



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Μελέτη use case οικοσυστήματος Διαδικτύου των Πραγμάτων Στενής Ζώνης (Narrow-Band IoT) στα 3,5 GHz

ΚΑΛΠΥΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ - ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Μελέτη use case οικοσυστήματος Διαδικτύου των
Πραγμάτων Στενής Ζώνης (Narrow-Band IoT) στα
3,5 GHz

ΚΑΛΠΥΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ - ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

3,5 GHz NARROW-BAND IoT ECOSYSTEM USE CASE STUDY

KALPYRIS DIMITRIOS

FINAL THESIS

ADVISOR

DR. THEOFILOS CHRYSIKOS
TUTOR – ASSOCIATE UNIVERSITY OF THESSALY

Lamia 2023

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάσθηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 01/11/2023

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας οι τεχνολογίες 5G (τεχνολογία πέμπτης γενιάς) γίνονται όλο και πιο καθιερωμένες χάρη στις μεγάλες προσπάθειες από εταιρείες τηλεπικοινωνιών, ερευνητικές εγκαταστάσεις, κυβερνήσεις καθώς και την ανάγκη του κόσμου για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών συνδεδεμένη με φορητότητα και κινητικότητα. Αυτή η τεχνολογία συνδέεται συχνά με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών με την αυτοματοποίηση και τη συλλογή διαδικασιών ανάκλησης δεδομένων. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τις τεχνολογίες 5G και IoT, εξηγώντας κοινές αρχιτεκτονικές, τυπικές υλοποιήσεις IoT και επαναλαμβανόμενα προβλήματα και κινδύνους. Παρουσιάζει επίσης μια λεπτομερή και επεξηγημένη επισκόπηση των παρεμβολών σε γενικές ασύρματες εφαρμογές, τις παρεμβολές μοναδικές για το 5G και το IoT και πιθανές τεχνικές βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Όλα αυτά υπογραμμίζονται μέσω της αναζήτησης και εξέτασης ενός use case πάνω σε μετρήσεις σε συγκεκριμένη τοπολογία για την εξαγωγή συμπερασμάτων υλοποίησης του παραπάνω συνδυασμού στα 3,5GHz, πράγμα που θα μπορούσε να αποτελέσει μία καινοτόμα εικόνα χρήσιμη για τις επιχειρήσεις που βασίζονται σε αυτές τις τεχνολογίες για να βελτιώσουν την παραγωγικότητά τους, να μειώσουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας και να βελτιώσουν την ικανοποίηση των πελατών. Τονίζουμε επίσης τις δυνατότητες της σύγκλισης δικτύων και υπηρεσιών στην αύξηση της διαθεσιμότητας και της ταχύτητας πρόσβασης στο διαδίκτυο, επιτρέποντας μια σειρά νέων και καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών.

ABSTRACT

Currently, 5G technologies (fifth generation technology) are becoming more and more established thanks to great efforts by telecommunications companies, research facilities, governments as well as the world's need for better quality of service connected to portability and mobility. This technology is often linked to the Internet of Things to improve citizens' quality of life by automating and collecting data recall processes. This paper introduces 5G and IoT technologies, explaining common architectures, typical IoT implementations, and recurring problems and risks. It also presents a detailed and illustrated overview of interference in general wireless applications, interference unique to 5G and IoT, and potential optimization techniques to address these challenges. All this is highlighted through the search and examination of a use case based on measurements in a specific topology to conclude the implementation of the above combination at 3.5GHZ, which could be an innovative insight useful for enterprises relying on these technologies to improve their productivity, reduce downtime and improve customer satisfaction. We also emphasize the potential of network and service convergence in increasing the availability and speed of internet access, enabling a range of new and innovative applications and services that may not be fully utilized yet.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ _I	
ABSTRACT _{II}	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΡΑ)	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	10
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ-ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΙΟΤ)	10
(ΕΝΟΤΗΤΑ 2.1.Α ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ)	10
(ΕΝΟΤΗΤΑ 2.1.Β ΥΛΙΚΑ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ)	16
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΙΟΤ)	24
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΙΟΤ ΚΑΙ CLOUD)	27
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G)	30
(ΕΝΟΤΗΤΑ 2.4.Α ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 5G)	30
(ΕΝΟΤΗΤΑ 2.4.Β ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G)	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	37
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.1	37
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.2 ΣΥΝΥΠΑΡΕΧΗ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΙΟΤ)	40
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.3 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ) ..	43
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.3.Α ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ – ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ)	43
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.3.Β ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΣΤΟ 5G)	46
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.3.Γ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G)	50
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΙΟΤ)	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	73
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΙΟΤ ΒΑΣΙΣΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 5G)	73
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ)	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
--------------------------------------	-----------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88
---------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή και κίνητρα

Η πανδημία COVID-19 έστρεψε την προσοχή του κοινού στις ψηφιακές λύσεις και προκάλεσε τεράστια ζήτηση στην αγορά τηλεπικοινωνιών. Η σύγκλιση της τεχνολογίας 5G και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) [1] είναι το επόμενο φυσικό βήμα για δύο προηγμένες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για να κάνουν τη ζωή των χρηστών τους πιο προσιτή, πιο άνετη και πιο παραγωγική [2]. Μία από τις πιο τυπικές τεχνολογίες που πρέπει να εισαχθούν στην κύρια περιοχή είναι το 5G, το οποίο θα επιτρέψει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες υποστηριζόμενο από το Industry 4.0, τις συσκευές IoT και τις Έξυπνες Πόλεις, και θα βελτιώσει τη συνολική συνδεσιμότητα σε όλο τον κόσμο [3]. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων είναι ένα οικοσύστημα αυξανόμενης πολυπλοκότητας: ένα σύμπαν συνδεδεμένων πραγμάτων ικανών να καταγράφουν κρίσιμα δεδομένα και να πραγματοποιούν προηγμένες αναλύσεις χρησιμοποιώντας λειτουργίες που βασίζονται στο cloud για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια μεγάλη ευκαιρία για πλήθος φορέων σε όλους τους τομείς δραστηριότητας [4]. Πολλές εταιρείες οργανώνονται για να εστιάσουν στο IoT και τη συνδεσιμότητα κατά την ανάπτυξη των προϊόντων και των υπηρεσιών του μέλλοντος.

Το κόστος εγκατάστασης, η εμβέλεια, οι παρεμβολές και οι δυνατότητες των συσκευών του Διαδικτύου των Πραγμάτων αποτελούν παράγοντες για τον προσδιορισμό της σωστής κύριας ή συμπληρωματικής επιλογής συνδεσιμότητας για μια εγκατάσταση IoT. Το Wi-Fi 6 ή το Zigbee είναι επαρκή για ορισμένα στοιχεία του ελέγχου έξυπνων κτιρίων, αλλά άχρηστα για χρήση σε μεγάλη κινητή περιοχή ευρείας κλίμακας [5]. Επιπλέον, endpoints όπως το Bluetooth, το Zigbee, το RFID ή το Wi-Fi μπορεί να είναι σημαντικά πιο αποδοτικά από άποψη κόστους σε σενάρια όπου το 5G μπορεί να είναι διαθέσιμο αλλά δεν έχει ακόμη φτάσει σε σημαντική κλίμακα αγοράς για να κάνει ανταγωνιστικά endpoints ή

υπηρεσίες δικτύου [6]. Τεχνικές μελέτες [7] δείχνουν ότι το 5G και άλλες υπηρεσίες μπορούν να συνυπάρξουν σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων. Οι τεχνικές συνθήκες πρέπει να είναι επαρκώς προσαρμοσμένες και όχι υπερβολικά περιοριστικές- διαφορετικά, υπάρχει κίνδυνος να επηρεαστεί το κόστος, η κάλυψη και η ποιότητα λειτουργίας των υπηρεσιών 5G.

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τις νέες εφαρμογές της κινητής τεχνολογίας που συγχωνεύουν το 5G και τις τεχνολογίες του Διαδικτύου των πραγμάτων. Κατά το σχεδιασμό νέων εφαρμογών ή τεχνολογικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούν το 5G και το Διαδίκτυο των πραγμάτων, εξετάζεται η συμμόρφωση με τα επιτρεπόμενα όρια έκθεσης. Οι διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές έκθεσης έχουν αναπτυχθεί χάρη σε εκτεταμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε επί πολλές δεκαετίες. Όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από ανεξάρτητες αρχές δημόσιας υγείας, ομάδες εμπειρογνομόνων και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) συμφωνούν ότι οι εν λόγω κατευθυντήριες γραμμές εγγυώνται την προστασία όλων των ανθρώπων από κάθε κίνδυνο για την υγεία [8]. Όπως σε κάθε νέα τεχνολογική γενιά, το 5G προσφέρει βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση και την ταχύτητα. Παρόλα αυτά, αντιμετωπίζει προκλήσεις στην εφαρμογή του που έχουν προσελκύσει προσοχή.

Οι τεχνολογίες IoT χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στην αγορά καταναλωτικών αγαθών, στοχεύοντας κυρίως στον οικιακό αυτοματισμό και την ασφάλεια. Αυτή η αύξηση της υιοθέτησης από τους καταναλωτές έχει οδηγήσει σε προτάσεις για την ενσωμάτωση συσκευών IoT ώστε να γίνουν τέτοιου είδους βελτιώσεις σε μητροπολιτική κλίμακα [9]. Οι βελτιώσεις αυτές εικάζεται ότι θα βελτιώσουν την ασφάλεια και τα καθήκοντα αυτοματισμού και να αντιμετωπίσουν μακροχρόνιες δυσκολίες όπως ο έλεγχος της κυκλοφορίας, η διαχείριση των αποβλήτων κ.ο.κ.

Ωστόσο, το IoT δεν εξαρτάται μόνο από τα ηλεκτρονικά που αναπτύσσονται και εγκαθίστανται- βασίζεται στη χρήση αποδοτικής και ανθεκτικής τεχνολογίας μετάδοσης. Η σύγκλιση των δικτύων και των υπηρεσιών αποτελεί ουσιαστική

πτυχή του σύγχρονου διαδικτύου. Το διαδίκτυο έχει εξελιχθεί από ένα απλό μέσο επικοινωνίας σε ένα σύνθετο και πολύπλευρο οικοσύστημα που έχει ενσωματωθεί σχεδόν σε κάθε πτυχή της καθημερινής μας ζωής. Η έλευση της τεχνολογίας 5G έχει προωθήσει περαιτέρω τη σύγκλιση δικτύων και υπηρεσιών, παρέχοντας στους χρήστες ταχύτερες και πιο αξιόπιστες συνδέσεις στο διαδίκτυο, επιτρέποντας μια σειρά από νέες και καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες [10].

Ένας από τους σημαντικότερους τρόπους με τους οποίους η σύγκλιση δικτύων και υπηρεσιών επηρεάζει τις υπηρεσίες διαδικτύου είναι η αύξηση της διαθεσιμότητας και της ταχύτητας πρόσβασης στο διαδίκτυο. Η τεχνολογία 5G προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες και εύρος ζώνης, επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε βίντεο, ήχο και άλλο περιεχόμενο πολυμέσων υψηλής ποιότητας σε πραγματικό χρόνο [11]. Αυτό σημαίνει ότι οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου μπορούν να προσφέρουν μια σειρά από νέες υπηρεσίες και εφαρμογές που ήταν προηγουμένως αδύνατες, όπως εμπειρίες εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας και εντυπωσιακά παιχνίδια.

Η κυψελοειδής συνδεσιμότητα (Cellular connectivity) ανοίγει τον δρόμο για την επίτευξη βασικών στόχων στον χώρο του Internet of Things (IoT), εστιάζοντας ιδιαίτερα στη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους των συσκευών, καθώς και στην επέκταση της κάλυψης για την υποστήριξη δύσκολων και απομακρυσμένων εφαρμογών. Σημαντικά πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την ευελιξία ανάπτυξης, την υψηλή χωρητικότητα και τη μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τα οποία είναι ουσιώδη για την αποτελεσματική λειτουργία των συσκευών IoT.

Οι ασύρματες τεχνολογίες 3GPP προσφέρουν σημαντικά τεχνολογικά πλεονεκτήματα, ενισχύοντας τη χωρητικότητα της υποδομής Long Term Evolution (LTE) για την αντιμετώπιση των αναγκών της τεράστιας αγοράς του IoT. Επιπλέον, το 5G αναμένεται να ενσωματωθεί σύντομα, προσφέροντας νέες δυνατότητες. Οι εκδόσεις 14, 15 και μετέπειτα του 3GPP επιλύουν εμπορικά

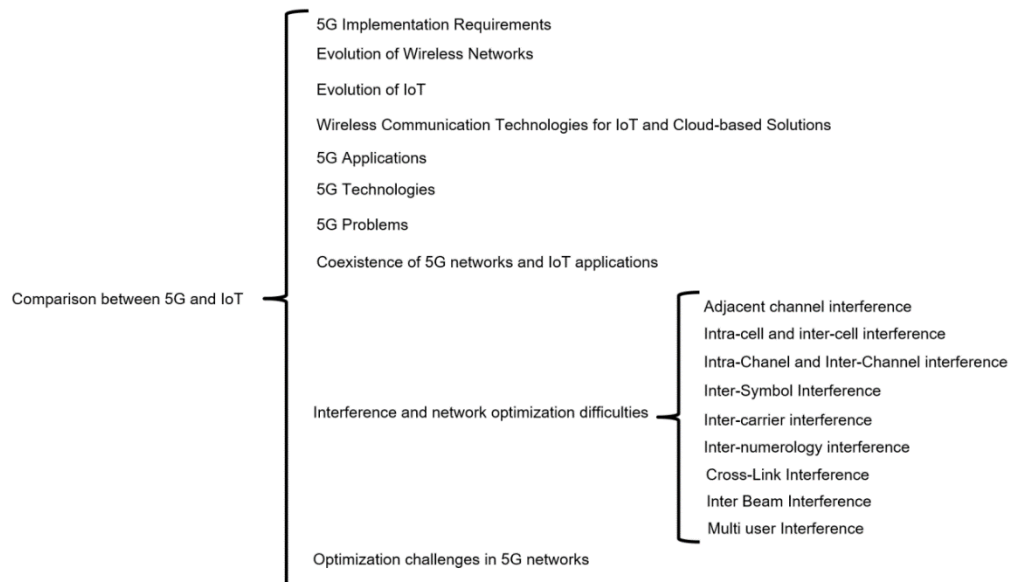
ζητήματα, επιτρέποντας την ευκολότερη υλοποίηση του 5G στο πλαίσιο του IoT [12].

Αυτή η εξέλιξη προβλέπει την εκρηκτική αύξηση του αριθμού των συσκευών και αισθητήρων, που προσφέρουν ψηφιακές αναπαραστάσεις του πραγματικού κόσμου. Αυτές οι συσκευές, χαρακτηριζόμενες από χαμηλό κόστος, μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ευρεία κάλυψη, ανοίγουν τον δρόμο για καινοτόμες επιχειρηματικές εφαρμογές. Επιπλέον, το 5G φέρνει τη δυνατότητα για κρίσιμες εφαρμογές IoT, όπως το vehicle-to-vehicle (V2V), το vehicle-to-infrastructure (V2I), το high-speed motion και το traffic control, με απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση δικτύου και υψηλή αξιοπιστία. Αυτά τα στοιχεία αναπτύσσονται στο πλαίσιο των εργασιών του 3GPP για τον καθορισμό νέας ραδιοδιεπαφής για το 5G [13], σχεδιασμένη να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις και να προαγάγει την ανάπτυξη του IoT.

Η επιτυχία των υπηρεσιών IoT στα δίκτυα 5G εξαρτάται από την ικανότητα των δικτύων αυτών να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις παρεμβολές. Οι παρεμβολές μπορεί να προκύψουν όταν διαφορετικές συσκευές IoT λειτουργούν στην ίδια περιοχή και τα σήματά τους επικαλύπτονται, προκαλώντας χαμηλότερη απόδοση, υψηλότερη καθυστέρηση και μειωμένη αξιοπιστία [14]. Αυτό αποτελεί σημαντική πρόκληση για τα δίκτυα 5G και τις υπηρεσίες IoT, καθώς έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν τεράστιο αριθμό συσκευών και εφαρμογών, καθεμία από τις οποίες έχει μοναδικές απαιτήσεις συνδεσιμότητας και καθυστέρησης.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ του 5G και του IoT, το οποίο αποτελεί θέμα ενδιαφέροντος στον κόσμο της τεχνολογίας. Για την υλοποίηση του 5G, υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως υποδομές και εξειδικευμένο υλικό, ενώ η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων έχει οδηγήσει σε ταχύτερους και πιο αξιόπιστους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Η εξέλιξη του IoT επέτρεψε τη δημιουργία συσκευών χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους που μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Ασύρματη επικοινωνία τεχνολογίες όπως το Bluetooth,

το Wi-Fi, το ZigBee και το LoRa είναι κατάλληλες για διαφορετικούς τύπους IoT, και οι λύσεις που βασίζονται στο cloud χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση και επεξεργασία τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που παράγονται από συσκευές IoT. Οι εφαρμογές 5G περιλαμβάνουν αυτόνομα οχήματα, απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις, καθώς και εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα, και αυτές απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης, χαμηλή καθυστέρηση, και αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τα δίκτυα 5G, όπως οι παρεμβολές και οι δυσκολίες βελτιστοποίησης του δικτύου. Η συνύπαρξη των δικτύων 5G και των εφαρμογών IoT αποτελεί προβληματισμό και οι προκλήσεις βελτιστοποίησης στα δίκτυα 5G πρέπει να αντιμετωπιστούν για να καταστεί δυνατή η αποδοτική και αποτελεσματική εφαρμογή.



Σχήμα 1. Σύγκριση μεταξύ του 5G και του IoT [1]

Κίνητρα:

Η κίνηση που ωθεί αυτή την εργασία είναι να εξετάσει πώς οι παρεμβολές μπορούν να επηρεάσουν τις κορυφαίες τεχνολογίες 5G και, συνεπώς, να επηρεάσουν την επικοινωνία των συσκευών IoT. Οι υπηρεσίες IoT εκτείνονται σε διάφορους κλάδους, όπως η υγεία, η βιομηχανία και οι μεταφορές, όπου η σταθερή και αποτελεσματική σύνδεση αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο για την αρμονική λειτουργία των συσκευών IoT και την ανεμπόδιστη ροή των επιχειρηματικών διαδικασιών. Σε περίπτωση που παραμεληθούν ζητήματα παρεμβολών και

απόδοσης του δικτύου, οι επιχειρήσεις ενδέχεται να αντιμετωπίσουν μειωμένη αποτελεσματικότητα, αυξημένο χρόνο αδράνειας και μειωμένη ικανοποίηση των πελατών. Επομένως, η αντιμετώπιση των παρεμβολών και η βελτιστοποίηση των δικτύων 5G για τις υπηρεσίες IoT αποτελούν κρίσιμο βήμα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και αποτελεσματικής σύνδεσης των συσκευών IoT, ενισχύοντας ταυτόχρονα την απόλυτη αξιοποίηση των οφελών που προσφέρουν τα δίκτυα 5G και οι υπηρεσίες IoT. Για τον λόγο αυτό, το κίνητρο πίσω από την εργασία είναι να αναθεωρήσει την τρέχουσα κατάσταση όσον αφορά την αντιμετώπιση των παρεμβολών και τη βελτιστοποίηση των τεχνολογιών 5G για τις υπηρεσίες IoT καθώς και να ερευνήσει τρόπους χρήσεις.

Οι παρεμβολές και η βελτιστοποίηση των δικτύων 5G στις υπηρεσίες IoT είναι σημαντικές για την εξασφάλιση αξιοπιστίας και αποτελεσματικής συνδεσιμότητας για τις συσκευές IoT, η οποία κατ'επέκταση είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία των επιχειρησιακών διαδικασιών. Με την εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου, οι επιχειρήσεις μπορούν να επωφεληθούν πλήρως από τα οφέλη των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT.

Η κύρια συμβολή της παρούσας ανασκόπησης είναι να παρουσιάσει την ιδέα ότι η ένωση των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT αντιπροσωπεύει μια τεχνολογική επανάσταση που υπόσχεται να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούμε με τον κόσμο γύρω μας. Ωστόσο, η ένωση αυτή έχει τις προκλήσεις της και μόνο αν τις ξεπεράσουμε μπορούμε να ξεκλειδώσουμε το πλήρες δυναμικό αυτών των πρωτοποριακών τεχνολογιών. Γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ του 5G και του IoT, ανοίγουμε το δρόμο για μια νέα εποχή καινοτομίας: κάθε συσκευή είναι συνδεδεμένη και κάθε εμπειρία είναι απρόσκοπτη. Η παρούσα εργασία περιγράφει τις κύριες προκλήσεις μεταξύ των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT και υπογραμμίζει την ανάγκη για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών για την επίτευξη του πλήρους δυναμικού τους. Η παρούσα εργασία ενισχύει την ιδέα ότι οι τεχνολογίες IoT τροφοδοτούν τις υπηρεσίες 5G και η συμβατότητά τους είναι ζωτικής σημασίας

για την προσφορά υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης στους καταναλωτές. Επιπλέον, υπογραμμίζει ότι οι παρεμβολές είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές και πρέπει να τις λάβουν υπόψη τους για να προσφέρουν συμβατές και αξιόπιστες υπηρεσίες.

Στο Σχήμα 2, παρατίθεται οπτικοποιημένα η δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ των τεχνολογιών IoT και 5G για τη δημιουργία ποικίλων εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Στον χώρο των Έξυπνων Πόλεων, οι συσκευές IoT συλλέγουν δεδομένα πραγματικού χρόνου σχετικά με την κυκλοφορία, την ποιότητα του αέρα και τη χρήση ενέργειας. Τα 5G δίκτυα εξυπηρετούν αυτές τις εφαρμογές, παρέχοντας απαραίτητο εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση. Στον βιομηχανικό αυτοματισμό, οι συσκευές IoT παρακολουθούν και ελέγχουν παραγωγικές διαδικασίες σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τον χρόνο αδράνειας. Τα δίκτυα 5G παρέχουν αξιοπιστία και ευρυζωνικότητα. Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, οι συσκευές IoT επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, με τα 5G να παρέχουν αξιόπιστη σύνδεση.

Στις μεταφορές, τα δεδομένα πραγματικού χρόνου από συσκευές IoT βοηθούν στη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας και τη βελτίωση της ασφάλειας, με τα 5G να υποστηρίζουν αυτές τις εφαρμογές. Στη γεωργία, οι συσκευές IoT βελτιστοποιούν την παραγωγή, ενώ τα 5G δίκτυα εξασφαλίζουν ευρυζωνικότητα και αξιοπιστία. Στο λιανικό εμπόριο, οι συσκευές IoT παρέχουν δεδομένα για τη συμπεριφορά των πελατών, με τα 5G να υποστηρίζουν τη σύνδεση και την αξιοπιστία για βελτίωση της εμπειρίας πελατών. Συνολικά, αποδεικνύεται πώς η εναρμονισμένη λειτουργία μεταξύ IoT και 5G μπορεί να διαμορφώσει και να υποστηρίξει ποικίλες εφαρμογές σε διάφορους τομείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Ασύρματα δίκτυα-συνδεσιμότητα και IoT

2.1.α Σχετικές έρευνες

Τα χαρακτηριστικά του ραδιοσήματος των νέων ασύρματων εφαρμογών είναι παρόμοια με εκείνα των υφιστάμενων τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας [5]. Σε αυτό το σημείο έγκειται το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας, η λεπτομερής εξέταση των επιπτώσεων και των τύπων παρεμβολών των τεχνολογιών 5G που συνυπάρχουν με συσκευές IoT. Οι νέες εφαρμογές χρησιμοποιούν παρόμοιες ισχύς εκπομπής και λειτουργούν στις ίδιες περιοχές συχνοτήτων. Για να μετριάσουμε τις παρεμβολές, μπορούμε να συγχρονίσουμε ή να συντονίσουμε όλα τα δίκτυα ή να εφαρμόσουμε μεγάλες ζώνες προστασίας που σπαταλούν πολύτιμο φάσμα [15]. Στην πράξη, απαιτείται στενή συνεργασία μεταξύ όλων των φορέων εκμετάλλευσης σε κάθε ζώνη συχνοτήτων και δεν είναι πιθανό να υποστηρίζονται ταυτόχρονα όλοι οι τρόποι χρήσης και όλοι οι τύποι ανάπτυξης 5G. Οι ρυθμιστικές αρχές πρέπει να εξετάσουν αυτά τα τεχνικά ζητήματα και τις επιπτώσεις τους όταν αποφασίζουν πώς να οργανώσουν συχνότητες σε αυτές τις ζώνες.

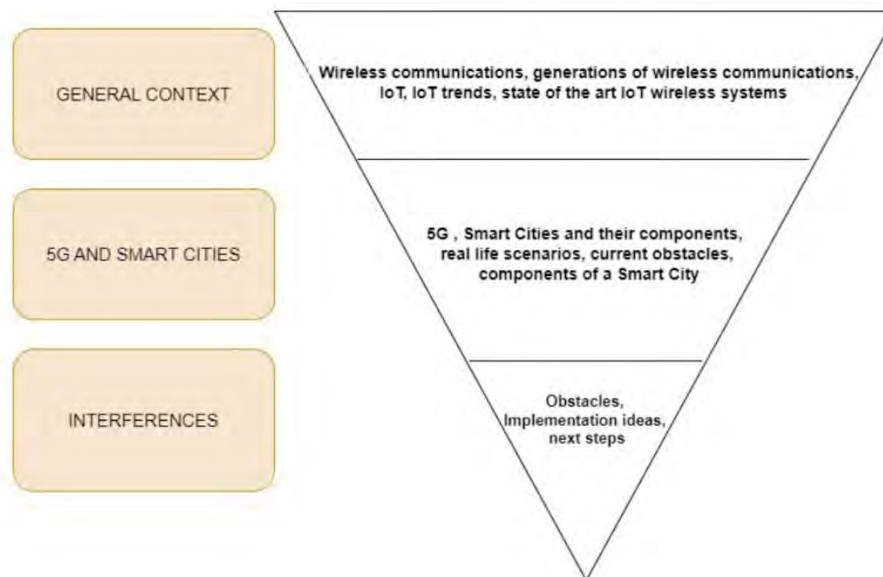
Μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, όπως ο έλεγχος ισχύος, η κατανομή του καναλιού(channel allocation) και η διαμόρφωση δέσμης, για να διασφαλιστεί ότι οι συσκευές IoT στο ίδιο δίκτυο δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές μπορεί να είναι περίπλοκες και μπορεί να απαιτούν σημαντικές αλλαγές στην υποδομή του δικτύου [16]. Επιπλέον, ενδέχεται να απαιτηθούν νέες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, καθώς οι συσκευές IoT συνεχίζουν να εξελίσσονται και να γίνονται πιο πολύπλευρες και πολύπλοκες.

Μια άλλη σημαντική πρόκληση για τη διαχείριση των παρεμβολών στα δίκτυα 5G είναι η ποικιλομορφία των συσκευών και των εφαρμογών που χρησιμοποιούν αυτά τα δίκτυα. Οι υπηρεσίες IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους κλάδους, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η μεταποίηση και οι μεταφορές, ο

καθένας με μοναδικές απαιτήσεις συνδεσιμότητας και καθυστέρησης [17]. Για παράδειγμα, στην υγειονομική περίθαλψη, οι συσκευές IoT, όπως οι φορητές οθόνες και τα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης ασθενών, απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και αξιόπιστη συνδεσιμότητα για την παροχή ακριβών δεδομένων και ειδοποιήσεων. Αντίθετα, οι συσκευές IoT που χρησιμοποιούνται στον βιομηχανικό αυτοματισμό απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση για να λειτουργούν αποτελεσματικά [18]. Ως εκ τούτου, η διαχείριση των παρεμβολών στα δίκτυα 5G απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις συνδεσιμότητας και καθυστέρησης των διαφόρων συσκευών και εφαρμογών IoT.

Μια άλλη σημαντική πρόκληση είναι το ενδεχόμενο εξωτερικών παρεμβολών- ενώ οι τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών μπορούν να διασφαλίσουν ότι οι συσκευές IoT στο ίδιο δίκτυο δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους, οι εξωτερικές παρεμβολές μπορεί να προκύψουν όταν οι συσκευές IoT λειτουργούν σε περιοχές με άλλες ασύρματες συσκευές, όπως δρομολογητές Wi-Fi, συσκευές Bluetooth και άλλα κυψελοειδή δίκτυα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση του σήματος, μειωμένη απόδοση και μειωμένη αξιοπιστία του δικτύου [19].

Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι εξωτερικές παρεμβολές κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G για υπηρεσίες IoT και να χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως ο συντονισμός συχνοτήτων και η κοινή χρήση φάσματος για την αποτελεσματική διαχείριση των εξωτερικών παρεμβολών. Για να παρέχουμε καλύτερες γνώσεις για το θέμα των παρεμβολών 5G, ακολουθούμε τη δομή που περιγράφεται λεπτομερώς στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Επιδράσεις τεχνολογιών 5G και IoT [1]

Ο αντίκτυπος των παρεμβολών του δικτύου 5G στις υπηρεσίες IoT είναι ένα αντικείμενο ενεργής έρευνας. Αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει τις επιπτώσεις των παρεμβολών στις επιδόσεις των συσκευών και των εφαρμογών IoT. Μια πρόσφατη μελέτη των Chandra et al. ανέλυσε τον αντίκτυπο των παρεμβολών στην αξιοπιστία των δικτύων 5G για υπηρεσίες IoT [20]. Η μελέτη διαπίστωσε ότι οι παρεμβολές μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αξιοπιστία των δικτύων 5G για υπηρεσίες IoT, ιδίως σε πυκνές αναπτύξεις όπου πολλές συσκευές λειτουργούν στην ίδια περιοχή. Η μελέτη συνέστησε τη χρήση προηγμένων τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών, όπως η δυναμική κατανομή καναλιών και ο έλεγχος ισχύος, για τον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών και τη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου.

Μια άλλη πρόσφατη μελέτη των Azari, A. και Masoudi, M [21] διερεύνησε τον αντίκτυπο των παρεμβολών στην απόδοση των δικτύων 5G για εφαρμογές IoT. Η μελέτη διαπίστωσε ότι οι παρεμβολές μπορούν να προκαλέσουν σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων του δικτύου, ιδίως για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης. Η μελέτη συνέστησε τη χρήση προσαρμοστικής διαμόρφωσης δέσμης (adaptive beamforming) και δυναμικής κατανομής καναλιών για τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων 5G για εφαρμογές IoT. Επιπλέον, η μελέτη υπογράμμισε

την ανάγκη για περισσότερη έρευνα σε τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών που μπορούν να μετριάσουν αποτελεσματικά τον αντίκτυπο των παρεμβολών στα δίκτυα 5G για υπηρεσίες IoT. Αρκετές ερευνητικές μελέτες έχουν επίσης διερευνήσει τον αντίκτυπο των παρεμβολών στην ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών IoT που είναι συνδεδεμένες σε δίκτυα 5G.

Σε ακόμη μία μελέτη εκ του Al-Turjman [22] διαπιστώθηκε ότι οι παρεμβολές μπορούν να προκαλέσουν στις συσκευές IoT μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και την αύξηση του κόστους συντήρησης. Η μελέτη συνέστησε τη χρήση τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών, όπως η ενεργειακά αποδοτική κατανομή καναλιών και ο χρονοπρογραμματισμός για τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συσκευών IoT στα δίκτυα 5G. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι αποτελεσματικές τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας των υπηρεσιών IoT σε δίκτυα 5G.

Ένας άλλος κρίσιμος ερευνητικός τομέας που σχετίζεται με τις παρεμβολές του δικτύου 5G στις υπηρεσίες IoT είναι οι επιπτώσεις των τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα. Οι τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, όπως η διαμόρφωση δέσμης και η κατανομή καναλιών, απαιτούν την εκ-μεταβολή πληροφοριών μεταξύ των συσκευών IoT και του δικτύου, η οποία μπορεί δυνητικά να εκθέσει ευαίσθητες πληροφορίες σε υποκλοπείς και επιτιθέμενους. Μια πρόσφατη μελέτη των Hasan κ.ά. [23] διερεύνησε τους κινδύνους ασφάλειας και ιδιωτικότητας που σχετίζονται με τη διαμόρφωση δέσμης και πρότεινε ένα ασφαλές σύστημα διαμόρφωσης δέσμης που χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση και έλεγχο ταυτότητας για την προστασία ευαίσθητων πληροφοριών. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι επιπτώσεις της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά κατά το σχεδιασμό δικτύων 5G για υπηρεσίες IoT.

Τα αποτελεσματικά μέτρα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με τις τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών και να διασφαλίσουν την ακεραιότητα και την εμπιστευτικότητα των δεδομένων IoT στα δίκτυα 5G.

Συνολικά, η τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας και οι σχετικές εργασίες σχετικά με τον αντίκτυπο των παρεμβολών του δικτύου 5G στις υπηρεσίες IoT υπογραμμίζουν τη σημασία των αποτελεσματικών τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των δικτύων 5G για εφαρμογές IoT. Οι μελέτες συνιστούν τη χρήση προηγμένων τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών, όπως η δυναμική κατανομή καναλιών, ο έλεγχος ισχύος, ο προσαρμοστικός σχηματισμός δέσμης και ο διαμοιρασμός φάσματος, για τον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών και τη βελτίωση των επιδόσεων του δικτύου. Ωστόσο, απαιτείται περισσότερη έρευνα για την ανάπτυξη νέων και πιο αποτελεσματικών τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις μοναδικές προκλήσεις των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT.

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει μια σύγκριση των υπηρεσιών IoT με βάση τον αντίκτυπο των παρεμβολών του δικτύου 5G στις επιδόσεις τους. Περιγράφει έξι παραμέτρους ως εξής:

1. Υπηρεσία IoT: Αυτή η παράμετρος απαριθμεί τις διάφορες υπηρεσίες IoT που λαμβάνονται υπόψη στη σύγκριση.

2. Αξιοπιστία: Αυτή η μέτρηση αντιπροσωπεύει την αξιοπιστία των δικτύων 5G όταν χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της αντίστοιχης υπηρεσίας IoT. Η αξιοπιστία είναι ένα μέτρο της ικανότητας του δικτύου να παρέχει συνεπή και αξιόπιστη υπηρεσία. Οι τιμές σε αυτή τη στήλη κυμαίνονται από χαμηλές έως υψηλές.

3. Λειτουργία πολλαπλών συσκευών: Αυτή η μέτρηση δείχνει αν η υπηρεσία IoT μπορεί να λειτουργήσει με πολλαπλές συσκευές. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη, δεδομένου ότι πολλές υπηρεσίες IoT

περιλαμβάνουν τη σύνδεση πολλαπλών συσκευών και το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει την ταυτόχρονη επικοινωνία αυτών των συσκευών.

4. Καθυστέρηση: Η παράμετρος αυτή μετρά το μέγεθος της καθυστέρησης ή του χρόνου καθυστέρησης στη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συσκευών IoT και του δικτύου. Η καθυστέρηση είναι μια σημαντική μετρική που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για υπηρεσίες IoT σε πραγματικό χρόνο, όπως τα συνδεδεμένα οχήματα και η παρακολούθηση της υγειονομικής περίθαλψης. Οι τιμές σε αυτή τη στήλη κυμαίνονται από χαμηλές έως εξαιρετικά χαμηλές.

5. Τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών: Αυτή η παράμετρος απαριθμεί τις διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση των παρεμβολών στο δίκτυο. Η διαχείριση παρεμβολών είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση υψηλής απόδοσης παρουσία άλλων συσκευών και δικτύων που ενδέχεται να χρησιμοποιούν τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων. Οι τεχνικές που παρατίθενται σε αυτή τη στήλη περιλαμβάνουν τη δυναμική επιλογή συχνότητας, τη μεταπήδηση καναλιού, τη διαμόρφωση δέσμης, τη συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων, το δυναμικό έλεγχο ισχύος, την αποφυγή παρεμβολών, το MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος), το γνωστικό ραδιόφωνο [24], το μαζικό MIMO και την ευθυγράμμιση παρεμβολών.

6. Κατανάλωση ενέργειας: Η μετρική αυτή δείχνει την ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από τις συσκευές IoT και το δίκτυο. Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τις υπηρεσίες IoT, ιδίως για εκείνες που λειτουργούν σε απομακρυσμένες τοποθεσίες ή βασίζονται σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες. Οι τιμές σε αυτή τη στήλη κυμαίνονται από χαμηλές έως υψηλές.

Ο Πίνακας 1 συγκρίνει δέκα υπηρεσίες IoT, συμπεριλαμβανομένων του έξυπνου οικιακού αυτοματισμού, της έξυπνης γεωργίας, του βιομηχανικού IoT, των συνδεδεμένων οχημάτων, της παρακολούθησης της υγειονομικής περίθαλψης, των έξυπνων πόλεων, της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, της διαχείρισης έξυπνων δικτύων, της επαυξημένης πραγματικότητας και των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Για κάθε υπηρεσία IoT, ο πίνακας παραθέτει τις παραμέτρους σε κάθε στήλη που σχετίζονται με τον αντίκτυπο της παρεμβολής

του δικτύου 5G στην απόδοσή της. Σημειώστε ότι οι τιμές στον πίνακα είναι απλώς παραδείγματα και θα πρέπει να αντικατασταθούν με κατάλληλα δεδομένα από σχετικές εργασίες. Ο Πίνακας παρέχει μια χρήσιμη επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο οι διάφορες υπηρεσίες IoT μπορεί να επηρεαστούν από την παρεμβολή του δικτύου 5G και ποιοι παράγοντες είναι ουσιώδεις για να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση της απόδοσης αυτών των υπηρεσιών παρουσία παρεμβολών.

Πίνακας 1. Σύγκριση των υπηρεσιών IoT με βάση τον αντίκτυπο των παρεμβολών του δικτύου 5G στις επιδόσεις τους

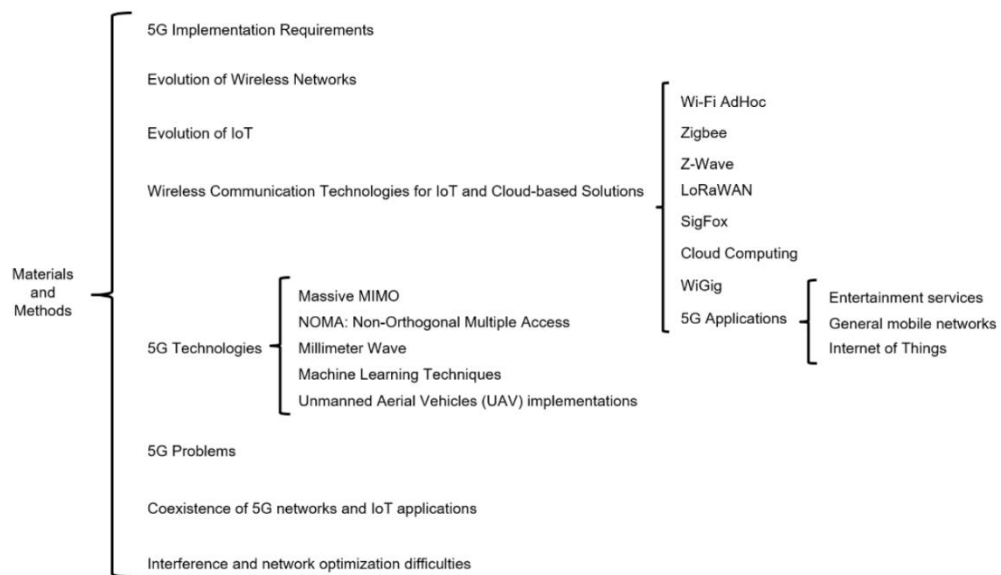
Αξιοπιστία	Πολλαπλές Συσκευές	Καθυστερήση	Διαχείριση παρεμβολών Δυναμική επιλογή συχνότητας Μεταπήδηση καναλιού Beamforming Συντονισμένη πολλαπλών- σημείων μετάδοση	Κατανάλωση ενέργειας
Υψηλή [7]	Ναι	Χαμηλή		Χαμηλή
Μέτρια [25]	Ναι	Μέτρια		Υψηλή
Υψηλή [26]	Ναι	Χαμηλή		Μέτρια
Υψηλή [27]	Ναι	Εξαιρετικά χαμηλή		Υψηλή
Υψηλή [28]	Ναι	Χαμηλή	Δυναμικός έλεγχος ισχύος Αποφυγή παρεμβολών	Χαμηλή
Υψηλή [29]	Ναι	Χαμηλή		Υψηλή
Μέτρια [30]	Ναι	Χαμηλή	MIMO Γνωσιακός ραδιοεξοπλισμός	Χαμηλή
Υψηλή [31]	Ναι	Χαμηλή		Υψηλή
Υψηλή [32]	Όχι	Εξαιρετικά χαμηλή	Μαζική MIMO Ευθυγράμμιση	Υψηλή
Υψηλή [33]	Ναι	Εξαιρετικά χαμηλή	παρεμβολής	Μέτρια

2.1.8 Υλικά, μέθοδοι και προϋποθέσεις υλοποίησης

Τα δίκτυα 4G βασίζονται στην τεχνολογία LTE, χρησιμοποιώντας ένα φάσμα συχνοτήτων περίπου 700 MHz έως 2600 MHz. Αυτές οι συχνότητες διαμερίζονται σε διάφορες ζώνες για φωνή και δεδομένα. Τεχνικές όπως το Frequency Division Duplex (FDD) και το Time Division Duplex (TDD) χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων. Η FDD χρησιμοποιεί ξεχωριστές συχνότητες για μετάδοση και λήψη, ενώ η TDD χρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα για και τα δύο. Από την

άλλη, οι συσκευές IoT χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες και ζώνες συχνοτήτων όπως οι ζώνες 2,4 GHz, 5 GHz και υπο-GHz. Ορισμένες λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, άλλες σε αδειοδοτημένο που απαιτεί άδεια. Ένα κύριο ζήτημα είναι οι παρεμβολές μεταξύ δικτύων 4G και συσκευών IoT, κυρίως σε κοινές ζώνες συχνοτήτων. Αυτές οι παρεμβολές μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία και να οδηγήσουν σε απώλεια ή αλλοίωση δεδομένων. Για την αντιμετώπιση αυτού, χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως η μεταπήδηση συχνότητας, η διασπορά φάσματος και ο έλεγχος ισχύος.

Το Σχήμα 4 συνοψίζει αυτή την ενότητα, όπου παρατηρούνται οι κύριες έννοιες που σχετίζονται με τον αντίκτυπο των δικτύων 5G στις υπηρεσίες IoT. Αναλύουμε την εφαρμογή, την εξέλιξη και τους τύπους των ασύρματων τεχνολογιών που επηρεάζουν τις τρέχουσες υπηρεσίες, τις κορυφαίες τεχνολογίες και τα προβλήματα του 5G, καθώς και τη συνύπαρξη των δικτύων επόμενης γενιάς. Διαμορφώνουμε την παρεμβολή ως την καρδιά της μελέτης των προβλημάτων σε αυτού του είδους τα δίκτυα.



Σχήμα 4. Υλικά και μέθοδοι για υπηρεσίες 5G και IoT [1]

Το 5G αποτελεί μια αναδυόμενη τεχνολογία στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, προσφέροντας υψηλές ταχύτητες σύνδεσης, χαμηλότερες καθυστερήσεις και εξαιρετική κλιμακούμενη συνδεσιμότητα μεταξύ πολλαπλών συσκευών. Ο κάθε

κλάδος περιμένει με ανυπομονησία τη διαδεδομένη και σταθερή εφαρμογή του 5G. Αυτό επιτρέπει σε τεχνολογίες που σχετίζονται με τις μαζικές επικοινωνίες των μηχανών ή του Internet of Things (IoT) να βελτιωθούν, προσφέροντας υψηλή ταχύτητα σύνδεσης και ενθαρρύνοντας την αυτοματοποίηση σε βιομηχανίες κατασκευής και κατασκευών[34].

Ωστόσο, το Internet of Things (IoT) έχει εφαρμογές και στην καθημερινή ζωή των καταναλωτών, όπως σε σπίτια, εμπορικά κέντρα και πάρκα, παρέχοντας πολλές περιπτώσεις χρήσης για τους απλούς χρήστες. Τεχνικά, το 5G λειτουργεί σε υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ασύρματες τεχνολογίες, κυμαίνονται από 24 έως 100 GHz. Παρέχει επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αλλά αντιμετωπίζει προκλήσεις λόγω της υψηλής συχνότητας [35].

Το 5G λειτουργεί σε δύο ζώνες συχνοτήτων: Sub 6 GHz και mmWave (χιλιοστομετρικά κύματα). Το mmWave προσφέρει ταχύτερη μετάδοση δεδομένων, αλλά έχει περιορισμένη κάλυψη και είναι ευαίσθητο στα εμπόδια. Η ζώνη Sub 6 GHz παρέχει ευρύτερη κάλυψη και μπορεί να διαπεράσει εμπόδια, καθιστώντας την ιδανική για περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα mmWave [36].

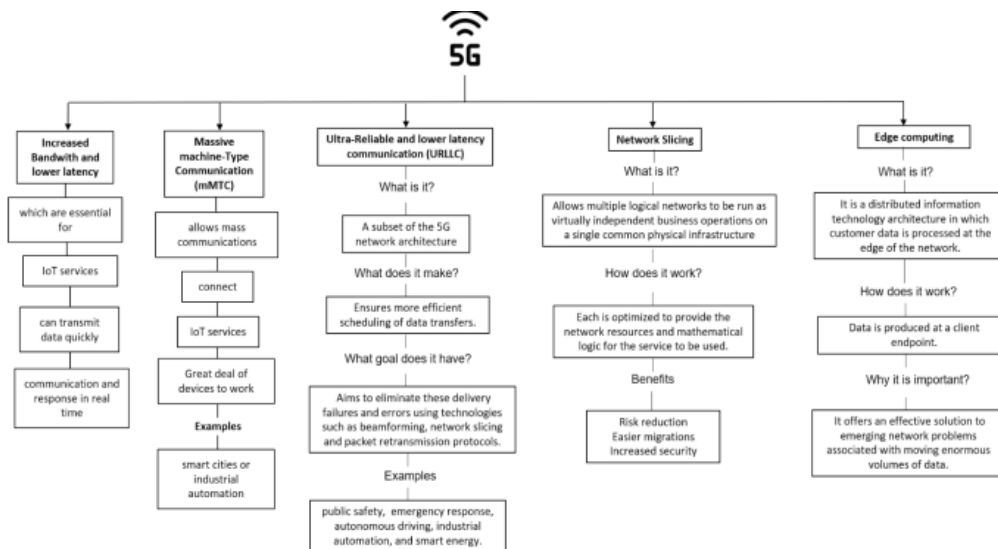
Για να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί, το 5G χρησιμοποιεί νέες τεχνολογίες όπως η διαμόρφωση δέσμης, η μαζική MIMO, η μικρή κυψέλη, το mmWave και το network slicing, προσφέροντας επιπλέον λειτουργικότητα και ευελιξία στα δίκτυα 5G.

Παρόλο που το 5G απέχει πολύ από το να εφαρμοστεί παγκοσμίως, αρκετοί πάροχοι υπηρεσιών εργάζονται δημόσια και μοιράζονται τις προόδους τους σχετικά με αυτή την τεχνολογία. Ορισμένα διάσημα ονόματα από τον κόσμο της πληροφορικής είναι οι Ericsson, Verizon, Nokia, AT&T, T-Mobile, Samsung και Qualcomm. Ωστόσο, αναμφίβολα, οι περισσότερες μεγάλες εταιρείες

τηλεπικοινωνιών εργάζονται σε έργα που σχετίζονται με τη νέα γενιά ασύρματων τεχνολογιών.

Ερευνητικές ομάδες έχουν επικεντρωθεί στο οικοσύστημα των κινητών δικτύων 5G, με ιδρύματα όπως το METIS (Mobile and wireless communications Enablers for Twentytwenty (2020) Information Society), το 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) και το NYU New York University Wireless, που διεξάγουν σημαντική έρευνα σχετικά με τις μεταδόσεις MIMO, τα χιλιοστομετρικά κύματα και τα πλαίσια στο οικοσύστημα 5G [37].

Τα δίκτυα 5G προσφέρουν διάφορα χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τις υπηρεσίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Το 5G παρέχει αυξημένο εύρος ζώνης και χαμηλότερη καθυστέρηση, επιτρέποντας στις συσκευές IoT να μεταδίδουν δεδομένα γρήγορα και αποτελεσματικά για επικοινωνία και ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο. Το 5G επιτρέπει μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής (mMTC), η οποία επιτρέπει σε μεγάλο αριθμό συσκευών IoT να συνδεθούν στο δίκτυο ταυτόχρονα. Παρέχεται επίσης εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλή καθυστέρηση (URLLC), εξασφαλίζοντας γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων κατάλληλη για κρίσιμες υπηρεσίες IoT. Το network slicing είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό των δικτύων 5G, το οποίο δημιουργεί ειδικά εικονικά δίκτυα για συσκευές IoT για να παρέχει καλύτερες επιδόσεις και ασφάλεια δικτύου.



Σχήμα 5. Χαρακτηριστικά 5G και υπηρεσίες IoT [1]

Πριν από την εφαρμογή των δικτύων 5G, οργανισμοί όπως το IEEE έπρεπε να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις σχετικά με την εφαρμογή του 5G. Μία από αυτές τις προκλήσεις αφορά τις βασικές διαστάσεις του ρυθμού δεδομένων, δεδομένου ότι η ζήτηση τεχνολογικών υπηρεσιών αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Το 5G θα πρέπει να αποτελέσει λύση για την ικανοποίηση όλης αυτής της ζήτησης και την παροχή μεγάλης ποιότητας υπηρεσιών (QoS) [38].

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η καθυστέρηση, η οποία είναι υπεύθυνη για την καθυστέρηση των εισερχόμενων και εξερχόμενων πακέτων σε μια ζεύξη, καθώς οι υπηρεσίες ροής, όπως τα διαδικτυακά παιχνίδια [39], το metaverse και άλλα, απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση προκειμένου να παρέχουν καλύτερες υπηρεσίες.

Στη σύγχρονη κοινωνία, τα περισσότερα προϊόντα χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων, για παράδειγμα, των ηλεκτρικών αυτοκινήτων όπως το Tesla. Με άλλα λόγια, περνάμε από ηλεκτρονικές συσκευές και είναι απαραίτητο να επικεντρωθούμε στην ανάπτυξη φιλικών συσκευών για να αποφύγουμε την υπερβολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Πρέπει να αναφερθούν ορισμένα σημαντικά σημεία σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας από το 5G. Πρώτον, η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από την κυκλοφορία στο

δίκτυο. Σύμφωνα με το άρθρο "Energy-efficient 5G for a greener future" [40], όταν το φορτίο κίνησης είναι χαμηλό, ένας σταθμός βάσης μπορεί να εξοικονομήσει το 98,75% της ενέργειας, αλλά αν το φορτίο κίνησης είναι υψηλό, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αυξηθεί.

Στο Σχήμα 6 περιγράφονται οι απαιτήσεις για το 5G, το οποίο αναδεικνύεται ως η τελευταία γενιά κυψελοειδών δικτύων, σχεδιασμένη για σημαντικές βελτιώσεις σε επιδόσεις, χωρητικότητα και ευελιξία σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές. Για την επίτευξη αυτών των βελτιώσεων, χρησιμοποιούνται διάφορες βασικές τεχνολογίες.

Οι συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) αποτελούν μια τεχνολογία που προσφέρει υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, παρέχοντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη λόγω του μικρού μήκους κύματος.

Η τεχνολογία massive MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για να αυξήσει τον αριθμό των χωρικών ροών, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του ασύρματου καναλιού και αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα.

Η διαμόρφωση δέσμης επικεντρώνει το ραδιοσήμα προς συγκεκριμένες συσκευές, βελτιώνοντας την ισχύ του σήματος και μειώνοντας τις παρεμβολές.

Το network slicing επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών δικτύων για διάφορες εφαρμογές, ενώ το Edge Computing παρέχει επεξεργασία δεδομένων στην άκρη του δικτύου για μείωση της καθυστέρησης.

Πέραν των προαναφερθέντων τεχνολογιών, υπάρχουν και άλλα κρίσιμα στοιχεία που συνθέτουν το οικοσύστημα του 5G:

1. **Dense Network Deployments (Πυκνές Εγκαταστάσεις Δικτύου):** Το 5G απαιτεί πυκνότερες εγκαταστάσεις κεραιών σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές. Αυτό βελτιώνει την επικοινωνία σε περιοχές

υψηλής ζήτησης και πυκνής κίνησης, όπως αστικές περιοχές και εκδηλώσεις.

2. **IoT Συνδεσιμότητα:** Το 5G ανοίγει το δρόμο για τη σύνδεση υπερβολικά μεγάλου αριθμού συσκευών IoT. Αυτό μπορεί να καλύψει ευρύ φάσμα εφαρμογών, από έξυπνες πόλεις και έξυπνες κατοικίες έως και βιομηχανικές λύσεις.

3. **Ασφάλεια Δικτύου:** Επικεντρωμένη στην ασφάλεια, η τεχνολογία 5G προσφέρει προηγμένες λύσεις όπως το network slicing, παρέχοντας ασφαλείς εικονικές δικτυακές περιοχές για διάφορες χρήσεις.

4. **Ενέργεια και Οικολογική Αποτελεσματικότητα:** Η τεχνολογία 5G αποσκοπεί στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά bit με τη χρήση προηγμένων τεχνικών, προσφέροντας περισσότερη αποτελεσματικότητα στα δίκτυα.

5. **Υποστήριξη Νέων Εφαρμογών:** Η υψηλή χωρητικότητα και η χαμηλή καθυστέρηση του 5G το καθιστούν ιδανικό για νέες τεχνολογίες, όπως τα αυτόνομα οχήματα, η εικονική πραγματικότητα και οι αυξημένης πραγματικότητας εφαρμογές.

Η χαμηλή καθυστέρηση, η υψηλή αξιοπιστία και η πλήρης διπλή όψη είναι χαρακτηριστικά που επιδιώκονται στα δίκτυα 5G, ενώ το επίκεντρο είναι και στην υποστήριξη εφαρμογών που απαιτούν υψηλή απόδοση και ασφάλεια.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, οι απαιτήσεις ανάπτυξης του δικτύου 5G είναι οι ακόλουθες:

- Συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) για υψηλότερο εύρος ζώνης και ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων.
- Μαζική τεχνολογία MIMO (πολλαπλές εισόδους, πολλαπλές εξόδους) για την αύξηση των χωρικών ροών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας του ασύρματου καναλιού.

- Διαμόρφωση δέσμης για την εστίαση του ραδιοφωνικού σήματος προς μια συγκεκριμένη συσκευή, αυξάνοντας την ισχύ του σήματος και μειώνοντας τις παρεμβολές.
- Τεμαχισμός δικτύου για τη δημιουργία αποκλειστικών εικονικών δικτύων που ανταποκρίνονται στις ειδικές απαιτήσεις διαφορετικών εφαρμογών, βελτιώνοντας την απόδοση και την ασφάλεια του δικτύου.
- Edge computing για επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στην άκρη του δικτύου, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση των ευαίσθητων στον χρόνο εφαρμογών.
- Χαμηλή καθυστέρηση για επικοινωνία και απόκριση σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την επίτευξη καθυστέρησης μικρότερης από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου.
- Υψηλή αξιοπιστία για κρίσιμες εφαρμογές, εξασφαλίζοντας υψηλή διαθεσιμότητα και χαμηλό χρόνο διακοπής λειτουργίας.
- Πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία για ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, τη χωρητικότητα και μειώνοντας την καθυστέρηση.



Σχήμα 6. Απαιτήσεις υλοποίησης 5G [1]

Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών στα δίκτυα 5G μπορεί να επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από υπηρεσίες IoT έως εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως η εικονική και η επαυξημένη πραγματικότητα. Τα δίκτυα 5G στοχεύουν να παρέχουν τις απαραίτητες μετρήσεις επιδόσεων για την υποστήριξη αυτών των εφαρμογών, επιτρέποντας την ανάπτυξη του οικοσυστήματος IoT και μια νέα εποχή συνδεσιμότητας.

2.2 Εξέλιξη ασύρματων δικτύων και IoT

Τα ασύρματα δίκτυα [41] διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κοινωνία μας, διότι μας επιτρέπουν να είμαστε συνδεδεμένοι σε ένα δίκτυο χωρίς καλώδια, αποτελώντας τη γέφυρα για τη δημιουργία χρήσιμων εργαλείων. Για παράδειγμα, το 3GPP παρέχει βασικές υπηρεσίες δεδομένων, όπως δυνατότητες φωνής και ανταλλαγής μηνυμάτων, με το 4G μπορούμε να κάνουμε βιντεοκλήσεις και να χρησιμοποιούμε υπηρεσίες IP, ενώ με το 5G μπορούμε να έχουμε περισσότερα οφέλη, όπως χαμηλή καθυστέρηση, μεγαλύτερο εύρος ζώνης και άλλα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά [42].

Η εξέλιξη του διαδικτύου επέτρεψε απομακρυσμένες συνδέσεις μεταξύ μηχανημάτων και η τυποποίηση των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των πληροφοριών, όπως το TCP/IP, επέτρεψε στους ερευνητές να επωφεληθούν από το διαδίκτυο και επέτρεψε τη δημιουργία νέων πρωτοκόλλων και τρόπων μετάδοσης των δεδομένων [43]. Έκτοτε, νέες τεχνολογίες έχουν φτάσει στη ζωή μας, κάτι που ισχύει και στην περίπτωση του IoT. Τα τελευταία χρόνια προέκυψαν νέες τεχνολογίες και πρωτόκολλα για τη σύνδεση και τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών και δικτύων IoT, καθένα από τα οποία παρέχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για την εκτέλεση των εφαρμογών. Στις ακόλουθες δηλώσεις, αναφέρουμε ορισμένα πρωτόκολλα για την επικοινωνία δεδομένων. Κάθε πρωτόκολλο μπορεί να παρέχει καλύτερη επικοινωνία ανάλογα με την εφαρμογή. Για παράδειγμα, το LoRaWAN χρησιμοποιείται στην επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις ακόμη και με εμπόδια μεταξύ της σύνδεσης και χρησιμοποιώντας

χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το Zigbee είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται συνήθως σε έξυπνα σπιτία, αποφεύγοντας τα συμπεράσματα από δρομολογητές, ηλεκτρονικές συσκευές κ.λπ.

Η εξέλιξη των τεχνολογιών IoT έχει σημαντικό αντίκτυπο στα δίκτυα 5G. Καθώς όλο και περισσότερες συσκευές συνδέονται στο διαδίκτυο, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη για ταχύτερη και πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Σε αυτό το σημείο έρχονται τα δίκτυα 5G, τα οποία παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες, χαμηλότερη καθυστέρηση και μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις προηγούμενες ασύρματες τεχνολογίες. Ο πολλαπλασιασμός των συσκευών IoT δημιουργεί επίσης νέες ευκαιρίες για το 5G, καθώς η τεχνολογία είναι σε θέση να υποστηρίξει τις τεράστιες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από αυτές τις συσκευές. Ωστόσο, αυτό δημιουργεί επίσης προκλήσεις για τα δίκτυα 5G, όπως η ανάγκη διαχείρισης μεγάλων ποσοτήτων κίνησης από μια ποικιλία συσκευών με διαφορετικές απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, η εξέλιξη των τεχνολογιών IoT οδηγεί την καινοτομία στα δίκτυα 5G, καθώς οι πάροχοι αναζητούν τρόπους να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αυτού του αυξανόμενου οικοσυστήματος.

Η εφαρμογή των δικτύων 5G αναμένεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην εξέλιξη των υπηρεσιών IoT. Μία από τις σημαντικότερες αλλαγές είναι η αύξηση της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων. Τα δίκτυα 5G έχουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλότερη χωρητικότητα από τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας [44]. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές IoT μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα πολύ πιο γρήγορα, γεγονός που επιτρέπει την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε περισσότερο πραγματικό χρόνο. Η βελτιωμένη ανταπόκριση των υπηρεσιών IoT θα ανοίξει ευκαιρίες για νέες εφαρμογές που απαιτούν σχεδόν στιγμιαία επεξεργασία δεδομένων, όπως οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις, τα αυτόνομα οχήματα και ο βιομηχανικός αυτοματισμός.

Μια άλλη σημαντική αλλαγή που επιφέρει η εφαρμογή των δικτύων 5G είναι η αυξημένη επεκτασιμότητα των υπηρεσιών IoT. Τα δίκτυα 5G έχουν υψηλότερη

πυκνότητα συσκευών, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερο αριθμό συσκευών IoT ανά μονάδα επιφάνειας. Αυτό θα συμβάλει στην αύξηση της επεκτασιμότητας των υπηρεσιών IoT και θα επιτρέψει την ανάπτυξη πιο σύνθετων και εξελιγμένων λύσεων IoT.

Επιπλέον, τα δίκτυα 5G αναμένεται να βελτιώσουν την αξιοπιστία των υπηρεσιών IoT. Τα δίκτυα 5G διαθέτουν πιο ισχυρές δυνατότητες διόρθωσης σφαλμάτων και χαρακτηριστικά πλεονασμού, τα οποία μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία των υπηρεσιών IoT. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κρίσιμες εφαρμογές, όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση υποδομών ή ιατρικών συσκευών [45]. Η βελτιωμένη αξιοπιστία θα είναι επίσης επωφελής σε βιομηχανίες που απαιτούν ιδιαίτερα αξιόπιστα δίκτυα επικοινωνίας, όπως η μεταποίηση και η ενέργεια.

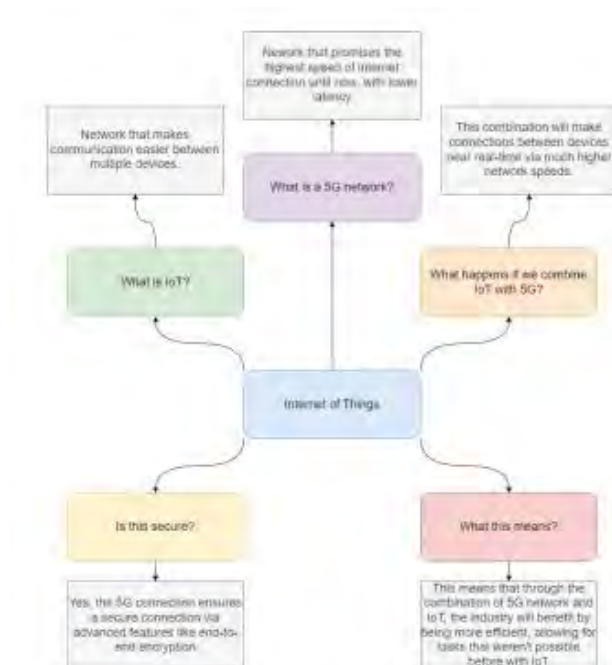
Τα ενισχυμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας των δικτύων 5G θα επηρεάσουν επίσης την εξέλιξη των υπηρεσιών IoT. Τα δίκτυα 5G προσφέρουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως το network slicing, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία απομονωμένων εικονικών δικτύων για διαφορετικές εφαρμογές IoT. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και να διασφαλίσει την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των δεδομένων IoT. Με τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών IoT, η σημασία της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας είναι κρίσιμη και τα δίκτυα 5G μπορούν να παρέχουν ένα πιο ασφαλές περιβάλλον για τα δεδομένα που μεταδίδονται.

Τα δίκτυα 5G προορίζονται να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών IoT. Σχεδιάζονται με γνώμονα την ενεργειακή αποδοτικότητα, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές και χαρακτηριστικά που επιτρέπουν βελτιωμένη διαχείριση της ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί έναν σημαντικό στόχο για τα δίκτυα 5G, καθώς επιδιώκουν να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις των συσκευών IoT.

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας προσφέρει ουσιαστικά οφέλη για τις συσκευές IoT. Καθώς πολλές από αυτές τις συσκευές λειτουργούν με μπαταρίες, η παρατεταμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας αποτελεί κρίσιμο κριτήριο για την αποτελεσματικότητά τους. Με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων 5G, οι συσκευές IoT μπορούν να λειτουργούν για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα χωρίς την ανάγκη συχνών αντικαταστάσεων ή επαναφόρτισης.

Εκτός από τα άμεσα οφέλη για τις συσκευές, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συμβάλλει στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος των συσκευών IoT. Αυτό αποτελεί σημαντικό βήμα προς τη δημιουργία βιώσιμων τεχνολογικών λύσεων που συνδυάζουν την καινοτομία με τον σεβασμό προς το περιβάλλον.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τα δίκτυα 5G και τις υπηρεσίες IoT, μαζί με μετρικές επιδόσεων που εστιάζουν στην κατανάλωση ενέργειας. Αυτές οι μετρικές περιλαμβάνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα των συσκευών, τον χρόνο ζωής της μπαταρίας και άλλα κρίσιμα στοιχεία που σχετίζονται με την ενέργεια



Σχήμα 7. Ορισμός 5G και χαρακτηριστικών που είναι απαραίτητα για τις υπηρεσίες IoT [1]

2.3 Τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας για IoT μέσω Cloud

Αυτή η ενότητα καλύπτει διάφορα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε συσκευές IoT, συμπεριλαμβανομένων των Wi-Fi AdHoc, Zigbee, Z-Wave, LoRaWAN και SigFox. Αναφέρεται επίσης στη χρήση του υπολογιστικού νέφους για εφαρμογές IoT, όπως η αποθήκευση δεδομένων, η ανάλυση και η απομακρυσμένη διαχείριση συσκευών. Αυτή η ενότητα θα μπορούσε να παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στις συσκευές IoT και την ενσωμάτωσή τους με λύσεις που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος.

1. Wi-Fi AdHoc: Με το πρότυπο IEEE 802.11, η τεχνολογία Wi-Fi μετατράπηκε στην πρώτη τεχνολογία για τη δημιουργία συσκευών συνδεδεμένων στο δίκτυο. Επιτρέποντας τη δημιουργία αρχιτεκτονικών ειδήσεων όπως το Wi-Fi AdHoc είναι ένας αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου επειδή κάθε κόμβος συμμετέχει στη δρομολόγηση προωθώντας δεδομένα σε άλλους κόμβους [47]. Αυτοί οι κόμβοι μπορεί να είναι συσκευές IoT και είναι πολύ χρήσιμοι σε εφαρμογές όπου χρειάζεται να είναι συνδεδεμένες πολλές συσκευές.

2. Zigbee: για τη σύνδεση αισθητήρων, οργάνων και συστημάτων ελέγχου. Το Zigbee υλοποιεί την επικοινωνία σε ένα προσωπικό ασύρματο δίκτυο περιοχής, παρέχοντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και διαλειτουργικότητα πολλαπλών προμηθευτών, που χρησιμοποιείται συνήθως στον οικιακό αυτοματισμό, σε αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, στον έλεγχο HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) κ.λπ. [48].

3. Z-Wave: Z-Wave Alliance για συσκευές αυτοματισμού για οικιακά και εμπορικά περιβάλλοντα. Αυτό το πρωτόκολλο επιτρέπει τη μετάδοση σύντομων μηνυμάτων με ελάχιστο θόρυβο και χρησιμοποιεί μια διαμόρφωση δικτύου Mesh [49].

4. LoRaWAN: Πρωτόκολλο δικτύωσης χαμηλής ισχύος και ευρείας περιοχής, σχεδιασμένο για τη σύνδεση "πραγμάτων" που λειτουργούν ασύρματα με μπαταρία στο διαδίκτυο σε περιφερειακά, εθνικά ή παγκόσμια δίκτυα. Στοχεύει στις απαιτήσεις του IoT, όπως η αμφίδρομη επικοινωνία, η ασφάλεια από άκρο σε άκρο, η κινητικότητα και οι υπηρεσίες εντοπισμού. Σύμφωνα με την εργασία που

αναφέρεται στο [50], το LoRa έχει τα περισσότερα χαρακτηριστικά όσον αφορά το IoT, όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας κ.λπ. Επιπλέον, η εργασία εξέτασε την επικοινωνία σε αστικές και δασικές περιοχές, δείχνοντας ότι το LoRaWAN μπορεί να μεταδώσει δεδομένα έως και 2,1 km σε αστικές περιοχές.

5. SigFox: Η SigFox είναι ένας φορέας εκμετάλλευσης δικτύου αφιερωμένος στο Διαδίκτυο των πραγμάτων. Το δίκτυο SigFox χρησιμοποιεί την εξαιρετικά στενή ζώνη, επιτρέποντας στις συσκευές να επικοινωνούν με χαμηλή ισχύ σε ευρεία περιοχή [51].

6. Υπολογιστικό νέφος: Cloud Computing: Ο όρος Cloud Computing χρησιμοποιείται για να περιγράψει τόσο μια πλατφόρμα όσο και έναν τύπο εφαρμογής. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του υπολογιστικού νέφους είναι η δυνατότητα ανάθεσης δυναμικών πόρων στο δίκτυο, που αποτελεί σημαντικό κλειδί για την παροχή κλιμακούμενων λύσεων και την αποφυγή υψηλού κόστους. Οι παρεμβολές παίζουν σημαντικό ρόλο κατά τη σύνδεση συσκευών, καθώς η ποιότητα του σήματος μειώνεται, πράγμα που σημαίνει ότι η διαμόρφωση μειώνεται και τα bits ανά σφάλμα αυξάνονται. Αυτό αποτελεί πρόβλημα εάν προσπαθούμε να προσφέρουμε μεγάλο εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση σε κάθε μετάδοση δεδομένων [52]. Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας διάφορους παράγοντες για να προσφέρουμε ένα μεγάλο QoS, όπως ο καιρός, τα κτίρια, το υλικό, οι πόροι λογισμικού κ.λπ. Στο πλαίσιο του IoT, τα κτίρια και οι αποστάσεις δημιουργούν τις κύριες παρεμβολές. Για το λόγο αυτό, τεχνολογίες όπως το Zigbee, το SigFox, το LoRaWAN και το Zwave παίζουν ζωτικό ρόλο στη σύνδεση των συσκευών.

7. WiGig: είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 60 GHz [53]. Αναπτύχθηκε ως επέκταση του προτύπου Wi-Fi με στόχο την παροχή υψηλής ταχύτητας ασύρματης επικοινωνίας με μικρή εμβέλεια, ειδικά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης, όπως η εικονική πραγματικότητα, η ροή υψηλής ευκρίνειας και τα παιχνίδια. Έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων πολλαπλών gigabit, με θεωρητικές ταχύτητες έως και 176 Gbps, που υπερβαίνουν σημαντικά τα προηγούμενα πρότυπα Wi-Fi.

Η επίτευξη αυτών των υψηλών ταχυτήτων επιτυγχάνεται με τη χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης και προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης, όπως η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM) και η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Ένα ακόμη ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του WiGig είναι η χαμηλή καθυστέρηση, που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως παιχνίδια και εικονική πραγματικότητα.

Επιπλέον, το WiGig υποστηρίζει την τεχνολογία πολλαπλών εισόδων, πολλαπλών εξόδων (MIMO), η οποία επιτρέπει σε πολλαπλές κεραίες να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση και αποδοτικότητα του δικτύου.

Σε συνδυασμό με τα δίκτυα 5G, το WiGig μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά για την παροχή συνδέσεων τοπικού δικτύου (LAN) υψηλής ταχύτητας για κινητές συσκευές και συσκευές IoT. Η χαμηλή εμβέλεια της ζώνης συχνοτήτων των 60 GHz το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπως η επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα, η ασύρματη ροή βίντεο HD και τα παιχνίδια νέφους. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία backhaul για μικρές κυψέλες σε δίκτυα 5G, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση και χωρητικότητα του δικτύου. Για τις υπηρεσίες IoT, το WiGig μπορεί να επιτρέπει συνδέσεις υψηλής ταχύτητας μεταξύ συσκευών IoT, βοηθώντας στη γρήγορη και αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου πολλές συσκευές πρέπει να επικοινωνούν σε πραγματικό χρόνο, όπως τα έξυπνα σπίτια.

2.4 Εφαρμογές και τεχνολογίες 5G

(Ενότητα 2.4.α Εφαρμογές 5G)

Τα οφέλη του 5G δεν αξιοποιούνται μόνο από τις πιο εξέχουσες εταιρείες πληροφορικής παγκοσμίως. Στη σύγχρονη εποχή, έχουμε βρει αρκετές συναρπαστικές εφαρμογές όπου οι υψηλές ταχύτητες, η εξαιρετική αξιοπιστία και η ενεργειακή αποδοτικότητα του 5G μπαίνουν στο παιχνίδι και προσφέρουν καλύτερη εμπειρία στους χρήστες.

- Υπηρεσίες ψυχαγωγίας: Οι υπηρεσίες video-on-demand είναι σήμερα μία από τις πιο χρησιμοποιούμενες υπηρεσίες στο διαδίκτυο. Αυτές οι υπηρεσίες απαιτούν συνδέσεις υψηλής ταχύτητας και με τις αυξανόμενες τάσεις για τη χρήση συσκευών υψηλότερης ανάλυσης, το 5G παίζει ζωτικό ρόλο στην παροχή βέλτιστης εμπειρίας στους χρήστες, ώστε να μπορούν να καταναλώνουν το περιεχόμενό τους χωρίς διακοπή.

- Γενικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας: Λόγω της πανδημίας COVID-19 τα τελευταία χρόνια , η τηλεργασία έχει σημειώσει τεράστια αύξηση σε όλους τους τομείς παγκοσμίως. Αυτό σημαίνει ότι οι εργαζόμενοι πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε κλήσεις βίντεο ή φωνής ανά πάσα στιγμή, γεγονός που απαιτεί βελτιωμένες ταχύτητες downlink και uplink. Οι απαιτήσεις αυτές, σε συνδυασμό με τις πτυχές υψηλότερης αξιοπιστίας του 5G , σημαίνουν ότι αυτή η εφαρμογή θα βελτιώσει τις επικοινωνίες σε οποιοδήποτε δεδομένο πλαίσιο, ειδικά για εργασίες που σχετίζονται με την εργασία.

- Διαδίκτυο των πραγμάτων: λόγω της φύσης του να παρέχει αυτοματοποίηση σε απλά ή πολύ σύνθετα θέματα. Παρόλο που οι περισσότερες συσκευές IoT χρησιμοποιούν σήμερα τεχνολογίες 3G ή 4G-LTE λόγω των χαμηλών απαιτήσεων για συνδεσιμότητα δεδομένων, μια νέα γενιά συσκευών IoT απαιτεί υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτές οι απαιτήσεις βρίσκονται στα όρια της τρέχουσας γενιάς ασύρματων τεχνολογιών, γεγονός που καθιστά το 5G έναν ενδιαφέροντα ανταγωνιστή για την επίλυση αυτών των απαιτήσεων. Οι εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) καλύπτουν μια ευρεία γκάμα τομέων, από έξυπνα σπίτια και βιομηχανίες μέχρι τη γεωργία. Οι αρχικές εφαρμογές συχνά απαιτούν χαμηλές ποσότητες ασύρματων δυνατοτήτων λόγω της χαμηλής ισχύος μικροεπεξεργασίας των συσκευών. Ωστόσο, νέες τάσεις, όπως οι έξυπνες πόλεις και το Διαδίκτυο των Οχημάτων (IoV), απαιτούν υψηλότερη απόδοση που προσφέρεται από το 5G.

Οι εφαρμογές IoT αναμένεται να αυξήσουν τα δεδομένα που παράγονται ανά περιοχή κατά 1000 φορές, υπογραμμίζοντας τη σημασία της υψηλής απόδοσης που προσφέρει το 5G. Η αυξημένη πολυπλοκότητα των συσκευών σημαίνει ότι τα δεδομένα θα συλλέγονται από περισσότερες πηγές, απαιτώντας εκθετική αύξηση

της κατανάλωσης δεδομένων και την ανάγκη για αποθήκευση σε κλιμακούμενες αποθήκες δεδομένων.

Στο πλαίσιο αυτό, η υπολογιστική νέφους εμφανίζεται ως σημαντικός παράγοντας για την αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων IoT. Οι αρχιτεκτονικές των συσκευών IoT ακολουθούν τρεις βασικές αρχές: το υλικό, το middleware και το στρώμα παρουσίασης. Το υλικό καλύπτει τους κόμβους αισθητήρων και τη διεπαφή υλικού με τον χρήστη. Το middleware είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων, ενώ το στρώμα παρουσίασης παρέχει εργαλεία οπτικοποίησης για την κατανόηση της κατάστασης και συμπεριφοράς των συσκευών IoT.

Οι τεχνολογίες 5G μπορούν να επηρεάσουν το επίπεδο υλικού και ενδιάμεσου λογισμικού. Καθώς η τεχνολογία είναι αισίως πιο ενεργειακά αποδοτική, οι συσκευές δεν χρειάζονται τεράστιες κεραιές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση. Στο επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού, καθώς οι συσκευές μπορούν να επικοινωνούν περισσότερα δεδομένα σε μια δεδομένη περίοδο, το επίπεδο αυτό θα επωφεληθεί από τα επιπλέον δεδομένα για τη βελτίωση οποιουδήποτε στατιστικού μοντέλου ή μοντέλου μηχανικής μάθησης.

[\(Ενότητα 2.4.β Τεχνολογίες 5G\)](#)

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στις τεχνολογίες που εφαρμόζονται με το 5G, παρουσιάζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά και τις τεχνικές προδιαγραφές που καθιστούν το 5G ιδανικό για ποικίλες εφαρμογές.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του 5G, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 8, περιλαμβάνουν:

1. **Αυξημένο Εύρος Ζώνης:** Παρέχει σημαντικά αυξημένο εύρος ζώνης, επιτρέποντας υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας όπως η εικονική και η επαυξημένη πραγματικότητα.

2. Χαμηλότερη Καθυστέρηση: Κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, όπως αυτόνομα οχήματα και απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις.

3. Υψηλή Αξιοπιστία: Χαρακτηριστικά όπως η τμηματοποίηση δικτύου και οι πλεονάζουσες διαδρομές δικτύου διασφαλίζουν ότι οι συσκευές παραμένουν συνδεδεμένες.

4. Υποστήριξη Κρίσιμων Εφαρμογών: Επιτρέπει τη μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής (mMTC) και υψηλά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC), καταστήνοντάς το κατάλληλο για κρίσιμες εφαρμογές όπως ο βιομηχανικός αυτοματισμός.

5. Τεμαχισμός Δικτύου, Διαμόρφωση Δέσμης και Συχνότητες mmWave: Χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως ο τεμαχισμός δικτύου, η διαμόρφωση δέσμης και τις συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων για ακόμη μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων.

6. Μαζική MIMO: Αυτή η τεχνολογία είναι υπεύθυνη για την ταυτόχρονη αποστολή και λήψη πολλαπλών σημάτων, χρησιμοποιώντας το ίδιο ραδιοκανάλι. Ενώ άλλες τεχνολογίες, όπως το Wi-Fi ή το 4G-LTE, έχουν χρησιμοποιήσει αυτή την τεχνολογία, το massive MIMO αποδίδει καλύτερα όταν συνδυάζεται με τεχνολογίες 5G. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί επιπλέον κεραιές για να μεταφέρει την ενέργεια σε μικρότερες περιοχές του χώρου, πράγμα που σημαίνει ότι βελτιώνεται η φασματική απόδοση και η κάλυψη [58].

7. NOMA: Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση: [59]. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλή καθυστέρηση και μαζική συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας. Η NOMA στον τομέα του κώδικα συνδυάζεται συνήθως με mMIMO, βελτιώνοντας δραστικά τη φασματική απόδοση [60]. Η NOMA στον τομέα ισχύος χρησιμοποιείται συνήθως με MIMO, διαμόρφωση δέσμης, ακόμη και με συνεργατικές επικοινωνίες, αποτελώντας μία από τις πιο ευέλικτες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε υλοποιήσεις 5G.

8. Εκατομμυριοστό κύμα: GHz και 300 GHz και πήρε το όνομά της από τα κύματα 1 έως 10 mm που χρησιμοποιεί η τεχνολογία.

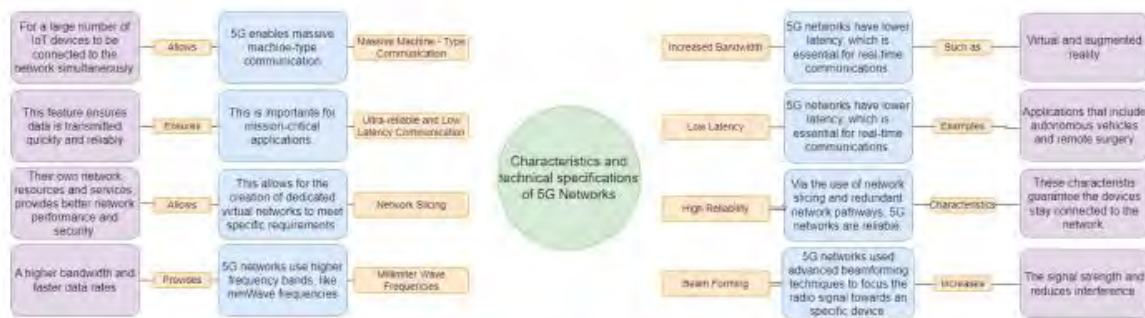
Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές ραντάρ, η τεχνολογία αυτή συνδυάζεται με το 5G για τη βελτίωση του εύρους ζώνης του φάσματος και την αύξηση της χρήσης του φάσματος. Το κύριο πλεονέκτημα της σύζευξης αυτής της τεχνολογίας με το 5G είναι η ελευθερία φάσματος που συνδέεται με το mmWave. Οι συνήθειες τεχνολογίες, όπως το GPS, το 4G και οι δορυφορικές συνδέσεις, χρησιμοποιούν το φάσμα 1 GHz έως 6 GHz, το οποίο γίνεται πολύ γεμάτο [61]. Επειδή το mmWave είναι νέο και διαθέτει τεράστιο φασματικό εύρος, το 5G παρέχει βελτιωμένη εμπειρία χρήσης μέσω αυτού του συνδυασμού.

9. Τεχνικές μηχανικής μάθησης: Εφαρμόζονται μοντέλα με επίβλεψη και χωρίς επίβλεψη στις τεχνολογίες 5G για τη βελτίωση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτιστοποίηση τεχνολογιών εντοπισμού, όπως η διαμόρφωση δέσμης. Στην κατηγορία με επιτήρηση, ορισμένα δίκτυα 5G χρησιμοποιούν αλγορίθμους γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη του χρονοπρογραμματισμού των κόμβων [62]. Άλλα εποπτευόμενα μοντέλα χρησιμοποιούν βαθιά νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη διανυσμάτων διαμόρφωσης δέσμης. Στη συνέχεια, τα μοντέλα μάθησης χωρίς επίβλεψη χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της επιλογής μεταβίβασης και τη μείωση της διακοπής των υπηρεσιών, καθώς και μπορούν να μειώσουν την καθυστέρηση με την ομαδοποίηση των κόμβων ομίχλης.

10. Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV): Οι σημερινοί ερευνητές του 5G χρησιμοποιούν UAV για τη βελτίωση της κάλυψης του δικτύου. Αυτά τα UAV θα βοηθήσουν το επίγειο δίκτυο χρησιμεύοντας ως φάροι. Το μεγάλο υψόμετρο αυτών των αεροπλάνων θα μπορούσε να λύσει πολλά προβλήματα παρεμβολών και να αντικαταστήσει ακόμη και εξ ολοκλήρου τα επίγεια κυψελοειδή δίκτυα [63]. Τα UAV, κοινώς γνωστά ως drones, έχουν γίνει όλο και πιο δημοφιλή τόσο για εμπορική όσο και για προσωπική χρήση. Με την έλευση των δικτύων 5G και του IoT, τα UAV μπορούν πλέον να εξοπλιστούν με ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων και συσκευών που μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε επίγειους σταθμούς για ανάλυση και λήψη αποφάσεων [64]. Υπάρχουν

διάφορες πιθανές εφαρμογές των UAVs στο πλαίσιο του 5G και του IoT. Μια τέτοια εφαρμογή είναι στον τομέα της γεωργίας ακριβείας. Τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την ανάπτυξη των καλλιεργειών, τις συνθήκες του εδάφους και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τη γεωργική παραγωγή. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο σε έναν επίγειο σταθμό για ανάλυση και να χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των προγραμμάτων φύτευσης, λίπανσης και άρδευσης [65]. Τα δίκτυα 5G και οι αισθητήρες IoT μπορούν να παρέχουν το απαραίτητο εύρος ζώνης και τη χαμηλή καθυστέρηση για αυτού του είδους τις εφαρμογές. Μια άλλη πιθανή εφαρμογή των UAV στο πλαίσιο του 5G και του IoT είναι η βιομηχανική επιθεώρηση και συντήρηση. UAV εξοπλισμένα με κάμερες και άλλους αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιθεώρηση και παρακολούθηση εξοπλισμού και υποδομών, όπως γραμμές μεταφοράς ενέργειας και ανεμογεννήτριες. Η μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω δικτύων 5G μπορεί να επιτρέψει την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο αυτών των συστημάτων, βελτιώνοντας την αξιοπιστία τους και μειώνοντας το κόστος συντήρησης [66]. Τα UAV μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών και τη διαχείριση καταστροφών. Σε περίπτωση φυσικής καταστροφής, όπως τυφώνας ή σεισμός, τα UAV μπορούν να αναπτυχθούν για να εκτιμήσουν τις ζημιές και να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο στους πρώτους ανταποκριτές. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να μεταδίδονται μέσω δικτύων 5G σε κέντρα διαχείρισης έκτακτης ανάγκης για ανάλυση και λήψη αποφάσεων. Τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς επιτήρησης και ασφάλειας. Σε εφαρμογές δημόσιας ασφάλειας, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των κινήσεων του πλήθους και τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με πιθανές απειλές. Σε εφαρμογές ιδιωτικής ασφάλειας, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιπολία και την παρακολούθηση εγκαταστάσεων για εισβολείς ή άλλες απειλές ασφαλείας. Ο συνδυασμός των UAV με τα δίκτυα 5G και τους αισθητήρες IoT μπορεί να επιτρέψει

ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους κλάδους. Με τη δυνατότητα βελτίωσης της αποδοτικότητας, μείωσης του κόστους και ενίσχυσης της ασφάλειας, είναι πιθανό να δούμε αύξηση της υιοθέτησης των UAV τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 8. Χαρακτηριστικά και τεχνικές προδιαγραφές των δικτύων 5G [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Προκλήσεις τεχνολογίας 5G

3.1 Κατηγορίες προκλήσεων τεχνολογιών 5G

Το 5G προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών. Παρ' όλα αυτά, προκύπτουν πολλές προκλήσεις σε σχέση με τεχνολογικά ζητήματα, επιπτώσεις στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα, καθώς και κοινωνικές ανησυχίες. Τα τεχνικά θέματα συνδέονται κυρίως με τις παρεμβολές. Η τεχνολογία 5G αντιμετωπίζει προκλήσεις λόγω των παρεμβολών, καθώς είναι ευαίσθητη σε φαινόμενα όπως η βροχή σε αστικά περιβάλλοντα [67]. Παρότι υπάρχουν τεχνολογικές λύσεις που επιχειρούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα, το 5G πρέπει ακόμη να εξελιχθεί για να χρησιμοποιηθεί ευρέως.

Δοκιμές σε πολλές χώρες με χρήση μικρών κυψελών αποκαλύπτουν την ανάγκη για εκτενέστερες αρχιτεκτονικές προκειμένου να παρέχουν πλήρη κάλυψη και βέλτιστη εμπειρία χρήστη [68]. Αυτό οδηγεί στην πιθανότητα οι παρόχοι να επικεντρωθούν κυρίως στα αστικά κέντρα, αφήνοντας τις αγροτικές περιοχές ανεπαρκώς εξυπηρετημένες. Αυτό προκαλεί ηθικά και κοινωνικά ερωτήματα. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του 5G είναι η δυνατότητα παροχής βελτιωμένων συνδέσεων σε δύσκολες συνθήκες. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι προς το παρόν χρησιμοποιείται ως μέσο μάρκετινγκ, λόγω του υψηλού κόστους και των περιορισμένων δυνατοτήτων κάλυψης στις αγροτικές περιοχές. Καθώς η τεχνολογία 5G εξαπλώνεται σε ευρύτερη κλίμακα, αναμένονται πρόοδοι σε αυτόν τον τομέα. Ένα άλλο ηθικό και κοινωνικό ζήτημα είναι η χρήση των τεχνολογιών IoV με την υποστήριξη του 5G.

Καθώς τα αυτόνομα οχήματα αυξάνονται, και το 5G επιτρέπει ακριβέστερο έλεγχο αυτών των οχημάτων, αντιμετωπίζουμε σημαντικά ηθικά διλήμματα σε περιπτώσεις αυτόνομων οχημάτων που εμπλέκονται σε τροχαία ατυχήματα. Η ασφάλεια επηρεάζεται από τη σύνδεση των οχημάτων στο διαδίκτυο, δίνοντας τη δυνατότητα σε χάκερ να απαγάγουν ανθρώπους από τα οχήματά τους μέσω του

διαδικτύου. Τα κύρια προβλήματα που αναφέρονται και εξηγούνται παραπάνω παρατίθενται παρακάτω:

- Τεχνικές επιπλοκές που σχετίζονται με τις παρεμβολές, συμπεριλαμβανομένης της ευαισθησίας στην ήπια βροχή σε αστικές περιοχές.
- Ανάγκη για εκτεταμένες και δαπανηρές αρχιτεκτονικές για την παροχή πλήρους κάλυψης και βέλτιστης εμπειρίας χρήστη, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει τους παρόχους να επικεντρωθούν κυρίως στις αστικές περιοχές, αφήνοντας τις αγροτικές περιοχές χωρίς φροντίδα.
- Ηθικές και κοινωνικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την αδυναμία να προσφερθούν βελτιωμένες συνδέσεις σε ανθρώπους σε κακές συνθήκες λόγω του υψηλού κόστους των αρχιτεκτονικών 5G και της έλλειψης κάλυψης σε αγροτικές περιοχές.
- Επιπτώσεις στην ασφάλεια που προκύπτουν από την τάση σύνδεσης των οχημάτων στο διαδίκτυο, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε απομακρυσμένες απαγωγές από χάκερ.

Ο Πίνακας 2 συγκρίνει τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι υπηρεσίες 5G και IoT σε διάφορους βασικούς τομείς, δηλαδή την ασφάλεια, την καθυστέρηση, τις παρεμβολές, το κόστος και τη συμβατότητα. Όσον αφορά την ασφάλεια, τα δίκτυα 5G είναι ευάλωτα σε μια σειρά απειλών, όπως επιθέσεις DDoS, κλοπή ταυτότητας και επιθέσεις man-in-the-middle, ενώ οι συσκευές IoT μπορεί να υποφέρουν από παραβιάσεις της ασφάλειας λόγω της αδύναμης κρυπτογράφησης, των κωδικών πρόσβασης και του ξεπερασμένου λογισμικού. Όσον αφορά την καθυστέρηση, τα δίκτυα 5G έχουν χαμηλότερη καθυστέρηση, η οποία μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για ορισμένες εφαρμογές IoT που απαιτούν απόκριση σε πραγματικό χρόνο, ενώ οι υπηρεσίες IoT μπορεί να υποφέρουν από καθυστέρηση λόγω συμφόρησης του δικτύου, απόστασης από τον διακομιστή και από τον αριθμό των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Οι παρεμβολές είναι ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τόσο τις υπηρεσίες 5G όσο και τις υπηρεσίες IoT, καθώς και οι δύο είναι ευάλωτες σε παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Το κόστος είναι επίσης ένα πρόβλημα, καθώς το υψηλό κόστος της υποδομής και των υπηρεσιών 5G μπορεί να περιορίσει τη χρησιμότητά του για πολλές εφαρμογές IoT, ενώ οι υπηρεσίες IoT μπορεί επίσης να είναι ακριβές στην ανάπτυξη και τη συντήρηση, ιδίως εάν απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης ή εξειδικευμένο υλικό. Τέλος, η συμβατότητα αποτελεί πιθανό ζήτημα τόσο για το 5G όσο και για τις υπηρεσίες IoT, καθώς ορισμένες συσκευές IoT δεν είναι συμβατές με τα δίκτυα 5G και οι υπηρεσίες IoT περιορίζονται από ζητήματα συμβατότητας με ιδιόκτητο υλικό ή λογισμικό.

Πίνακας 2. Προβλήματα που παρουσιάζουν οι υπηρεσίες 5G και IoT σε διάφορους βασικούς τομείς

Προβλημα	5G	Υπηρεσίες IoT
Ασφάλεια	Τα δίκτυα 5G είναι ευάλωτα σε διάφορες απειλές ασφαλείας, όπως επιθέσεις DDoS, κλοπή ταυτότητας και επιθέσεις man-in-the-middle.	Τα δίκτυα 5G είναι ευάλωτα σε διάφορες απειλές ασφαλείας, όπως επιθέσεις DDoS, κλοπή ταυτότητας και επιθέσεις man-in-the-middle.
Καθυστέρηση	Τα δίκτυα 5G έχουν χαμηλότερη καθυστέρηση, η οποία μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για ορισμένες εφαρμογές IoT που απαιτούν απόκριση σε πραγματικό χρόνο	Οι υπηρεσίες IoT μπορεί να υποφέρουν από καθυστερήσεις λόγω συμφόρησης του δικτύου, απόστασης από τον διακομιστή και από τον αριθμό των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο.
Παρεμβολή	Τα δίκτυα 5G μπορεί να παρουσιάσουν παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές, οι οποίες μπορεί να διαταράξουν τη μετάδοση δεδομένων.	Οι υπηρεσίες IoT μπορεί επίσης να υποφέρουν από παρεμβολές λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως εμπόδια και παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές.
Κόστος	Το κόστος της υποδομής και των υπηρεσιών 5G μπορεί να είναι απαγορευτικά υψηλό για πολλές εφαρμογές IoT, ιδίως για εκείνες που απαιτούν ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας.	Οι υπηρεσίες IoT μπορεί επίσης να είναι δαπανηρές για την ανάπτυξη και τη συντήρηση, ιδίως εάν απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης ή εξειδικευμένο υλικό
Συμβατότητα	Ορισμένες συσκευές IoT ενδέχεται να μην είναι συμβατές με τα δίκτυα 5G, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρησιμότητά τους σε ορισμένες εφαρμογές.	Οι υπηρεσίες IoT μπορεί επίσης να περιορίζονται από ζητήματα συμβατότητας, ιδίως εάν βασίζονται σε ιδιόκτητο υλικό ή λογισμικό.

3.2 Συνύπαρξη δικτύων 5G και εφαρμογών IoT

Η συνύπαρξη των δικτύων 5G και των εφαρμογών IoT έχει τη δυνατότητα να επαναστατικοποιήσει αρκετές βιομηχανίες παρέχοντας εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία, μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής και τεμαχισμό του δικτύου για πολλαπλές υπηρεσίες και εφαρμογές [18]. Μια νέα ιδέα είναι η χρήση των δικτύων 5G για τον βιομηχανικό αυτοματισμό και τα αυτόνομα οχήματα, όπου η εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του συστήματος. Μια άλλη καινοτόμος εφαρμογή είναι η χρήση των δικτύων 5G για την επικοινωνία οχήματος προς τα πάντα, όπου τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλα οχήματα και υποδομές για τη βελτίωση της διαχείρισης της κυκλοφορίας και της ασφάλειας [69].

Η χρήση των δικτύων 5G για έξυπνες πόλεις και τη γεωργία μπορεί επίσης να είναι ιδιαίτερα επωφελής, καθώς μπορεί να επιτρέψει μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής για την υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών IoT, όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές, και να διευκολύνει τη συλλογή δεδομένων, την ανάλυση και τη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, η χρήση του network slicing μπορεί να επιτρέψει τη συνύπαρξη πολλαπλών υπηρεσιών και εφαρμογών στην ίδια υποδομή, διατηρώντας παράλληλα τις μοναδικές απαιτήσεις τους για ασφάλεια, αξιοπιστία και καθυστέρηση. Ωστόσο, η συνύπαρξη δικτύων 5G και εφαρμογών IoT παρουσιάζει επίσης αρκετές προκλήσεις, όπως η ασφάλεια, οι παρεμβολές, η συμβατότητα και το κόστος [35].

Για παράδειγμα, η ασφάλεια είναι κρίσιμη για την προστασία των συσκευών και των δικτύων IoT από επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, ενώ οι παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές και περιβαλλοντικούς παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τόσο το 5G όσο και τις υπηρεσίες IoT. Επιπλέον, ζητήματα συμβατότητας μπορεί να προκύψουν όταν οι συσκευές IoT δεν είναι συμβατές με τα δίκτυα 5G, και το υψηλό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης της υποδομής 5G και των υπηρεσιών IoT μπορεί να περιορίσει την ευρεία υιοθέτησή τους.

Συνολικά, η συνύπαρξη των δικτύων 5G και των εφαρμογών IoT παρουσιάζει ευκαιρίες και προκλήσεις και απαιτεί προσεκτική εξέταση των τεχνικών απαιτήσεων, της ασφάλειας και της συμβατότητάς τους για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού τους.

Ο Πίνακας 3 παρέχει μια σύνοψη της συνύπαρξης διαφόρων υπηρεσιών και δικτύων 5G με εφαρμογές IoT. Επισημαίνονται η ασύρματη τεχνολογία, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται και η συνύπαρξη των υπηρεσιών με το 4G και το Wi-Fi. Ο πίνακας περιλαμβάνει διάφορες υπηρεσίες 5G, όπως 5G NR, 5G-V2X, 5G mMTC, 5G-UHD, 5G-IoT, 5G-eMBB, 5G-URLLC, 5G-mIoT, 5G-gNB, και 5G-Slicing, και περιγράφει τις πιθανές εφαρμογές τους και την περιγραφή του συστήματος.

Οι υπηρεσίες 5G προσφέρουν διαφορετικά οφέλη και είναι σχεδιασμένες για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως είναι οι εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες για βιομηχανικό αυτοματισμό, οι επικοινωνίες οχήματος προς τα πάντα για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την ασφάλεια, οι μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής για έξυπνες πόλεις και τη γεωργία, οι επικοινωνίες βίντεο υπερ-υψηλής ευκρίνειας και η εικονική επανα-αλληλεγγύη, επικοινωνίες Internet of Things για έξυπνα σπίτια και wearables, βελτιωμένη κινητή ευρυζωνικότητα για μεταφορά και ροή δεδομένων υψηλής ταχύτητας, εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης για κρίσιμες εφαρμογές, μαζικές επικοινωνίες IoT για έξυπνες πόλεις και γεωργία, επικοινωνίες κατηγορίας gigabit για μεταφορά και ροή δεδομένων υψηλής ταχύτητας, και διαίρεση δικτύου για πολλαπλές υπηρεσίες και εφαρμογές. Ο πίνακας παρέχει μια χρήσιμη επισκόπηση της συνύπαρξης των υπηρεσιών 5G και IoT και μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των δυνητικών οφελών και προκλήσεων της κοινής ανάπτυξης αυτών των τεχνολογιών.

Πίνακας 3. Σύνοψη της συνύπαρξης διαφόρων υπηρεσιών και δικτύων 5G με εφαρμογές IoT

Υπηρεσία	Ασύρματη τεχνολογία	Αλγόριθμοι	Συνύπαρξη υπηρεσιών	Εφαρμογές και περιγραφή συστήματος που χρησιμοποιούνται
5G NR [70]	NR-U	NOMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες για βιομηχανικό αυτοματισμό και αυτόνομα οχήματα
5G-V2X [71]	PC5	OFDMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Επικοινωνίες οχήματος προς τα πάντα για διαχείριση και ασφάλεια
5G Mmtc [72]	NR-MTC	NOMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής για έξυπνες πόλεις και γεωργία
5G-UHD [73]	NR-U	OFDMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Επικοινωνίες βίντεο υπερ-υψηλής ευκρίνειας και εικονική πραγματικότητα
5G-IoT [74]	NR-MTC	NOMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Επικοινωνίες Internet of things για έξυπνα ι Wi-Fi σπιτία και wearables
5G-eMBB [75]	NR-eMBB	OFDMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα για δεδομένα υψηλής ταχύτητας μεταφοράς και streaming
5G-URLLC [76]	NR-URLLC	NOMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες για κρίσιμες εφαρμογές
5G-mIoT [77]	NR-mIoT	NOMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Μαζικές επικοινωνίες IoT για έξυπνες πόλεις και γεωργία
5G-gNB [78]	NR-gNB	OFDMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Επικοινωνίες κατηγορίας Gigabit για υψηλές ταχύτητες, μεταφορά δεδομένων και streaming
5G-Slicing [79]	Nr-Slicing	NOMA	Συνύπαρξη με το 4G και Wi-Fi	Τεμαχισμός δικτύου για πολλαπλές υπηρεσίες και εφαρμογές

3.3 Δυσκολίες παρεμβολών και βελτιστοποίησης δικτύου

Σήμερα, με την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών, τα δίκτυα αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις. Εμφανίζονται, μεταξύ άλλων, ζητήματα όπως η κάλυψη, η καθυστέρηση, η διαθεσιμότητα και η προσβασιμότητα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ένα πιο βαθύ ή πιο συγκεντρωτικό σημείο στα χαρακτηριστικά του δικτύου, εμφανίζονται ζητήματα όπως η καθυστέρηση, οι παρεμβολές, η χρήση του φάσματος ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και άλλα.

Οι παρεμβολές στα δίκτυα 5G μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η συμφόρηση των ραδιοσυχνοτήτων και η ανάπτυξη υπερβολικά πολλών σημείων πρόσβασης σε μια περιορισμένη περιοχή. Αυτά τα ζητήματα μπορεί να προκαλέσουν απώλεια ή υποβάθμιση του σήματος, με αποτέλεσμα κακές επιδόσεις δικτύου και μειωμένους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Οι παρεμβολές στα δίκτυα 5G μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις συσκευές IoT που βασίζονται σε μια σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.

Οι συσκευές IoT είναι σχεδιασμένες να μεταδίδουν μικρές ποσότητες δεδομένων για μεγάλα χρονικά διαστήματα, συχνά χρησιμοποιώντας δίκτυα χαμηλής ισχύος και χαμηλού εύρους ζώνης. Οι παρεμβολές στα δίκτυα 5G μπορούν να προκαλέσουν καθυστερήσεις ή διακοπές στη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συσκευών IoT και των συστημάτων που βασίζονται στο cloud, στα οποία βασίζονται. Αυτές οι διακοπές μπορούν να επηρεάσουν κρίσιμες λειτουργίες, όπως η παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο, η διαχείριση της κυκλοφορίας και η κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι παρεμβολές στα δίκτυα 5G μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη καθυστέρηση, η οποία μπορεί να δυσχεράνει την έγκαιρη επικοινωνία των συσκευών IoT μεταξύ τους.

Μια άλλη κρίσιμη πτυχή των παρεμβολών στα δίκτυα 5G είναι το ενδεχόμενο παραβίασης της ασφάλειας. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών, αυξάνεται και ο κίνδυνος επιθέσεων στον κυβερνοχώρο. Οι παρεμβολές

στα δίκτυα 5G μπορούν να διευκολύνουν τους χάκερ να αποκτήσουν μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στις συσκευές IoT και στα δεδομένα που μεταδίδουν. Αυτό μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες, ιδίως για συσκευές που χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες υποδομές, όπως συστήματα υγειονομικής περίθαλψης, δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και δίκτυα μεταφορών.

Για να μετριαστεί ο αντίκτυπος των παρεμβολών στα δίκτυα 5G στις συσκευές IoT, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο έχει ρυθμιστεί και διαχειριστεί σωστά. Αυτό περιλαμβάνει τη στρατηγική ανάπτυξη σημείων πρόσβασης για την ελαχιστοποίηση της συμφόρησης, τη χρήση κατευθυντικών κεραιών για την εστίαση των σημάτων και τη μείωση των παρεμβολών και την εφαρμογή μέτρων ασφαλείας για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογίες, όπως η υπολογιστική ακμής και το network slicing, μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση της καθυστέρησης και στη βελτίωση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας των συσκευών IoT.

Στον Πίνακα 4 περιγράφονται ορισμένοι από τους κύριους τύπους παρεμβολών που μπορούν να επηρεάσουν τα δίκτυα 5G και το IoT. Οι παρεμβολές μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως ο θόρυβος, η πολυδιαδρομή, η παρεμβολή από το ίδιο κανάλι, οι παρεμβολές από άλλες συσκευές ή ασύρματα δίκτυα και οι παρεμβολές. Μία από τις βασικές πτυχές της απόδοσης του δικτύου που μπορεί να επηρεάσει η παρεμβολή είναι η κάλυψη. Η παρεμβολή μπορεί να μειώσει την κάλυψη ενός ασύρματου δικτύου αυξάνοντας το όριο του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) που απαιτείται για αξιόπιστη επικοινωνία. Όταν υπάρχει θόρυβος, πολλαπλές διαδρομές ή παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα, τα σήματα ενδέχεται να μην φτάνουν τόσο μακριά ή να μην διεισδύουν τόσο βαθιά στα κτίρια, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής κάλυψης. Μια άλλη πτυχή που μπορεί να επηρεαστεί από τις παρεμβολές είναι η καθυστέρηση.

Η παρεμβολή μπορεί να αυξήσει την καθυστέρηση εισάγοντας καθυστερήσεις στη μετάδοση ή τη λήψη του σήματος. Για παράδειγμα, η παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών μπορεί να προκαλέσει την άφιξη των σημάτων σε έναν δέκτη σε

ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους, οδηγώντας σε παραμόρφωση του σήματος και αύξηση της καθυστέρησης. Αυτή η καθυστέρηση μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματική για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως παιχνίδια ή τηλεδιασκέψεις. Η παρεμβολή μπορεί επίσης να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα ενός ασύρματου δικτύου. Όταν υπάρχουν παρεμβολές από το ίδιο κανάλι ή παρεμβολές από άλλες συσκευές, μπορεί να προκληθούν συγκρούσεις ή κορεσμός καναλιού, οδηγώντας σε μειωμένη διαθεσιμότητα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια πακέτων ή διακοπές σύνδεσης, δυσχεραίνοντας την πρόσβαση των χρηστών στο δίκτυο και οδηγώντας σε κακή εμπειρία χρήστη.

Η πρόσβαση σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί επίσης να επηρεαστεί από παρεμβολές. Η παρεμβολή μπορεί να δυσχεράνει τη σύνδεση των συσκευών σε ένα δίκτυο, οδηγώντας σε αποτυχίες σύνδεσης ή μειωμένο εύρος ζώνης. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματικό σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα συσκευών, όπως τα αστικά περιβάλλοντα. Η παρεμβολή μπορεί επίσης να επηρεάσει τη διαμόρφωση και την κωδικοποίηση. Όταν υπάρχουν παρεμβολές, η ποιότητα του σήματος μπορεί να υποβαθμιστεί, καθιστώντας δυσκολότερη την αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση του σήματος από τον δέκτη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα και να μειώσει τη συνολική απόδοση του δικτύου.

Πίνακας 4. Κύριοι τύπους παρεμβολών που μπορούν να επηρεάσουν τα δίκτυα 5G και το IoT

Τύπος παρεμβολής	Κάλυψη	Καθυστέρηση	Διαθεσιμότητα	Πρόσβαση	Διαμόρφωση	Κωδικοποίηση
Θόρυβος	Μειωμένη	Αυξημένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη
Πολλαπλές διαδρομές	Μειωμένη	Αυξημένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη
Παρεμβολές μεταξύ κυττάρων	Μειωμένη	Αυξημένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη
Παρεμβολές συν-καναλιού	Μειωμένη	Αυξημένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη
Παρεμβολές από άλλες συσκευές	Μειωμένη	Αυξημένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη
Εμπλοκή Παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα	Μειωμένη	Αυξημένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη	Μειωμένη

Ένα από τα ζητήματα που αναδεικνύονται από την ανάπτυξη του 5G είναι οι παρεμβολές. Θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η παρεμβολή, εξ ορισμού, είναι όταν δύο ηλεκτρομαγνητικά κύματα επικαλύπτονται. Αυτή η επικάλυψη προκαλεί αποτυχίες στην επικοινωνία από το σημείο όπου αποστέλλεται το κύμα μέχρι το σημείο όπου λαμβάνεται. Υπάρχουν δύο τύποι παρεμβολής: η εποικοδομητική και η καταστροφική. Η εποικοδομητική παρεμβολή συμβαίνει όταν τα κύματα επικαλύπτονται ή συγκρούονται σε φάση, και αυτό προκαλεί το κύμα που προκύπτει να έχει μεγαλύτερο πλάτος. Επιπλέον, η καταστροφική παρεμβολή είναι όταν υπάρχει μια εκτός φάσης επικάλυψη, όπου το προκύπτον από αυτό το κύμα θα έχει μικρότερο πλάτος [80]. Ορισμένα δίκτυα μπορεί να είναι πιο επιρρεπή σε παρεμβολές ανάλογα με τον τύπο του κύματος που διαχειρίζονται, δηλαδή τη συχνότητα που χρησιμοποιείται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Τα RF μπορούν να δώσουν αυτή την παρεμβολή, ενώ στα δίκτυα 5G χρησιμοποιούνται ζώνες χιλιοστών και ζώνες κάτω των 6 GHz. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτές οι παρεμβολές θα συνεχίσουν να αυξάνονται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Το Σχήμα 9 καλύπτει διάφορους τύπους παρεμβολών στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας στο 5G. Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού εμφανίζεται όταν γειτονικές συχνότητες ή κανάλια επικαλύπτονται λόγω ατελειών στα φίλτρα ή μη γραμμικότητας στους ενισχυτές. Η ενδοκυτταρική παρεμβολή συμβαίνει όταν δύο χρήστες από γειτονικές κυψέλες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα την ίδια ζώνη συχνοτήτων λόγω περιορισμού των πόρων στο δίκτυο. Οι ενδοκαναλικές και διακαναλικές παρεμβολές συμβαίνουν λόγω της φυσικής εγγύτητας των συσκευών και της χαμηλής ισχύος εντός του δικτύου μακροκυψελών, αντίστοιχα. Η διασυμβολική παρεμβολή προκύπτει από την παραμόρφωση του σήματος λόγω διασποράς φάσης ή πλάτους στο κανάλι. Η διαφέρουσα παρεμβολή εμφανίζεται λόγω μετατόπισης συχνότητας μεταξύ των υποφορέων. Η δια-αριθμητική παρεμβολή προκύπτει λόγω μη ορθογωνιότητας στο σύστημα, προκαλώντας δυσκολίες για την ευθυγράμμιση συμβόλων.

Η διασταυρούμενη παρεμβολή εμφανίζεται όταν τα σήματα μεταδίδονται σε γειτονικές κυψέλες σε διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Η παρεμβολή μεταξύ ακτίνων συμβαίνει λόγω της χρήσης συστημάτων κεραιών πολλαπλών ακτίνων, προκαλώντας παρεμβολές από γειτονικές ακτίνες. Η παρεμβολή πολλαπλών χρηστών συμβαίνει όταν αρκετοί χρήστες προσπαθούν να μεταδώσουν τα αιτήματά τους για πληροφορίες την ίδια στιγμή, και το MU-MIMO χρησιμοποιείται για την αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης των συστημάτων ασύρματης μετάδοσης.

Πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι με την εξέλιξη των υψηλότερων ρυθμών δεδομένων, αναζητούμε την εφαρμογή σε ένα φάσμα συχνοτήτων που καθημερινά γίνεται όλο και πιο κορεσμένο. Η ανάπτυξη σε αυτές τις συχνότητες κάνει τον φορέα εκμετάλλευσης να επαναχρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες για γειτονικές κυψέλες για να εξοικονομήσει φάσμα. Αυτή η εξέλιξη προκαλεί υψηλές παρεμβολές μεταξύ των κυττάρων [81]. Εκτός από αυτές, εμφανίζονται και άλλες παρεμβολές εντός των δικτύων. Η ταξινόμηση αυτών των παρεμβολών είναι η ακόλουθη:

- Παρεμβολή γειτονικού καναλιού: Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού είναι ένα πρόβλημα που εμφανίζεται σε πολλές συσκευές και σε πολλές περιοχές συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει όταν μια γειτονική συχνότητα ή το γειτονικό κανάλι αυτού που χρησιμοποιείται από τη συσκευή μας επικαλύπτεται. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται στο 5G, όπως και σε άλλες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το είδος παρεμβολής προκαλείται κυρίως, όπως αναφέρεται στο [82], από μια ατέλεια στα φίλτρα, όπου δεν μπορούν να φιλτράρουν σωστά το επιθυμητό σήμα. Αυτές οι ατέλειες έχουν ως αποτέλεσμα να περνούν κοντινές συχνότητες στη ζώνη διέλευσης. Με τη σειρά του, αυτό συμβαίνει επειδή οι ενισχυτές δεν είναι γραμμικοί.

- Παρεμβολές εντός και μεταξύ κυττάρων: Η ενδοκυτταρική παρεμβολή είναι μία από τις πιο σημαντικές αιτίες υποβάθμισης της απόδοσης του δικτύου. Αυτό συμβαίνει όταν δύο χρήστες από γειτονικές κυψέλες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει, όπως αναφέρεται στο [83], λόγω του περιορισμού των πόρων εντός του δικτύου, λόγω

του παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Με τον ίδιο τρόπο, η ενδοκυτταρική παρεμβολή εντοπίζεται όταν ένας Σταθμός Βάσης(Base Station) συνδέεται απευθείας στην κοντινή εμβέλεια ενός άλλου BS, και αυτό όταν υπάρχει μια ταυτόχρονη μετάδοση σε αυτή την επαναχρησιμοποίηση. Εμφανίζεται μια παραμόρφωση από την παρεμβολή που δίνει ο χρήστης και ο άλλος εξοπλισμός στην ίδια κυψέλη.

- Παρεμβολές εντός και μεταξύ καναλιών: Η ενδοκαναλική παρεμβολή εμφανίζεται συνήθως όταν υπάρχει χαμηλή ισχύς εντός του δικτύου μακροκυψελών. Τότε, κατά την επικοινωνία, οι πληροφορίες προωθούνται στον πλησιέστερο σταθμό βάσης. Όταν γίνεται η μετάδοση, ολοκληρώνεται μέσω γρήγορης μεταγωγής και περιορίζει τις καθυστερήσεις και τις απώλειες διάδοσης. Ωστόσο, αυτό παράγει ενδοκαναλικές παρεμβολές που επηρεάζουν το πολύτιμο σήμα. Από την άλλη πλευρά, η ενδοκαναλική παρεμβολή εμφανίζεται λόγω της φυσικής εγγύτητας των συσκευών, όταν δύο ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους. Καθώς οι συσκευές αυτές λειτουργούν σε κοντινή απόσταση, ο πομπός ενός σήματος υψηλής ισχύος παρεμβαίνει στον δέκτη ενός ασθενούς σήματος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα δίκτυα 5G IoT ή οι συσκευές με κανάλια στην περιοχή MHz είναι ευάλωτα σε αυτού του είδους τις παρεμβολές λόγω της εγγύτητας και του αριθμού των κοντινών συσκευών. Ένας τρόπος μετριασμού αυτού του τύπου παρεμβολής είναι η χωρική διαμόρφωση μέσω MIMO [84].

- Διασυμβολική παρεμβολή: Η διασυμβολική παρεμβολή συμβαίνει όταν ένα ή περισσότερα σύμβολα παρεμβάλλονται με άλλα σύμβολα. Προκαλείται από τη διασπορά φάσης ή πλάτους στο κανάλι, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σήματος. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στο OFDMA, όπου υπάρχει διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Μια μελέτη [85] εξέθεσε πώς αυτός ο τύπος παρεμβολής μπορεί να αποτελέσει εξαιρετική πρόκληση για τα συστήματα δικτύου και θα πρέπει να επιδιωχθεί η βελτίωση της αποδοτικότητας του εύρους ζώνης, αναζητώντας παράλληλα εναλλακτικές λύσεις στη διαμόρφωση. Αυτό γίνεται προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτός ο τύπος παρεμβολής.

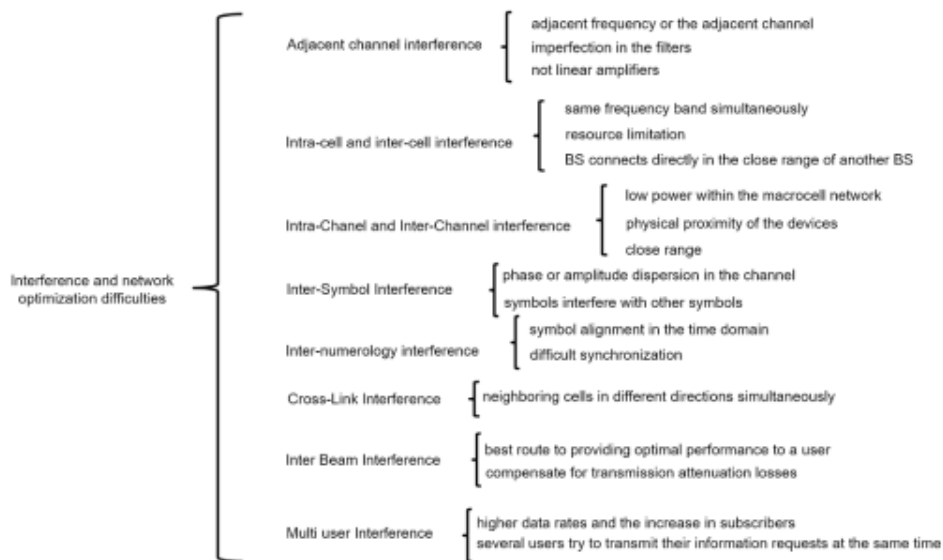
- Δια-αριθμολογική παρεμβολή: είναι ένα μοντέλο που παρέχει ευελιξία για συσκευές σε διαφορετικές υπηρεσίες. Για αυτές τις αριθμολογίες

χρησιμοποιούνται κανάλια 15, 30, 60, 120 και 240 kHz. Αποσκοπούν στη βελτίωση των επιδόσεων και του σημαντικού εύρους ζώνης. Όπως αναφέρεται στο [86], οι συγγραφείς εισάγουν μια μη ορθογωνικότητα στο σύστημα, προκαλώντας δυσκολίες για την ευθυγράμμιση συμβόλων στο πεδίο του χρόνου. Κατά τη δειγματοληψία στην ίδια συχνότητα, η αριθμολογία τείνει να ευθυγραμμίζεται διαφορετικά, καθιστώντας δύσκολο το συγχρονισμό εντός του πλαισίου. Αυτό είναι γνωστό ως παρεμβολή μεταξύ των αριθμολογιών.

- Παρεμβολή διασταυρούμενων συνδέσμων: Αυτή η παρεμβολή συμβαίνει όταν τα σήματα μεταδίδονται σε γειτονικές κυψέλες σε διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα, είτε σε συχνότητα χρόνου είτε σε αυθαίρετα επικαλυπτόμενους πόρους. Όπως αναφέρεται στο [87], υπάρχουν διαφορετικοί τύποι παρεμβολής και διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους εμφανίζεται. Για παράδειγμα, ο Σταθμός Βάσης δέχεται παρεμβολές από συσκευές εξοπλισμού χρήστη σε γειτονικές κυψέλες ή ένας εξοπλισμός χρήστη downlink δέχεται παρεμβολές από μια δεύτερη βάση δεδομένων.
- Inter Beam Interference: Με την υψηλή ζήτηση για τεχνολογικές υπηρεσίες, στόχος ήταν η βελτίωση της φασματικής απόδοσης και της απόδοσης του δικτύου. Σε συμβιβασμούς για δίκτυα όπως το 5G, όπου η ποιότητα και η χωρητικότητα πρέπει να είναι υψηλές, αναζητήθηκε η λύση της ενσωμάτωσης ενός συστήματος κεραιών πολλαπλών ακτίνων, όπως το mMIMO, όπως διερευνήθηκε λεπτομερώς στο [88]. Αυτή η τεχνική προσδιορίζει την καλύτερη διαδρομή για την παροχή βέλτιστης απόδοσης σε έναν χρήστη. Η προσέγγιση αυτή βοηθά στην αντιστάθμιση των απωλειών εξασθένησης της μετάδοσης, ειδικά στις επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων. Στην περίπτωση αυτή, ο σταθμός βάσης παράγει πολλαπλές στενές δέσμες ενέργειας κυρίως RF προς όλες τις κατευθύνσεις της περιοχής κάλυψης. Αυτό προκαλεί χωρικό διαχωρισμό των πολλαπλών ακτίνων, εισάγοντας παρεμβολές. Οι γειτονικές δέσμες προκαλούν αυτή την παρεμβολή από την ίδια κυψέλη ή μια γειτονική κυψέλη.

- Παρεμβολές πολλαπλών χρηστών: Η παρεμβολή πολλαπλών χρηστών οφείλεται στην επιδίωξη της βιομηχανίας για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων στις εφαρμογές και στη δραματική αύξηση των συνδρομητών στις ασύρματες επικοινωνίες [89]. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον τύπο

τεχνολογίας δίνονται από το MU- MIMO, μια τεχνική της γενιάς 5G που συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης των συστημάτων ασύρματης μετάδοσης. Η παρεμβολή πολλαπλών χρηστών εμφανίζεται όταν πολλοί χρήστες προσπαθούν να μεταδώσουν τα αιτήματα πληροφοριών τους ταυτόχρονα.



Σχήμα 9. Κύριες κατηγορίες παρεμβολών στην τεχνολογία 5G [1]

(Ενότητα 3.3.β Παρεμβολές στο 5G)

Έχουν διερευνηθεί οι διάφορες ταξινομήσεις των παρεμβολών. Τώρα επιδιώκεται ως μέρος της κατάστασης της τεχνολογίας η κατανόηση των παρεμβολών στο πλαίσιο του 5G. Θα επιδιωχθεί ο εμπλουτισμός των παρεμβολών σε τεχνολογίες όπως τα Hetnets, το IoT, το D2D, ο κόμβος αναμετάδοσης και το New Radio 5G.

- Παρεμβολές σε δίκτυα διαδικτύου: Είναι ετερογενή δίκτυα 5G. Στόχος τους είναι να παρέχουν ασύρματη κάλυψη για κινητούς συνδρομητές και εφαρμογές σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Τα Hetnets είναι συστήματα δικτύων πολλαπλών επιπέδων που αναπτύσσουν μικρές κυψέλες σε κατοικημένες περιοχές. Αυτές οι κυψέλες χαρακτηρίζονται από μικρή εμβέλεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει σημεία πρόσβασης, τα οποία

επιτρέπουν υψηλή πυκνότητα, βελτιώσεις στην ευελιξία του δικτύου κ.ο.κ. [90]. Λόγω της υποδομής και των τοποθεσιών για την ανάπτυξη αυτού του τύπου δικτύου, είναι επιρρεπή σε διάφορους τύπους παρεμβολών, όπως ενδοκυτταρικά, διακυτταρικά και γειτονικά κανάλια. Αυτό το είδος προβλήματος οφείλεται στην κακή συστηματοποίηση και οργάνωση στο σχεδιασμό του δικτύου του. Υπάρχουν τύποι παρεμβολών εντός των ετερογενών δικτύων λόγω της υποδομής τους ή της ομαδοποίησής τους ανάλογα με την ανάγκη που πρέπει να καλυφθεί. Η πρώτη παρεμβολή που εμφανίζεται είναι η παρεμβολή Co-tier. Αυτός ο τύπος παρεμβολής εμφανίζεται κυρίως σε fem-to-cells, όπου υπάρχει μεγάλη ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Αυτό το περιβάλλον επιτρέπει την κάλυψη, όπως τα σημεία ραδιοπρόσβασης χαμηλής ισχύος, παρέχοντας διάφορες υπηρεσίες στο σπίτι [91].

Παρατηρείται όταν πολλοί χρήστες διαμένουν στην ίδια βαθμίδα δικτύου, όπου η μετάδοση γίνεται σε γειτονικές κυψέλες εντός του fem-to-cell. Παρόμοια με τη συνεπίπεδη παρεμβολή, μπορεί να εμφανιστεί και η διασταυρούμενη παρεμβολή. Η διαφορά είναι ότι η co-tier είναι η παρεμβολή μεταξύ των κυττάρων, ενώ η cross-tier είναι η παρεμβολή μεταξύ του fem-to-cell και των μακροκυττάρων, λαμβάνοντας υπόψη ότι το fem-to-cell βρίσκεται μέσα στο macro-cell [92]. Τέλος, στο [93], η παρεμβολή ελέγχου καναλιού αναφέρει ότι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για τον έλεγχο του καναλιού είναι το κανάλι δείκτη φυσικής μορφής ελέγχου. Αυτό το κανάλι μεταφέρει πληροφορίες χρονοπρογραμματισμού και συγχρονισμού για τα κανάλια δεδομένων των συνδέσεων uplink και downlink. Καθώς η μεταφορά γίνεται με φυσικά μέσα, αυτό θα προκαλέσει παρεμβολές.

- Παρεμβολές στο D2D: Με την εισαγωγή του 5G, τα καλύτερα ασύρματα συστήματα αναζητούν συνεχώς μια λύση που επιτρέπει την καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας. Τα δίκτυα από συσκευή σε συσκευή είναι ένας από τους υποψήφιους για να αποτελέσουν το μέλλον των δικτύων 5G. Η άμεση επαφή μεταξύ δύο κινητών τηλεφώνων αυξάνει την αποδοτικότητα στο φάσμα. Ωστόσο, φέρνει πάντα κάποιες προκλήσεις, στην προκειμένη περίπτωση την αντιμετώπιση

των παρεμβολών. Όπως συζητήθηκε στην περιγραφή των δικτύων Hetnets παραπάνω, αυτά χρησιμοποιούν υψηλή χωρητικότητα συνδεσιμότητας χάρη στη δομή με μακρο-κύτταρο και fem-to-cell. Επιτρέπουν καλές επιδόσεις [94]. Με την εισαγωγή του D2D, αναζητείται ένα κυψελοειδές δίκτυο που βελτιώνει σημαντικά τη φασματική αποδοτικότητα και την απόδοση.

Ωστόσο, ορισμένες προκλήσεις είναι η ανάγκη για μεγαλύτερη ασφάλεια που παρουσιάζει αυτός ο τύπος τεχνολογίας και οι παρεμβολές. Από την πλευρά των παρεμβολών, εμφανίζονται σε σχέση με τις παρεμβολές μεταξύ κυψελών. Επιπλέον, η ενδοκυτταρική μπορεί να σχετίζεται με τη γειτονική συχνότητα. Επιπλέον, πρέπει να θυμόμαστε ότι υπάρχουν τύποι παρεμβολής που είναι χαρακτηριστικοί για τους κόμβους D2D, η παρεμβολή D2D-to-CU και η παρεμβολή μεταξύ των κόμβων D2D, μεταξύ άλλων. • Παρεμβολές στο IoT και τις έξυπνες πόλεις: Δεν μπορούμε να περιοριστούμε σε μία μόνο εφαρμογή όταν συζητάμε για το Διαδίκτυο των πραγμάτων. Ωστόσο, τα πάντα, από τις συσκευές D2D και το V2X έως τα έξυπνα σπιτία ή κτίρια, αποτελούν μέρος του. Η σύλληψη του IoT με το 5G έχει εξελιχθεί σε μεγάλα και μικρά οικοσυστήματα.

Το IoT σε ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιείται πάνω από τη μη αδειοδοτημένη ζώνη ISM, η οποία χρησιμοποιείται για διάφορες φυσικές συσκευές για τη σωστή αξιοποίηση του φάσματος ώστε να τηρούνται οι όροι και οι κανονισμοί της βραχείας ραδιοεπικοινωνίας. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων έχει θεωρηθεί ως το άλλο μεγάλο άλμα στην εξέλιξη του Διαδικτύου. Έχοντας αυτό κατά νου, η ανάπτυξη έξυπνων πόλεων θα συμβάλει στη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου και οικονομικά αποδοτικού οικοσυστήματος [95]. Ο συνδυασμός τεχνολογιών όπως το 5G, το IoT και άλλων θα επιτρέψει τη δημιουργία μεγάλων δεδομένων, την προσφορά σύνθετων υπηρεσιών στην κοινότητα, την προσθήκη μελών στις έξυπνες πόλεις και τη διασφάλιση της συμβατότητας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι πρέπει να χαρακτηριστούν οι παρεμβολές. Όταν μιλάμε για έξυπνες πόλεις που χρησιμοποιούν Wi-Fi λόγω της χρήσης της ζώνης χιλιοστών, τα φυσικά εμπόδια, όπως οι τοίχοι, είναι πράγματα που πρέπει να έχουμε κατά νου, εκτός από την επικάλυψη καναλιών και την παρεμβολή μεταξύ φορέων [96].

Το 5G παρουσιάζεται ως ένα ανεπτυγμένο περιβάλλον με ένα οικοσύστημα όπου τα όρια είναι πλήρεις πόλεις. Οι τεχνολογίες 5G υπόσχονται μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης χρησιμοποιώντας τη ζώνη χιλιοστών. Αν και αυτή η ζώνη συχνοτήτων επιτρέπει αυτά τα πλεονεκτήματα, επιτρέπει μόνο μικρές αποστάσεις. Επιτρέποντας τόσο μικρές αποστάσεις, γίνονται εμφανή προβλήματα όπως οι παρεμβολές. Η βελτιστοποίηση αυτού του τύπου δικτύου θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται για την καλύτερη δυνατή αξιοποίησή του. Στο 5G χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως το MIMO και η διαμόρφωση δέσμης για τη μείωση των παρεμβολών ή της υποβάθμισης του σήματος [90]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι βελτιστοποιήσεις για τα δίκτυα 5G περιλαμβάνουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές που αποτελούν μέρος αυτού του τύπου δικτύου. Αυτές οι αρχιτεκτονικές μπορούν να χωριστούν σε μη αυτόνομες και αυτόνομες.

Η βελτιστοποίηση αυτών των αρχιτεκτονικών, ανάλογα με τη θέση τους, μπορεί να είναι επικερδής, καθώς η επικοινωνία ποικίλλει. Η επικοινωνία μπορεί να είναι πιο προσυτή ή περιορισμένη ανάλογα με την αρχιτεκτονική. Ταυτόχρονα, μπορούν να προκύψουν διαφορετικές διαμορφώσεις για την ενίσχυση της μετάδοσης δεδομένων, της ταχύτητας μετάδοσης και της καθυστέρησης. Με τον ίδιο τρόπο, με το 5G, οι περισσότερες αρχιτεκτονικές επιτρέπουν την ενσωμάτωση του MIMO. Χάρη στη διαχείριση της διαμόρφωσης δέσμης, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της χρήσης των συχνοτήτων για τη μετάδοση, έτσι ώστε ορισμένες τεχνολογίες να μπορούν να στέλνουν πληροφορίες στην περιοχή των mmWaves.

Από τις παρεμβολές στην περίπτωση του NR, άλλες παρεμβολές επηρεάζουν αρνητικά τη μετάδοση δεδομένων σε αυτή την αρχιτεκτονική λόγω της φύσης αυτής της αρχιτεκτονικής. Αυτές είναι η παρεμβολή μεταξύ φορέων και η παρεμβολή φάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιεί το εύρος συχνοτήτων mmWave. Με τη σειρά της, μια άλλη παρεμβολή που βλάπτει το NR είναι η αριθμητική παρεμβολή [97]. Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από το

3G στο 4G και τώρα στο 5G έχει επηρεάσει σημαντικά τις υπηρεσίες και τις συσκευές Internet of Things. Κάθε νέα γενιά παρείχε ταχύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, αυξημένο εύρος ζώνης και βελτιωμένη αξιοπιστία, επιτρέποντας την εμφάνιση νέων υπηρεσιών και εφαρμογών που προηγουμένως δεν ήταν δυνατές στις κινητές συσκευές. Καθώς τα δίκτυα 5G υιοθετούνται ευρύτερα, θα συνεχίσουν να ξεκλειδώνουν νέες ευκαιρίες για καινοτομία, μεταμορφώνοντας τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούμε με τις συσκευές μας και τον κόσμο γύρω μας. Ο πίνακας 5 παρουσιάζει τον αντίκτυπο κάθε γενιάς κινητής τηλεφωνίας, ξεκινώντας από το 3G, και εξηγεί τον αντίκτυπο σε ένα πλαίσιο IoT.

Πίνακας 5. Αντίκτυπος γενιών κινητής τηλεφωνίας

Έτος	Τεχνολογία	Επιπτώσεις στο IoT
2000	Το 3G επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται στο διαδίκτυο, καθώς το 3G επιτρέπει κινητές και ασύρματες συνδέσεις στο διαδίκτυο.	Με τις συνδέσεις στο διαδίκτυο, οι ηλεκτρονικές συσκευές αρχίζουν να μεταδίδουν δεδομένα μέσω του διαδικτύου, το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη συσκευών IoT.
2008	Το 4G επιτρέπει την τεχνολογία υπολογιστικού νέφους και μεταδίδει πληροφορίες με το πρωτόκολλο IP. Επιπλέον, το 4G αύξησε το εύρος ζώνης κάθε μετάδοσης.	Η μετάδοση δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου IP επιτρέπει μια εύκολη μέθοδο επικοινωνίας με ηλεκτρονικές συσκευές. Το σύννεφο επιτρέπει την ανάπτυξη πιο προσιτών λύσεων. Επιπλέον, το κόστος σύνδεσης στο διαδίκτυο μειώνεται επειδή το 4G παρέχει έναν φθινό τρόπο μετάδοσης δεδομένων, καθώς τα πρωτόκολλα IP διαχειρίζονται τα δεδομένα πιο αποτελεσματικά. Αυτή η γενιά είναι η πιο σημαντική στο πλαίσιο του IoT, επειδή η βιομηχανία διαθέτει όλους τους πόρους για τη σύνδεση των συσκευών με το cloud.
2019	Με το 5G, ένα βασικό χαρακτηριστικό είναι το πλάτος της δέσμης, ένα σημαντικό κλειδί στο πλαίσιο του IoT.	Εάν έχουμε μεγαλύτερο εύρος ζώνης, μπορούμε να παρέχουμε καλύτερες λύσεις, όπως συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Στην κοινωνία μας, αυτές οι λύσεις είναι ζωτικής σημασίας αν θέλουμε να αυτοματοποιήσουμε τις διαδικασίες. Για το λόγο αυτό, το 5G παίζει ουσιαστικό ρόλο στο πλαίσιο του IoT, επειδή η βιομηχανία προσπαθεί να αυτοματοποιήσει όλες τις διαδικασίες της.

Οι νέες τεχνολογίες και η πρόσφατη έρευνα σχετικά με την ασύρματη επικοινωνία έχουν δημιουργήσει νέους τρόπους μετάδοσης και λήψης δεδομένων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, όπως το 5G, έφτασαν νέα χαρακτηριστικά για την παροχή/εκτέλεση των τρόπων αποστολής και λήψης δεδομένων. Το IoT έχει δείξει περισσότερα οφέλη, βοηθώντας με άλλες τεχνολογίες όπως η μηχανική μάθηση, η υπολογιστική νέφους και άλλες. Δεδομένου ότι τα δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία, κάθε συσκευή σχηματίζει μια νοημοσύνη ομήνους που επιτρέπει την αυτοματοποίηση και αποφεύγει τη σπατάλη πόρων στη βιομηχανία. Ένας άλλος παράγοντας που αναλύεται είναι οι παρεμβολές στα κανάλια, καθώς τα σπίτια μας, τα γραφεία, ακόμη και οι φυσικοί χώροι έχουν ηλεκτρονικές συσκευές που συνήθως χρησιμοποιούν τη ζώνη 2,4 GHz, γεγονός που προκαλεί παρεμβολές σε αυτή τη ζώνη. Ως εκ τούτου, το 5G ενσωματώνει νέες ζώνες για την αποφυγή των παρεμβολών που προκαλούνται από αυτή τη μαζική κατανάλωση των 2,4 GHz. Πρέπει να συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά του 3G, του 4G και του 5G για να καταλάβουμε γιατί το 5G αποτελεί βασικό κλειδί στις έξυπνες πόλεις. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των τριών γενεών τεχνολογιών φαίνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά γενιών 3G-4G-5G

	Γενιά	3G	4G	5G
Χαρακτηριστικό γνώρισμα				
Standard		WCDMA	OFDMA	
Ρυθμός δεδομένων		A, CDMA2000	, MC-CDMA	CDMA, BDMA
		2 Mbps	2 Mbps-1 Gbps	1 Gbps και άνω
Συχνότητα		1.8-2.5 GHz	2-8 GHz	3-300 GHz
Δίκτυο τύπου πυρήνα		Δίκτυο πακέτων	Όλο το δίκτυο IP	Δίκτυο IP και 5G-NI

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι προσδοκίες για τη χρήση της τεχνολογίας 5G στο IoT. Το πρώτο χαρακτηριστικό που αναφέρεται είναι το εύρος ζώνης. Το εύρος ζώνης αναφέρεται στην ποσότητα δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός δικτύου ή ενός καναλιού επικοινωνίας σε δεδομένο χρονικό διάστημα. Στο πλαίσιο του 5G, υψηλότερο εύρος ζώνης σημαίνει ότι περισσότερα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω των ραδιοκυμάτων σε μικρότερο χρονικό διάστημα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερο και πιο αξιόπιστο 5G μεταδόσεις.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που τονίζεται είναι η τεχνητή νοημοσύνη, η οποία μπορεί να αναλύει όλα τα δεδομένα που παράγονται από τις συσκευές IoT για να λαμβάνει ακριβείς αποφάσεις. Με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, οι συσκευές IoT μπορούν να εντοπίζουν μοτίβα, να κάνουν προβλέψεις και να αναλαμβάνουν δράσεις με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι απαραίτητο για την υποστήριξη εφαρμογών IoT που απαιτούν λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, όπως οι έξυπνες πόλεις και τα ευφυή συστήματα μεταφορών. Το τρίτο χαρακτηριστικό είναι η παρακολούθηση και διαχείριση σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή η δυνατότητα παρακολούθησης και διαχείρισης ηλεκτρονικών συσκευών. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την παρακολούθηση και διαχείριση των συσκευών IoT από μια κεντρική τοποθεσία, η οποία μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως ο βιομηχανικός αυτοματισμός ή η διαχείριση έξυπνων δικτύων.

Η νοημοσύνη σμήνους είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που αναφέρεται, το οποίο σημαίνει ότι κάθε συσκευή IoT μπορεί να είναι ένας κόμβος και να συνεργάζεται με άλλους κόμβους για τη δημιουργία μιας νοημοσύνης σμήνους. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στις συσκευές IoT να εργάζονται συνεργατικά και αποτελεσματικά, παρέχοντας καλύτερες επιδόσεις και αξιοπιστία σε πολύπλοκες εφαρμογές. Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) αναφέρεται επίσης ως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που μπορεί να παρέχει το 5G στις συνδέσεις IoT. Με το 5G, οι συσκευές IoT μπορούν να βιώσουν καλύτερη συνδεσιμότητα, χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλότερη απόδοση, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τη συνολική QoS και τις επιδόσεις των εφαρμογών IoT.

Στο πλαίσιο των συνδέσεων IoT, το QoS αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να παρέχει αξιόπιστη και υψηλής απόδοσης συνδεσιμότητα στις συσκευές IoT. Το 5G είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τις συνδέσεις IoT, καθώς μπορεί να παρέχει διάφορα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιώσουν το συνολικό QoS και τις επιδόσεις των εφαρμογών IoT. Το 5G έχει σχεδιαστεί για να παρέχει σημαντικά βελτιωμένο QoS σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού προηγμένων τεχνολογιών και χαρακτηριστικών που ενσωματώνονται στο πρότυπο 5G. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G που μπορεί να συμβάλει σε καλύτερο QoS είναι η χρήση προηγμένων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης.

Οι τεχνολογίες αυτές, όπως η μαζική MIMO και η διαμόρφωση δέσμης, επιτρέπουν την αποδοτικότερη χρήση του ραδιοφάσματος και την καλύτερη ποιότητα σήματος. Αυτό σημαίνει ότι το 5G μπορεί να παρέχει καλύτερη συνδεσιμότητα και ισχύ σήματος, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα του δικτύου. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του 5G που μπορεί να συμβάλει σε καλύτερο QoS είναι η χρήση του network slicing. Το network slicing επιτρέπει τη διαίρεση του δικτύου σε πολλαπλά εικονικά δίκτυα, καθένα από τα οποία είναι προσαρμοσμένο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης και απαιτήσεις. Αυτό σημαίνει ότι σε διαφορετικές εφαρμογές και υπηρεσίες μπορούν να δοθούν διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας, εύρους ζώνης και απαιτήσεων καθυστέρησης, ανάλογα με τις ανάγκες τους. Αυτό μπορεί να βελτιώσει το QoS για κάθε μεμονωμένη εφαρμογή και χρήστη. Επιπλέον, το 5G μπορεί να παρέχει χαμηλότερη καθυστέρηση, υψηλότερη απόδοση και καλύτερη υποστήριξη για μαζικές αναπτύξεις IoT, τα οποία μπορούν να συμβάλουν σε καλύτερο QoS.

Χαμηλότερη καθυστέρηση σημαίνει ότι υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση μεταξύ της μετάδοσης των δεδομένων και της λήψης τους, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και ταχύτερους χρόνους απόκρισης. Υψηλότερη απόδοση σημαίνει ότι περισσότερα δεδομένα μπορούν να

μεταδοθούν μέσω του δικτύου σε δεδομένο χρόνο, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των εφαρμογών που απαιτούν μεταφορά δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης. Τέλος, η καλύτερη υποστήριξη για μαζικές αναπτύξεις IoT σημαίνει ότι το δίκτυο μπορεί να διαχειριστεί μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και κίνησης δεδομένων, χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα υπηρεσίας ποιότητας για μεμονωμένες συσκευές ή εφαρμογές.

Η χαμηλή καθυστέρηση είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που μπορεί να προσφέρει το 5G, μειώνοντας την καθυστέρηση μεταξύ μετάδοσης και λήψης δεδομένων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν άμεση λήψη αποφάσεων, όπως τα αυτόνομα οχήματα ή οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις. Η υπολογιστική νέφους αναφέρεται ως χαρακτηριστικό που μπορεί να προσφέρει το 5G στις συνδέσεις IoT. Με το 5G, οι συσκευές IoT μπορούν να συνδεθούν στο σύννεφο πιο αποτελεσματικά και κάθε συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους τους πόρους του σύννεφου, όπως η αποθήκευση και η επεξεργαστική ισχύς. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις επιδόσεις και την επεκτασιμότητα των εφαρμογών IoT, ιδίως εκείνων που απαιτούν μεγάλες ποσότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων.

Η χαμηλή καθυστέρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές που απαιτούν άμεση λήψη αποφάσεων, όπως τα αυτόνομα οχήματα ή οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις. Με το 5G, η καθυστέρηση μπορεί να μειωθεί σε μόλις ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και ταχύτερους χρόνους απόκρισης. Επιπλέον, το 5G μπορεί να παρέχει υψηλότερη απόδοση, η οποία αναφέρεται στην ποσότητα δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν μέσω ενός δικτύου σε δεδομένο χρόνο. Με υψηλότερη απόδοση, οι συσκευές IoT μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τις επιδόσεις των εφαρμογών IoT που απαιτούν μεταφορά δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης όπως ροή βίντεο ή δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο.

Η υπολογιστική νέφος είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που μπορεί να προσφέρει το 5G για συνδέσεις IoT. Με το 5G, οι συσκευές IoT μπορούν να συνδεθούν στο σύννεφο πιο αποτελεσματικά και κάθε συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους τους πόρους του σύννεφου, όπως αποθήκευση και επεξεργαστική ισχύ. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις επιδόσεις και την επεκτασιμότητα των εφαρμογών IoT, ιδίως εκείνων που απαιτούν μεγάλες ποσότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων.

Πίνακας 7. Προσδοκίες για τη χρήση της τεχνολογίας 5G στο IoT

Χαρακτηριστικό γνώρισμα	Περιγραφή
Εύρος ζώνης	Περισσότερο εύρος ζώνης για την παροχή εφαρμογών με υψηλή ταχύτητα.
AI Παρακολούθηση και διαχείριση σε πραγματικό χρόνο	Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αναλύσει όλα τα δεδομένα που παράγονται από τις συσκευές IoT για τη λήψη ακριβών αποφάσεων Η δυνατότητα παρακολούθησης και διαχείρισης ηλεκτρονικών συσκευών από απόσταση.
Νοημοσύνη σμήνους	Κάθε συσκευή IoT μπορεί να είναι ένας κόμβος και, συνεργαζόμενη με άλλους κόμβους, μπορεί να λειτουργήσει ως σμήνος νοημοσύνης
QoS	Το 5G μπορεί να παρέχει καλύτερο QoS στις συνδέσεις IoT.
Χαμηλή καθυστέρηση	Το 5G μειώνει την καθυστέρηση, πράγμα που σημαίνει ότι οι συσκευές IoT μπορούν να λαμβάνουν άμεσες αποφάσεις.
Υπολογιστικό νέφος	Το 5G μπορεί να παρέχει καλύτερες συνδέσεις με το σύννεφο, που σημαίνει ότι κάθε συσκευή IoT μπορεί να χρησιμοποιεί όλους τους πόρους του νέφους.

Δεδομένου ότι οι έξυπνες πόλεις χρησιμοποιούν συσκευές IoT για να παρέχουν μια λύση στην καθημερινή μας ρουτίνα, το 5G είναι απαραίτητο για την παροχή μιας πιο σταθερής, επεκτάσιμης και ακριβούς λύσης, με τη βοήθεια άλλων τεχνολογιών, όπως η υπολογιστική νέφος, η μηχανική μάθηση κ.ο.κ. Με άλλα λόγια, το 5G είναι το κλειδί στις έξυπνες πόλεις επειδή αυτή η γενιά

βελτιστοποιεί τον τρόπο μετάδοσης και λήψης δεδομένων και εκτελεί τον τρόπο λήψης δεδομένων. Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι ηλεκτρονικές συσκευές μπορούν να λαμβάνουν ακριβείς αποφάσεις μετά την επεξεργασία. Ο πίνακας 8 χωρίστηκε σε μέρη, όπου το πρώτο μέρος ασχολείται αποκλειστικά με την περιγραφή και τον αντίκτυπο στο 5G και το δεύτερο μέρος περιγράφει περιπτώσεις και τρόπους αποτροπής των παρεμβολών αυτών.

Πίνακας 8. Περιγραφή παρεμβολών και αν'τίκτυπος στο 5G

Παρεμβολή	Περιγραφή	Επιπτώσεις 5G
Παρεμβολή γειτονικού καναλιού	Αυτό συμβαίνει όταν το κανάλι συχνότητας της συσκευής μας επικαλύπτεται	Αν δεν έχουμε καλά ζωνοδιαβατά φίλτρα, θα υπάρχουν παρεμβολές από κοντινές συχνότητες. Στις συσκευές 5G, αυτό μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο.
Παρεμβολές εντός και μεταξύ κυψελών	Η παρεμβολή μεταξύ κυψελών συμβαίνει όταν δύο χρήστες σε γειτονικά κελιά προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν την ίδια συχνότητα ταυτόχρονα. Η παρεμβολή εντός κυψέλης συμβαίνει όταν υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση μικρής εμβέλειας από δύο BS, με παραμόρφωση από τον χρήστη και τον άλλο εξοπλισμό στην ίδια κυψέλη.	Αυτός ο τύπος παρεμβολής μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά στα δίκτυα 5G, διότι για βάσεις ή αρχιτεκτονικές όπου υπάρχουν μικροή μακροκύτταρα, η ισχύς των γειτονικών σημάτων τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική μετάδοση από πολλαπλούς χρήστες μπορεί να παρεμβάλλεται μεταξύ τους [98].
Παρεμβολές εντός και μεταξύ καναλιών	Η ενδοκαναλική παρεμβολή εμφανίζεται όταν υπάρχει μικρή ισχύς εντός της κυψέλης του μακροδικτύου.	Οι διακαναλικές παρεμβολές εμφανίζονται λόγω της εγγύτητας των συσκευών, όταν δύο διαφορετικές συχνότητες προκαλούν παρεμβολές. Καθώς λειτουργούν σε μικρή απόσταση, ο πομπός ενός σήματος υψηλής ισχύος προκαλεί παρεμβολές- οι παρεμβολές μπορεί επίσης να οφείλονται στη διερεύνηση των hetnets με OFDM. Υπάρχουν λύσεις μείωσης της ICI με την αντιστροφή κατανομή συχνότητας (RFA) που χρησιμοποιείται, η οποία είναι μια προληπτική παρεμβολή. Προκαλείται από τη διασπορά φάσης ή πλάτους του καναλιού, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σήματος. Αυτό φαίνεται καθαρά στο OFDMA, το οποίο προκαλεί διάδοση πολλαπλών διαδρομών και επηρεάζει την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης.
Διασυμβολική παρεμβολή	Αυτός ο τύπος παρεμβολής συμβαίνει όταν ένα ή περισσότερα σύμβολα παρεμβάλλονται με άλλα σύμβολα.	Στην αναζήτηση υψηλότερων επιδόσεων και σημαντικού εύρους ζώνης, η χρήση αριθμολογίας, μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές, έχοντας δίκτυα με πολλές συσκευές που στέλνουν σημαντικές ποσότητες πληροφοριών, γεγονός που κάνει αυτό το είδος παρεμβολής πιο έντονο, επηρεάζοντας την απόδοση του δικτύου
Δια-αριθμολογική παρεμβολή	Εμφανίζεται όταν χρησιμοποιείται το σύστημα αριθμολογίας για μεγαλύτερη ευελιξία και δεν επιτρέπει την τέλεια ευθυγράμμιση στο πεδίο του χρόνου. Αυτές οι κακές ευθυγραμμίσεις ή ατέλειες είναι γνωστές ως παρεμβολές μεταξύ των αριθμολογιών	

Παρεμβολή διασταυρούμενων συνδέσεων	Αυτό το είδος παρεμβολής συμβαίνει όταν μια μετάδοση γίνεται σε γειτονική κυψέλη προς διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα, είτε με αυθαίρετη επικάλυψη πόρων είτε με χρονική συχνότητα.	Οι παρεμβολές διασταυρούμενων συνδέσεων μπορούν να επηρεάσουν τα δίκτυα 5G λόγω της ποσότητας των απαιτούμενων BS, καθώς η λανθασμένη μεταπήδηση μπορεί να προκαλέσει αποτυχίες απόδοσης.
Παρεμβολή μεταξύ των ακτίνων (Inter-Beam) [99]	Αυτό συμβαίνει όταν χρησιμοποιείται η τεχνολογία MIMO, καθώς αυτός ο τύπος συστοιχίας στέλνει ενέργεια RF προς όλες τις κατευθύνσεις, με τη χωρική διαίρεση των πολλαπλών ακτίνων να προκαλεί παρεμβολές.	Προκαλεί παρεμβολές σε εφαρμογές όπου εισάγεται η τεχνολογία κεραιών MIMO λόγω της ίδιας χρήσης. Κατά την αναζήτηση καλύτερης φασματικής απόδοσης και βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου, οι παρεμβολές από γειτονικές δέσμες εντός της ίδιας κυψέλης ή πολλαπλών συστοιχιών MIMO μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τους γείτονές τους.
Παρεμβολή πολλαπλών χρηστών [100]	Αυτό συμβαίνει όταν, στο MU-MIMO, πολλοί χρήστες προσπαθούν να μεταδώσουν πληροφορίες ταυτόχρονα.	Λαμβάνοντας υπόψη ότι στο 5G επιδιώκεται βελτίωση των επιδόσεων και της προώθησης πληροφοριών, κατά τη μετάβαση σε MUMIMO, οι μη συντονισμένες κυψέλες αντιμετωπίζουν σημαντικότερα προβλήματα κατά τη διαχείριση των χρηστών.
Παρεμβολή γειτονικού καναλιού	Αυτό συμβαίνει όταν το κανάλι συχνότητας της συσκευής επικαλύπτεται.	Αν δεν έχουμε καλά ζωνοπερατά φίλτρα, θα υπάρχουν παρεμβολές από κοντινές συχνότητες. Στις συσκευές 5G, αυτό μπορεί να έχει αντίκτυπο.

Είναι σκόπιμο να εξετάσουμε πώς αυτό το είδος παρεμβολής μπορεί να επηρεάσει ή να επηρεάσει τα δίκτυα 5G σήμερα, καθώς πρέπει να το έχουμε κατά νου με την εκρηκτική ανάπτυξη της τεχνολογίας. Με τη σειρά του, αυτό μπορεί να επηρεάσει τις διάφορες αρχιτεκτονικές 5G, δεδομένου ότι οι κύριοι στόχοι αυτών των δικτύων είναι να βελτιώσουν πράγματα όπως η καθυστέρηση, η απόδοση, οι ταχύτητες μετάδοσης κ.λπ. Ο Πίνακας 9 παρέχει μια επισκόπηση των διαφόρων τύπων παρεμβολών που μπορούν να εμφανιστούν σε δίκτυα 5G και των πιθανών επιπτώσεών τους στην απόδοση του δικτύου. Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού συμβαίνει όταν το κανάλι συχνότητας της συσκευής μας επικαλύπτεται με κοντινές συχνότητες, οδηγώντας σε παρεμβολές.

Η ενδοκυτταρική και διακυτταρική παρεμβολή συμβαίνει όταν πολλαπλοί χρήστες σε γειτονικές κυψέλες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα την ίδια συχνότητα ή όταν υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση μικρής εμβέλειας από δύο σταθμούς βάσης στην ίδια κυψέλη. Αυτού του είδους οι παρεμβολές μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή βλάβη στα δίκτυα 5G, ιδίως σε αρχιτεκτονικές όπου

υπάρχουν μικρο- ή μακρο-κυψέλες. Οι ενδοκαναλικές και διακαναλικές παρεμβολές εμφανίζονται όταν υπάρχει μικρή ισχύς εντός της κυψέλης του μακροδικτύου, αν και οι διακαναλικές παρεμβολές μπορούν επίσης να εμφανιστούν λόγω της εγγύτητας συσκευών που λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες.

Η διασυμβολική παρεμβολή συμβαίνει όταν ένα ή περισσότερα σύμβολα παρεμβάλλονται με άλλα σύμβολα, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σήματος λόγω της διασποράς φάσης ή πλάτους του καναλιού. Η παρεμβολή μεταξύ των φορέων συμβαίνει όταν το σήμα χάνεται λόγω μετατόπισης μεταξύ των υποφορέων, οδηγώντας σε μεγάλης ή μικρής κλίμακας εξασθένιση και μεταβολές στο λαμβανόμενο σήμα. Η διαριθμολογική παρεμβολή εμφανίζεται όταν χρησιμοποιείται το σύστημα αριθμολογίας για μεγαλύτερη ευελιξία, οδηγώντας σε κακές ευθυγραμμίσεις ή ατέλειες γνωστές ως δια-αριθμολογική παρεμβολή. Παρεμβολή διασταυρούμενων συνδέσεων (Cross-Link Interference) συμβαίνει όταν γίνεται μετάδοση σε γειτονική κυψέλη προς διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα, οδηγώντας σε αποτυχίες απόδοσης. Η παρεμβολή μεταξύ των ακτίνων εμφανίζεται όταν χρησιμοποιείται τεχνολογία MIMO, με τη χωρική διαίρεση των πολλαπλών ακτίνων να προκαλεί παρεμβολές από γειτονικές ακτίνες είτε από την ίδια κυψέλη είτε από γειτονικές κυψέλες. Τέλος, η παρεμβολή πολλαπλών χρηστών εμφανίζεται όταν πολλαπλοί χρήστες προσπαθούν να μεταδώσουν πληροφορίες ταυτόχρονα, οδηγώντας σε προβλήματα κατά τη διαχείριση χρηστών σε μη συντονισμένες κυψέλες.

Πίνακας 9. Επισκόπηση των διαφόρων τύπων παρεμβολών που μπορούν να εμφανιστούν σε δίκτυα 5G και των πιθανών επιπτώσεών τους στην απόδοση του δικτύου

Τύπος παρεμβολής	Περιγραφή	Επιπτώσεις στα δίκτυα 5G
Παρακείμενο κανάλι	Επικάλυψη καναλιών συχνότητας	Ναι
Ενδοκυτταρικά και διακυτταρικά	Ταυτόχρονη μετάδοση σε γειτονικές κυψέλες	Όχι
Ενδοκαναλικά και διακαναλικά	Χαμηλή ισχύς στα macro network cell	Ναι

Inter-Symbol	Παρεμβολή μεταξύ συμβόλων	Όχι
Διαμεταφορέας	Απώλεια σήματος λόγω μετατόπισης υποφορέα	Όχι
Δια- αριθμολογία	Κακές ευθυγραμμίσεις στο σύστημα αριθμολογίας	Όχι
Cross-Link	Επικαλυπτόμενες μεταδόσεις σε γειτονικά κύτταρα	Όχι
Μεταξύ των ακτινών	Παρεμβολή από γειτονικές ακτίνες σε MIMO	Όχι
Πολλαπλός χρήστης	Ταυτόχρονη μετάδοση από πολλούς χρήστες	Όχι

3.4 Συγκρίσεις δεδομένων δικτύων 5G και υπηρεσιών IoT

Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε κριτικά τις σχετικές επιπτώσεις της σύγκλισης δικτύων και υπηρεσιών μεταξύ των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT. Ένα από τα κύρια οφέλη της σύγκλισης των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT είναι η δυνατότητα υποστήριξης μαζικής επικοινωνίας μεταξύ μηχανών. Η ενσωμάτωση των δικτύων 5G με τις συσκευές IoT δημιουργεί μια απρόσκοπτη σύνδεση, επιτρέποντας στις συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους και με το διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες και χαμηλή καθυστέρηση. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις σε κλάδους όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές και η μεταποίηση, όπου πρέπει να μεταδίδονται μεγάλοι όγκοι δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για να είναι δυνατή η αποτελεσματική λειτουργία. Για παράδειγμα, τα συνδεδεμένα αυτοκίνητα, τρένα και αεροπλάνα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και με άλλα συνδεδεμένες συσκευές σε πραγματικό χρόνο, οδηγώντας σε βελτιωμένη ασφάλεια και αποδοτικότητα.

Ένας άλλος αντίκτυπος της σύγκλισης των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT είναι η δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων και πηγών εσόδων. Με την αυξημένη ταχύτητα και χωρητικότητα των δικτύων 5G, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να προσφέρουν νέες υπηρεσίες IoT, όπως έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις και έξυπνα εργοστάσια. Αυτό δημιουργεί μια ευκαιρία για τους παρόχους υπηρεσιών να αναπτύξουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα και ροές εσόδων, όπως η πώληση πληροφοριών σχετικά με τα δεδομένα, η παροχή υπηρεσιών διαχείρισης

και η προσφορά εξατομικευμένων λύσεων. Για παράδειγμα, οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών μπορούν να προσφέρουν συνδεσιμότητα IoT ως υπηρεσία, η οποία παρέχει στις επιχειρήσεις μια οικονομικά αποδοτική και κλιμακούμενη μέθοδο για τη σύνδεση και τη διαχείριση των συσκευών IoT.

Ωστόσο, η σύγκλιση των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT παρουσιάζει επίσης ορισμένες δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μία από τις προκλήσεις είναι το ζήτημα της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών, αυξάνεται και η πιθανότητα κυβερνοεπιθέσεων και παραβιάσεων δεδομένων. Ως εκ τούτου, οι πάροχοι υπηρεσιών και οι κατασκευαστές συσκευών πρέπει να συνεργαστούν για να διασφαλίσουν ότι οι συσκευές IoT είναι ασφαλείς και συμμορφώνονται με τους κανονισμούς προστασίας δεδομένων. Επιπλέον, η σύγκλιση των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και τεχνολογία. Οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει να αναπτύξουν τεράστιο αριθμό σταθμών βάσης 5G για να επιτρέψουν αξιόπιστη και συνεπή συνδεσιμότητα για τις συσκευές IoT.

Η σύγκλιση των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους και με το διαδίκτυο. Έχει σημαντικές επιπτώσεις σε κλάδους όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές και η μεταποίηση, δημιουργώντας νέα επιχειρηματικά μοντέλα και πηγές εσόδων. Ωστόσο, παρουσιάζει επίσης προκλήσεις, όπως ανησυχίες για την ασφάλεια και την προστασία της ιδιωτικής ζωής και την ανάγκη για σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και τεχνολογία. Ως εκ τούτου, οι πάροχοι υπηρεσιών και οι κατασκευαστές συσκευών πρέπει να συνεργαστούν για να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις και να διασφαλίσουν ότι η σύγκλιση των δικτύων 5G και των υπηρεσιών IoT θα οδηγήσει σε έναν ασφαλέστερο, αποτελεσματικότερο και συνδεδεμένο κόσμο.

Ο πίνακας 10 εξετάζει τις πιθανές θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της ενσωμάτωσης των τεχνολογιών 5G με λύσεις IoT. Ο πίνακας χωρίζεται σε τρεις στήλες, όπως η Κατηγορία, το Πλαίσιο και η Επεξήγηση. Η πρώτη κατηγορία που

αναφέρεται στον πίνακα είναι η θετική, η οποία περιλαμβάνει τρία διαφορετικά πλαίσια.

Το πρώτο πλαίσιο είναι η βελτιστοποίηση κόστους, η οποία αναφέρεται στην πιθανή εξοικονόμηση κόστους που συνδέεται με την ενσωμάτωση τεχνολογιών 5G σε λύσεις IoT. Με τη βοήθεια των δεδομένων που συλλέγονται από τις συσκευές, οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις διαδικασίες τους, οδηγώντας σε πιο αποδοτικές λύσεις. Επιπλέον, η λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων επιτρέπει σε ιδιωτικούς ή δημόσιους φορείς να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις. Για παράδειγμα, μια πόλη μπορεί να χρησιμοποιήσει λύσεις IoT για τη βελτιστοποίηση της κυκλοφοριακής ροής, οδηγώντας σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμων και λιγότερα μποτιλιαρίσματα.

Το δεύτερο πλαίσιο που αναφέρεται στη θετική κατηγορία είναι η βελτίωση της ποιότητας ζωής, η οποία αναφέρεται στη δυνητική βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Παρέχοντας σχετικές πληροφορίες και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των δημόσιων υποδομών, οι πόλεις μπορούν να επηρεάσουν θετικά τη ζωή των πολιτών. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας λύσεις IoT, μια πόλη μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια παρακολουθώντας δημόσιους χώρους και την παροχή ειδοποιήσεων σε πραγματικό χρόνο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, οι πόλεις μπορούν να δημιουργήσουν νέες ευκαιρίες οικονομικής ανάπτυξης που τροφοδοτούνται από την εποχή της ψηφιοποίησης.

Το τρίτο πλαίσιο που αναφέρεται στη θετική κατηγορία είναι η μείωση της κλιματικής αλλαγής. Με την εφαρμογή λύσεων IoT με τεχνολογίες 5G, οι επιχειρήσεις μπορούν να έχουν στενότερο έλεγχο των βιομηχανικών διαδικασιών και αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις σχετικές περιβαλλοντικές ιδιότητες. Αυτό μπορεί να αποτελέσει το επόμενο βήμα για να γίνουμε μια πιο φιλική προς το περιβάλλον κοινωνία. Περνώντας στην κατηγορία Αρνητικά, ο πίνακας αναφέρει δύο διαφορετικά πλαίσια. Το πρώτο πλαίσιο είναι η ψηφιακή μη ένταξη, η οποία αναφέρεται στις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις των λύσεων IoT σε περιοχές με λιγότερη πρόσβαση σε τεχνολογικές υπηρεσίες, ενώ οι

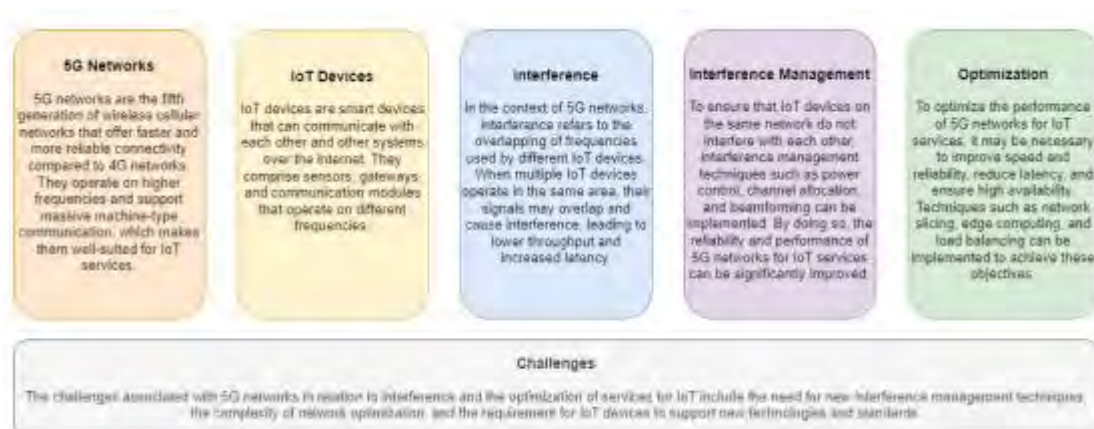
προσπάθειες για το 5G και το IoT μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των πόλεων που μπορούν να το αντέξουν οικονομικά, προς το παρόν δεν προσφέρουν οικονομικά αποδοτικές λύσεις για περιοχές με λιγότερη πρόσβαση σε τεχνολογικές υπηρεσίες. Το δεύτερο πλαίσιο που αναφέρεται στην κατηγορία Αρνητικά είναι η παραβίαση της ιδιωτικής ζωής. Η ύπαρξη πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο για περιουσιακά στοιχεία, ανθρώπους και κάθε ζωντανό ή μη ζωντανό οργανισμό σε μια περιοχή μπορεί να απειλήσει σοβαρά με παραβιάσεις της ιδιωτικής ζωής. Τα πολιτικά ή κοινωνικά κινήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν αρνητικά ευαίσθητα δεδομένα που σχετίζονται με τους πολίτες για να εκτελέσουν οποιαδήποτε ενέργεια.

Πίνακας 10. Πιθανές θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της ενσωμάτωσης των τεχνολογιών 5G με λύσεις IoT

Κατηγορία	Πλαίσιο	Επεξήγηση
Θετικό	Βελτιστοποίηση κόστους	Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών 5G με λύσεις IoT θα επιτρέψει πιο οικονομικά αποδοτικές λύσεις όταν το 5G και οι τεχνολογίες φτάσουν στην mainstream αγορά. Η βελτιστοποίηση των διαδικασιών με τα δεδομένα που συλλέγονται από τις συσκευές θα επιτρέψει τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων, επιτρέποντας σε ιδιωτικούς ή δημόσιους φορείς να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις.
Θετικό	Βελτίωση QoS	Παρέχοντας σχετικές πληροφορίες και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των δημόσιων υποδομών, οι πολίτες θα επηρεαστούν θετικά από τη μείωση της κυκλοφορίας, τη βελτίωση της ασφάλειας και τις νέες ευκαιρίες οικονομικής ανάπτυξης που τροφοδοτεί η εποχή της ψηφιοποίησης
Θετικό	Μείωση της κλιματικής αλλαγής	Έχοντας στενότερο έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών και αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις σχετικές περιβαλλοντικές ιδιότητες, η εφαρμογή λύσεων IoT με τεχνολογίες 5G μπορεί να αποτελέσει το επόμενο βήμα προς μια πιο φιλική προς το περιβάλλον κοινωνία.
Αρνητικό	Ψηφιακή μη-συμπερίληψη	Ενώ οι προσπάθειες για το 5G και το IoT μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των πόλεων που μπορούν να το αντέξουν οικονομικά, επί του παρόντος δεν προσφέρουν οικονομικά αποδοτικές λύσεις για περιοχές με λιγότερη πρόσβαση σε τεχνολογικές υπηρεσίες.
Αρνητικό	Συμβιβασμοί στην ιδιωτική ζωή	Η ύπαρξη πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο σχετικά με περιουσιακά στοιχεία, ανθρώπους και κάθε ζωντανό ή μη ζωντανό οργανισμό σε μια περιοχή μπορεί να απειλήσει σοβαρά την παραβίαση της ιδιωτικής ζωής. Τα πολιτικά ή κοινωνικά κινήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν αρνητικά ευαίσθητα δεδομένα που σχετίζονται με τους πολίτες για να εκτελέσουν οποιαδήποτε ενέργεια.

Το Σχήμα 10 εξετάζει τις κύριες προκλήσεις στα δίκτυα 5G. Μία από τις κύριες προκλήσεις των δικτύων 5G που σχετίζονται με τις παρεμβολές, τις συσκευές IoT και τη βελτιστοποίηση του δικτύου είναι η υψηλή ζήτηση για ασύρματη συνδεσιμότητα και μετάδοση δεδομένων. Με την αύξηση του αριθμού των συσκευών IoT και την εκθετική αύξηση της χρήσης δεδομένων, τα δίκτυα 5G πρέπει να βελτιστοποιηθούν ώστε να διαχειρίζονται τον τεράστιο όγκο μετάδοσης δεδομένων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις παρεμβολές.

Η ανάπτυξη μικρών κυψελών και ετερογενών δικτύων είναι μια στρατηγική για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και τη μείωση των παρεμβολών. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, της ανάπτυξης και της διαχείρισης του δικτύου αυξάνεται με την ανάπτυξη μικρών κυψελών, γεγονός που απαιτεί εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η ανάπτυξη των συσκευών 5G IoT με περιορισμένη ισχύ και δυνατότητες επεξεργασίας αποτελεί επίσης πρόκληση. Ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και αποτελεσματικών τεχνικών κατανομής πόρων είναι απαραίτητος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συσκευών IoT σε δίκτυα 5G. Οι προκλήσεις των δικτύων 5G που σχετίζονται με τις παρεμβολές, τις συσκευές IoT και τη βελτιστοποίηση του δικτύου απαιτούν προηγμένες λύσεις και καινοτόμες τεχνολογίες για τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας ασύρματης συνδεσιμότητας και την ικανοποίηση των απαιτήσεων του αναπτυσσόμενου ψηφιακού οικοσυστήματος.



Σχήμα 10. Προκλήσεις δικτύων 5G [1]

Ο Πίνακας 11 παρουσιάζει τις προκλήσεις που προκύπτουν από την έρευνα στον τομέα του 5G, εστιάζοντας άμεσα στις υπηρεσίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Αποτελείται από πέντε στήλες με τις ακόλουθες ετικέτες: Χαρακτηριστικά, Πλεονεκτήματα, Ερευνητικές προκλήσεις, Βασικές απαιτήσεις και Διαλειτουργικότητα.

1. **Χαρακτηριστικά:** Αναφέρει τα κύρια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις υπηρεσίες IoT στο πλαίσιο του 5G. Περιλαμβάνει τις υπηρεσίες IoT, την υπολογιστική ακμή, τη ραδιοπρόσβαση 5G και τον τεμαχισμό του δικτύου.
2. **Πλεονεκτήματα:** Καταγράφει τα οφέλη που το 5G μπορεί να προσφέρει στις υπηρεσίες IoT, όπως η ενεργοποίηση νέων περιπτώσεων χρήσης, η μείωση της καθυστέρησης, η παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων και η παροχή ευέλικτων δικτύων που μπορούν να προσαρμοστούν από τους χρήστες.
3. **Ερευνητικές προκλήσεις:** Καταγράφει τις κύριες ερευνητικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να εκμεταλλευτεί πλήρως το 5G το δυναμικό του για υπηρεσίες IoT. Ανάμεσα σε αυτές περιλαμβάνονται ο τεμαχισμός του δικτύου, η ασφάλεια, η επεκτασιμότητα, η κατανομή πόρων και η διαχείριση του φάσματος.
4. **Βασικές απαιτήσεις:** Απαριθμεί τις βασικές τεχνικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται για να αντιμετωπιστούν οι ερευνητικές προκλήσεις. Περιλαμβάνει χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή αξιοπιστία, ενεργειακή απόδοση και συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών.
5. **Διαλειτουργικότητα:** Καταγράφει τα βασικά ζητήματα διαλειτουργικότητας που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την απρόσκοπτη συνεργασία διαφορετικών δικτύων 5G και συσκευών IoT. Συμπεριλαμβάνει τυποποίηση, ενσωμάτωση με υφιστάμενα συστήματα, συμβατότητα με διαφορετικές τεχνολογίες και διαλειτουργικότητα μεταξύ τμημάτων δικτύου.

Οι παρεμβολές μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα δίκτυα 5G, ιδίως στο πλαίσιο των συσκευών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Ο μεγάλος αριθμός συσκευών IoT που θα συνδεθούν στα δίκτυα 5G θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε αυξημένες παρεμβολές, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε υποβαθμισμένες επιδόσεις δικτύου και κακή εμπειρία χρήστη.

Μία από τις κρίσιμες απαντήσεις στις παρεμβολές στα δίκτυα 5G είναι η χρήση προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος για τον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών. Για παράδειγμα, η διαμόρφωση δέσμης και οι προηγμένοι αλγόριθμοι δέκτη μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των παρεμβολών στα δίκτυα 5G. Επιπλέον, η χρήση συστημάτων πολλαπλών κεραιών και έξυπνων κεραιών μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και να μειώσει τις παρεμβολές.

Μια άλλη κρίσιμη απάντηση είναι η εφαρμογή πρωτοκόλλων διαχείρισης παρεμβολών που επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Αυτά τα πρωτόκολλα μπορούν να βοηθήσουν στο συντονισμό της χρήσης διαφορετικών καναλιών, στη μείωση των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κυψελών και στη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων φάσματος. Για παράδειγμα, η χρήση δικτύων μικρών κυψελών μπορεί να συμβάλει στη μείωση των παρεμβολών μειώνοντας την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Επιπλέον, η χρήση συχνοτήτων τεχνικές επαναχρησιμοποίησης, όπως η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών σε δίκτυα πολλαπλών κυψελών.

Πίνακας 11: προκλήσεις που προκύπτουν από την έρευνα στον τομέα του 5G

Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Ερευνητικές προκλήσεις	Βασικές απαιτήσεις	Διαλειτουργικότητα
IoT Υπηρεσίες	Ενεργοποιεί νέες περιπτώσεις χρήσης	Τεμαχισμός δικτύου – Ασφάλεια – Επεκτασιμότητα	Χαμηλή καθυστέρηση – Υψηλή αξιοπιστία – Μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής	Τυποποίηση – Ενσωμάτωση με υφιστάμενα συστήματα – Συμβατότητα με διαφορετικές τεχνολογίες
Edge Computing	Μειωμένη καθυστέρηση	Κατανομή πόρων - Edge intelligence – Edge Analytics	Ενεργειακή απόδοση – Διαχείριση πόρων – Διαχείριση QoS	Διαλειτουργικότητα με υπηρεσίες cloud – Ασφάλεια - Ενσωμάτωση με το

				network slicing
Ραδιοπρόσβαση 5G	Υψηλοί ρυθμοί δεδομένων	Διαχείριση φάσματος συχνοτήτων – Πολυσυνδεσιμότητα mmWave επικοινωνιών	Χαμηλή κατανάλωση – Διαχείριση κάλυψης παρεμβολών	Πυκνότητα δικτύου – Συμβατότητα με παλαιά συστήματα – ενσωμάτωση με edge computing
Τεμαχισμός δικτύου	Προσαρμοσίμα δίκτυα	Ενορχήστρωση – Κατανομή πόρων – Διαχείριση QoS	Συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών – Κατανομή πόρων – Ασφάλεια	Διαλειτουργικότητα μεταξύ των τμημάτων – Επεκτασιμότητα – Ενσωμάτωση με υπάρχοντα συστήματα

Ο Πίνακας 12 περιλαμβάνει ένα σύνολο συνοπτικών πληροφοριών σχετικά με τις μελλοντικές ερευνητικές προκλήσεις στο πεδίο του 5G για υπηρεσίες IoT. Τα στοιχεία του πίνακα παρουσιάζονται ως εξής:

1. **Ζητήματα:**

- Παρεμβολές
- Ασφάλεια
- Ενεργειακή απόδοση
- Επεκτασιμότητα
- Καθυστέρηση

2. **Μεθοδολογίες:**

- Παρεμβολές: DSA και συνεργατική ανίχνευση
- Ασφάλεια: Πιστοποίηση ταυτότητας και κρυπτογράφηση

3. **Πλεονεκτήματα:**

- Παρεμβολές: Καλύτερη αξιοποίηση φάσματος, αυξημένη αξιοπιστία
- Ασφάλεια: Ασφαλής επικοινωνία, προστασία από επιθέσεις

4. **Περιορισμοί/Μελλοντικές εργασίες:**

- Ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών και κλιμακούμενων αλγορίθμων DSA και συνεργατικής ανίχνευσης για την αντιμετώπιση της παρεμβολής.
- Ανάγκη ανάπτυξης ελαφρών και ενεργειακά αποδοτικών μηχανισμών ασφαλείας για την αντιμετώπιση του ζητήματος της ασφαλείας."

Ο Πίνακας 13 περιλαμβάνει διάφορους τύπους παρεμβολών που επηρεάζουν τα δίκτυα 5G και τις υπηρεσίες IoT. Σε αυτούς περιλαμβάνονται η ατμοσφαιρική απορρόφηση, η απώλεια διαδρομής στον ελεύθερο χώρο, η ανάκλαση, η διάθλαση, η περίθλαση, η σκέδαση, η εξασθένιση βροχής, η εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών, οι παρεμβολές σε συνδιαύλους, οι παρεμβολές γειτονικών καναλιών και οι παρεμβολές από άλλα ραδιόφωνα και συσκευές IoT. Ο πίνακας παρέχει τεχνικές λεπτομέρειες σχετικά με το εύρος συχνοτήτων, το εύρος ζώνης, το επίπεδο ισχύος και τον αντίκτυπο κάθε τύπου παρεμβολής.

- **Παρεμβολή:** Ο τύπος παρεμβολής που επηρεάζει τα δίκτυα 5G και τις υπηρεσίες IoT.
- **Συχνότητα:** Η περιοχή συχνοτήτων στην οποία εμφανίζεται η παρεμβολή.
- **Εύρος ζώνης:** Το εύρος ζώνης της παρεμβολής.
- **Ισχύς:** Το επίπεδο ισχύος της παρεμβολής.
- **Επιπτώσεις:** Η επίδραση των παρεμβολών στα δίκτυα 5G και στις υπηρεσίες IoT.

Πίνακας 12. Σύνολο συνοπτικών πληροφοριών σχετικά με τις μελλοντικές ερευνητικές προκλήσεις στο πεδίο του 5G για υπηρεσίες IoT

Θέματα	Μεθοδολογίες	Πλεονεκτήματα	Όρια/Μελλοντικές εργασίες
Παρεμβολή	Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα, συνεργατικό Sensing	Καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος, αυξημένη αξιοπιστία	Ανάπτυξη αποτελεσματικών και κλιμακούμενων DSA (δυναμική πρόσβαση στο φάσμα) και αλγορίθμων συνεργατικής ανίχνευσης
Ασφάλεια	Αυθεντικοποίηση, κρυπτογράφηση	Ασφαλής επικοινωνία, προστασία από επιθέσεις	Ανάπτυξη ελαφρών και ενεργειακά αποδοτικών μηχανισμών ασφαλείας
Ενεργειακή ή απόδοση	Διαχείριση ισχύος, κατανομή πόρων	Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, βελτιωμένη χωρητικότητα του συστήματος	Ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων για κατανομή πόρων και διαχείριση ισχύος
Επεκτασιμότητα	Τεμαχισμός δικτύου, εικονικοποίηση	Καλύτερη αξιοποίηση των πόρων, βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών	Ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνικών τεμαχισμού και εικονικοποίησης δικτύου για μαζικές αναπτύξεις IoT
Καθυστέρηση	Edge computing, αρχιτεκτονική δικτύου	Μειωμένη καθυστέρηση επικοινωνίας, βελτιωμένη απόδοση της εφαρμογής	Ανάπτυξη αρχιτεκτονικής υπολογισμού και δικτύου άκρων χαμηλής καθυστέρησης για υπηρεσίες IoT

Πίνακας 13. Τύποι παρεμβολών που επηρεάζουν τα δίκτυα 5G και τις υπηρεσίες IoT

Παρεμβολή	Συχνότητα	Εύρος ζώνης	Ισχύς	Επιπτώσεις	Πηγή
Ατμοσφαιρική Απορρόφηση	24–40 GHz	Στενής ζώνης	Χαμηλή	Εξασθένηση	[101]
Απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Εξασθένηση	[102]
Αντανάκλαση	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Διάχυση πολλαπλών διαδρομών	[103]
Διάθλαση	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Κάμψη διαδρομής	[104]
Περίθλαση	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Κάμψη διαδρομής	[105]
Διασπορά	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Διάχυση πολλαπλών διαδρομών	[106]
Rain Fade	10-100 GHz	Ευρείας ζώνης	Υψηλή	Εξασθένηση	[107]
Διάχυση πολλαπλών διαδρομών	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Διασυμβολική παρεμβολή	[108]
Παρεμβολές συν-καναλιού	Όλες	Όλες	Υψηλή	Μειωμένη ποιότητα σήματος	[109]
Παρεμβολή παρακείμενων καναλιών	Όλες	Όλες	Υψηλή	Μειωμένη ποιότητα σήματος	[110]
Παρεμβολή από άλλα radio	Όλες	Όλες	Υψηλή	Μειωμένη ποιότητα σήματος	[111]
Παρεμβολή από άλλες συσκευές IoT	Όλες	Όλες	Χαμηλή	Μειωμένη ποιότητα σήματος	[112]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σενάριο εργασίας

4.1 Παράμετροι αξιολόγησης κατά την υλοποίηση υπηρεσιών IoT βασισμένων σε τεχνολογία 5G

Η μοντελοποίηση των απωλειών διαδρομής είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων επικοινωνίας, ιδίως στο πλαίσιο των έξυπνων υπηρεσιών IoT που βασίζονται στο 5G. Στα δίκτυα 5G, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την απώλεια διαδρομής, συμπεριλαμβανομένων των υψηλότερων συχνοτήτων, των διαμορφώσεων των κεραιών και της παρουσίας εμποδίων. Ακολουθεί μια προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της απώλειας διαδρομής για έξυπνες υπηρεσίες IoT σε πλαίσιο 5G:

Επιλογή συχνότητας και ζώνης: Προσδιορισμός των ζωνών συχνοτήτων που διατίθενται για την επικοινωνία 5G στην περιοχή σας. Το 5G χρησιμοποιεί συχνά υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, όπως οι συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων, οι οποίες έχουν μικρότερα μήκη κύματος αλλά μεγαλύτερη ατμοσφαιρική και περιβαλλοντική απορρόφηση.

Εξετάζουμε τον αντίκτυπο της συχνότητας στην απώλεια διαδρομής, με τις υψηλότερες συχνότητες να παρουσιάζουν γενικά υψηλότερες απώλειες διαδρομής λόγω της αυξημένης ατμοσφαιρικής απορρόφησης και της απώλειας διείσδυσης εμποδίων.

Εξωτερικά και εσωτερικά σενάρια: Διαφοροποίηση μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών σεναρίων. Η απώλεια διαδρομής σε εσωτερικά περιβάλλοντα μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική λόγω της παρουσίας τοίχων, επίπλων και άλλων εμποδίων.

Επιπτώσεις πολλαπλών διαδρομών: Εκτίμηση των επιδράσεων πολλαπλών διαδρομών, συμπεριλαμβανομένων των ανακλάσεων, της περίθλασης και της σκέδασης, οι οποίες είναι πιο έντονες σε αστικά περιβάλλοντα. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση εργαλείων όπως οι προσομοιώσεις ανίχνευσης ακτίνων.

Μοντελοποίηση εμποδίων: Ενσωμάτωση μοντελοποίησης εμποδίων για σενάρια όπου υπάρχουν φυσικά εμπόδια, όπως κτίρια ή βλάστηση. Μοντέλα όπως

το μοντέλο Okumura-Hata ή το μοντέλο COST 231 Hata μπορούν να προσαρμοστούν για σενάρια 5G.

Μαζική MIMO και διαμόρφωση δέσμης: Εκτίμηση του αντίκτυπου των τεχνολογιών μαζικής MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος) και διαμόρφωσης δέσμης, οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του 5G. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να μετριάσουν τις απώλειες διαδρομής βελτιώνοντας την ισχύ και την κάλυψη του σήματος.

Εργαλεία προσομοίωσης: Χρήση εργαλείων προσομοίωσης όπως το Matlab, το NS-3 ή άλλες πλατφόρμες προσομοίωσης 5G για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της απώλειας διαδρομής σε διάφορα σενάρια. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν τη δοκιμή διαφορετικών διαμορφώσεων κεραιών, συχνοτήτων και στρατηγικών ανάπτυξης.

Εμπειρικές μετρήσεις: Διεξαγωγή εμπειρικών μετρήσεων για την επικύρωση του μοντέλου απώλειας διαδρομής σε περιβάλλοντα του πραγματικού κόσμου. Οι μετρήσεις πεδίου παρέχουν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την ακρίβεια του μοντέλου και βοηθούν στη λεπτομερή ρύθμιση των παραμέτρων.

Δυναμικά μοντέλα: Αναγνώριση ότι το μοντέλο απωλειών διαδρομής μπορεί να χρειαστεί να είναι δυναμικό, καθώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι διαμορφώσεις του δικτύου μπορούν να αλλάξουν. Οι τακτικές ενημερώσεις και η βαθμονόμηση με βάση μετρήσεις στον πραγματικό κόσμο είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της ακρίβειας.

Η μοντελοποίηση της απώλειας διαδρομής για έξυπνες υπηρεσίες IoT σε περιβάλλοντα 5G είναι ένα πολύπλοκο έργο που απαιτεί συνδυασμό θεωρητικής μοντελοποίησης, προσομοίωσης και εμπειρικής επικύρωσης. Είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος ανάπτυξης και τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5G κατά την ανάπτυξη και εφαρμογή μοντέλων απώλειας διαδρομής.

4.2 Σενάριο εργασίας

Όλες οι πληροφορίες που μεταδίδονται μέσω του ασύρματου μέσου πρέπει να διαδίδονται ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία υπόκεινται σε διάφορες

ντετερμινιστικές και στοχαστικές απώλειες, λόγω διαφόρων μηχανισμών και φαινομένων [111]-[112]. Η σύγχρονη έρευνα έχει αναπτύξει και οργανώσει μια μεθοδολογία για τον χαρακτηρισμό και τη διερεύνηση αυτών των φαινομένων, τα οποία κατηγοριοποιούνται ως εξασθένιση μεγάλης κλίμακας (οκιά) και μικρής κλίμακας (πολλαπλών διαδρομών). Οι μεταβολές του πλάτους και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος έχουν διερευνηθεί σε πολλές εργασίες και ένας αριθμός μοντέλων απωλειών διαδρομής έχουν αναπτυχθεί και επικυρωθεί για διάφορες συχνότητες ενδιαφέροντος, προκειμένου να παρέχουν αξιόπιστες προβλέψεις της τοπικής μέσης τιμής της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος [113].

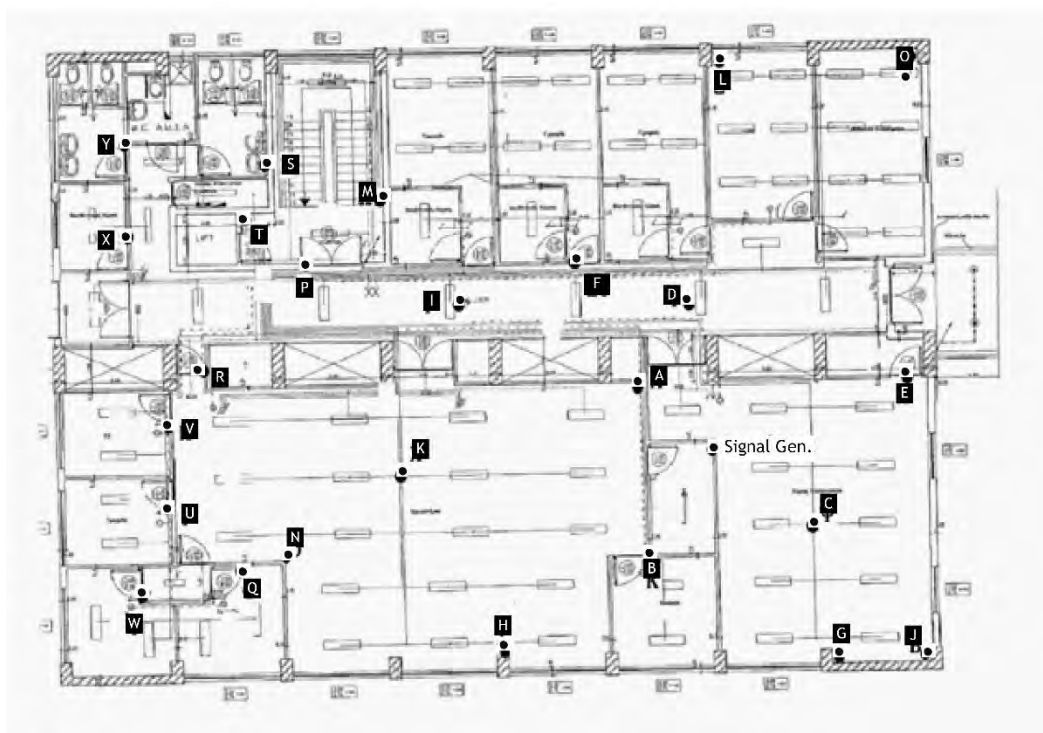
Η μοντελοποίηση καναλιών εσωτερικών χώρων ειδικότερα έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή και επιστημονικό ενδιαφέρον τόσο από τη βιομηχανία όσο και από την ακαδημαϊκή κοινότητα, δεδομένου ότι τα αντικείμενα που παρεμβαίνουν στο μεταδιδόμενο σήμα μπορούν να προκαλέσουν σκέδαση και ανάκλαση/απορρόφηση, καθώς και περίθλαση. Πολλά ασύρματα συστήματα έχουν αναπτυχθεί ειδικά για εσωτερικούς σταθερούς χρήστες σε περιβάλλοντα με εμπόδια διαφόρων διαστάσεων και με πολλούς τοίχους και δάπεδα που παρεμβαίνουν στη διαδρομή του διαδιδόμενου σήματος. Ως αποτέλεσμα, η επικύρωση των μοντέλων απωλειών διαδρομής για τοπολογίες εσωτερικών χώρων παραμένει πολύ σημαντική.

Η δημοσιευμένη έρευνα έχει συμβάλει στην ανάπτυξη και περαιτέρω βελτίωση του χαρακτηρισμού ασύρματων καναλιών είτε μέσω προσομοιώσεων είτε μέσω μετρήσεων. Έντονο ενδιαφέρον έχει στραφεί στη συχνότητα 2,4 GHz που αφορά τα πρωτόκολλα 802.11b/g/n. Πολλές εργασίες έχουν παράσχει εμπειρικά δεδομένα που προέρχονται από μετρήσεις βασισμένες σε πραγματικά λειτουργικά συστήματα στα 2,4 GHz [113].

Μια άλλη συχνότητα ενδιαφέροντος είναι το κανάλι 3,5 GHz. Το κανάλι 3,5 GHz, διεθνώς αναγνωρισμένο ως συχνότητα WiMax, έχει επίσης παρουσιαστεί σε επιστημονικές εργασίες [10]-[14], οι οποίες διερευνούν τις μεταβολές του πλάτους και της φάσης του σήματος τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους.

Υπάρχουν, ωστόσο, πολλά ανοικτά ζητήματα σχετικά με τη σχέση των διακυμάνσεων μεγάλης κλίμακας του λαμβανόμενου σήματος με τα εγγενή χαρακτηριστικά του καναλιού και τις τοπικές ανωμαλίες.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διεξοδική επικύρωση των πιο σημαντικών και συχνά χρησιμοποιούμενων μοντέλων απωλειών διαδρομής σε μια τοπολογία διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους πυκνή με εμπόδια των οποίων οι διαστάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, θέτοντας, επομένως, το εμπόδιο σκίασης ως την κύρια αιτία των μη ντετερμινιστικών απωλειών. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε όλη την τοπολογία παρέχουν εμπειρικά δεδομένα σχετικά με τη μέση τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος και τις διακυμάνσεις της. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από την εργασία υποβάθρου που αφορά τη συχνότητα 2,4 GHz, ανοίγουν το δρόμο για την εισαγωγή μιας εμπειρικής μεθόδου που σχετίζεται με την τοπολογία για την αξιολόγηση και τον υπολογισμό των μη καθοριστικών απωλειών απευθείας από τα εμπόδια στο χώρο [113].



Σχήμα 11. Τοπολογία διεξαγωγής μετρήσεων [113]

Οι μετρήσεις μας πραγματοποιήθηκαν στους χώρους γραφείων και έρευνας του Εργαστηρίου Ασύρματων Τηλεπικοινωνιών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών [113].

Επί του παρόντος, κανένα ασύρματο σύστημα δεν λειτουργεί στη ζώνη 3,5 GHz στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Πατρών. Ως σταθερός πομπός μας χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια σήματος που διαθέτει το εργαστήριο για δοκιμαστικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Χρησιμοποιήθηκε μια πανκατευθυντική κεραία και η συνολική αποτελεσματική ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) ήταν 0 dBm (1 mW).

Για τους σκοπούς του χαρακτηρισμού εξασθένισης μεγάλης κλίμακας, χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός SRM-3006 της NARDA, ο οποίος παρείχε τιμές πυκνότητας ισχύος και ηλεκτρικού πεδίου (V/m) για κάθε θέση μέτρησης. Ο θόρυβος στα 3,5 GHz μετρήθηκε και βρέθηκε ίσος με -102 dBm.

Επιλέχθηκαν συνολικά 25 θέσεις μέτρησης σε όλο τον όροφο του εργαστηρίου ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Σε κάθε θέση, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για ένα χρονικό παράθυρο 5 λεπτών και σε μια τοπικά μέση περιοχή 10 μηκών κύματος, έτσι ώστε τυχόν φαινόμενα εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών (μικρής κλίμακας) να εξαλειφθούν από τις αποκτηθείσες τοπικές μέσες τιμές μας. Σε κάθε τοποθεσία, ο δέκτης (ο εξοπλισμός SRM-3006 της NARDA) κρατήθηκε σε ύψος μέσης, που θεωρείται ότι είναι 1 m πάνω από το έδαφος. Η συνολική απόσταση πομπού-δέκτη (διαχωρισμός T-R) υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη και τα δύο ύψη των κεραιών. Δεδομένου ότι η γεννήτρια σήματος ήταν τοποθετημένη σε επιφάνεια στο ίδιο ύψος με τον δέκτη, θεωρήθηκε ότι και τα δύο ύψη κεραιών ήταν ίσα με 1 m. Τα εμπόδια και τα αντικείμενα που εξασθενίζουν το διαδιδόμενο σήμα ήταν, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, σημαντικά μεγαλύτερα από τις διαστάσεις που συγκρίνονται με το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, επομένως οι απώλειες εξασθένισης θεωρήθηκαν προϊόν εξασθένισης σκιών (εμπόδια) και όχι σκέδασης [113].

Η πρώτη θέση μέτρησης βρισκόταν σε απόσταση αναφοράς 1 μέτρου από τη γεννήτρια σήματος εκπομπής. Η μέση απόσταση T-R ήταν 13 μέτρα, με μέγιστο τα 22,5 μέτρα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αποκλειστικά στον ίδιο όροφο χωρίς σενάρια πολλαπλών ορόφων λόγω του πολύ χαμηλού EIRP. Τέλος, όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αργά το βράδυ και τα Σαββατοκύριακα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό το φαινόμενο της σκίασης του σώματος [113].

Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου απώλειας διαδρομής Log-Distance δίνεται από την [113]:

$$L_{total} = PL(d_0) + N \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (1)$$

Όπου $PL(d_0)$ ισούται με -43,33 dB, N είναι ο παράγοντας κλίσης και X_s είναι μια γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ dB. Σύμφωνα με το ημιεμπειρικό μοντέλο, τα N και σ προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα.

Στην παρούσα εργασία, ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ορίστηκε ίσος με 1,8 προκειμένου να εκφράζονται αποκλειστικά οι εξαρτώμενες από την απόσταση απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Όλες οι άλλες απώλειες θεωρήθηκαν ότι είναι το προϊόν της παρεμπόδισης από εμπόδια και επομένως όλη η αντίστοιχη εξασθένηση προκλήθηκε από εξασθένιση μεγάλης κλίμακας (σκιά) [113]. Για τον υπολογισμό του βάθους σκιάς, θεωρήθηκε πιθανότητα κάλυψης 95%, ως ένα πιο ρεαλιστικό, υπο-βέλτιστο σενάριο και συνεπώς:

$$X_{\sigma} = z \times \sigma(dB) = 1.645 \times \sigma(dB) \quad (2)$$

Λεδομένου ότι πρόκειται για τοπολογία με πυκνά εμπόδια, η απόκλιση σκίασης ορίστηκε ίση με 10 dB. Επομένως, η τιμή της σκιαγράφησης υπολογίστηκε ως εξής: "Η σκιαγράφηση δεν είναι δυνατόν να υπερβαίνει την τιμή της:

$$P_r(dBm) = -59.78 - 18 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3)$$

Πίνακας 14. Καταγραφή μετρήσεων ανά σημείο στον χώρο της τοπολογίας

Location	T-R (m)	Pr (dBm)
A	3.43	-73.29
B	4.29	-72.78
C	4.43	-50.56
D	5.57	-66.88
E	7	-55.34
F	8.15	-72.33
G	8.29	-55.79
H	9.86	-84.54
I	10	-81.36
J	10.15	-56.88
K	10.57	-76.31
L	13.43	-85.34
M	14.14	-93.87
N	14.86	-80.28
O	15.29	-86.88
P	15.29	-91.53
Q	16.29	-89.32
R	17.58	-80.56
S	17.72	-93.87
T	17.86	-93.29
U	18.43	-82.33
V	18.58	-82.33
W	20	-91.53
X	21.15	-93.29
Y	22.44	-93.57

Η προσαρμογή δεδομένων είναι η διαδικασία προσαρμογής μοντέλων σε δεδομένα και η ανάλυση της ακρίβειας της προσαρμογής. Οι μηχανικοί και οι επιστήμονες χρησιμοποιούν τεχνικές προσαρμογής δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων μαθηματικών εξισώσεων και μη παραμετρικών μεθόδων, για να μοντελοποιήσουν δεδομένα που έχουν αποκτηθεί.

Το MATLAB® μάς επιτρέπει να εισάγουμε και να οπτικοποιούμε τα δεδομένα μας και να εκτελούμε βασικές τεχνικές προσαρμογής, όπως πολυωνυμική και spline παρεμβολή. Με το εργαλείο Basic Fitting του MATLAB μπορούμε να

εκτελέσουμε διαδραστικά την προσαρμογή δεδομένων ή προγραμματιστικά χρησιμοποιώντας συναρτήσεις του MATLAB για την προσαρμογή.

Τα πρόσθετα προϊόντα του MATLAB επεκτείνουν τις δυνατότητες προσαρμογής δεδομένων σε:

- Προσαρμογή καμπυλών και επιφανειών σε δεδομένα χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις και την εφαρμογή στο Curve Fitting Toolbox™. Περιλαμβάνονται διάφορα γραμμικά, μη γραμμικά, παραμετρικά και μη παραμετρικά μοντέλα. Μπορούμε επίσης να ορίσουμε τα δικά μας προσαρμοσμένα μοντέλα.
- Να προσαρμόζουν N-διάστατα δεδομένα χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης στο Statistics and Machine Learning Toolbox™. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για προσαρμογή με βάση τα δεδομένα.
- Πραγματοποιούμε προσαρμογή δεδομένων με περιορισμούς, όπου οι παράμετροι πρέπει να ικανοποιούν γραμμικούς ή μη γραμμικούς περιορισμούς με την Optimization Toolbox™.

```
function [fitresult, gof] = createFit(d1, p1)
%CREATEFIT(D1,PL)
% Create a fit.
%
% Data for 'untitled fit 1' fit:
%   X Input: d1
%   Y Output: p1
% Output:
%   fitresult : a fit object representing the fit.
%   gof : structure with goodness-of fit info.
%
% See also FIT, CFIT, SFIT.

% Auto-generated by MATLAB on 20-Nov-2023 13:28:15

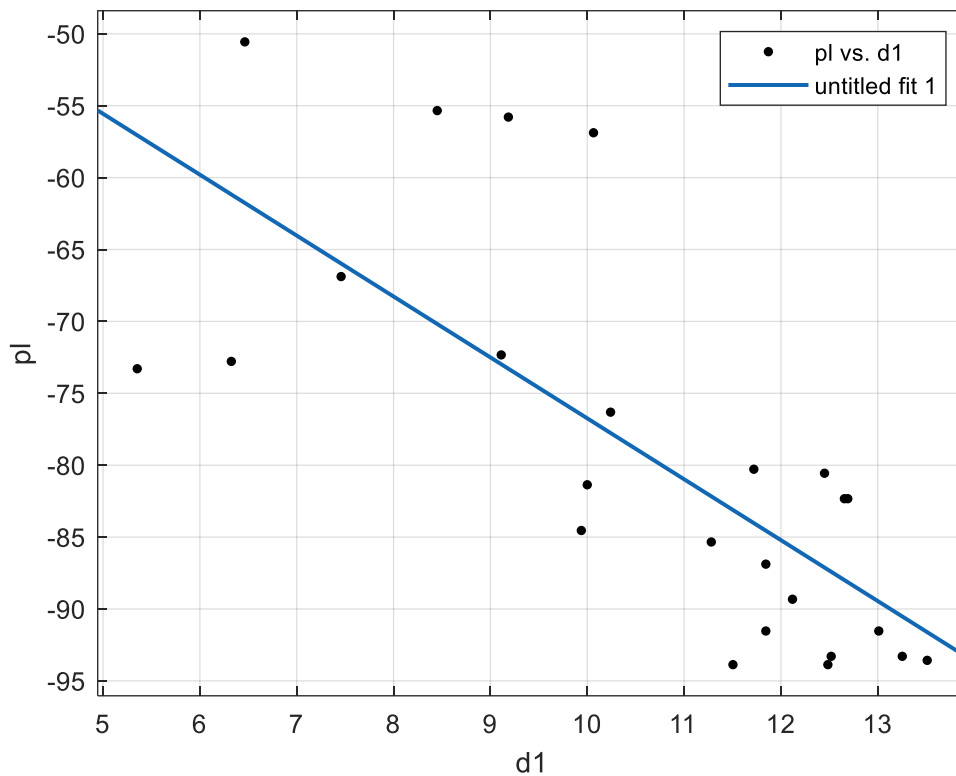
%% Fit: 'untitled fit 1'.
[xData, yData] = prepareCurveData( d1, p1 );

% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'poly1' );

% Fit model to data.
```

```
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, 'Normalize', 'on' );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, 'p1 vs. d1', 'untitled fit 1', 'Location', 'NorthEast', 'Interpreter',
'none' );
% Label axes
xlabel( 'd1', 'Interpreter', 'none' );
ylabel( 'p1', 'Interpreter', 'none' );
grid on
```



Σχήμα 12. Εφαρμογή Curve Fitting Tool στις μετρήσεις

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 \cdot x + p2$$

where x is normalized by mean 10.62 and std 2.339

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = -9.909 (-13.8, -6.016)

p2 = -79.36 (-83.18, -75.55)

Goodness of fit:

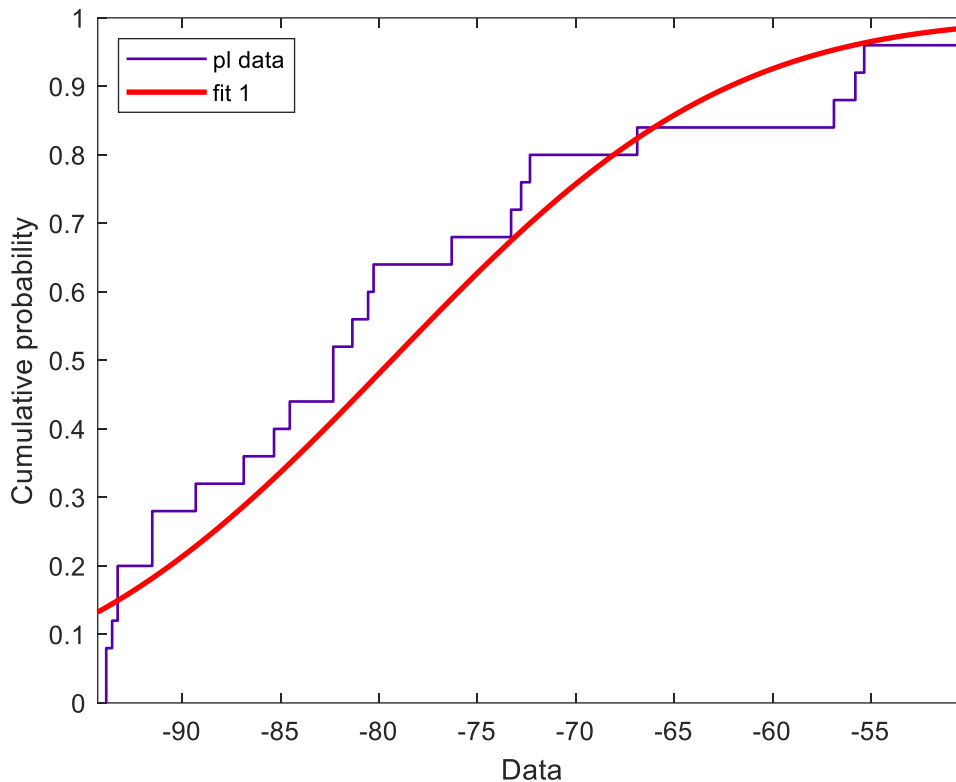
SSE: 1955

R-square: 0.5466

Adjusted R-square: 0.5269

RMSE: 9.219

Το εργαλείο προσαρμογής κατανομών του MATLAB είναι μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) που παρέχει ένα διαδραστικό περιβάλλον για την προσαρμογή κατανομών πιθανότητας στα δεδομένα μας. Αυτό το εργαλείο αποτελεί μέρος της εργαλειοθήκης Statistics and Machine Learning Toolbox του MATLAB. Μας επιτρέπει να εξερευνήσουμε διάφορες επιλογές κατανομών, να τις προσαρμόσουμε στα δεδομένα μας και να αναλύσουμε την καλή προσαρμογή.



Σχήμα 13. Εφαρμογή Distribution Fitting Tool στις μετρήσεις

Distribution: Normal
 Log likelihood: -99.8608
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: -79.362
 Variance: 179.646

Parameter	Estimate	Std. Err.
mu	-79.362	2.68064
sigma	13.4032	1.95506

Estimated covariance of parameter estimates:

	mu	sigma
mu	7.18583	1.98259e-14
sigma	1.98259e-14	3.82225

Πίνακας 15. Καταγραφή Λόγου Σήματος Προς Θόρυβο και Τεχνικών Διαμόρφωσης ανά σημείο στον χώρο της τοπολογίας

Pr (dBm)	SNR (dB)	QPSK	8PSK	16QAM	32QAM	64QAM
-73,29	28,71	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-72,78	29,22	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-50,56	51,44	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-66,88	35,12	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-55,34	46,66	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-72,33	29,67	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-55,79	46,21	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-84,54	17,46	FALSE	FALSE	1	FALSE	FALSE
-81,36	20,64	FALSE	FALSE	FALSE	1	FALSE
-56,88	45,12	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	1
-76,31	25,69	FALSE	FALSE	FALSE	1	FALSE
-85,34	16,66	FALSE	FALSE	1	FALSE	FALSE
-93,87	8,13	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-80,28	21,72	FALSE	FALSE	FALSE	1	FALSE
-86,88	15,12	FALSE	1	FALSE	FALSE	FALSE
-91,53	10,47	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-89,32	12,68	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-80,56	21,44	FALSE	FALSE	FALSE	1	FALSE
-93,87	8,13	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-93,29	8,71	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-82,33	19,67	FALSE	FALSE	1	FALSE	FALSE
-82,33	19,67	FALSE	FALSE	1	FALSE	FALSE
-91,53	10,47	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-93,29	8,71	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
-93,57	8,43	1	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE

Πίνακας 16. Καταγραφή Προκύπτοντος Ρυθμού Μετάδοσης (Ευρυζωνικότητα IoT 5G) ανά σημείο στον χώρο της τοπολογίας

Διαμόρφωση	Locations	Rs (Mbps)	Weight factor	Rs (Mbps)
	(amount)	(minimum)	(ratio)	(ratio)
QPSK	8	140	0,32	44,80
8PSK	1	180	0,04	7,20
16QAM	4	240	0,16	38,40
32QAM	4	300	0,16	48,00
64QAM	8	400	0,32	128,00
Sum	25		1	53,28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα

Η διερεύνηση και μοντελοποίηση των απωλειών διαδρομής για το κανάλι 3,5 GHz σε εσωτερικό χώρο επιβεβαίωσε την αξιοπιστία μιας μεθοδολογίας που υπολογίζει την εξαρτώμενη από την απόσταση εξασθένηση του ελεύθερου χώρου ξεχωριστά από την υπερβολική απώλεια διαδρομής. Σε τέτοιες τοπολογίες διάδοσης με πυκνά εμπόδια όπως αυτή που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, ο κύριος μηχανισμός των μη προσδιοριστικών απωλειών είναι η σκίαση (παρεμπόδιση του LOS).

Ένα μέσο βάθος σκιάς σε επίπεδο περιοχής μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο ένας υπολογισμός των απωλειών σε τοπικό επίπεδο με βάση έναν πεπερασμένο αριθμό διαφόρων εμποδίων, όπως τοίχοι, πόρτες, δάπεδα, ανελκυστήρες κ.λπ., παρέχει εντυπωσιακά καλύτερα αποτελέσματα.

Επιπλέον, τα ευρήματά μας επιβεβαιώνουν ότι οι απώλειες από εμπόδια εξαρτώνται από τη συχνότητα και αυτό ανοίγει το δρόμο για περαιτέρω έρευνες στο ζήτημα του Narrow-Band (με εύρος ζώνης πλέον τις κάποιες δεκάδες MHz). Παρατηρούμε με βάση τα αποτελέσματα που παρέχουμε με καινοτόμους υπολογισμούς στους Πίνακες 15 και 16 ότι με βάση την κατανομή των τιμών ισχύος στον χώρο της τοπολογίας και την αξιοποίηση των τεχνικών διαμόρφωσης που παρέχει η τεχνολογία 5G, μπορούμε να έχουμε έναν μέσο όρο ρυθμού μετάδοσης λίγο μεγαλύτερο από 53 Mbps στην πλήρη έκταση της τοπολογίας.

Η μοντελοποίηση καναλιών έχει σημαντική σημασία στο πλαίσιο των έξυπνων υπηρεσιών IoT (Internet of Things) για διάφορους λόγους:

Η μοντελοποίηση καναλιού βοηθά στην κατανόηση και την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του καναλιού επικοινωνίας μέσω του οποίου οι συσκευές IoT μεταδίδουν δεδομένα. Η κατανόηση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση αξιόπιστης και στιβαρής επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών.

Η μοντελοποίηση καναλιού συμβάλλει στην ανάλυση του προϋπολογισμού σύνδεσης, η οποία περιλαμβάνει την αξιολόγηση του προϋπολογισμού ισχύος μιας σύνδεσης επικοινωνίας. Αυτό περιλαμβάνει τη συνεκτίμηση παραγόντων όπως η ισχύς μετάδοσης, η απώλεια διαδρομής, τα κέρδη από τις κεραιές και ο θόρυβος του συστήματος. Ένα καλά μοντελοποιημένο κανάλι επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση ισχύος στις συσκευές IoT.

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών του καναλιού είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό της περιοχής κάλυψης ενός δικτύου IoT. Τα μοντέλα καναλιών βοηθούν στον προσδιορισμό της εμβέλειας και της κάλυψης των συσκευών IoT, βοηθώντας στη βέλτιστη ανάπτυξη συσκευών για μέγιστη κάλυψη.

Η αποτελεσματική μοντελοποίηση καναλιών υποστηρίζει το σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας που κάνουν αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς οι συσκευές IoT λειτουργούν συχνά σε κοινόχρηστες ζώνες συχνοτήτων και η αποδοτικότητα του φάσματος είναι απαραίτητη για τη φιλοξενία μεγάλου αριθμού συσκευών.

Η μοντελοποίηση καναλιών βοηθά στην ανάλυση πιθανών πηγών παρεμβολής στο περιβάλλον επικοινωνίας. Αυτό περιλαμβάνει παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές ή πηγές, και η γνώση που αποκτάται από τη μοντελοποίηση καναλιού βοηθά στην ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριασμό των παρεμβολών.

Τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας, όπως η εξασθένιση και τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών, επηρεάζουν την απόδοση των κεραιών. Η μοντελοποίηση του καναλιού βοηθά στη σχεδίαση και την τοποθέτηση κεραιών για βέλτιστη απόδοση σε διάφορα περιβάλλοντα, ενισχύοντας τη συνολική αξιοπιστία της επικοινωνίας IoT.

Οι συσκευές IoT λειτουργούν συχνά σε περιβάλλοντα όπου η διάδοση πολλαπλών διαδρομών και η εξασθένιση μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την επικοινωνία. Η μοντελοποίηση του καναλιού επιτρέπει την ανάπτυξη τεχνικών

για τον μετριασμό των επιπτώσεων της πολλαπλής διάδοσης και της εξασθένισης, βελτιώνοντας την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων.

Η μοντελοποίηση καναλιού συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας ποιότητας (QoS) για τις έξυπνες υπηρεσίες IoT. Με την κατανόηση των χαρακτηριστικών του καναλιού, καθίσταται δυνατός ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων επικοινωνίας που πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, όπως χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή απόδοση και ελάχιστη απώλεια πακέτων.

Η ακριβής κατανόηση των χαρακτηριστικών του καναλιού είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ασφαλείας στην επικοινωνία του IoT. Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του καναλιού, μπορούν να σχεδιαστούν πρωτόκολλα ασφαλείας για την προστασία της μετάδοσης δεδομένων από υποκλοπές και άλλες απειλές ασφαλείας.

Η μοντελοποίηση του καναλιού διαδραματίζει βασικό ρόλο στο συνολικό σχεδιασμό και την ανάπτυξη των δικτύων IoT. Βοηθά στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την τοποθέτηση συσκευών, την επιλογή τεχνολογιών επικοινωνίας και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του δικτύου.

Συνοπτικά, η μοντελοποίηση καναλιών αποτελεί θεμελιώδη πτυχή του σχεδιασμού και της ανάπτυξης έξυπνων υπηρεσιών IoT. Παρέχει γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του μέσου επικοινωνίας, επιτρέποντας την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας που είναι αξιόπιστα, αποδοτικά και ικανά να ανταποκρίνονται στις ποικίλες απαιτήσεις των εφαρμογών IoT.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pons, Mario, et al. "Utilization of 5G Technologies in IoT Applications: Current Limitations by Interference and Network Optimization Difficulties—A Review." *Sensors* 23.8 (2023): 3876.
2. Shao, D.; Mwangakala, H.; Ishengoma, F.; Mongi, H.; Mambile, C.; Chali, F. Sustenance of the digital transformations induced by the COVID-19 pandemic response: Lessons from Tanzanian public sector. *Glob. Knowl. Mem. Commun.* 2022, ahead-of-print. [CrossRef]
3. Minoli, D.; Occhiogrosso, B. Practical aspects for the integration of 5G networks and IoT applications in smart cities environments. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2019, 2019, 5710834. [CrossRef]
4. Vermesan, O.; Friess, P. *Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*; River Publishers: Ljubljana, Slovenia, 2013.
5. Ghosh, A.; Maeder, A.; Baker, M.; Chandramouli, D. 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE Access* 2019, 7, 127639–127651. [CrossRef]
6. Montori, F.; Bedogni, L.; Di Felice, M.; Bononi, L. Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues. *Pervasive Mob. Comput.* 2018, 50, 56–81. [CrossRef]
7. Muteba, K.; Djouani, K.; Olwal, T. 5G NB-IoT: Design, Considerations, Solutions and Challenges. *Procedia Comput. Sci.* 2022, 198, 86–93. [CrossRef]
8. Hardell, L.; Carlberg, M. [Comment] Health risks from radiofrequency radiation, including 5G, should be assessed by experts with no conflicts of interest. *Oncol. Lett.* 2020, 20, 15. [CrossRef]
9. Mumtaz, S.; Alshaily, A.; Pang, Z.; Rayes, A.; Tsang, K.F.; Rodriguez, J. Massive Internet of Things for industrial applications: Addressing wireless IIoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2017, 11, 28–33. [CrossRef]
10. Markakis, E.K.; Karras, K.; Sideris, A.; Alexiou, G.; Pallis, E. Computing, caching, and communication at the edge: The cornerstone for building a versatile 5G ecosystem. *IEEE Commun. Mag.* 2017, 55, 152–157. [CrossRef]
11. Chettri, L.; Bera, R. A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems. *IEEE Internet Things J.* 2019, 7, 16–32. [CrossRef]
12. Chaudhari, B.S.; Zennaro, M.; Borkar, S. LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet* 2020, 12, 46. [CrossRef]
13. Hwang, S.H.; Liu, S.Z. Survey on 3GPP low power wide area technologies and its application. In *Proceedings of the 2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*, Singapore, 28–30 August 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 1–5.
14. Sahoo, B.P.; Chou, C.C.; Weng, C.W.; Wei, H.Y. Enabling millimeter-wave 5G networks for massive IoT applications: A closer look at the issues impacting millimeter-waves in consumer devices under the 5G framework. *IEEE Consum. Electron. Mag.* 2018, 8, 49–54. [CrossRef]

15. Yang, L.; Zhao, B.Y.; Zheng, H. The spaces between us: Setting and maintaining boundaries in wireless spectrum access. In Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Chicago, IL, USA, 20–24 September 2010; pp. 37–48.
16. Qamar, F.; Hindia, M.N.; Dimyati, K.; Noordin, K.A.; Amiri, I.S. Interference management issues for the future 5G network: A review. *Telecommun. Syst.* 2019, 71, 627–643. [CrossRef]
17. Attaran, M. The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 2021, 1–17. [CrossRef]
18. Siddiqi, M.A.; Yu, H.; Joung, J. 5G ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices. *Electronics* 2019, 8, 981. [CrossRef]
19. Ferro, E.; Potorti, F. Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: A survey and a comparison. *IEEE Wirel. Commun.* 2005, 12, 12–26. [CrossRef]
20. Chandra, S.; Arya, R.; Verma, A.K. Reliability and age of information analysis of 5G IoT for intelligent communication. *Comput. Electr. Eng.* 2022, 101, 108053. [CrossRef]
21. Azari, A.; Masoudi, M. Interference management for coexisting Internet of Things networks over unlicensed spectrum. *Ad Hoc Netw.* 2021, 120, 102539. [CrossRef]
22. Al-Turjman, F. 5G-enabled devices and smart-spaces in social-IoT: An overview. *Future Gener. Comput. Syst.* 2019, 92, 732–744. [CrossRef]
23. Hasan, M.K.; Ghazal, T.M.; Saeed, R.A.; Pandey, B.; Gohel, H.; Eshmawi, A.; Abdel-Khalek, S.; Alkhassawneh, H.M. A review on security threats, vulnerabilities, and counter measures of 5G enabled Internet-of-Medical-Things. *IET Commun.* 2022, 16, 421–432. [CrossRef]
24. Lin, Z.; Lin, M.; Champagne, B.; Zhu, W.P.; Al-Dhahir, N. Secrecy-energy efficient hybrid beamforming for satellite-terrestrial integrated networks. *IEEE Trans. Commun.* 2021, 69, 6345–6360. [CrossRef]
25. Tang, Y.; Dananjayan, S.; Hou, C.; Guo, Q.; Luo, S.; He, Y. A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities. *Comput. Electron. Agric.* 2021, 180, 105895. [CrossRef]
26. Mahmood, A.; Beltramelli, L.; Abedin, S.F.; Zeb, S.; Mowla, N.I.; Hassan, S.A.; Sisinni, E.; Gidlund, M. Industrial IoT in 5G-and-beyond networks: Vision, architecture, and design trends. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2021, 18, 4122–4137. [CrossRef]
27. Storck, C.R.; Duarte-Figueiredo, F. A survey of 5G technology evolution, standards, and infrastructure associated with vehicle-toeverything communications by internet of vehicles. *IEEE Access* 2020, 8, 117593–117614. [CrossRef]
28. Liu, E.; Effiok, E.; Hitchcock, J. Survey on health care applications in 5G networks. *IET Commun.* 2020, 14, 1073–1080. [CrossRef]
29. Ogbodo, E.U.; Abu-Mahfouz, A.M.; Kurien, A.M. Enabling LPWANs for Coexistence and Diverse IoT Applications in Smart Cities Using Lightweight Heterogenous Multihomed Network Model. *J. Sens. Actuator Netw.* 2022, 11, 87. [CrossRef]
30. Ivanova, D.; Markova, E.; Moltchanov, D.; Pirmagomedov, R.; Koucheryavy, Y.;

Samouylov, K. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments. *IEEE Access* 2022, 10, 9241–9256. [CrossRef]

31. Ahmad, A.; Rehmani, M.H.; Tembine, H.; Mohammed, O.A.; Jamalipour, A. IEEE Access Special Section Editorial: Optimization for emerging wireless networks: IoT, 5G, and smart grid communication networks. *IEEE Access* 2017, 5, 2096–2100. [CrossRef]

32. Bairagi, A.K.; Munir, M.S.; Alsenwi, M.; Tran, N.H.; Alshamrani, S.S.; Masud, M.; Han, Z.; Hong, C.S. Coexistence mechanism between eMBB and uRLLC in 5G wireless networks. *IEEE Trans. Commun.* 2020, 69, 1736–1749. [CrossRef]

33. Shen, H.; Ye, Q.; Zhuang, W.; Shi, W.; Bai, G.; Yang, G. Drone-small-cell-assisted resource slicing for 5G uplink radio access networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2021, 70, 7071–7086. [CrossRef]

34. Painuly, S.; Sharma, S.; Matta, P. Future trends and challenges in next generation smart application of 5G-IoT. In *Proceedings of the 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 8–10 April 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021; pp. 354–357.

35. Gupta, N.; Sharma, S.; Juneja, P.K.; Garg, U. Sdnfv 5g-iot: A framework for the next generation 5g enabled iot. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*, Dehradun, India, 21–22 August 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 289–294.

36. Islam, S.; Zada, M.; Yoo, H. Low-pass filter based integrated 5G smartphone antenna for sub-6- GHz and mm-wave bands. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2021, 69, 5424–5436. [CrossRef]

37. Mitra, R.N.; Agrawal, D.P. 5G mobile technology: A survey. *ICT Express* 2015, 1, 132–137. [CrossRef]

38. Ahad, A.; Tahir, M.; Yau, K.L.A. 5G-based smart healthcare network: Architecture, taxonomy, challenges and future research directions. *IEEE Access* 2019, 7, 100747–100762. [CrossRef]

39. Andrewsetal, J. Whatwill5Gbe? *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2014, 32, 1065–1082.

40. Han, S.; Bian, S. Energy-efficient 5G for a greener future. *Nat. Electron.* 2020, 3, 182–184.

41. Lin, Z.; Niu, H.; An, K.; Wang, Y.; Zheng, G.; Chatzinotas, S.; Hu, Y. Refracting RIS-aided hybrid satellite-terrestrial relay networks: Joint beamforming design and optimization. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2022, 58, 3717–3724. [CrossRef]

42. Shim, J.P.; Varshney, U.; Dekleva, S.; Knoerzer, G. Mobile and wireless networks: Services, evolution and issues. *Int. J. Mob. Commun.* 2006, 4, 405–417. [CrossRef]

43. Cano, J.C.; Berrios, V.; Garcia, B.; Toh, C.K. Evolution of IoT: An industry perspective. *IEEE Internet Things Mag.* 2018, 1, 12–17. [CrossRef]

44. Jovovi'c, I.; Forenbacher, I.; Periša, M. Massive machine-type communications: An overview and perspectives towards 5G. In *Proceedings of the 3rd International Virtual Research Conference in Technical Disciplines*, Zilina, Slovakia, 19–23 October 2015; Volume 3.

45. Vaezi, M.; Azari, A.; Khosravirad, S.R.; Shirvanimoghaddam, M.; Azari, M.M.; Chasaki, D.; Popovski, P. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: A survey on 5G

advances and the road toward 6G. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2022, 24, 1117–1174. [CrossRef]

46. Tao, J.; Umair, M.; Ali, M.; Zhou, J. The impact of Internet of Things supported by emerging 5G in power systems: A review. *CSEE J. Power Energy Syst.* 2019, 6, 344–352.

47. Student, V.; Dhir, R. A study of ad hoc network: A review. *Int. J.* 2013, 3, 135–138.

48. Tomar, A. Introduction to ZigBee technology. *Glob. Technol. Cent.* 2011, 1, 1–24.

49. Yassein, M.B.; Mardini, W.; Khalil, A. Smart homes automation using Z-wave protocol. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Agadir, Morocco, 22–24 September 2016*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016; pp. 1–6.

50. Villarim, M.R.; de Luna, J.V.H.; de Farias Medeiros, D.; Pereira, R.I.S.; de Souza, C.P.; Baiocchi, O.; da Cunha Martins, F.C. An evaluation of LoRa communication range in urban and forest areas: A case study in brazil and portugal. In *Proceedings of the 2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, BC, Canada, 17–19 October 2019*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 0827–0832.

51. Abdulmalek, S.; Nasir, A.; Jabbar, W.A.; Almuhaya, M.A.; Bairagi, A.K.; Khan, M.A.M.; Kee, S.H. IoT-Based Healthcare-Monitoring System towards Improving Quality of Life: A Review. *Healthcare* 2022, 10, 1993. [CrossRef] [PubMed]

52. Zhang, Q.; Cheng, L.; Boutaba, R. Cloud computing: State-of-the-art and research challenges. *J. Internet Serv. Appl.* 2010, 1, 7–18. [CrossRef]

53. Hansen, C.J. WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band. *IEEE Wirel. Commun.* 2011, 18, 6–7. [CrossRef]

54. Mohamed, E.M. WiGig access point selection using non-contextual and contextual multi-armed bandit in indoor environment. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 2022, 1–16. [CrossRef]

55. Pham, D.A.; Park, E.; Lee, H.L.; Lim, S. High gain and wideband metasurfaced magnetoelectric antenna for WiGig applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020, 69, 1140–1145. [CrossRef]

56. Kim, S.; Yun, J.H. Motion-aware interplay between wigig and wifi for wireless virtual reality. *Sensors* 2020, 20, 6782. [CrossRef]

57. Zhang, W.; Zhang, Z.; Chao, H.C. Cooperative fog computing for dealing with big data in the internet of vehicles: Architecture and hierarchical resource management. *IEEE Commun. Mag.* 2017, 55, 60–67. [CrossRef]

58. Dahlman, E.; Parkvall, S.; Skold, J. 4G, LTE-Advanced Pro and the Road to 5G; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2016.

59. Lin, Z.; Lin, M.; Wang, J.B.; De Cola, T.; Wang, J. Joint beamforming and power allocation for satellite-terrestrial integrated networks with non-orthogonal multiple access. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.* 2019, 13, 657–670. [CrossRef]

60. Ma, Z.; Xiao, M.; Xiao, Y.; Pang, Z.; Poor, H.V.; Vucetic, B. High-reliability and low-latency wireless communication for internet of things: Challenges, fundamentals, and enabling technologies. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 7946–7970. [CrossRef]

89. Hanzo, L.; Yang, L.L.; Kuan, E.; Yen, K. Single-and Multi-Carrier DS-CDMA: Multi-User Detection, Space-Time Spreading, Synchronisation, Standards and Networking; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2003.
90. Agiwal, M.; Roy, A.; Saxena, N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2016, 18, 1617–1655. [CrossRef]
91. Omar, T.; Ketseoglou, T.; Naffaa, I. A novel self-healing model using precoding & big-data based approach for 5G networks. *Pervasive Mob. Comput.* 2021, 73, 101365.
92. Shaddad, R.Q.; Al-Barakani, W.G.; Al-Hakimi, A.R.; Ahmed, S.A.; Ahmed, M.Y. Mobility Management for Small Cells in 5G Ultra-Dense Wireless Network. In Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), Ibb, Yemen, 25–26 October 2022; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2022; pp. 1–6.
93. Stanze, O.; Weber, A. Heterogeneous networks with LTE-Advanced technologies. *Bell Labs Tech. J.* 2013, 18, 41–58. [CrossRef]
94. Qiao, J.; Shen, X.S.; Mark, J.W.; Shen, Q.; He, Y.; Lei, L. Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks. *IEEE Commun. Mag.* 2015, 53, 209–215. [CrossRef]
95. Lynggaard, P. Using neural networks to reduce sensor cluster interferences and power consumption in smart cities. *Int. J. Sens. Netw.* 2020, 32, 25–33. [CrossRef]
96. Liu, Y.; Zeng, Q.; Zhao, Y.; Wu, K.; Hao, Y. Novel channel-hopping pattern-based wireless IoT networks in smart cities for reducing multi-access interference and jamming attacks. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* 2021, 2021, 152. [CrossRef]
97. Pérez-Neira, A.I.; Caus, M.; Zakaria, R.; Le Ruyet, D.; Kofidis, E.; Haardt, M.; Mestre, X.; Cheng, Y. MIMO signal processing in offset-QAM based filter bank multicarrier systems. *IEEE Trans. Signal Process.* 2016, 64, 5733–5762. [CrossRef]
98. Zhang, X.; Haenggi, M. A stochastic geometry analysis of inter-cell interference coordination and intra-cell diversity. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2014, 13, 6655–6669. [CrossRef]
99. Elsayed, M.; Shimotakahara, K.; Erol-Kantarci, M. Machine learning-based inter-beam inter-cell interference mitigation in mmWave. In Proceedings of the ICC 2020–2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 7–11 June 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 1–6.
100. Hu, B.; Beaulieu, N.C. Accurate performance evaluation of time-hopping and direct-sequence UWB systems in multi-user interference. *IEEE Trans. Commun.* 2005, 53, 1053–1062. [CrossRef]
101. Moongilan, D. 5G wireless communications (60 GHz band) for smart grid—An EMC perspective. In Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Ottawa, ON, Canada, 25–29 July 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016; pp. 689–694.
102. Sun, S.; MacCartney, G.R.; Rappaport, T.S. Millimeter-wave distance-dependent large-scale propagation measurements and path loss models for outdoor and indoor 5G systems. In Proceedings of the 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, 10–15 April 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016; pp. 1–5.
103. Schulpen, R.; Bronckers, L.; Smolders, A.; Johannsen, U. 5G millimeter-wave NLOS coverage using specular building reflections. In Proceedings of the 2020 14th

61. Rappaport, T.S.; Sun, S.; Mayzus, R.; Zhao, H.; Azar, Y.; Wang, K.; Wong, G.N.; Schulz, J.K.; Samimi, M.; Gutierrez, F. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access* 2013, 1, 335–349. [CrossRef]
62. Dangi, R.; Lalwani, P.; Choudhary, G.; You, I.; Pau, G. Study and investigation on 5G technology: A systematic review. *Sensors* 2022, 22, 26. [CrossRef]
63. Huang, H.; Savkin, A.V. A method for optimized deployment of unmanned aerial vehicles for maximum coverage and minimum interference in cellular networks. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2018, 15, 2638–2647. [CrossRef]
64. Luppici, R.; So, A. A technoethical review of commercial drone use in the context of governance, ethics, and privacy. *Technol. Soc.* 2016, 46, 109–119. [CrossRef]
65. Vergouw, B.; Nagel, H.; Bondt, G.; Custers, B. Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments. In *The Future of Drone Use: Opportunities and Threats from Ethical and Legal Perspectives*; T.M.C. Asser Press: The Hague, The Netherlands, 2016; pp. 21–45.
66. Katta, S.S.; Nandyala, S.; Viegas, E.K.; AlMahmoud, A. Benchmarking Audio-based Deep Learning Models for Detection and Identification of Unmanned Aerial Vehicles. In *Proceedings of the 2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench)*, Milan, Italy, 3–6 May 2022; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2022; pp. 7–11.
67. Borralho, R.; Mohamed, A.; Quddus, A.U.; Vieira, P.; Tafazolli, R. A survey on coverage enhancement in cellular networks: Challenges and solutions for future deployments. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2021, 23, 1302–1341. [CrossRef]
68. Alsharif, M.H.; Nordin, R. Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells. *Telecommun. Syst.* 2017, 64, 617–637. [CrossRef]
69. Boban, M.; Kousaridas, A.; Manolakis, K.; Eichinger, J.; Xu, W. Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2018, 13, 110–123. [CrossRef]
70. Garcia, M.H.C.; Molina-Galan, A.; Boban, M.; Gozalvez, J.; Coll-Perales, B.; Sahin, T.; Kousaridas, A. A tutorial on 5G NR V2X communications. *IEEE Commun. Surv. Tutor* 2021, 23, 1972–2026. [CrossRef]
71. Alalewi, A.; Dayoub, I.; Cherkaoui, S. On 5G-V2X use cases and enabling technologies: A comprehensive survey. *IEEE Access* 2021, 9, 107710–107737. [CrossRef]
72. Bockelmann, C.; Pratas, N.K.; Wunder, G.; Saur, S.; Navarro, M.; Gregoratti, D.; Vivier, G.; De Carvalho, E.; Ji, Y.; Stefanović, C.; et al. Towards massive connectivity support for scalable mMTC communications in 5G networks. *IEEE Access* 2018, 6, 28969–28992. [CrossRef]
73. Salva-Garcia, P.; Alcaraz-Calero, J.M.; Alaez, R.M.; Chirivella-Perez, E.; Nightingale, J.; Wang, Q. 5G-UHD: Design, prototyping and empirical evaluation of adaptive Ultra-High-Definition video streaming based on scalable H. 265 in virtualised 5G networks. *Comput. Commun.* 2018, 118, 171–184. [CrossRef]
74. Rahimi, H.; Zibaeenejad, A.; Safavi, A.A. A novel IoT architecture based on 5G-IoT and next generation technologies. In *Proceedings of the 2018 IEEE 9th annual information technology, electronics and mobile communication conference (IEMCON)*,

Vancouver, BC, Canada, 1–3 November 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; pp. 81–88.

75. Hunukumbure, M.; Tsoukaneri, G. Cost analysis for drone based 5G eMBB provision to emergency services. In Proceedings of the 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Waikoloa, HI, USA, 9–13 December 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 1–5.

76. Li, Z.; Uusitalo, M.A.; Shariatmadari, H.; Singh, B. 5G URLLC: Design challenges and system concepts. In Proceedings of the 2018 15th international symposium on wireless communication systems (ISWCS), Lisbon, Portugal, 28–31 August 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; pp. 1–6. 77. Trivisonno, R.; Condoluci, M.; An, X.; Mahmoodi, T. mMTC slice for 5G systems: Design and performance evaluation. *Sensors* 2018, 18, 635. [CrossRef] [PubMed]

78. Marchese, M.; Moheddine, A.; Patrone, F. IoT and UAV integration in 5G hybrid terrestrial-satellite networks. *Sensors* 2019, 19, 3704. [CrossRef] [PubMed]

79. Chekired, D.A.; Togou, M.A.; Khoukhi, L.; Ksentini, A. 5G-slicing-enabled scalable SDN core network: Toward an ultra-low latency of autonomous driving service. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2019, 37, 1769–1782. [CrossRef]

80. Bodinier, Q.; Bader, F.; Palicot, J. On spectral coexistence of CP-OFDM and FB-MC waveforms in 5G networks. *IEEE Access* 2017, 5, 13883–13900. [CrossRef]

81. Biglieri, E.; Goldsmith, A.J.; Greenstein, L.J.; Poor, H.V.; Mandayam, N.B. *Principles of Cognitive Radio*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013.

82. Zubow, A.; Sombrutzki, R. Adjacent channel interference in IEEE 802.11 n. In Proceedings of the 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Paris, France, 1–4 April 2012; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2012; pp. 1163–1168.

83. Yu, Y.; Dutkiewicz, E.; Huang, X.; Mueck, M.; Fang, G. Performance analysis of soft frequency reuse for inter-cell interference coordination in LTE networks. In Proceedings of the 2010 10th International Symposium on Communications and Information Technologies, Tokyo, Japan, 26–29 October 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010; pp. 504–509.

84. Boukalov, A.O.; Haggman, S.G. System aspects of smart-antenna technology in cellular wireless communications-an overview. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2000, 48, 919–929. [CrossRef]

85. Bahai, A.R.; Saltzberg, B.R.; Ergen, M. *Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2004.

86. Zambianco, M.; Verticale, G. Interference minimization in 5G physical-layer network slicing. *IEEE Trans. Commun.* 2020, 68, 4554–4564. [CrossRef]

87. Seifi, N.; Zhang, J.; Heath, R.W.; Svensson, T.; Coldrey, M. Coordinated 3D beamforming for interference management in cellular networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2014, 13, 5396–5410. [CrossRef]

88. De Gaudenzi, R.; Angeletti, P.; Petrolati, D.; Re, E. Future technologies for very high throughput satellite systems. *Int. J. Satell. Commun. Netw.* 2020, 38, 141–161. [CrossRef]

European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 1–5.

104. Morais, D.H.; Morais. 5G and beyond Wireless Transport Technologies; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021.

105. Deng, S.; MacCartney, G.R.; Rappaport, T.S. Indoor and outdoor 5G diffraction measurements and models at 10, 20, and 26 GHz. In Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Washington, DC, USA, 4–8 December 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016; pp. 1–7.

106. Chun, Y.J.; Cotton, S.L.; Dhillon, H.S.; Lopez-Martinez, F.J.; Paris, J.F.; Yoo, S.K. A Comprehensive Analysis of 5G Heterogeneous Cellular Systems Operating Over κ - μ Shadowed Fading Channels. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2017, 16, 6995–7010. [CrossRef]

107. Samad, M.A.; Diba, F.D.; Choi, D.Y. A survey of rain fade models for earth-space telecommunication links—Taxonomy, methods, and comparative study. *Remote Sens.* 2021, 13, 1965. [CrossRef]

108. Mahmud, M.H.; Hossain, M.M.; Khan, A.A.; Ahmed, S.; Mahmud, M.A.; Islam, M.H. Performance analysis of OFDM, W-OFDM and F-OFDM under Rayleigh fading channel for 5G wireless communication. In Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Thoothukudi, India, 3–5 December 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 1172–1177.

109. Dey, P.; Masal, A.; Kaimalettu, S.; Milleth, J.K.; Ramamurthi, B. Reference signal design to mitigate co-channel interference in 5G OFDM systems with multiple numerologies. *Phys. Commun.* 2022, 53, 101653. [CrossRef]

110. Wu, T.Y.; Chang, T. Interference reduction by millimeter wave technology for 5G-based green communications. *IEEE Access* 2016, 4, 10228–10234. [CrossRef]

111. Soret, B.; De Domenico, A.; Bazzi, S.; Mahmood, N.H.; Pedersen, K.I. Interference coordination for 5G new radio. *IEEE Wirel. Commun.* 2017, 25, 131–137. [CrossRef]

112. Qamar, F.; Hindia, M.N.; Dimyati, K.; Noordin, K.A.; Majed, M.B.; Abd Rahman, T.; Amiri, I.S. Investigation of future 5G-IoT millimeter-wave network performance at 38 GHz for urban microcell outdoor environment. *Electronics* 2019, 8, 495. [CrossRef]

113. Chrysikos, Theofilos, Christos Papadakos, and Stavros Kotsopoulos. "Wireless channel measurements and modeling for an office topology at 3.5 GHz." 2015 Wireless Telecommunications Symposium (WTS). IEEE, 2015.