνης στα 700 ζώνης στα 3.5 GHz με εύρος ζώνης 400 MHz, 64 QAM και 256 QAM και συχνότητα υψηλής ζώνης στα 26 GHz / 28 GHz με εύρος ζώνης 400 MHz με 16 QAM, 64 QAM και 256 μοντέλο. Συνεπώς, για να γίνει η εκτίμηση του εύρους κάλυψης της περιοχής υπολογίζεται με προσέγγιση κύκλου, δηλαδή για να υπολογιστεί το ποσό την καλυπτόμενης περιοχής εφαρμόζεται ο τύπος $A = \pi r^2$, με το r να σημαίνει την ακτίνα του κύκλου και η συγκεκριμένη ποσότητα μετριέται σε τετραγωνικά χιλιόμετρα. Στην συνέχεια γίνονται κάποιες παραδοχές, όπως το εύρος κάλυψης του σταθμού βάσης μακροκυψελών 4G LTE-A (MaBS) με τρεις τομείς ανά πόλη είναι 0.57 km, ο σταθμός βάσης 5G mmW pico (PBS) έχει εύρος κάλυψης 0.02 km και σταθμός βάσης (metro) 5G mmW (MetBS - Metro Base Station) που

λειτουργεί με 3 τομείς έχει εύρος κάλυψης 0.1 km [65] [66]. Το σύστημα χωρητικότητας διατυπώθηκε ως εξής [67]:

- Το $N_{(site)}$ είναι ο αριθμός τοποθεσιών.
- Το $N_{(cell)}$ είναι ο αριθμός κυψελών.
- Το $Spectrum_{(eff)}$ είναι το φάσμα απόδοσης, για το οποίο όπως αναφέρεται στο LTE-κυμαίνεται στα 2.83 bps/Hz/κυψέλη [66] [69] και το εύρος ζώνης IEEE 802.11ac κυμαίνεται από 20.40, 80.60 MHz σε απόσταση 10 μέτρων και οι ταχύτητες ενδέχεται να φτάσουν τα 6933 Mbps [70]. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16 Ανάγκες Δικτύου Υπολογισμού [52].

Παράμετροι	BS κλάση			
	MaBS	MetBS	PBS	WiFi AP
	4G LTE-A	5G mmW	5G mmW	IEEE 802.11ac
Περιβάλλον	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά	Εσωτερικά
Εύρος (km ²)	0.57	0.1	0.02	0.01
Κάλυψη (km ²)	1.0211	0.0314	0.0013	0.0003
Τομείς	3	3	3	1
Εύρος Ζώνης (MHz)	40	400	400	160
Av. Cell SE(bps/Hz)	4.2	2.83	2.83	43.33
Av. Cell Cap.(Mbps)	168	1132	1132	6933
Av. Site Cap. (Mbps)	504	3396	3396	6933

3.4 Επένδυση δικτύου

=

Η στρατηγική που εφαρμόστηκε για την συνολική ζήτηση δικτύου υλοποιήθηκε χωρίζοντας περιοχές σε τρεις κατηγορίες: υψηλή που χρησιμοποιείται για προηγμένους υπολογισμούς, η μεσαία που αποτελεί το 60% του υψηλού και η χαμηλή που αποτελεί το 60% του μέσου (Gbps/km²). Ο πίνακας 17 απεικονίζει τις απαιτήσεις σε δεδομένα, σε BS και στο εύρος ζώνης που απαιτούνται για το CAPEX και το OPEX στην περιοχή της Jakarta για κάθε km² [52].

Πίνακας 17 Επενδύσεις και ανάγκες Δικτύου στη Jakarta/km² [52].

Παράμετροι	BS κλάση		
	MaBS	MetBS	PBS

*

		4G LTE-A	5G mmW	5G mmW
Περιβάλλον	Χαμηλή	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
	Μέτρια	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
	Υψηλή	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
Συνολική ζήτηση Gbps/km ²	Χαμηλή	6.34	6.34	6.34
	Μέτρια	10.56	10.56	10.56
	Υψηλή	17.60	17.60	17.60
Κάλυψη(km ²) ανά κυψέλη	Χαμηλή	1.0211	0.0314	0.0013
	Μέτρια	1.0211	0.0314	0.0013
	Υψηλή	1.0211	0.0314	0.0013
Συνολικό BS	Χαμηλή	13	2	2
	Μέτρια	21	4	4
	Υψηλή	35	6	6
Τομείς	Χαμηλή	3	3	3
	Μέτρια	3	3	3
	Υψηλή	3	3	3
Εύρος Ζώνης (MHz)	Χαμηλή	40	400	400
	Μέτρια	40	400	400
	Υψηλή	40	400	400
Average site capacity (Gbps)	Χαμηλή	0.504	3.396	3.396
	Μέτρια	0.504	3.396	3.396
	Υψηλή	0.504	3.396	3.396
Average site capacity (Mbps)	Χαμηλή	504	3396	3396
	Μέτρια	504	3396	3396
	Υψηλή	504	3396	3396
CAPEX (k\$)	Χαμηλή	120	25.4	7.9
	Μέτρια	120	25.4	7.9
	Υψηλή	120	25.4	7.9
OPEX (k\$)	Χαμηλή	30	7.4	2.3
	Μέτρια	30	7.4	2.3
	Υψηλή	30	7.4	2.3
Συνολικό CAPEX (k\$)	Χαμηλή	1560	50.80	15.80
	Μέτρια	2520	101.60	31.60
	Υψηλή	4200	152.40	47.40
Συνολικό OPEX (k\$)	Χαμηλή	390	14.80	4.60
	Μέτρια	630	29.60	9.20
	Υψηλή	1050	44.40	13.80

Η επένδυση δικτύου της πόλης Surabaya. Ο πίνακας 18 απεικονίζει τις απαιτήσεις σε δεδομένα, σε BS και στο εύρος ζώνης που απαιτούνται για το CAPEX και το OPEX στην περιοχή της πόλης Surabaya για κάθε km² [52].

Πίνακας 18 Επενδύσεις και ανάγκες Δικτύου στην πόλη Surabaya /km² [52].

Παράμετροι		BS κλάση		
		MaBS	MetBS	PBS
		4G LTE-A	5G mmW	5G mmW
Περιβάλλον	Χαμηλή	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά

	Μέτρια	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
	Υψηλή	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
Συνολική ζήτηση Gbps/km²	Χαμηλή	2.808	2.808	2.808
	Μέτρια	4.68	4.68	4.68
	Υψηλή	7.8	7.8	7.8
Κάλυψη(km²) ανά κυψέλη	Χαμηλή	1.021	0.031	0.001
	Μέτρια	1.021	0.031	0.001
	Υψηλή	1.021	0.031	0.001
Συνολικό BS	Χαμηλή	6	1	1
	Μέτρια	10	2	2
	Υψηλή	16	3	3
Τομείς	Χαμηλή	3	3	3
	Μέτρια	3	3	3
	Υψηλή	3	3	3
Εύρος Ζώνης (MHz)	Χαμηλή	40	400	400
	Μέτρια	40	400	400
	Υψηλή	40	400	400
Average site capacity (Gbps)	Χαμηλή	0.504	3.396	3.396
	Μέτρια	0.504	3.396	3.396
	Υψηλή	0.504	3.396	3.396
Average site capacity (Mbps)	Χαμηλή	504	3396	3396
	Μέτρια	504	3396	3396
	Υψηλή	504	3396	3396
CAPEX (k\$)	Χαμηλή	120	25.4	7.9
	Μέτρια	120	25.4	7.9
	Υψηλή	120	25.4	7.9
OPEX (k\$)	Χαμηλή	30	7.4	2.3
	Μέτρια	30	7.4	2.3
	Υψηλή	30	7.4	2.3
Συνολικό CAPEX (k\$)	Χαμηλή	720	25.40	7.90
	Μέτρια	1200	50.80	15.80
	Υψηλή	1920	76.20	23.70
Συνολικό OPEX (k\$)	Χαμηλή	180	7.40	2.30
	Μέτρια	300	14.80	4.60
	Υψηλή	480	22.20	6.90

Η επένδυση δικτύου στην πόλη Medan. Ο πίνακας 19 απεικονίζει τις απαιτήσεις σε δεδομένα, σε BS και στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιούνται για το CAPEX και το OPEX στην περιοχή της πόλης Medan για κάθε km² [52].

Πίνακας 19 Επενδύσεις και ανάγκες Δικτύου στην πόλη Medan/km² [52].

Παράμετροι		BS κλάση		
		MaBS	MetBS	PBS
		4G LTE-A	5G mmW	5G mmW
Περιβάλλον	Χαμηλή	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
	Μέτρια	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά

	Υψηλή	Εξωτερικά	Εξωτερικά	Εσωτερικά
Συνολική ζήτηση Gbps/km²	Χαμηλή	2.448	2.448	2.448
	Μέτρια	4.08	4.08	4.08
	Υψηλή	6.8	6.8	6.8
Κάλυψη(km²) ανά κυψέλη	Χαμηλή	1.0211	0.0314	0.0013
	Μέτρια	1.0211	0.0314	0.0013
	Υψηλή	1.0211	0.0314	0.0013
Συνολικό BS	Χαμηλή	5	1	1
	Μέτρια	9	2	2
	Υψηλή	14	3	3
Τομείς	Χαμηλή	3	3	3
	Μέτρια	3	3	3
	Υψηλή	3	3	3
Εύρος Ζώνης (MHz)	Χαμηλή	40	400	400
	Μέτρια	40	400	400
	Υψηλή	40	400	400
Average site capacity (Gbps)	Χαμηλή	0.504	3.396	3.396
	Μέτρια	0.504	3.396	3.396
	Υψηλή	0.504	3.396	3.396
Average site capacity (Mbps)	Χαμηλή	504	3396	3396
	Μέτρια	504	3396	3396
	Υψηλή	504	3396	3396
CAPEX (k\$)	Χαμηλή	120	25.4	7.9
	Μέτρια	120	25.4	7.9
	Υψηλή	120	25.4	7.9
OPEX (k\$)	Χαμηλή	30	7.4	2.3
	Μέτρια	30	7.4	2.3
	Υψηλή	30	7.4	2.3
Συνολικό CAPEX (k\$)	Χαμηλή	600	25.40	7.90
	Μέτρια	1080	50.80	15.80
	Υψηλή	1680	76.20	23.70
Συνολικό OPEX (k\$)	Χαμηλή	150	7.40	2.30
	Μέτρια	270	14.80	4.60
	Υψηλή	420	22.20	6.90

Κάθε μία από τις τρεις πόλεις της Ινδονησίας έχει διαφορετικές απαιτήσεις δικτύου, το οποίο επηρεάζει τις κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες. Η Jakarta είναι η πρώτη πόλη σε απαιτήσεις επενδύσεων 5G δικτύων και ακολουθούν οι πόλεις Surabaya και Με αυτό το υποκεφάλαιο η μοντελοποίηση αφορούσε έναν μόνο πάροχο κινητής τηλεφωνίας. Στην Ινδονησία όπως προαναφέρθηκε, επιλέχθηκαν τρεις κατηγορίες ζωνών συχνοτήτων: η συχνότητα χαμηλής ζώνης 700 MHz με εύρος ζώνης 40 MHz, η συχνότητα μεσαίου εύρους 3.5 GHz με εύρος ζώνης 400 MHz και η συχνότητα υψηλής ζώνης 26GHz/28GHz με εύρος ζώνης 400 MHz. Η Jakarta αποτελεί την πόλη με τις περισσότερες απαιτήσεις

δικτύου 5G με ζήτηση 17.6 Gbps/km², ακολουθούμενη από την πόλη Surabaya στα 7.8

Με βάση των αποτελεσμάτων που απεικονίζονται στους Πίνακες 17, 18 και 19 η Jakarta απαιτεί σε μοντέλα ανάπτυξης υψηλής ζήτησης 35 BS 4G LTE-A ανά km², 6 BS 5G ανά km² με εύρος ζώνης 400 MHz και 6 PBS ανά km², η πόλη Surabaya απαιτεί σε μοντέλα ανάπτυξης υψηλής ζήτησης 16 4G LTE-A BSs ανά km², 3 5G BSs ανά km² με εύρος ζώνης 400 MHz και 3 PBS ανά km² και η πόλη Medan απαιτεί σε μοντέλα ανάπτυξης υψηλής ζήτησης 14 4G LTE-A BS ανά km², 3 5G BS ανά km² με εύρος ζώνης 400 MHz και 3 PBS ανά km². Όσον αφορά την κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες της πόλης Jakarta χρειάζονται 4200 k\$ και 1050 k\$ ανά χιλιόμετρο, αντίστοιχα, με σκοπό την καταβολή του κόστους των 4G LTE-A μακροκυψελών BS όταν η ζήτηση κίνησης είναι υψηλή και οι σταθμοί βάσης 5G mmW BS χρειάζονται κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες των 152.4 k\$ και 44,4 k\$, αντίστοιχα όταν η ζήτηση κίνησης είναι υψηλή. Τα ανάλογα ποσά για την πόλη Surabaya, όταν η ζήτηση κίνησης είναι υψηλή, είναι: οι κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες των 1920 k\$ και των 480 k\$, αντίστοιχα για το 4G LTE-A ανά χιλιόμετρο και κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες των 76.2 k\$ και των 22.2 k\$, αντίστοιχα για το 5G mmW ανά χιλιόμετρο. Τέλος, για την πόλη Medan όταν η ζήτηση κίνησης είναι υψηλή τα ανάλογα ποσά είναι: οι κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες των 1680 k\$ και των 420 k\$, αντίστοιχα για το 4G LTE-A ανά χιλιόμετρο και κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες των 76.2 k\$ και των 22.2 k\$, αντίστοιχα για το 5G mmW

ν Συμπεράσματα

ά Στο Κεφάλαιο 4, μελετήθηκαν διεξοδικά διαφορετικές οικονομοτεχνικές μελέτες 5G δικτύων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετώνται και αναλύονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των οικονομοτεχνικών μελετών. Καταρχάς, όσον αφορά τις τεχνολογίες LoRaWAN, WiFi-HaLow, Sigfox και NB-IoT και τις στρατηγικές ανάπτυξης κυψελών θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι δύο πρώτες έχουν συνήθως κεραιές που εκπέμπουν προς όλες τις κατευθύνσεις, η τρίτη δεν περιέχει τομέα μέσα σε μια κυψέλη και η τέταρτη θεωρεί την κατηγοριοποιημένη κυψέλη που σημαίνει αύξηση του τομέα που αυξάνει την απόδοση κάλυψης. Η διαφοροποίηση αυτών των στρατηγικών έχει επιπτώσεις στην περιοχή κάλυψης, όπως αυτή αποτυπώθηκε στον Πίνακα 5. Από τον εν λόγω πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τεχνολογία Sigfox είναι καταλληλότερη για τη κάλυψη

δικτύωσης σε αγροτικές περιοχές, όπως και η τεχνολογία NB-IoT. Αναφορικά με την ανάλυση κόστους, όπως αυτή αποτυπώνεται στην Εικόνα 14, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το συνολικό κόστος CAPEX για την κατασκευή κυψέλης (Site Build) των προαναφερόμενων τεχνολογιών είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση της τεχνολογίας Sigfox (εκφρασμένο σε εκατομμύρια ευρώ) σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, ακολουθούμενο από την τεχνολογία NB-IoT και WiFi-HaLow. Αντίθετα, το μικρότερο συνολικό CAPEX κόστος για την κατασκευή κυψέλης το παρέχει η τεχνολογία LoRaWAN, που αποτελεί και την προτιμώμενη τεχνολογία στην προκειμένη περίπτωση. Όσον αφορά το συνολικό κόστος OPEX για χρηματοδοτική μίσθωση (leased), η τεχνολογία WiFi-HaLow έχει το υψηλότερο κόστος, ενώ η LoRaWAN έχει το μικρότερο. Επομένως, ένα συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι στην προκειμένη περίπτωση η προτιμώμενη τεχνολογία είναι LoRaWAN, καθότι παρέχει το μικρότερο συνολικό CAPEX και OPEX κόστος. Από την άλλη μεριά και όπως προκύπτει από τη μελέτη της Εικόνας 15, η τεχνολογία LoRaWAN έχει τις υψηλότερες απαιτήσεις κυψέλης (required number of cells). Επιπλέον, από τη σύγκριση των γραφικών παραστάσεων της Εικόνας 16, που δείχνει τις σχέσεις CAGR με το κόστος για την υπόθεση ενός παρόχου εκμετάλλευσης και εικάζεται ότι διαθέτει υφιστάμενες τοποθεσίες κυψελών για επαναχρησιμοποίηση και σύμφωνα με τον Πίνακα 7, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σχεδόν σε όλες τις στρατηγικές δημιουργίας κυψέλης και μίσθωσης (α, γ, δ), η τεχνολογία αποτελεί η δημιουργία μιας οικιακής κυψέλης και επιτυγχάνεται με το WiFi-HaLow, διότι μπορεί να επιτύχει χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης από τις άλλες στρατηγικές αρκεί το κόστος κατασκευής κυψέλης να είναι χαμηλότερο από τα υπόλοιπα κυψελοειδή συστήματα. Τέλος ένα παρόμοιο σενάριο παρεμφερές με σενάριο Greenfield όπως φαίνεται στην Εικόνα 17 και αφορά έναν νεοεισερχόμενο πάροχο που θα αναπτύξει ένα δίκτυο από την αρχή, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σχεδόν σε όλες τις στρατηγικές δημιουργίας κυψέλης και μίσθωσης, η τεχνολογία WiFi-HaLow διαθέτει το μικρότερο αρχικό συνολικό CAPEX και OPEX, εκτός από μία περίπτωση (γ) όπου το LoRaWAN υπερτερεί.

Όσον αφορά το χρονικό διάστημα δραστηριότητας συσκευής αναλογικά με το κόστος που απεικονίζεται στην Εικόνα 18, συμπεραίνεται ότι το χρονικό διάστημα λειτουργίας μιας συσκευής αυξάνεται εκθετικά όταν λειτουργεί σε χρονικό διάστημα λεπτών. Διαφορετικά δεν επηρεάζεται η λειτουργία κόστους. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη χωρητικότητα και τους μεγάλους χρόνους μετάδοσης και αφορά τα ακόλουθα κυψελοειδή συστήματα LoRaWAN, Sigfox και NB-IoT που τείνουν στον κορεσμό τους σε 10 και 5 λεπτά

αντίστοιχα. Αντίθετα, το WiFi-HaLow δεν ξεπερνάει τα όρια κόστους, διότι υποστηρίζει μεγάλη χωρητικότητα δεδομένων και μικρό χρόνο μετάδοσης μηνυμάτων και συνεπώς κυριαρχεί έναντι των άλλων κυψελοειδών συστημάτων. Επίσης στην Εικόνα 19 που απεικονίζεται το NPV χαμηλής έντασης κυκλοφορίας συμπεραίνεται ότι το Sigfox αποτελεί την κυψελοειδή τεχνολογία που έχει το χαμηλότερο κόστος στρατηγικής δημιουργίας κυψέλης και μίσθωσης. Επιπλέον από τον Πίνακα 6, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τεχνολογία

I
n
c
u
m
b
e
n
t

Είναι γεγονός ότι οι OMNs εξετάζουν τρόπους με τους οποίους η μετεγκατάσταση σε 5G δίκτυο θα αποφέρει κέρδη ή όχι. Αρχικά, σύμφωνα με την Εικόνα 20, που αφορά ένα και Greenfield προκύπτει ότι τα LoRaWAN, NB-IoT και Sigfox είναι οικονομικά αποδομότελο υψηλού επιπέδου στο οποίο περιγράφονται οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται αν αξίζει να γίνει η επένδυση σε 5G δίκτυα. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην αξία της τεχνολογίας επικοινωνιών IoT είναι ανάλογο της πυκνότητάς του αριθμού χρηστών που υποστηρίζεται από την εκάστοτε τεχνολογία. Σχετικά με την πρόβλεψη του αριθμού χρηστών έχει επιλεχθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης Bass, το οποίο εξηγεί καλά το σύστημα πρόβλεψης της αγοράς για τους τύπους προϊόντων ή υπηρεσιών. Από τον τύπο (4) και την Εικόνα 21 και θέτοντας τους κατάλληλους συντελεστές στον τύπο (4) προκύπτει ότι ο αριθμός των adopters μέχρι το 2021 θα παραμείνει χαμηλός και μετά θα αυξηθούν εκθετικά μέχρι το 2025.

Το churn rate ή αλλιώς ρυθμός μετακίνησης από πάροχο σε πάροχο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό χαμένων και νέων εσόδων. Επίσης ο ρυθμός μετακίνησης από πάροχο σε πάροχο πρέπει να είναι της τάξης του [4%, 10%] οπότε σύμφωνα με την Εικόνα 22 συμπεραίνεται ότι όταν αποχωρεί ένας χρήστης πέρα από τα μελλοντικά έσοδα που χάνονται, δαπανώνται επιπλέον και πόροι που αποκτήθηκαν για τις ανάγκες της επένδυσης.

Σχετικά με το μοντέλο τιμολόγησης στην παρούσα κατάσταση χρησιμοποιείται μια στρατηγική τιμολόγησης volume-based, η οποία δεν είναι αποδοτική για το δίκτυο κινητής

τηλεφωνίας 5G και σύμφωνα με την Εικόνα 23 δεν είναι κερδοφόρα. Γι' αυτό το λόγο διαμορφώθηκε μια υβριδική στρατηγική τιμολόγησης που αποτελεί συνδυασμό βάσει όγκου και αξίας και αποσκοπεί στην κερδοφορία. Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση για τους

O

M

N

s

είναι η εύρεση της βέλτιστης τιμής υπηρεσιών η οποία για να επιτευχθεί έχουν γίνει δύο προσεγγίσεις και είναι η διαφάνεια και η ελαστικότητα τιμής ζήτησης PED. Από τον Πίνακα 8, που αφορά το υβριδικό μοντέλο τιμολόγησης που χρησιμοποιούν τα περιεχόμενα χρηστών, τους τύπους (6) και (7) που είναι η ελαστικότητα τιμής του όγκου $E_V(P)$ και ο όγκος ελαστικότητας εσόδων $E_R(V)$, αντίστοιχα, από την εικόνα 24 που δείχνει την προβλεπόμενη τιμή και τον όγκο κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης 5G χρησιμοποιώντας $E_V(P)$ και $E_R(V)$ συμπεραίνεται ότι αν μειωθεί η τιμή των υπηρεσιών τότε αυξάνεται η ποσότητα λόγω χαμηλής ζήτησης από τους χρήστες. Συνεπώς η ιδανική λύση είναι όταν το PED ι-

σούται με 1 όπου και ο χρήστης αλλά και ο πάροχος είναι κερδισμένοι όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Τέλος από τον Πίνακα 9 που αφορά την επίδραση της αξίας και του όγκου στο Όσον αφορά την πρόβλεψη κόστους έχουν αναπτυχθεί 2 σενάρια. Το 1^ο σενάριο α- κέρδος για 5G Mobile Broadband σε συνδυασμό με τους τύπους (6) και (7) προκύπτει το φορά τη δημιουργία νέας τεχνολογίας RAT με αντικατάσταση των προηγούμενων BS εξο- συμπεράσμα ότι οι τεχνολογίες 5G είναι πιο ευεργετικές από τις 4G, λόγω του χαμηλού πλισμών και το 2^ο σενάριο αφορά την προσθήκη νέων φορέων και εξοπλισμών στο ήδη κόστους και της αύξησης της μέσης κατανάλωσης δεδομένων.

υπάρχον RAT με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση του προηγούμενου εξοπλισμού BS σε συνδυασμό με τον νέο εξοπλισμό και με μια αναβάθμιση λογισμικού. Η εικόνα 26 που αφορά τις προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX για BS / AP διαφορετικών RAT που σχετίζονται με νέα κυψέλη (σενάριο 1) και την εικόνα 27 που αφορά τις προβλεπόμενες τιμές CAPEX και OPEX για επαναχρησιμοποίηση κυψελών (σενάριο 2), τον τύπο (8) που αφορά τις συνολικές δαπάνες και τον Πίνακα 10 στον οποίο αποτυπώνονται το συνολικό μειωμένο κόστος συμπεραίνεται ότι και για τις 2 εικόνες το σενάριο 2 είναι πιο αποτελε- σματικό λόγω χαμηλότερου CAPEX, όμως για το OPEX και τα 2 σενάρια δεν παρουσιάζουν ουσιαστική διαφορά.

Είναι γνωστό ότι η ζήτηση κίνησης δικτύου είναι ανάλογη της πυκνότητας του πλη- θυσμού, αφού ο όγκος δεδομένων ανά συνδρομητή δεν εξαρτάται από το σενάριο ανάπτυ- ξης. Σύμφωνα με την έρευνα που προαναφέρθηκε και αφορούσε το μοντέλο κυκλοφορίας με σκοπό την εκτίμηση της ζήτησης κυκλοφορίας για 1 km² στη Σαγκάη και συνδυάζοντας

τον τύπο (9) με τους κατάλληλους συντελεστές και το αποτέλεσμα της εικόνας 21 αλλά και το αποτέλεσμα που αποτυπώνεται στον Πίνακα 11, προκύπτει ότι το επίπεδο ζήτησης που αντιστοιχεί στο μέσο όρο των ποσοστών δεδομένων των χρηστών είναι 2.59 Mbps, το οποίο λήφθηκε κατά τη διάρκεια των 8 ωρών εργασίας. Όμως από τον τύπο (6) προκύπτει

ό
τ
ι Βασικό ζήτημα αποτελεί και η μοντελοποίηση επενδύσεων δικτύου σε εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια για την επίτευξη του ρυθμού 20 Gbps σε 1 km².

Τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι το κόστος, η κάλυψη και η χωρητικότητα για κάθε κατηγορία BS. Ωστόσο, για όλα αυτά τα σενάρια υπάρχουν απώλειες διείσδυσης λόγω εμποδίου και για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα έχουν προταθεί δύο δυνατοί τρόποι αντιμετώπισης. Επίσης από τον Πίνακα 12 που αφορά το CAPEX και την χωρητικότητα για FBS και WI-FI IEEE 802.11AC και το από τον Πίνακα 13 που αφορά το CAPEX και χωρητικότητα για τοποθεσίες μακροκυψελών με συνάθροιση φορέων και διείσδυσης απώλειας τοίχους συνοψίζονται οι διαφορετικές στρατηγικές με τα ανάλογα κόστη, την κάλυψη και την χωρητικότητα. Συνεπώς από τους Πίνακες 12 και 13 προκύπτει ότι η ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού νέων τοποθεσιών κυψέλης είναι κοστοβόρα σε αντίθεση με την επαναχρησιμοποίηση των υπαρχόντων τοποθεσιών κυψέλης που είναι λιγότερο πολυδάπανη ακόμη και αν οι τοποθεσίες κυψελών είναι εξοπλισμένοι με νέο RAT. Επιπλέον η στρατηγική 5G mmW PBS παρέχει το χαμηλότερο κόστος αλλά εμφανίζει περιορισμό ως προς την κάλυψη του δικτύου με αποτέλεσμα αν γίνει επέκταση του δικτύου θα έχει υψηλό συνολικό CAPEX. Επιπρόσθετα, πιο αποδοτική στρατηγική με μικρή πυκνότητα σταθμών βάσης είναι η χρήση της λειτουργικότητας συνάθροισης φορέα του LTE- αποτελεί μια πιο οικονομική λύση σε σχέση με τα σενάρια ανάπτυξης νέων τοποθεσιών κυψέλης και η ανάπτυξη FBS και Wi-Fi IEEE 802.11ac γίνεται οικονομικά αποτελεσματικότερη όταν η ανάπτυξη FBS μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό χρηστών. Τέλος με όσα προαναφέρθηκαν προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κύρια έλλειψη του 5G δικτύου είναι ότι η περιορισμένη κάλυψη που πηγάζει από την χρήση μικροκυψελών όπως femtocells, picocells που αναπτύσσονται με σύστημα 5G mmW και Wi-Fi και η έλλειψη χωρητικότητας που περιορίζεται από τις τοποθεσίες μακροκυψελών και επιλύεται με τον συνδυασμό των τοποθεσιών μακροκυψελών ή MaBS και των femtocells, 5G mmW PBS ή Wi-Fi IEEE m και κάλυψης.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Ινδονησία με σκοπό την αναβάθμιση του δικτύου σε 5G περιλαμβάνει τις εξής πόλεις Jakarta, Surabaya και Medan όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 14 όπου και αναφέρονται το μέγεθος της κάθε πόλης και ο αριθμός των κατοίκων τους. Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιώντας το Bass μοντέλο που προβλέπει τον αριθμό των χρηστών μιας αγοράς σε συνδυασμό με την Εικόνα 28 που απεικονίζει μια μέθοδο ενός αλγορίθμου και εφαρμόζοντας τους κατάλληλους συντελεστές στον τύπο (4), προκύπτουν τα αποτελέσματα στην Εικόνα 29 και συνοψίζονται στον Πίνακα 15, όπου παρατηρείται η πρόβλεψη του αριθμού των συνδρομητών να αυξάνεται έως το 2025 με κυρίαρχη την πόλη Jakarta. Επίσης οι διαφορετικές στρατηγικές που προαναφέρθηκαν για την ανάπτυξη 5G δικτύου, οι οποίες είναι MaBS, MetBS, PBS και WiFi AP και συνοψίζονται στον Πίνακα 16, ο οποίος δείχνει τον υπολογισμό των αναγκών του δικτύου και προκύπτουν από την εφαρμογή του τύπου (10), θέτοντας τους συντελεστές που προαναφέρθηκαν. Ο σχεδιασμός του δικτύου πραγματοποιήθηκε χωρίζοντας περιοχές σε τρεις κατηγορίες απαιτήσεις δικτύου βάση της συνολικής ζήτησης, σε υψηλή, μέτρια και χαμηλή. Συνεπώς για κάθε πόλη οι Πίνακες 17,18 και 19 δείχνουν τις ανάγκες δεδομένων, τις ανάγκες BS και το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του CAPEX και του OPEX. Επομένως η Jakarta αποτελεί την κυρίαρχη πόλη σε σχέση με τις υπόλοιπες στις ανάγκες δικτύου και στις επενδύσεις που αφορούν την ανάπτυξη 5G δικτύων.

Μελλοντικές εξελίξεις

Η ολοένα αυξανόμενη υπηρεσίες που βασίζονται σε μηχανές δημιουργούν πολλά προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης. Πρωταρχικό ζήτημα αποτελεί η δημιουργία ομάδας χαμηλής καθυστέρησης χρόνου (low-latency group) με τις συσκευές MTC που επιβάλλεται να είναι σε κατάσταση ενεργοποίησης, δηλαδή από κατάσταση αδράνειας σε συνδεδεμένη λειτουργία με σκοπό την λήψη πολλαπλών δεδομένων. Συνεπώς, πριν ξεκινήσει η μετάδοση δεδομένων ο πελάτης οφείλει να εντοπίσει τα μηχανήματα στην ομάδα πολλαπλών διανομέων. Επίσης ο σχεδιασμός των διαδικασιών ομαδικής σελιδοποίησης σε συστήματα γίνεται με στόχο την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συσκευών που βρίσκο-

νται ταυτόχρονα σε κατάσταση ενεργοποίησης διότι προκύπτουν θετικές συνέπειες στην επιβάρυνση ελέγχου (control overhead) και στην καθυστέρηση εφαρμογών (latency). Επιπλέον ζήτημα μείζονος σημασίας αποτελεί το γεγονός ότι οι εφαρμογές MTC επιτρέπουν την μετάδοση λίγων byte με στόχο την μείωση της ποσότητας πληροφοριών ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών και του δικτύου. Τέλος, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται δεν έχουν υψηλή επεξεργαστική δύναμη με αποτέλεσμα οι επικοινωνίες θηκαν υπάρχει καθυστέρηση σχηματισμού ομάδας [86].

Αρκετές αναφορές υποστηρίζουν ότι η εκμετάλλευση συνδέσμων 3GPP και μη θεωρούν ότι η μονάδα που είναι η υπεύθυνη για την κατανομή πόρων είναι γενικά ο σταθμός βάσης διότι ενδέχεται να γνωρίζει πληροφορίες που σχετίζονται με τις συνθήκες του καναλιού και τις συνδέσεις μικρής εμβέλειας που αφορούν τα μέλη μιας ομάδας. Θα ήταν λοιπόν προτιμητέο να δοθεί κατάλληλη σημασία στη μελλοντική έρευνα για τον έλεγχο των μηνυμάτων με στόχο την ανακάλυψη κοντινών συσκευών. Βασικό μέλημα είναι ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο γίνονται οι διαγνωστικοί έλεγχοι από τον σταθμό βάσης. Είναι γνωστό ότι κάθε τερματικό εκτιμά την ποιότητα σύνδεσης με κοντινές συσκευές και μεταδίδει αυτές τις πληροφορίες στη μονάδα διαχείρισης πόρων. Όμως για να δοθούν οι κατάλληλες λύσεις στην περίπτωση μεγάλων ομάδων πολλαπλών διανομέων (multicast φαινόμενα συμφόρησης στο σταθμό βάσης που αφορά 5G δίκτυα. Επιπλέον, η απόδοση των μηνυμάτων ελέγχου που αποστέλλονται μεταξύ συσκευών καθορίζεται από την κυκλοφορία τους στις συσκευές MTC και εκτιμάται με βάση την καθυστέρηση και την κατανάλωση ενέργειας. Τα προαναφερθέντα ζητήματα επιδεινώνονται στην περίπτωση συνδέσεων μικρής εμβέλειας 3GPP. Τα επισημασμένα προβλήματα δεν βρίσκουν ακόμη απαντήσεις στη βιβλιογραφία. Επομένως, είναι επιτακτική ανάγκη να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε αυτά τα ζητήματα ώστε να υπάρξει αποτελεσματική λύση που αφορά την ενισχυμένη πολλαπλή διανομή. Ακόμη μία σημαντική ερευνητική ανάγκη αναφέρεται στις επικοινωνίες χαμηλής ενέργειας και με τη διαδικασία επιλογής ρελέ. Συγκεκριμένα, αρκετές έρευνες εστιάζουν στις συνθήκες καναλιού αλλά δεν δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην κατάσταση του buffer, σε τι επίπεδο βρίσκεται η μπαταρίας και τη θέση των κόμβων, τα οποία με την σειρά τους συμβάλλουν στην ενίσχυση των διαδικασιών επιλογής/ενημέρωσης ρελέ 5G. Τέλος, η επιλογή ρελέ γίνεται από τη θέση της συσκευής με σκοπό να επιτρέψει υπηρεσίες πολλαπλής διανομής βασισμένες στην τοποθεσία [86].

Ανοιχτές ερευνητικές προκλήσεις: Για να υιοθετηθεί το 5G I-IoT πρέπει πρώτα να διεκπεραιωθούν προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια, την ιδιωτική ζωή και την εμπιστοσύνη. Αναλυτικότερα η συγχώνευση και εξόρυξη δεδομένων που αφορά το 5G I-δεδομένων [87], συνεπώς η εμπιστοσύνη αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Είναι πρέπον να αναφερθεί ότι δεν λαμβάνονται οι ανάλογες προφυλάξεις στις συσκευές και στους αισθητήρες και σε συνδυασμό με την ασύρματη μετάδοση δεδομένων προκύπτουν θέματα ασφαλείας. Για αυτό το λόγο 5G I-IoT είναι μια υπηρεσία διαδικτύου με γνώμονα το ανθρώπινο συμφέρον και είναι πρέπον να εξασφαλισθεί το απόρρητο και οι ασφάλεια αυτών [86].

Μελλοντικές κατευθύνσεις για την έρευνα: Οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις κατηγοριοποιούνται σε δύο πτυχές: τη σύντηξη πληροφοριών (information fusion) και την βαθιά ενισχυτική μάθηση (deep reinforcement learning). Με την χρήση διάφορων συσκευών και αισθητήρων παράγονται τεράστια ομοιογενή και ετερογενή δεδομένα, τα οποία είναι μοναδικά. Στόχος είναι η πλήρη αξιοποίηση των πόρων που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη των βασικότερων πληροφοριών, την απόκτηση υψηλής ποιότητας και την επεκτασιμότητα των δεδομένων. Για αυτό το λόγο η τεχνολογία συμπίεσης πληροφοριών πολλαπλών τρόπων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον επεξεργαστή αντικειμένων για την επιτυχή εξαγωγή πληροφοριών. Τέλος, η βαθιά ενισχυτική μάθηση είναι μια νέα μέθοδος που σε συνδυασμό με την μάθηση σε βάθος να επιτρέψει τον επεξεργαστή να μαθαίνει χρήσιμες πληροφορίες γρήγορα και να τις στέλνει στον επεξεργαστή αντικειμένων. Στο μέλλον, η ενισχυτική μάθηση θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη στον επεξεργαστή αντικειμένων, διότι με αυτόν τον τρόπο και ανάλογα το περιβάλλον να μαθαίνει αυτόματα το ζητούμενο περιεχόμενο [86].

Μια επιπλέον μελλοντική κατεύθυνση για έρευνα αποτελεί το Non-Orthogonal mul-

Η εφαρμογή ασύρματης μεταφοράς ενέργειας στο NOMA

Το κίνητρο για την εφαρμογή ταυτόχρονης ασύρματης μεταφοράς πληροφοριών και ισχύος Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) ομαδοποιείται σε συνδυασμό με τα ακόλουθα [89], [90], [91] και συνδυάζεται με το συνεργατικό NOMA που αναφέρεται στο [92]. Ένα συνεργατικό NOMA συμβάλλει ενεργά στον αδύναμο χρήστη με εξασθενημένες συνθήκες καναλιού χρησιμοποιώντας τον ισχυρό χρήστη ως ρελέ.

Όμως, αυτό επηρεάζει τον ισχυρό χρήστη διότι δεν είναι υποχρεωμένος να εκτελεστεί ως ρελέ, αφού καταναλώνεται η δική του ενέργεια με αρνητική συνέπεια στην μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του. Για αυτό το λόγο το SWIPT επιτρέπει τον ισχυρό χρήστη να συλλέξει ενέργεια από τα σήματα που στέλνονται από το BS με σκοπό την συλλογή ενέργειας ώστε να τροφοδοτήσει τη μετάδοση του ρελέ. Ως αποτέλεσμα, ο ισχυρός χρήστης θα επωφελείται από την εκτέλεση αναμετάδοσης που σκοπό έχει την παροχή βοήθειας στον ασθενή χρήστη. Με βάση την ιδέα του [92] και την εφαρμογή της στο [93] διερευνάται ο σχεδιασμός πομποδεκτών για το συνεργατικό SWIPT-NOMA. Ο χαρακτηρισμός της περιοχής επιτεύξιμου ποσοστού ασύρματου NOMA με υποβοηθούμενη μεταφορά ενέργειας αναφέρεται στο [94]. Ο αντίκτυπος της επιλογής χρήστη και της επιλογής κεραίας στο συνεργατικό SWIPT-NOMA μελετάται στα [95] και [96], αντίστοιχα.

Το SWIPT δεν εφαρμόζεται μόνο στο συνεργατικό NOMA, αλλά είναι χρήσιμο και για άλλα σενάρια επικοινωνίας NOMA. Για παράδειγμα, στα [97], [98], [99] το SWIPT εφαρμόζεται για μετάδοση ζεύξης NOMA με σκοπό την συλλογή ενέργειας από τα BSs και την μετάδοση των πληροφοριών στους BSs ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας την αρχική NOMA. Η κατανομή πόρων για αυτήν τη μορφή μετάδοσης SWIPT-NOMA ανερχόμενης ζεύξης μελετάται στο [100], όπου η κατανομή ισχύος και η διάρκεια ισχύος και μεταφοράς πληροφοριών έχουν σχεδιαστεί από κοινού για να αντιμετωπίσουν το σχεδόν δύσκολο αποτέλεσμα. Τέλος, τα περισσότερα υπάρχοντα σχήματα SWIPT-NOMA βασίζονται σε διάφορες ιδεολογικές παραδοχές και στον αντίκτυπο πρακτικών περιορισμών όπως αστοχία υλικού, η μη γραμμική συλλογή ενέργειας, η κατανάλωση ενέργειας κυκλώματος και η απόδοση του SWIPT-NOMA που δεν έχει διερευνηθεί ακόμα [88].

Ο συνδυασμός NOMA και CRN

Η εφαρμογή του CRN μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των πολιτικών κατανομής ισχύος ώστε να εγγυηθεί αυστηρά τις απαιτήσεις QoS των χρηστών εφαρμογή του NOMA επηρεάζει αρκετά το CRN. Για παράδειγμα, στο [104] για να αναβαθμιστεί η συνδεσιμότητα των δευτερευόντων δικτύων το NOMA εφαρμόζεται σε ευρείας κλίμακας υποστρώματα CRN. Αντίθετα από την πρακτική εφαρμογή του NOMA σε συμβατικά ασύρματα δίκτυα, η ισχύς των σημάτων επικάλυψης CR των χρηστών NOMA είναι αναγκαίος ο περιορισμός τους για την αποφυγή της υπερβολικής παρέμβασης στους πρωτεύοντες δέκτες. Σύμφωνα με το [105], ο δευτερεύοντας πομπός χρησιμοποιεί το

N
O
M
A

και υποστηρίζει δύο λειτουργίες, οι οποίες αφορούν την παραδώσει πληροφοριών στους δευτερεύοντες δέκτες και το άλλο να ενεργήσει ως ρελέ βοηθώντας τους πρωτεύοντες δέκτες. Τέλος σχετικά με το συνδυασμό NOMA και CRN εξακολουθείτε να υπάρχει εξάρτηση σε μεγάλο βαθμό στις τοπολογίες δικτύου και απαιτείται περισσότερη ερευνητική προσπάθεια και μελέτες τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης διεξοδικά ιδιαίτερα προσοχή κατά την ανάπτυξη των NOMA σε θέματα ασφάλειας. Ένας σημαντικός κίνδυνος ασφάλειας με το NOMA είναι ότι για να εκτελεστεί το Successive Interference Cancellation (SIC), ένας χρήστης πρέπει να είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει το μήνυμα του άλλου χρήστη. Στη σημερινή εποχή στα συστήματα τηλεπικοινωνιών η ασφάλεια παρέχεται με τεχνικές κρυπτογράφησης. Όμως ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση του NOMA είναι χρήσιμη για τη βελτίωση της ασφάλειας μετάδοσης, ιδιαίτερα στους ακόλουθους δύο τύπους σεναρίων [88]:

- Το πρώτο αφορά εξωτερικές υποκλοπές και συγκεκριμένα το NOMA συνδυάζεται με τη φυσική ασφάλεια στρώματος Physical Layer Security (PLS) [106], [107], σχεδιαστεί σύμφωνα με τις νόμιμες συνθήκες καναλιού των χρηστών, που σημαίνει ότι το SIC όταν δέχεται υποκλοπή από παραβατικούς χρήστες ενδέχεται να αποτύχει και συνεπώς η υποκλοπή προλαμβάνεται αποτελεσματικά.
- Το δεύτερο αφορά πιθανούς παραβατικούς χρήστες NOMA και ο τρόπος αποφυγής υποκλοπής φαίνεται στο [110]. Συγκεκριμένα, το NOMA χρησιμοποιείται στο [110] για την ταυτόχρονη αποστολή μηνυμάτων πολλαπλής διανομής και unicast. Επίσης το Beamforming στο σταθμό βάσης έχει σχεδιαστεί προσεκτικά για να αυξήσει τεχνητά τη διαφορά μεταξύ των δύο τύπων συνθηκών καναλιού των χρηστών, κάτι που βοηθά στην αύξηση του απορρήτου.

Ο συνδυασμός PLS και NOMA αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό τομέα και απαιτείται περισσότερη ερευνητική προσπάθεια για την ανάπτυξη συστημάτων χαμηλής πολυπλοκότητας με στόχο την αύξηση ασφάλειας στο NOMA.

Εφαρμογές του NOMA σε άλλες επικοινωνίες 5G

Το NOMA έχει αποδειχθεί ότι είναι συμβατό και με άλλες τεχνολογικές επικοινωνίες 5G. Για παράδειγμα, παίζει σημαντικό ρόλο στα 5G δίκτυα η ετερογενής αρχιτεκτονική δικτύου με στόχο οι σταθμοί βάσης μακροκυψελών και μικροκυψελών να συνεργαστούν για την κοινή χρήση φάσματος. Τα οφέλη του NOMA για ετερογενή δίκτυα έχουν καταδειχθεί σε [111], [112], [113], [114], καθώς περισσότεροι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μια μικρή κυψέλη εκμεταλλευόμενοι το NOMA. Στα [115], [116], [117], [118], μελετώνται οι εφαρμογές NOMA σε επικοινωνίες μεταξύ machine-to-machine (M2M), εξαιρετικά πυκνών δικτύων Ultra-Dence Networks (UDN) και μαζικών επικοινωνιών τύπου μηχανής να διαχειριστεί την μαζική συνδεσιμότητα και τη λειτουργικότητα IoT του 5G. Τέλος η προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου αποτελεί μια βασική τεχνική που έχει αναγνωριστεί ως ένας φασματικά αποτελεσματικός τρόπος παράδοσης περιεχομένου στους χρήστες [88],

Αναδυόμενες εφαρμογές NOMA πέραν του 5G

Η τεχνολογία NOMA είναι γενικευμένη και η εφαρμογή της δεν περιορίζεται σε κυψελοειδή δίκτυα. Το NOMA έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για τηλεοπτικές εκπομπές και έχει συμπεριληφθεί στο πρότυπο τηλεοπτικής επόμενης γενιάς [120]. Επιπλέον, η ερευνητική κοινότητα Visible Light Communications (VLC) έχει αρχίσει να δείχνει ενδιαφέρον στο NOMA σε συστήματα VLC είναι επωφελής για την υποστήριξη περισσότερων χρηστών και το γεγονός ότι το VLC προσφέρει υψηλό SNR είναι ευεργετικό για την εφαρμογή του μεγάλο στα συστήματα SNR. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι το NOMA-VLC αποδίδει καλύτερα από το OMA-VLC δόθηκε και η κατάλληλη ερευνητική προσπάθεια και στο MIMO-VLC. Τα κανάλια VLC είναι διαφορετικά από τα συμβατικά κανάλια εξασθένισης ραδιοσυχνοτήτων και υπάρχει έντονος συσχετισμός με τα κανάλια των χρηστών VLC. Όπως υποδεικνύεται από το κριτήριο υποβάθμισης στο [126], η χρήση του NOMA που εφαρμόζεται σε έντονα συσχετισμένα κανάλια προσφέρει απόδοση κοντά στη βέλτιστη απόδοση Density Parity Check (DPC). Επομένως, μια πολλά υποσχόμενη μελλοντική κατεύθυνση στο NOMA-VLC είναι η εφαρμογή NOMA στο σχεδιασμό της προ-κωδικοποίησης και του beamforming VLC. Άλλες σημαντικές εφαρμογές του NOMA πέραν του 5G περιλαμβάνουν ολοκληρωμένα επίγεια-δορυφορικά δίκτυα [127], Additive Links On-line

H
a
w
a
i
i
A
r
e
a

βασισμένα δίκτυα τυχαίας πρόσβασης [[128](#)] και δίκτυα οχήματος ad-hoc [[88](#)],

Βιβλιογραφία

1. O. Eluwole et. al, “From 1G to 5G, What Next?”, IAENG International Journal of Computer Science, 45:3, IJCS_45_3_06.
2. Heikki Karjaluoto, “An Investigation of Third Generation (3G) Mobile Technologies and Services”, October 2006.
3. Afaq H. Khan, “4G as a Next Generation Wireless Network”, International Conference on Future Computer and Communication, April 2009.
4. Atul Garg, “Digital Society from 1G to 5G: A Comparative Study”, Chitkara University, February 2014.
5. O. Olusanya, “The comparison of time division multiple access (TDMA) (global system for mobile communication, GSM) and wideband-code division multiple access (W-CDMA) (third generation, 3G) system based on their modulation techniques”, July 2014.
6. <https://www.online-sciences.com/technology/2g-technology-uses-features-advantages-and-disadvantages/>.
7. A. Kaloxylou et. al. “3G Network & Service Provision Architecture Evolutions”, January 2003.
8. Sassan Ahmadi, “Mobile WiMAX, A Systems Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology”, 4th November 2010.
9. T. Dahariya et. al, “Study of 5G Technology”, International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology (IJARTET) Vol. 2, Issue 4, April 2015.
10. Bram Naudts et. al, “Techno-economic analysis of software defined networking as architecture for the virtualization of a mobile network”, 2012.
11. Bouras, Christos et al. (Sept. 2018). "Techno-economic analysis of MIMO & DAS in 5G". In: 11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2018). Ed. by Dusan Maga. Vol. IFIP eCollection-3. Wireless and Mobile Networking Conference. Prague, Czech Republic, pp. 73– 80. URL: <https://hal.inria.fr/hal-01995438>.
12. D. Sinh, “The Challenges of Applying SDN/NFV for 5G & IoT”, Conference Paper, August 2017.
13. W. Ejaz et. al, “Internet of Things (IoT) in 5G Wireless Communications”, Article in IEEE Access January 2016.
14. C. Patel, M. Yavuz and S. Nanda, "Femtocells [Industry Perspectives]," in IEEE Wireless Communications, vol. 17, no. 5, pp. 6-7, October 2010, doi: 10.1109/MWC.2010.5601950.

15. R. Nossenson, "Long-Term Evolution Network Architecture", Israel, 2010
16. Popescu, Alexandru & Yao, Yong & Fiedler, Markus & Popescu, Adrian. (2013). "Communication Mechanisms for Cognitive Radio Networks." 2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2013. 10.1109/PerComW.2013.6529536.
17. A. , Mohammed et. al., (2020). "Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions. Symmetry". 12. 676. 10.3390/sym12040676.
18. Smail, G., and Weijia, J. (2017). Techno-economic analysis and prediction for the deployment of 5G mobile network. Proceedings of the 2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks, ICIN 2017, (2015), 9–16. <https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899243>.
19. Shanghai Population; <http://worldpopulationreview.com/worldcities/shanghai-population> (2016).
20. 82% of Chinese Have Mobile Phones, Some Provinces Have More Mobiles Than People; www.tchinasia.com/82-chinas-13-billion-people-mobile-phones-provinces-mobiles-people
21. Marco. N, Roland. K, Kate. G, Stuart. T, Bernhard. D, Jaak. D, Richard. M, Thomas. R, Praveen. D; Cisco white paper "Rethinking Flat Rate Pricing for Broadband Services".
22. Ericsson Consumer Insight Summary Report ;"How smarter management and charging of mobile internet can enhance the consumer experience?" Smarter Mobile Broadband (2012).
23. Book "Smart Pricing" by Jagmohan Raju, Z. John Zhang /Wharton School Publishing/ (2010).
24. Book "Value Merchants: Demonstrating and Documenting Superior Value in Business Markets Hardcover" by James. A, Nirmalya.K, James.N (2008).
25. Karl-Heinz. S, Andrea. M; economic report "The Value before Volume pricing strategy" (2015).
26. GREGER.B; Ericsson business case mobile broadband "Don't worry—Mobile broadband is profitable" (2009).
27. Johansson. K, "Cost Effective Deployment Strategies for Heterogeneous Wireless Networks", Doctoral Dissertation. The Royal Institute of Technology, Stockholm (2007).
28. Feidias.M "A techno-economic comparison between outdoor macro-cellular and indoor of-flooding solutions" Master's Degree Project, Stockholm (2015).

29. Thibaut. K; 5G Research in Horizon 2020, "Why 5G research?" European Commission - DG CONNECT Unit E1: Network Technologies (2014).
30. Markendahl. J, Mäkitalo. Ö, "A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macro cellular and femtocell networks", IOFC (2010).
31. D. Wang, D. Chen, B. Song, N. Guizani, X. Yu and X. Du, "From IoT to 5G I-IoT: The Next Generation IoT-Based Intelligent Algorithms and 5G Technologies," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, pp. 114-120, OCTOBER 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1701310.
32. I. Filippini, V. Sciancalepore, F. Devoti and A. Capone, "Fast Cell Discovery in mm-Wave 5G Networks with Context Information," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 7, pp. 1538-1552, 1 July 2018, doi: 10.1109/TMC.2017.2772881.
33. S. Rangan, T. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366–385, Mar 2014.
34. A. Maltsev, A. Pudeyev, I. Karls, I. Bolotin, G. Morozov, R. Weiler, M. Peter, and W. Keusgen, "Quasi-deterministic approach to mmwave channel modeling in a non-stationary environment," in *IEEE Globecom 2014, Workshop on Emerging Technologies for 5G Wireless Cellular Networks*, 2014.
35. A. Ghosh, T. Thomas, M. Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. Vook, T. Rappaport, G. Maccartney, S. Sun, and S. Nie, "Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 32, no. 6, pp. 1152–1163, Jun 2014.
36. T. Bai and R. Heath, "Coverage and rate analysis for millimeter wave cellular networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2, pp. 1100–1114, Feb 2015.
37. R. Weiler, W. Keusgen, I. Filippini, and A. Capone, "Split control plane functionality in millimeter-wave overlay access," in *1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity*, 2014.
38. Q. C. Li, H. Niu, G. Wu, and R. Q. Hu, "Anchor-booster based heterogeneous networks with mmwave capable booster cells," in *Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE*, 2013, pp. 93–98.
39. V. Raghavan, J. Cezanne, S. Subramanian, A. Sampath, and O. Koymen, "Beamforming tradeoffs for initial UE discovery in millimeter-wave MIMO systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 543–559, 2016.

40. J. Palacios, D. D. Donno, and J. Widmer, "Tracking mmwave channel dynamics: Fast beam training strategies under mobility," in *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, May 2017.
41. A. Alkhateeb, Y. H. Nam, M. S. Rahman, J. Zhang, and R. W. Heath, "Initial beam association in millimeter wave cellular systems: Analysis and design insights," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 2807–2821, May 2017.
42. P. Parada and M. Zorzi, "Cell discovery based on historical users location in mmwave 5G," in *European Wireless (EW) 2017*, Apr 2017.
43. H. Shokri-Ghadikolaei, F. Boccardi, C. Fischione, G. Fodor, and M. Zorzi, "Spectrum sharing in mmwave cellular networks via cell association, coordination, and beamforming," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 11, pp. 2902–2917, Nov 2016.
44. M. Akdeniz, Y. Liu, M. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 32, no. 6, pp. 1164–1179, Jun 2014.
45. R. Weiler, W. Keusgen, A. Maltsev, T. Kuhne, A. Pudeyev, L. Xian, J. Kim, and M. Peter, "Millimeter-wave outdoor access shadowing mitigation using beamforming arrays," in *Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 European Conference on*, Apr 2016, pp. 4568–4573.
46. O. Holland, "Some are born with white space, some achieve white space, and some have white space thrust upon them," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 2, no. 2, pp. 178–193, Jun 2016.
47. A. Capone, A. F. dos Santos, I. Filippini, and B. Gloss, "Looking beyond green cellular networks," in *Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 2012 9th Annual Conference on. IEEE, 2012*, pp. 127–130.
48. Y. Niu, Y. Li, M. Chen, D. Jin, and S. Chen, "A cross-layer design for a software-defined millimeter-wave mobile broadband system," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 124–130, Feb 2016.
49. GSM Association, "Data market Asia-Indonesia" , 2019. [Online]. Available: <https://www.gsmaintelligence.com/markets/1531/dashboard/>. Access on Jun. 20, 2019.
50. A. T. Haryanto, "Kominfo optimis seluruh Indonesia terselimuti 4G di 2019", 2019. [Online]. Available: <https://inet.detik.com/telecommunication/d-4440304/kominfo-optimis-seluruh-indonesiaterselimuti-4g-di-2019>. Access on Jun. 20, 2019.

51. Ministry of Communications and Informatics, "Kajian congestion jaringan telekomunikasi bergerak Seluler pada rilayah rural" , (60), 1–5.2017.
52. A. A. Kusuma and M. Suryanegara, "Upgrading Mobile Network to 5G: The Techno-economic Analysis of Main Cities in Indonesia," 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, Padang, Indonesia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/QIR.2019.8898260.
53. "IMT Vision: Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Recommendation ITU-R M.2083-0, 2015.
54. Qualcomm Technologies. "Spectrum for 4G and 5G". December, 2017.
55. A. Hikmaturokhman, K. Ramli and M. Suryanegara, "Spectrum Considerations for 5G in Indonesia," 2018 International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev), Badung Regency, Indonesia, 2018, pp. 23-28. doi: 10.1109/ICICTR.2018.8706874.
56. BPS DKI Jakarta, "DKI Jakarta in numbers", 2018. Retrieved from: <https://jakarta.bps.go.id/publication/2018/08/16/67d90391b7996f51d1c625c4/provinsi-dki-jakarta-dalam-angka-2018.html>.
57. BPS Surabaya, "Surabaya City in numbers", 2018. Retrieved from: <https://surabaya-kota.bps.go.id/publication/2018/08/21/35de76f19338e3ecd445b838/kota-surabaya-dalam-angka-2018.html>.
58. BPS Kota Medan, "Medan City in numbers", 2018. Retrieved from: <https://medankota.bps.go.id/publication/2018/08/16/922c9e998caef5b74fa0552c/kota-medan-dalam-angka-2018.html>.
59. Sood, A., James, G. M., Tellis, G. J., James, G. M., and Tellis, G. J. (2018). Functional Regression : A New Model for Predic Market Penetration of New Products, 28(1), 36–51. <https://doi.org/10.1287/mksc.1080.0382>.
60. Sokele, M., and Moutinho, L. (2018). Bass model with explanatory Parameters, (March). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64394-6>.
61. Klemann, R. (2012). Cisco wp rethinking flat rate pricing for broadband services how service providers can monetize internet traffic growth via value-based pricing rethinking flat rate pricing for broadband services How Service Providers Can Monetize Internet Traffic Growth , (July).
62. Tellabs. (2011). Tellabs End of Profit _study executive summary, (January).
63. R. Jagmohan, Z. John Zhang. (2010). Smart Pricing. In Press.
64. Vladimir.N, Toni.J; State-of-the-art Comparative Cost Modeling of Heavily-loaded Wireless Heterogeneous. IEEE Conference 1-5, DOI-10: 1109/VITAE 2014.693- 4472, (2014).

65. Markendahl, J., Mäkitalo, Ö. (2010). A comparative study of deployment options , capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks, 145–150. <https://doi.org/10.1109/PIMRCW.2010.5670351>.
66. Nikolikj, V., Janevski, T.(2015). Cost-effectiveness Assessment of 5G Systems with Cooperative Radio Resource Sharing, 7(2), 68–73.in press.
67. Markendahl, J. (2010). Mobile Broadband Expansion Calls for More Spectrum or Base Stations - Analysis of the Value of Spectrum and the Role of Spectrum Aggregation, (September), 13–15.
68. 3GPP. (2010). Further advancements for E-UTRA physical layer aspects, Release 9.
69. Rangan, S., Member, S., Rappaport, T. S., & Erkip, E. (2014). Millimeter Wave Cellular Wireless Networks : Potentials and Challenges, (April). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397>.
70. Perahia, E., and Gong, M. X. (2014). Gigabit Wireless LANs : an overview of IEEE 802 . 11ac and 802 . 11ad, (January 2011).
71. Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, “A survey of millimeter wave (mmwave) communications for 5g: Opportunities and challenges,” arXiv preprint arXiv:1502.07228, 2015.
72. <https://www.telekom.com/en/company/details/what-is-5g-basic-information-on-the-network-of-the-future-542354>
73. P. K. Agyapong et al., “Design Considerations for a 5G Network Architecture,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 11, Nov. 2014, pp. 65–75.
74. M. I. Hossain, L. Lin and J. Markendahl, "A Comparative Study of IoT-Communication Systems Cost Structure: : Initial Findings of Radio Access Networks Cost," 2018 11th CMI International Conference: Prospects and Challenges Towards Developing a Digital Economy within the EU, Copenhagen, Denmark, 2018, pp. 49-55, doi: 10.1109/PCTDDE.2018.8624853.
75. Mekki, Kais, et al. "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment." ICT Express, 2018.
76. Adelantado, Ferran, et al. "Understanding the limits of LoRaWAN." IEEE Communications magazine 55.9 (2017).
77. R. Akeela and Y. Elziq, “Design and verification of IEEE 802.11ah for IoT and M2M applications,” in 2017 IEEE PerCom Workshops, 2017.

78. K. Johansson, J. Zander, and A. Furuskär, "Modelling the cost of heterogeneous wireless access networks," *International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, Vol. 2 No. 1, 2007.
79. Markendahl, Jan, and Östen Mäkitalo. "A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks." *IEEE 21st PIMRC Workshops*, 2010.
80. Salah El Ayoubi, et al. "Deliverable d1. 2 METIS II Quantitative techno-economic feasibility assessment". METIS-II, 2017.
81. White paper; Machina research Open standards in IoT deployments would accelerate growth by 27% and reduce deployment costs by 30% (2016).
82. Tomas.S et al; "Is backhaul becoming a bottleneck for green wireless access networks?". *IEEE ICC* (2014).
83. Document of METIS "Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society system", ICT-317669 (2013).
84. Vladimir.N, Toni.J; Cost-effectiveness Assessment of 5G Systems with Cooperative Radio Resource Sharing (2015).
85. Khan.F, Pi.Z, "Millimeter-wave Mobile Broadband Unleashing 3-300 GHz Spectrum," in *Proc. IEEE Symposium*, 1-6, DOI: 10.1109/SARNOF.2011.5876482, (2011).
86. G. Araniti, M. Condoluci, P. Scopelliti, A. Molinaro and A. Iera, "Multicasting over Emerging 5G Networks: Challenges and Perspectives," in *IEEE Network*, vol. 31, no. 2, pp. 80-89, March/April 2017, doi: 10.1109/MNET.2017.1600067NM.
87. Y. Wu et al., "Cloud Transmission: A New Spectrum-Reuse Friendly Digital Terrestrial Broadcasting Transmission System," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 58, no. 3, Sept. 2012, pp. 329-37.
88. Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan and V. K. Bhargava, "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2725519.
89. R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
90. X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov. 2013.

91. Z. Ding, S. M. Perlaza, I. Esnaola, and H. V. Poor, "Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 846–860, Feb. 2014.
92. Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, "Cooperative nonorthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 938–953, Apr. 2016.
93. R. Sun, Y. Wang, X. Wang, and Y. Zhang, "Transceiver design for cooperative non-orthogonal multiple access systems with wireless energy transfer," *IET Commun.*, vol. 10, no. 15, pp. 1947–1955, 2016.
94. J. Gong and X. Chen, "Achievable rate region of non-orthogonal multiple access systems with wireless powered decoder," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
95. N. T. Do, D. B. da Costa, T. Q. Duong, and B. An, "A BNBF user selection scheme for NOMA-based cooperative relaying systems with SWIPT," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 664–667, Mar. 2017.
96. W. Han, J. Ge, and J. Men, "Performance analysis for NOMA energy harvesting relaying networks with transmit antenna selection and maximal-ratio combining over Nakagami-m fading," *IET Commun.*, vol. 10, no. 18, pp. 2687–2693, 2016.
97. P. D. Diamantoulakis, K. N. Pappi, Z. Ding, and G. K. Karagiannidis, "Wireless-powered communications with non-orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 12, pp. 8422–8436, Dec. 2016.
98. "Optimal design of non-orthogonal multiple access with wireless power transfer," in *Prof. IEEE Int. Conf. Commun.*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
99. Y. Yuan and Z. Ding, "The application of non-orthogonal multiple access in wireless powered communication networks," in *Proc. IEEE 17th Int. Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Commun.*, Edinburgh, UK, Jul. 2016.
100. H. Chingoska, Z. Hadzi-Velkov, I. Nikoloska, and N. Zlatanov, "Resource allocation in wireless powered communication networks with non-orthogonal multiple access," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 684–687, Dec. 2016.
101. Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of user pairing on 5G non orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 65, no. 8, pp.6010–6023, Aug. 2016.
102. Y. Zhang, Q. Yang, T. X. Zheng, H. M. Wang, Y. Ju, and Y. Meng, "Energy efficiency optimization in cognitive radio inspired non-orthogonal multiple access," in *Proc.*

- IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun., f Valencia, Spain, Sept. 2016.
103. L. Lv, J. Chen, and Q. Ni, "Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 10, pp. 2059–2062, Oct. 2016.
 104. Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and J. Yuan, "Nonorthogonal multiple access in large-scale underlay cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 65, no. 12, pp. 10152–10157, Dec. 2016.
 105. L. Lv, Q. Ni, Z. Ding, and J. Chen, "Application of non-orthogonal multiple access in cooperative spectrum-sharing networks over Nakagamim fading channels," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
 106. Y. Zhang, H. M. Wang, Q. Yang, and Z. Ding, "Secrecy sum rate maximization in non-orthogonal multiple access," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 930–933, May 2016.
 107. Z. Qin, Y. Liu, Z. Ding, Y. Gao, and M. ElKashlan, "Physical layer security for 5G non-orthogonal multiple access in large-scale networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
 108. Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Y. Gao, and L. Hanzo, "Enhancing the physical layer security of non-orthogonal multiple access in large-scale networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–12, 2017.
 109. B. He, A. Liu, N. Yang, and V. Lau, "On the design of secure non-orthogonal multiple access systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
 110. Z. Ding, Z. Zhao, M. Peng, and H. V. Poor, "On the spectral efficiency and security enhancements of NOMA assisted multicastunicast streaming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
 111. Z. Zhang, Z. Ma, M. Xiao, and P. Fan, "Modeling and analysis of non-orthogonal MBMS transmission in heterogeneous networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
 112. Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, A. Nallanathan, and J. McCann, "Non-orthogonal multiple access in large-scale hybrid heterogeneous networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 65, no. 12, pp. 10152–10157, Dec. 2016.
 113. D. V. Nguyen, H. D. Tuan, T. Q. Duong, H. V. Poor, and O.-S. Shin, "Precoder design for signal superposition in MIMO-NOMA multicell networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.

114. B. Xu, Y. Chen, J. R. Carrion, and T. Zhang, "Resource allocation in energy cooperation enabled two-tier NOMA hetnets towards green 5G," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
115. M. Shirvanimoghaddam, M. Condoluci, M. Dohler, and S. J. Johnson, "On the fundamental limits of random non-orthogonal multiple access in cellular massive IoT," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
116. Y. Liu, X. Li, F. R. Yu, H. Ji, H. Zhang, and V. C. Leung, "Grouping and cooperating among access points in user-centric ultra-dense networks with non-orthogonal multiple access," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
117. Z. Zhang, H. Sun, and R. Q. Hu, "Downlink and uplink non-orthogonal multiple access in a dense wireless network," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
118. Y. Du, B. Dong, Z. Chen, X. Wang, Z. Liu, P. Gao, and S. Li, "Multiuser detection for uplink grant-free NOMA with prior-information aided adaptive compressive sensing," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
119. Z. Zhao, M. Xu, Y. Li, and M. Peng, "A non-orthogonal multiple access (NOMA)-based multicast scheme in wireless content caching networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
120. L. Zhang, W. Li, Y. Wu, X. Wang, S. I. Park, H. M. Kim, J. Y. Lee, P. Angueira, and J. Montalban, "Layered-division-multiplexing: Theory and practice," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 62, no. 1, pp. 216–232, Mar. 2016.
121. H. Marshoud, V. M. Kapinas, G. K. Karagiannidis, and S. Muhaidat, "Non-orthogonal multiple access for visible light communications," *IEEE Photonics Technology Lett.*, vol. 28, no. 1, pp. 51–54, Jan. 2016.
122. Z. Yang, W. Xu, and Y. Li, "Fair non-orthogonal multiple access for visible light communication downlinks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–4, 2016.
123. L. Yin, X. Wu, and H. Haas, "On the performance of non-orthogonal multiple access in visible light communication," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun.*, Hong Kong, China, Aug. 2015.
124. L. Yin, W. O. Popoola, X. Wu, and H. Haas, "Performance evaluation of non-orthogonal multiple access in visible light communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 12, pp. 5162–5175, Dec. 2016.

125. R. C. Kizilirmak, C. R. Rowell, and M. Uysal, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for indoor visible light communications," in Proc. the 4th Int. Workshop on Optical Wireless Commun., Istanbul, Turkey, Sept. 2015.
126. Z. Chen, Z. Ding, X. Dai, and G. K. Karagiannidis, "On the application of quasi-degradation to MISO-NOMA downlink," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 23, pp. 6174–6189, Dec. 2016.
127. X. Zhu, C. Jiang, L. Kuang, N. Ge, and J. Lu, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) based integrated terrestrial-satellite networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
128. J. Choi, "NOMA based random access with multichannel ALOHA," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
129. L. Qian, Y. Wu, H. Zhou, and S. Shen, "Dynamic cell association for non-orthogonal multiple-access V2S networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
130. Y. Chen, L. Wang, Y. Ai, B. Jiao, and L. Hanzo, "Performance analysis of NOMA-SM in vehicle-to-vehicle massive MIMO channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
131. B. Di, L. Song, Y. Li, and G. Y. Li, "Towards low-latency and high-reliability: NOMA-based 5G V2X broadcast communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
132. R. Syaputra, "The 5G network in Indonesia will be implemented the fastest in 2020", 2019. [On line]. Available: <https://covesia.com/techno/read/74027/5g-network-in-Indonesia-most-quickly-implemented-in-2020>. Access on Jun. 19, 2019.
133. Shubair, Raed & Al-Ogaili, Fatima. (2016). Millimeter-Wave Mobile Communications for 5G: Challenges and Opportunities. 10.1109/APS.2016.7696210.