

URLLC WITH MASSIVE MIMO

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Κ. ΜΥΡΙΛΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022

ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ 71347441

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

URLLC WITH MASSIVE MIMO

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου & του Εισηγητή

1. ΜΥΡΙΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
2. ΚΑΡΚΑΖΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
3. ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Η διπλωματική εργασία εξετάζεται από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/a	ΕΠΩΝΥΜΟ - ΟΝΟΜΑ	ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΜΥΡΙΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΚΑΡΚΑΖΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	ΛΕΚΤΟΡΑΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ του ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ, με αριθμό μητρώου 71347441 φοιτήτρια του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα
Αντωνίου Καλλιόπη



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Μυριδάκη Νικόλαο, για τις συμβουλές του και την υποστήριξή του σε όλη την διάρκεια. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξή τους και την υπομονή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η τεράστια (massive) πολλαπλή είσοδος και πολλαπλή έξοδος (multiple-input multiple-output - MIMO) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που αυξάνει την μέθοδο MIMO κατά πιθανές τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας. Η τεχνολογία massive MIMO βασίζεται στη συνεκτική φάση, αλλά υπολογιστικά, πραγματοποιείται πολύ απλή επεξεργασία σημάτων από όλες τις κεραιές στο σταθμό βάσης. Το σύστημα επικοινωνίας, το οποίο επιβλέπει την παράδοση των δεδομένων, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην εκπλήρωση των απαιτήσεων καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από εφαρμογές υψηλότερου επιπέδου αποθηκεύονται σε buffer μετάδοσης ειδικά για τον χρήστη. Σε κάθε χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI – Transmission Time Interval), η οντότητα προγραμματισμού στον πομπό εκχωρεί ραδιο-πηγές στους χρήστες, με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και την ποιότητα του καναλιού, όπως αναφέρεται στις αναφορές πληροφοριών κατάστασης καναλιών (CSI – Channel Status Information). Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών εμφανίζονται ως ένας φυσικός ενεργοποιητής για την URLLC, καθώς οι επικοινωνίες πολλαπλών κεραιών παρέχουν υψηλούς συνδέσμους SNR (Signal-to-noise ratio) και ποικιλομορφίας, καθώς και ικανότητα χωρικής πολυπλεξίας. Αυτές οι ιδιότητες συμβάλλουν στην αύξηση της αξιοπιστίας ή του λανθάνοντα χρόνου ή και των δύο. Ωστόσο, παρά τα προφανή πλεονεκτήματά τους, αυτοί οι μηχανισμοί είναι ακόμα σχετικά ανεξερευνήτοι. Ένα κεντρικό ερώτημα στο σύστημα πολλαπλών κεραιών είναι η απόκτηση στιγμιαίου CSI. Είναι ένας από τους πιο αυστηρούς περιορισμούς για να επιτευχθεί η URLLC κατά την εκμετάλλευση πολλαπλών κεραιών σε περιβάλλον κινητής συσκευής που περιορίζεται από τον χρόνο συνοχής του καναλιού καθώς και από τις ακραίες απαιτήσεις καθυστέρησης. Η πιο κρίσιμη απόκτηση πραγματοποιείται στη συστοιχία κεραιάς όταν η CSI χρησιμοποιείται για λειτουργία μετάδοσης (CSIT). Σε συστήματα διπλής διαίρεσης συχνοτήτων (frequency division duplex - FDD), η απόκτηση CSIT (Centre for Secure Information Technologies) απαιτεί έναν βρόχο ανατροφοδότησης από τους τερματικούς σταθμούς προκαλώντας σημαντική χρονική καθυστέρηση καθώς ο αριθμός των συνδέσμων προς αναφορά είναι μεγάλος. Σε ένα τεράστιο MIMO σύστημα κάτω των 6 GHz όπου τα τερματικά έχουν μικρό αριθμό κεραιών, προκαλείται προβληματισμός στον BS (Base Station) κατά τη μετάδοση κατερχόμενη ζεύξης. Σε συστήματα διμερούς διαίρεσης χρόνου (

time division duplex - TDD),

η χρονική καθυστέρηση μπορεί ακόμα να μειωθεί εκμεταλλευόμενη την αμοιβαιότητα του καναλιού [80], αλλά παραμένει σε κρίσιμη κατάσταση. Σε ένα σύστημα χιλιοστομετρικών κυμάτων (Millimeter wave – mmWave), με δυνητικά πολλές κεραιές στο τερματικό του, το ζήτημα αφορά και τις δύο πλευρές των συνδέσεων επικοινωνίας. Η απόκτηση του CSI στον δέκτη θεωρείται συνήθως λιγότερο κρίσιμη από ό, τι στον πομπό, καθώς η καθυστέρηση μεταξύ της εκτίμησης καναλιού και της ανίχνευσης δεδομένων είναι μικρή. Ωστόσο, οι ακραίες περιπτώσεις κινητικότητας από την πλευρά του χρήστη ενδέχεται να απαιτούν μια εναλλακτική λύση για τη συνεκτική ανίχνευση, ειδικά εάν ο στόχος είναι η URLLC. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, οι μη συνεκτικές μέθοδοι ανίχνευσης μπορούν να αποτελέσουν πλεονέκτημα. Μια ιδιαίτερα απλή μέθοδος που επωφελείται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία ενός τεράστιου αριθμού κεραιών βασίζεται στην ανίχνευση ενέργειας της ανερχόμενης ζεύξης ενός τεράστιου συστήματος MIMO. Η αρχή είναι να σταλεί ένα ενιαίο ρεύμα δεδομένων, να συλλεχτεί και να συγκεντρωθεί η ενέργεια από όλες τις κεραιές. Η ανίχνευση πραγματοποιείται με βάση τη μέση ενέργεια καναλιού στη συστοιχία κεραιάς, η οποία τείνει σε μια ντετερμινιστική ποσότητα για τις εντοπισμένες κινήσεις του χρήστη και ως εκ τούτου είναι πολύ πιο ισχυρή για την κινητικότητα του χρήστη από τη συνεκτική ανίχνευση. Επιπλέον, έχει προταθεί ένας αποτελεσματικός σχεδιασμός αστερισμού που μπορεί να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα των συνεκτικών επικοινωνιών σε χαμηλή κινητικότητα ενώ μεταβαίνει στην ανίχνευση ενέργειας για να εξασφαλίσει αξιόπιστες επικοινωνίες σε υψηλή κινητικότητα. Η συγκεκριμένη εργασία μελετά το πλαίσιο των κεραιοστοιχείων και την τεχνολογία URLLC με MASSIVE MIMO. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η ανάδειξη της συμβολής της τεχνολογίας των κεραιοστοιχείων και η δυναμική της τεχνολογίας URLLC με MASSIVE MIMO.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
1. Εισαγωγή	7
1.1. Τεχνολογία Massive MIMO.....	8
1.2. Προοπτική της Τεχνολογίας Massive MIMO	10
1.3. Εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλού λανθάνοντος χρόνου	17
(Ultra-Reliable Low-Latency Communications)	17
1.4. Ανατομία ενός συστήματος επικοινωνίας.....	18
1.5. Καθυστέρηση και αξιοπιστία στα δίκτυα LTE	18
1.6. Από τα LTE στα Δίκτυα 5G.....	20
1.7. Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα.....	22
2. URLLC	24
2.1. Απαιτήσεις και ορισμός	25
2.2. Σενάρια.....	25
2.3. Εκτίμηση	26
2.4. Αριθμολογία για URLLC	27
2.5. Οφέλη Μαζικών Συστημάτων Πολλαπλών Κεραιών για την URLLC.....	28
2.6. Δομή Καναλιού	29
2.7. Σχεδιασμός Βάσει της Συνδιακύμανσης	30
2.8. Δομή του πομποδέκτη	31
2.8.1 Μέθοδοι Διαμόρφωσης Ακτίνων	32
2.9. Αριθμητικές Αξιολογήσεις.....	33
3. Πολυσυνδεσιμότητα και Ποικιλομορφία Διεπαφών	36
4. URLLC ΣΕ MASSIVE MIMO	41
4.1 Ανατομία ενός συστήματος επικοινωνίας.....	42
4.2 Καθυστέρηση και αξιοπιστία στα δίκτυα LTE	43
4.3 Διάταξη του δικτύου	48
4.4 Η μεθοδολογία της προσομοίωσης	49
5. Προσομοίωση Διάδοσης Σήματος με Διαφορετικά Κεραιοστοιχεία	51
6. Συμπεράσματα.....	64
Βιβλιογραφία	65

1. Εισαγωγή

Σε ιστορικά πλαίσια, μια νέα γενιά τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας εισάγεται περίπου κάθε 10 χρόνια. Όλα ξεκίνησαν το 1981, όταν κυκλοφόρησαν τα κινητά συστήματα πρώτης γενιάς (1G). Το 1G χρησιμοποίησε ασύρματη αναλογική βάση σύνδεσης σε σταθμούς βάσης για αναμετάδοση τηλεφωνικών κλήσεων στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Αυτά αντικαταστάθηκαν αργότερα από τη δεύτερη γενιά (2G) στις αρχές της δεκαετίας του '90, φέρνοντας πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος και των νέων υπηρεσιών, π.χ. SMS, κάτι το οποίο λειτούργησε ως καρπός της μετάβασης από αναλογικές σε ψηφιακές επικοινωνίες [1]. Τα συστήματα 2G εξελίχθηκαν γρήγορα για να παρέχουν επίσης συνδεσιμότητα δεδομένων στους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, η επανάσταση των κινητών ευρυζωνικών δικτύων (MBB) επήλθε τον 21^ο αιώνα με την εισαγωγή της τρίτης γενιάς (3G) και αργότερα της τέταρτης γενιάς (4G), γνωστή και ως Long Term Evolution (LTE). Η πρώτη κυκλοφορία του LTE (η οποία ονομάστηκε LTE Release 8) ολοκληρώθηκε για πρώτη φορά τον Μάρτιο του 2009 από το 3^ο Generation Partnership Project (3GPP), με σκοπό την ικανοποίηση των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων της κυκλοφορίας MBB. Το LTE και ιδιαίτερα η εξέλιξή του, γνωστή ως LTE-Advanced (LTE-A), μπορεί να παρέχει μέγιστα ποσοστά δεδομένων θεωρητικά τόσο υψηλά όσο 3 Gbps. Επί του παρόντος, το LTE αναπτύσσεται ευρέως με περισσότερες από 1.683 δισεκατομμύρια συνδρομές (1 για κάθε 4 συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας) [2].

Το πρότυπο LTE-A εξελίσσεται συνεχώς προσπαθώντας να εκμεταλλευτεί πλήρως τις πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες στον συγκεκριμένο τομέα. Ωστόσο, η συμβατότητα προς τα πίσω, μεταξύ άλλων τεχνικών περιορισμών, οδήγησε σε δραστηριότητες έρευνας και τυποποίησης προς το σχεδιασμό ενός κινητού συστήματος πέμπτης γενιάς (5G), το οποίο εκπληρώνει τους στόχους για τις Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες για το 2020 και μετά (IMT-2020). Οι απαιτήσεις του IMT-2020 δεν επικεντρώνονται μόνο στην απόδοση MBB (Mobile Broadband, όπως στα δίκτυα 3G και 4G), αλλά αντιμετωπίζουν επίσης περιπτώσεις χρήσης που αναδύονται με εξαιρετικά διαφορετικές και πρωτοφανείς απαιτήσεις. Στην ουσία, το 5G παρέχει όταν χρειάζεται πολύ υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο, υψηλότερη αξιοπιστία και μεγαλύτερη πυκνότητα σύνδεσης σε σύγκριση με τους προκατόχους του [3].

Το επίκεντρο της συγκεκριμένης διπλωματικής έγκειται στην κατηγορία των υπηρεσιών Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC). Ο στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι να τονίσει ότι τα συστήματα 5G πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν σε έναν χρήστη κινητού μικρού ωφέλιμου φορτίου δεδομένων σε αισθητά σύντομο χρονικό διάστημα (έως 1 ms) με εξαιρετικά υψηλή πιθανότητα επιτυχίας (99,999%) [4].

1.1.Τεχνολογία Massive MIMO

Η τεράστια (massive) πολλαπλή είσοδος και έξοδος (multiple-input multiple-output - MIMO) αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία που έχει την ικανότητα να αυξάνει την MIMO κατά τάξεις μεγέθους συγκρινόμενη με την τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση. Σε αυτή τους τη μελέτη, οι συγγραφείς [5] συνεχίζουν την εργασία τους, με επίκεντρο τις εξελίξεις των τελευταίων τριών ετών και συγκεκριμένα, την ενεργειακή απόδοση, την εκμετάλλευση υπερβολικών βαθμών ελευθερίας, τη βαθμονόμηση διπλής χρονικής διαίρεσης (time-division duplex - TDD) και εντελώς νέες μετρήσεις καναλιών. Με τη βοήθεια της massive MIMO, είναι πια δυνατόν να θεωρηθούν συστήματα συστοιχιών κεραιών που αποτελούνται από μερικές εκατοντάδες κεραιές και που εξυπηρετούν ταυτόχρονα δεκάδες τερματικών στον ίδιο πόρο συχνότητας χρόνου. Η σημασία της massive MIMO είναι ότι δίνει τη δυνατότητα να αποκομίσει κανείς το να όλα τα οφέλη μιας συμβατικής MIMO σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα. Συνολικά, η massive MIMO αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων (σταθερών και κινητών), ενεργειακά αποδοτικών, ασφαλών και ισχυρών με αποδοτική χρήση του φάσματος. Συνεπώς αποτελεί ένα εργαλείο για τη υποδομή μιας μελλοντικής ψηφιακής κοινωνίας κατά την οποία θα υπάρχει διασύνδεση του Διαδικτύου των Ανθρώπων και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things-IoT), με υποδομές δικτύου και υπολογιστικά νέφη. Επιπλέον, καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων αλλά και σεναρίων ανάπτυξης όσον αφορά τις πραγματικές συστοιχίες κεραιών οι οποίες χρησιμοποιούνται από ένα σύστημα massive MIMO. Κάθε μονάδα κεραιάς θα είναι μικρή, ενεργή και τροφοδοτούμενη κατά κύριο λόγο μέσω οπτικού ή ηλεκτρικού ψηφιακού διαύλου. Η massive MIMO βασίζεται στη χωρική πολυπλεξία, η οποία στηρίζεται στον σταθμό βάσης με την αρκετά καλή γνώση καναλιού, τόσο όσον αφορά την άνω όσο και την κάτω ζεύξη.

Στην άνω ζεύξη, αυτό είναι εύκολο να επιτευχθεί με την αποστολή πιλότων από τα τερματικά, βάσει των οποίων ο σταθμός βάσης εκτιμά τις αποκρίσεις του καναλιού σε κάθε έναν από τους τερματικούς σταθμούς. Ωστόσο, η κάτω ζεύξη έχει μεγαλύτερη δυσκολία. Η λειτουργία των συμβατικών συστημάτων MIMO (Multiple Input Multiple Output), (ένα τέτοιο είναι και το πρότυπο μακροπρόθεσμης εξέλιξης (Long Term Evolution - LTE) πραγματοποιείται ως εξής:

1. Ο σταθμός βάσης αποστέλει πιλοτικές κυματομορφές,
2. Τα τερματικά με βάση τις κυματομορφές αυτές εκτιμούν τις αποκρίσεις του καναλιού,
3. ποσοτικοποιούν τις εκτιμήσεις που λαμβάνονται και
4. τροφοδοτούν το σταθμό βάσης.

Το παραπάνω δεν καθίσταται εφικτό σε συστήματα massive MIMO, τουλάχιστον όχι στην περίπτωση που αυτά λειτουργούν σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας. Το γεγονός αυτό συμβαίνει για δύο λόγους.

1. Οι βέλτιστοι πιλότοι κάτω ζεύξης πρέπει να είναι αμοιβαία ορθογώνιοι μεταξύ των κεραιών, γεγονός που δηλώνει ότι ο απαιτούμενος για τους πιλότους κάτω ζεύξης αριθμός των πόρων συχνότητας χρόνου, κλιμακώνεται σε σχέση με το πλήθος των κεραιών, το οποίο σημαίνει ότι ένα σύστημα massive MIMO θα είχε την ανάγκη πόρων έως και 100 φορές περισσότερων συγκρινόμενο με ένα συμβατικό σύστημα.

2. Κάθε τερματικό θα πρέπει να εκτιμήσει αριθμό αποκρίσεων καναλιού ανάλογο του αριθμού των κεραιών σταθμού βάσης. Συνεπώς, οι απαιτούμενοι αναγκαίοι πόροι για την ενημέρωση του σταθμού βάσης όσον αφορά τις αποκρίσεις του καναλιού πρέπει να είναι έως και 100 φορές πιο μεγάλοι σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.

Το πρόβλημα αυτό είναι πιθανόν να λύνεται με την εφαρμογή λειτουργίας TDD (Time Division Duplex) ενώ θα πρέπει να βασίζεται στην αμοιβαιότητα μεταξύ των καναλιών άνω και κάτω ζεύξης. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί επίσης να εφαρμοστεί η λειτουργία διπλού κειμένου διαίρεσης συχνοτήτων (frequency-division duplex - FDD). Αν και οι έννοιες που σχετίζονται με

τη massive MIMO ήταν κατά κύριο λόγο θεωρητικές και αποτέλεσαν τη βάση για πολλές έρευνες κυρίως στον τομέα των τυχαίων πινάκων και των σχετικών μαθηματικών ωστόσο οι βασικές περιοχές δοκιμών καθίστανται πια διαθέσιμες ενώ έχουν λάβει χώρα κάποιες αρχικές μετρήσεις καναλιών. Όπως δηλαδή φαίνεται μέσα από διάφορες μελέτες, π.χ. των [7] και [8].

1.2. Προοπτική της Τεχνολογίας Massive MIMO

Η τεχνολογία massive MIMO βασίζεται στη συνεκτική φάση, αλλά υπολογιστικά, πραγματοποιείται πολύ απλή επεξεργασία σημάτων από όλες τις κεραιές στο σταθμό βάσης. Κάποια σημαντικά οφέλη συστήματος massive MIMO είναι τα ακόλουθα:

- Η massive MIMO είναι σε θέση να οδηγήσει σε αύξηση 10 φορές ή και περισσότερο της χωρητικότητας καθώς και στη βελτίωση της ακτινοβολούμενης ενεργειακής απόδοσης κατά 100 φορές. Η αύξηση αυτή της χωρητικότητας είναι το αποτέλεσμα της επιθετικής χωρικής πολυπλεξίας την οποία χρησιμοποιεί η massive MIMO. Η θεμελιώδης αρχή που καθιστά δυνατή τη δραματική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, είναι ότι με μεγάλο αριθμό κεραιών, η ενέργεια μπορεί να επικεντρωθεί με εξαιρετική ευκρίνεια σε μικρές περιοχές στο διάστημα. Το παραπάνω βασίζεται όσον αφορά τη φυσική του στη συνεκτική υπέρθεση μετώπων κύματος. Με την κατάλληλη διαμόρφωση των σημάτων που στέλνονται από τις κεραιές, ο σταθμός βάσης βεβαιώνεται για το γεγονός ότι όλες οι προσόψεις κυμάτων που εκπέμπονται συλλογικά από όλες τις κεραιές αθροίζονται εποικοδομητικά στις θέσεις των τερματικών προορισμού, ενώ αθροίζονται καταστροφικά οπουδήποτε αλλού. Η καταστολή της παρεμβολής μεταξύ των τερματικών μπορεί να γίνει ακόμη μεγαλύτερη με τη χρήση, μηδενικής πίεσης (zero-forcing - ZF), κάτι που όμως ενδεχομένως να επιφέρει κόστος μεγαλύτερης μεταδιδόμενης ισχύος. Στο Σχήμα 1 αποτυπώνεται η θεμελιώδης αντιστάθμιση μεταξύ της ενεργειακής απόδοσης, ως προς τον συνολικό αριθμό των bits (αθροιστικό ποσοστό) που μεταδίδονται/Joule/τερματική υπηρεσία λήψης της ενέργειας και της φασματικής απόδοσης ως προς τον συνολικό αριθμό των bits (αθροιστικό ποσοστό), που μεταδίδονται/μονάδα του ραδιοφάσματος που καταναλώνεται. Στο σχήμα αυτό επιπλέον απεικονίζεται η σχέση για την άνω ζεύξη, από τους τερματικούς σταθμούς στον σταθμό βάσης (παρόμοια είναι και η απόδοση για την κάτω ζεύξη). Επίσης

παρουσιάζεται η αντιστάθμιση για τις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

1. Για σύστημα αναφοράς μίας μόνο κεραιάς η οποία εξυπηρετεί ένα μόνο τερματικό (μοβ).
2. Για σύστημα 100 κεραιών το οποίο εξυπηρετεί ένα μόνο τερματικό με τη χρήση συμβατικής διαμόρφωσης δέσμης (πράσινο).
3. Για τεράστιο σύστημα MIMO 100 κεραιών οι οποίες εξυπηρετούν ταυτόχρονα πολλαπλά (40περίπου) τερματικά (κόκκινο, με χρήση συνδυασμού μέγιστης αναλογίας(κόκκινο χρώμα) και, με τη χρήση ZF(μπλε χρώμα).

Εκτός από την υπολογιστική απλότητα (πολλαπλασιασμός των σημάτων που λαμβάνονται από τις αποκρίσεις του συζευγμένου καναλιού) που καθιστά πιο ελκυστικό το συνδυασμό της μέγιστης αναλογίας (maximum ratio combining - MRC) σε σχέση με τη χρήση ZF ένας άλλος παράγοντας που συντείνει στη επιλογή του εν λόγω συνδυασμού είναι ότι ο MRC μπορεί να εκτελεστεί με κατανεμημένο τρόπο και ανεξάρτητα σε κάθε κεραιά. Ωστόσο σε αντίθεση με τη ZF ο MRC δεν λειτουργεί αρκετά καλά για ένα MIMO συμβατικό ή μετρίου μεγέθους. Ο λόγος για την τόσο καλή λειτουργία του MRC στα massive MIMO είναι ότι οι αποκρίσεις των καναλιών οι σχετιζόμενες με διαφορετικά τερματικά τείνουν να θεωρούνται ορθογώνιες για μεγάλο αριθμό κεραιών σταθμών βάσης. Η πρόβλεψη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 απορρέει από μια θεωρητική ανάλυση πληροφοριών η οποία λαμβάνει υπόψη τις παρεμβολές εντός των ενδο-κελιών, το εύρος ζώνης καθώς και το κόστος ενέργειας κατά τη χρήση πιλότων προκειμένου να παρέχονται πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από υψηλή κινητικότητα. Χρησιμοποιώντας τον δέκτη MRC, οι συγγραφείς [5], λειτουργούν στο σχεδόν περιορισμένο από θόρυβο καθεστώς της θεωρίας πληροφοριών, κάτι που σημαίνει ότι σε κάθε τερματικό ρυθμό παρέχεται περίπου 1 b/ σύνθετη διάσταση (1 b/s/Hz). Σε ένα σύστημα massive MIMO, όταν γίνεται χρήση του MRC και η λειτουργία βρίσκεται στο «πράσινο» καθεστώς (δηλαδή, όταν υπάρχει μείωση της ισχύς όσο το δυνατόν περισσότερο χωρίς να επηρεαστεί σοβαρά η συνολική φασματική απόδοση), οι παρεμβολές πολλών χρηστών και οι επιπτώσεις από ατέλειες υλικού τείνουν να κατακλύζονται από τον θερμικό θόρυβο. Ο λόγος που κάνει τη συνολική φασματική απόδοση ακόμη και 10 φορές υψηλότερη σε σχέση με το συμβατικό MIMO, είναι το ότι μπορούν να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλές δεκάδες τερματικών και μάλιστα

στον ίδιο πόρο χρονικής συχνότητας. Στην περίπτωση που η λειτουργία είναι 1 b/διάσταση/τερματικό, τότε υπό συνθήκες η συμβολική παρεμβολή μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόσθετος θερμικός θόρυβος. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται ένας τρόπος διάθεσης με πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνοτήτων (orthogonal frequency division multiplexing - OFDM) που βοηθά στην καταπολέμηση των συμβολικών παρεμβολών. Για να γίνει κατανοητή η κλίμακα των δυνατοτήτων που προσφέρει η massive MIMO, έστω ότι μια συστοιχία αποτελείται από 6400 πολυκατευθυντικές κεραιές (συνολικός συντελεστής μορφής $6400 \times (\lambda/2)^2 = 40 \text{ m}^2$) που εκπέμπουν με συνολική ισχύ 120 W-watt (δηλαδή, κάθε κεραία ακτινοβολεί περίπου 20 mW-milliwatt) σε εύρος ζώνης 20 MHz - MegaHertz στη ζώνη προσωπικών υπηρεσιών επικοινωνιών (personal communications services - PCS) (1900 MHz). Έστω πίνακας ο οποίος εξυπηρετεί 1000 σταθερούς ακροδέκτες με τυχαία κατανομή εντός δίσκου ακτίνας 6 km με επίκεντρο τον πίνακα. Έστω ακόμη ότι το κάθε τερματικό διαθέτει κεραία κέρδους 8 dB και ότι το ύψος της συστοιχίας κεραιών είναι 30 m ενώ το ύψος των τερματικών 5 m. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο Hata COST231, οι συγγραφείς [5], διαπιστώνουν ότι η απώλεια διαδρομής είναι 127 dB σε απόσταση 1 χιλιομέτρου και ο εκθέτης εύρους αποσύνθεσης είναι 3,52. Υπάρχει επίσης μία φυσιολογική εξασθένηση σήματος με κανονική απόκλιση 8 dB και θεωρείται ότι οι δέκτες παρουσιάζουν θόρυβο στάθμης 9 dB. Το ένα τέταρτο του χρόνου αφιερώνεται στη μετάδοση πιλότων άνω ζεύξης για εκτίμηση του καναλιού TDD και υποτίθεται ότι το κανάλι είναι ουσιαστικά σταθερό σε διαστήματα 164 ms - millisecond για να εκτιμηθούν με επαρκή ακρίβεια τα κέρδη του καναλιού. Θεωρείται η παραδοχή ότι τα δεδομένα κάτω ζεύξης μεταδίδονται μέσω της μορφής δέσμης μέγιστης μετάδοσης (MRT) σε συνδυασμό με τον έλεγχο ισχύος και ότι το 5 % των τερματικών που παρουσιάζουν τα χειρότερα κανάλια δεν περιλαμβάνονται στην υπηρεσία. Χρησιμοποιούν μια χωρητικότητα χαμηλότερη από αυτή της έρευνας των [9], η οποία επεκτείνεται για να φιλοξενήσει αργή εξασθένηση, κοντά/μακριά εφέ και έλεγχο ισχύος, η οποία αντιπροσωπεύει τον θόρυβο του δέκτη, τα σφάλματα εκτίμησης καναλιών, τα γενικά έξοδα μετάδοσης του πιλότου και τις ατέλειες της διαμόρφωσης δέσμης MRT. Στη συνέχεια, οι συγγραφείς [5] χρησιμοποίησαν τον βέλτιστο έλεγχο ισχύος μέγιστος-ελάχιστος (max-min), ο οποίος παρέχει ίσο λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο, σε καθένα από τους 950 ακροδέκτες και συνεπώς ίση απόδοση. Ο αριθμητικός μέσος όρος σε τυχαίες θέσεις τερματικών και η εξασθένηση σήματος δείχνει ότι το 95% των τερματικών θα λάβει

απόδοση 21,2 Mb/s/τερματικό. Η συγκεκριμένη διάταξη αποδίδει στα 1000 τερματικά συνολική απόδοση κάτω ζεύξης 20 Gb/s και συνολική φασματική απόδοση 1000 b/s/Hz. Αυτό θα ήταν αρκετό, για παράδειγμα, για την παροχή ευρυζωνικής υπηρεσίας 20 Mb/s σε καθένα από τα 1000 σπίτια. Ο έλεγχος ισχύος max-min, παρέχει ίση εξυπηρέτηση ταυτόχρονα με 950 τερματικά.

Ετερογενείς απαιτήσεις κυκλοφορίας για μεγαλύτερο ενδεχομένως σύνολο τερματικών θα μπορούσαν πιθανόν να ικανοποιηθούν από άλλους τύπους ισχύος σε σχέση με την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου.

Ο δέκτης MRC (για την άνω ζεύξη) και ο αντίστοιχος MRT προ κωδικοποίησης (για την κάτω ζεύξη) είναι επίσης γνωστοί ως ταιριαστό φίλτράρισμα (matched filtering - MF).

- Η massive MIMO, η οποία αποτελεί μία τεχνολογία υψίστης σημασίας σχετική με τα συστήματα τη θεωρεί και την εφαρμογή, μπορεί να υλοποιηθεί από φθηνά εξαρτήματα χαμηλής ισχύος. Η τεχνολογία αυτή είναι σε θέση να αντικαταστήσει τους πολύ ακριβούς και γραμμικούς ενισχυτές των 50W (των οποίων η χρήση είναι μονόδρομος σε συμβατικά συστήματα) με εκατοντάδες ενισχυτές χαμηλού κόστους των οποίων η τιμή εξόδου έχει εύρος κάποιων mW. Σε αντίθεση με τα κλασσικά σχέδια συστοιχιών τα οποία χαρακτηρίζονταν από τη χρήση ενισχυτών υψηλής ισχύος, η νέα αυτή τεχνολογία είναι σε θέση να αντικαταστήσει και να καταργήσει τα ακριβά και ογκώδη αντικείμενα. (Τα τυπικά ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιούνται σήμερα για σταθμούς βάσης με πύργο, έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 4 εκατοστά). Το αποτέλεσμα είναι η μείωση των περιορισμών που επιφέρουν η ακρίβεια και η γραμμικότητα του κάθε μεμονωμένου ενισχυτή και αλυσίδας RF. Ουσιαστικά με το νόμο των μεγάλων αριθμών η massive MIMO αποδεικνύει ότι ο συνδυασμός σημάτων που προέρχονται από μεγάλο αριθμό κεραιών στον αέρα είναι σε θέση να εξισορροπήσουν το θόρυβο, τις ατέλειες του υλικού και την εξασθένηση σήματος. Η ίδια ιδιότητα που κάνει την massive MIMO ανθεκτική στην εξασθένηση σήματος καθιστά επίσης την τεχνολογία εξαιρετικά ανθεκτική σε αστοχία μιας ή μερικών από τις μονάδες της κεραίας. Στην πραγματικότητα ένα σύστημα massive MIMO χαρακτηρίζεται από πλεόνασμα σε αριθμό βαθμών ελευθερίας (όπου βαθμοί ελευθερίας είναι ο αριθμός τιμών στον τελικό υπολογισμό μιας στατιστικής, οι οποίες μπορούν να ποικίλουν ελεύθερα). Εάν για παράδειγμα 200 κεραίες εξυπηρετούν 20 τερματικά, δεν χρησιμοποιούνται και οι

180 βαθμοί ελευθερίας, οι οποίοι πιθανόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να διαμορφωθεί κάποιο σήμα φιλικό προς το υλικό. Συγκεκριμένα, κάθε κεραία μπορεί να μεταδώσει σήματα με πολύ μικρή αναλογία κορυφής προς μέσο όρο ή ακόμα και σταθερό φάκελο (δηλαδή ομαλή καμπύλη του σήματος που περιγράφει τα άκρα του), σε πολύ μέτρια ποινή όσον αφορά την αυξημένη συνολική ακτινοβολούμενη ισχύ. Αυτού του τύπου η σηματοδότηση φακέλου, η οποία θεωρείται σχεδόν σταθερή, μπορεί να βοηθήσει στη χρήση RFενισχυτών οι οποίοι είναι φθηνοί αλλά ταυτόχρονα αποδοτικοί. Οι τεχνικές που παρουσιάζονται στις μελέτες των [10] και [11], δεν πρέπει να συγχέονται με τις συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης ή τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης ίσου μεγέθους βάρους. Με την χρήση της (σχεδόν) σταθερής πρόβλεψης πολλαπλών χρηστών φακέλου, δημιουργείται πεδίο κύματος με τέτοιον τρόπο ώστε η δειγματοληψία να πραγματοποιείται στα σημεία όπου βρίσκονται οι ακροδέκτες οι οποίοι με τη σειρά τους «βλέπουν» το σήμα που ενδιαφέρεται να δει ο εκάστοτε χρήστης. Το κανάλι της massive MIMO χαρακτηρίζεται από την ιδιότητά του να διαθέτει έναν μεγάλο μηδενικό χώρο, στον οποίον χώρο μπορεί να τοποθετηθεί σχεδόν οτιδήποτε ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζει ό,τι βλέπουν τα τερματικά. Συνεπώς στο χώρο αυτό είναι δυνατόν να τοποθετηθούν συστατικά τέτοια που να μπορούν να καταστήσουν τις μεταδιδόμενες κυματομορφές ικανές στο να μπορούν να ικανοποιούν τους περιορισμούς του φακέλου. Τα αποτελεσματικά κανάλια ανάμεσα στον κάθε τερματικό σταθμό και τους σταθμούς βάσης, είναι σε θέση να λαμβάνουν ως είσοδο οτιδήποτε ασταθές σήματος χωρίς να απαιτείται η χρήση διαμόρφωσης εναλλαγής φάσης (phase shift keying-PSK). Χάρη στην δραστικά βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση τα massive MIMO είναι σε θέση να λειτουργούν με κατά δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη συνολική ισχύ εξόδου RF(σε σχέση με αυτήν που απαιτεί η τρέχουσα τεχνολογία), γεγονός μεγάλης σημασίας αφού σημαντικό πρόβλημα παγκοσμίως αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας των κυψελοειδών σταθμών βάσης. Άλλωστε, στην περίπτωση που οι σταθμοί βάσης είναι σε θέση να καταναλώνουν τόσο λιγότερη ενέργεια θα είναι ικανοί να τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή κ.λ.π) και κατ' επέκτασιν να αναπτύσσονται και σε περιοχές χωρίς διαθέσιμο ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον εάν η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς μειωθεί τόσο πολύ θα μειωθούν εξίσου σημαντικά και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές του σταθμού βάσης, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό εάν συσχετισθεί με τις ανησυχίες περί της ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης.

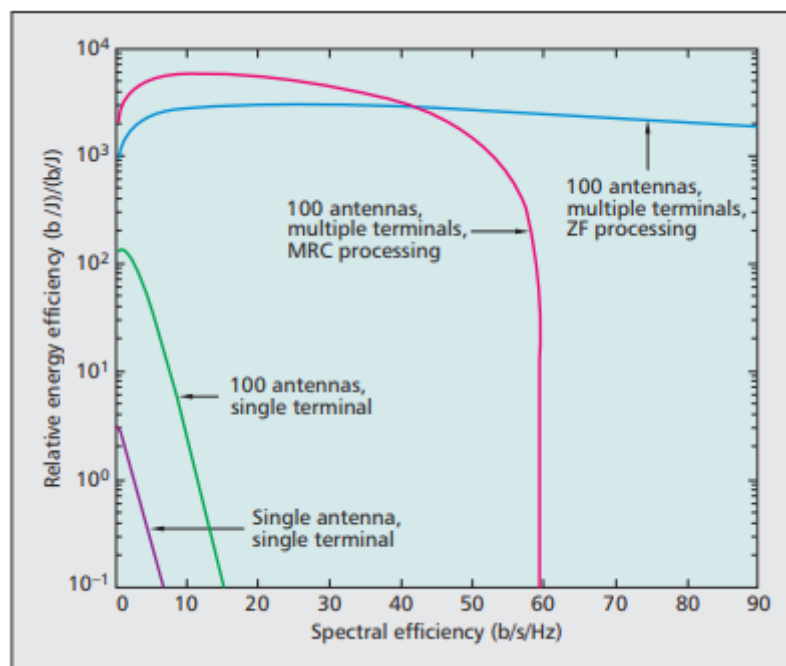
- Η massive MIMO μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της καθυστέρησης στη διεπαφή του αέρα. Η εξασθένηση του σήματος περιορίζει την απόδοση των ασύρματων επικοινωνιών και μπορεί να καταστήσει τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος επικίνδυνα μικρή κατά τη διάρκεια κάποιων χρονικών στιγμών. Η εξασθένηση αυτή συμβαίνει εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών που ακολουθεί το σήμα κατά την πορεία του από το σταθμό βάσης μέχρι να φθάσει στο τερματικό με συνέπεια τα κύματα τα οποία προκύπτουν εξαιτίας αυτών των πολλαπλών διαδρομών μπορεί να παρεμβαίνουν καταστροφικά. Η εξασθένηση αυτή δυσκολεύει τη δημιουργία ασύρματων συνδέσμων χαμηλής καθυστέρησης και το τερματικό θα παραμείνει εγκλωβισμένο σε αυτή την εξασθένηση μέχρι το κανάλι διάδοσης αλλάξει ώστε να μπορέσουν να ληφθούν τα δεδομένα. Με βάση τους νόμους των μεγάλων αριθμών και της διαμόρφωσης δέσμης, η massive MIMO καταφέρνει να αποφεύγει αυτές τις εξασθενήσεις του σήματος, με αποτέλεσμα να μην περιορίζεται πλέον η αδράνεια εξαιτίας της εξασθένησης.

- Η χρήση της massive MIMO απλοποιεί το επίπεδο πολλαπλής πρόσβασης. Λόγω του νόμου των μεγάλων αριθμών, το κανάλι σκληραίνει (δηλαδή συμπεριφέρεται σαν να μην έχει υποστεί εξασθένηση σήματος) έτσι ώστε ο προγραμματισμός τομέα συχνοτήτων να μην αποδίδει πλέον. Σύμφωνα με τον OFDM, σε ένα σύστημα massive MIMO ο κάθε υποφορέας θα παρουσιάζει το ίδιο κέρδος καναλιού. Έτσι σε κάθε τερματικό θα μπορεί να παρέχεται όλο το εύρος ζώνης που καθιστά περιττό το μεγαλύτερο μέρος της σηματοδότησης ελέγχου στο φυσικό επίπεδο.

- Η massive MIMO αυξάνει τη στιβαρότητα ενάντια σε ακούσιες τεχνητές παρεμβολές και στη σκόπιμη εμπλοκή η οποία ειδικά σε ότι αφορά στα ασύρματα συστήματα πολιτών αποτελεί μία πραγματικά σοβαρή απειλή που σχετίζεται με την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και η οποία είναι σχεδόν άγνωστη στο κοινό. Οι απλοί μηχανισμοί εμπλοκής μπορούν να αγοραστούν από το Διαδίκτυο για μερικές εκατοντάδες δολάρια και εξοπλισμός που παλαιότερα ήταν στρατιωτικής ποιότητας, μπορεί να συνδυαστεί χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες ραδιοφωνικές πλατφόρμες λογισμικού για μερικές χιλιάδες δολάρια. Πολλά είναι τα περιστατικά που αναδεικνύουν το μέγεθος του προβλήματος. Το 2001 στο Γκετενμποργκ, στη Σουηδία, και κατά τη διάρκεια συνόδου κορυφής της ΕΕ οι διαδηλωτές κατάφεραν

καταστήσουν αδύνατη την επικοινωνία του επικεφαλής διοικητή με τους 700 περίπου αστυνομικούς που συμμετείχαν στην καταπολέμηση της εξέγερσης, με τη χρήση μηχανισμού εμπλοκής. Λόγω της έλλειψης εύρους ζώνης η διάδοση πληροφοριών σε συχνότητα δεν είναι εφικτή, οπότε ο μόνος τρόπος βελτίωσης της ευρωστίας των ασύρματων επικοινωνιών είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών.

Οι υπερβολικοί βαθμοί ελευθερίας που προσφέρει η massive MIMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν από σκόπιμους μηχανισμούς εμπλοκής με σκοπό την ακύρωση σημάτων. Οι έξυπνοι μηχανισμοί εμπλοκής θα ήταν σε θέση να προκαλέσουν πραγματικά επιβλαβείς παρεμβολές σε μέτρια ισχύ μετάδοσης εάν για την εφαρμογή της massive MIMO χρησιμοποιούνταν πιλότοι άνω ζεύξης για την εκτίμηση καναλιού. Το παραπάνω πρόβλημα θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ικανοποιητικά με τη χρήση έξυπνων εφαρμογών που βασίζονται στη χρήση κοινής εκτίμησης και αποκωδικοποίησης καναλιών.



Σχήμα 1. Η μισή ισχύς – η διπλάσια δύναμη. (Πηγή: [12]).

1.3. Εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλού λανθάνοντος χρόνου (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)

Οι βασικοί δείκτες απόδοσης URLLC (KPI – Key Performance indicators) και οι ορισμοί τους έχουν αναδειχθεί σε διάφορες έρευνες. Εκτός από την απαίτηση αξιοπιστίας 1 ms με $1 \cdot 10^{-5}$ (99,999%), πρέπει να πληρείται η καθυστέρηση επιπέδου χρήστη 0,5 ms. Η καθορισμένη καθυστέρηση χρήστη-επιπέδου 0,5 ms αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη τιμή και δεν σχετίζεται με έναν συγκεκριμένο περιορισμό αξιοπιστίας.

Ο λανθάνων χρόνος-επιπέδου χρήστη ορίζεται ως ο μονοδρομικός λανθάνων χρόνος που επιτυγχάνεται στο επίπεδο 2/3 του δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN – Radio Access Network), είτε σε κατεύθυνση άνω ζεύξης είτε κατερχόμενης ζεύξης, και δεν λαμβάνει υπόψη τις λειτουργίες του πυρήνα του δικτύου. Επιπλέον, ο εξοπλισμός του χρήστη (UE – User Equipment) URLLC πρέπει να είναι ικανός να εκτελεί μεταβιβάσεις μεταξύ κελιών χωρίς διακοπή της συνδεσιμότητας δεδομένων [13].

Αναμένεται ότι η ενεργοποίηση της υποστήριξης για τέτοιες άνευ προηγουμένου απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας θα ανοίξει την πόρτα σε νέες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης. Παραδείγματα αυτών των εφαρμογών περιλαμβάνουν i) ασύρματο έλεγχο και αυτοματισμό σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, που καλύπτουν τις απαιτήσεις της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης (Industry 4.0), ii) επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων, όπου τα οχήματα ανταλλάσσουν πληροφορίες προκειμένου να αυξήσουν την ασφάλεια και να βελτιώσουν τη ροή και την αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας των οχημάτων και iii) από διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τον ασύρματο έλεγχο τόσο των πραγματικών όσο και των εικονικών αντικειμένων με απτική ανάδραση σε πραγματικό χρόνο. Με άλλα λόγια, η υποστήριξη για το URLLC προβλέπεται να επεκτείνει τη χρήση τεχνολογιών 5G σε νέες αγορές, δημιουργώντας νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για παρόχους κινητής τηλεφωνίας και πωλητές εξοπλισμού τηλεπικοινωνιών. Επιπλέον, το 5G URLLC θα επηρεάσει θετικά την κοινωνία, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής των ανθρώπων και εξοικονομώντας χρόνο και πόρους [14].

Ωστόσο τόσο σημαντικές απαιτήσεις σε αξιοπιστία και καθυστέρηση προϋποθέτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη ραδιοφωνική διεπαφή σε σχέση με αυτή των

συστημάτων LTE [13].

1.4. Ανατομία ενός συστήματος επικοινωνίας

Το σύστημα επικοινωνίας, το οποίο επιβλέπει την παράδοση των δεδομένων, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην εκπλήρωση των απαιτήσεων καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Δεδομένα των οποίων η λήψη προέρχεται από υψηλότερου επιπέδου εφαρμογές αποθηκεύονται σε ειδικά buffer μετάδοσης για τον χρήστη. Σε κάθε χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI – Transmission Time Interval), η οντότητα προγραμματισμού στον πομπό εκχωρεί ραδιο-πηγές στους χρήστες, με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και την ποιότητα του καναλιού, όπως αναφέρεται στις αναφορές πληροφοριών κατάστασης καναλιών (CSI – Channel Status Information). Η δυναμική προσαρμογή συνδέσμου εφαρμόζεται συνήθως στη μετάδοση δεδομένων κάθε χρήστη, προσπαθώντας να προσαρμόσει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS – Modulation Coding Scheme) για να ικανοποιήσει έναν περιορισμό συγκεκριμένου ποσοστού σφάλματος (BLER – Block Error Rate) [15]. Οι αβεβαιότητες στο ασύρματο κανάλι, λόγω θορύβου και παραλλαγής χρονικής και επιλεκτικής συχνότητας, μπορούν να μειωθούν εκμεταλλευόμενοι το χρόνο, τη συχνότητα και τη χωρική ποικιλομορφία. Το τελευταίο επιτυγχάνεται συνήθως χρησιμοποιώντας τεχνικές κεραίας πολλαπλών εισόδων- πολλαπλών εξόδων (MIMO). Στον δέκτη, εφαρμόζεται μετά την επεξεργασία του σήματος για να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα επιτυχούς αποκωδικοποίησης των δεδομένων. Σε περίπτωση αποτυχημένης αποκωδικοποίησης, αποστέλλεται στον πομπό μια αρνητική επιβεβαίωση (NACK), η οποία συνήθως ενεργοποιεί μηχανισμούς ελέγχου σφαλμάτων όπως το υβριδικό αυτόματο αίτημα επανάληψης (HARQ). Εκτός αυτού, η κινητικότητα του πομπού και / ή του δέκτη θα μπορούσε να οδηγήσει σε παράδοση με δυνητικά λίγο χρόνο διακοπής δεδομένων κατά τη μεταφορά της επικοινωνίας από έναν κόμβο σε έναν άλλο [16].

1.5. Καθυστέρηση και αξιοπιστία στα δίκτυα LTE

Το πρότυπο LTE σχεδιάστηκε κυρίως για τη μεταφορά δεδομένων που επικεντρώνονται στον άνθρωπο. Επομένως, οι περισσότερες από τις λειτουργίες του προτύπου LTE στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, ο σταθμός βάσης LTE εκχωρεί πόρους ραδιοφώνου

στους χρήστες με ανάλυση 1 ms TTI, η οποία αντιπροσωπεύει το κατώτερο όριο του λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίας. Η προσαρμογή συνδέσμου πραγματοποιείται για να επιτευχθεί ένας σχετικά υψηλός στόχος BLER πρώτης μετάδοσης 10% -20%. Τα πακέτα που έχουν αποκωδικοποιηθεί λανθασμένα μεταδίδονται ξανά.

Η μετάδοση με μικρότερα TTI 0,133 ms αναμένεται να υποστηρίζεται στο LTE Release 15, επίσης γνωστό ως LTE-Advanced Pro. HARQ, το οποίο προσθέτει τουλάχιστον 8 ms στην καθυστέρηση κάθε αναμεταδιδόμενου πακέτου. Οι περισσότερες από τις εμπορικές εφαρμογές LTE χρησιμοποιούν διαμορφώσεις κεραίας 2x2 MIMO. Ενώ τα σχήματα MIMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή υψηλής τάξης χωρικής ποικιλομορφίας, η χωρική πολυπλεξία παράλληλων ροών δεδομένων προτιμάται συνήθως για χρήστες που έχουν καλή ποιότητα καναλιού.

Σε περίπτωση κινητικότητας σε όλα τα κελιά, το LTE χρησιμοποιεί μεταβιβάσεις break-before-make, το καθένα με αποτέλεσμα συνήθως τη διακοπή της σύνδεσης δεδομένων 40-60 ms.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το έργο των [17], το οποίο μετρά την καθυστέρηση end-to-end (E2E) και την απόδοση παράδοσης τριών εμπορικών δικτύων LTE με βάση δοκιμές οδήγησης 19.000 km στη Βόρεια Δανία. Επιπλέον, παρατηρούνται καθυστερήσεις έως 250 ms στην ουρά της κατανομής. Ένα βασικό εύρημα είναι ότι η βασική ρύθμιση δικτύου για συγκεκριμένο χειριστή θέτει σε κίνδυνο τη συνολική απόδοση λανθάνοντος χρόνου RTT (Round Trip time). Παρόμοια απόδοση καθυστέρησης παρατηρείται από τις μέτρησεις που αναφέρονται στο [18].

Αυτά τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν επίσης πώς ο λανθάνων χρόνος ποικίλλει δραστικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με το φορτίο εμπειρίας στο σύστημα.

Όπως συζητήθηκε στην εργασία [17], η καθυστέρηση RTT επιπέδου χρήστη του LTE, εξαιρουμένου του κεντρικού δικτύου, είναι περίπου 19 ms. Ο λανθάνων χρόνος ραδιοσυχνότητας, εκτιμώμενος ως $19/2 \text{ ms} = 9,5 \text{ ms}$, επομένως δεν επαρκεί για την κάλυψη των απαιτήσεων λανθάνουσας κατάστασης URLLC. Όσον αφορά την απόδοση της κινητικότητας, τα αποτελέσματα από την εργασία [17] δείχνουν παρόμοιους χρόνους διακοπής των δεδομένων παράδοσης για τους τρεις χειριστές:

περίπου 40 ms στη διάμεση και έως 200 ms στο 99% -percentile. Η παρατηρούμενη απόδοση ευθυγραμμίζεται επίσης με τις αναφερόμενες σε άλλες δοκιμές πεδίου.

1.6. Από τα LTE στα Δίκτυα 5G

Η τρίτη και η τέταρτη γενιά (3G και 4G) των τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας αναπτύσσονται ευρέως, παρέχοντας φωνητικές και κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες ως κύριες υπηρεσίες τους. Η ζήτηση όμως για όλο και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων καθώς και για όλο και μεγαλύτερες χωρητικότητες συστήματος αλλά και λόγω των νέων περιπτώσεων χρήσης του Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things – IoT), οδηγεί στην πέμπτη γενιά (5G)(η τυποποίηση και ανάπτυξη του 5G αναμένεται τα έτη 2018 και 2020 αντίστοιχα). Χαρακτηριστικό στοιχείο του 5G αποτελεί η συνδεδεμένη κινητικότητα που χρησιμοποιεί την επικοινωνία των οχημάτων για ψυχαγωγία, ασφάλεια και αποδοτικότητα. Ειδικά η ασφάλεια και η αποδοτικότητα επιβάλλουν σημαντικές απαιτήσεις που σχετίζονται με την εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία του σήματος, τον μηδενικό χρόνο διακοπής της παράδοσης και την χαμηλή αδράνεια η ικανοποίηση των οποίων σε πρακτικό επίπεδο καθίσταται πολύ σημαντικό γεγονός εξαιτίας της κρισιμότητας περιπτώσεων που σχετίζονται με τη χρήση κινητικότητας και συνδέονται με την ασφάλεια. Ουσιαστικά πρόκειται για περιπτώσεις που αφορούν επικοινωνία οχημάτων για εφαρμογές όπως η συνεταιριστική ευαισθητοποίηση, τα αυτό-οδηγούμενα οχήματα και η διμοιρία. Υπό αυτή την έννοια, πρέπει να γίνουν δοκιμές δικτύου στην ήδη καθιερωμένη υποδομή 4G Μακροπρόθεσμης Εξέλιξης (Long Term Evolution - LTE), ώστε να αποδειχθεί τελικώς εάν και κατά πόσο ικανοποιούνται και σε πρακτικό επίπεδο οι απαιτήσεις LTE. Αν όχι, θα ήταν φρόνιμο να αξιολογηθεί εάν είναι πιθανές οι τρέχουσες εξελίξεις 5G ώστε να ελαχιστοποιηθεί το χάσμα μεταξύ απαιτήσεων και εμπορικής εφαρμογής. Στην εργασία [19] οι συγγραφείς ασχολήθηκαν με τις αρχικές απαιτήσεις προκειμένου για το σχεδιασμό του 4G LTE αλλά και τις επιδόσεις που σχετίζονται με την αδράνεια επιπέδου χρήστη και ελέγχου, καθώς και με το χρόνο εκτέλεσης παράδοσης LTE. Επ' αυτού αναλύουν τον πιθανό σχεδιασμό του 5G προκειμένου να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει απαιτήσεις αδράνειας και παράδοσης, όσον αφορά περιπτώσεις χρήσης συνδεδεμένης κινητικότητας (ασφάλεια , επικοινωνία οχημάτων, αποτελεσματικότητα.

Στην εργασία τους μέτρησαν την απόδοση LTE σε τέσσερα διαφορετικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στη Δανία και συγκεκριμένα στη Βόρειο Γιουτλάνδη και μεταξύ άλλων περιλαμβάνονταν εξειδικευμένα smartphone μέτρησης και 19.000 km δοκιμής οδήγησης με σαρωτές ραδιοφωνικών δικτύων. Οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση εργαλείου διάδοσης μικροκυμάτων προκειμένου να μελετηθεί η ραδιοφωνική κάλυψη δεδομένου ότι επρόκειτο για προϋπόθεση όσον αφορά την απόδοση και ως προς την αδράνεια και ως προς τη μετάδοση. Ο χρόνος αδράνειας και παράδοσης LTE έχει μελετηθεί σε προηγούμενες έρευνες, όπως για παράδειγμα, σε αυτές των [20], [21], [22], και [23]. Ωστόσο, το εύρος της καμπάνιας μέτρησης των συγγραφέων [19] όσον αφορά τον αριθμό των μελετημένων χειριστών, τις διαμορφώσεις και τις τοπολογίες δικτύου, τις ταχύτητες συσκευών και τις περιοχές σεναρίων, είναι για αυτούς πρωτόγνωρο. Συγκεκριμένα, μελετούν τέσσερις εμπορικούς φορείς που καλύπτουν αγροτικές, αστικές και προαστιακές περιοχές, συνολικής δοκιμαστικής οδήγησης 19.000 χιλιομέτρων με ταχύτητες από 30 έως 130 χλμ./ώρα χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα smartphones μέτρησης, τα οποία παρέχουν πληροφορίες όχι μόνο για την απόδοση του επιπέδου εφαρμογής αλλά και για τα μηνύματα ελέγχου των πόρων ραδιοφώνου (radio resource control - RRC). Πρόκειται για σημαντική στατιστική βελτίωση σε σύγκριση με την έρευνα [20], η οποία βασίζεται σε μετρήσεις τριών ημερών σε ένα ενιαίο, ελαφρώς φορτωμένο, αστικό δίκτυο με σύνδεση οπτικής επαφής, με την έρευνα [21], η οποία βασίζεται σε 35 χλμ αστικής δοκιμαστικής οδήγησης και με την έρευνα [22] η οποία βασίζεται σε δοκιμές πεδίου, όπου το κεντρικό δίκτυο (core network - CN) εντοπίζεται πλησίον της περιοχής δοκιμής με σκοπό τη μείωση της αδράνειας. Η έρευνα [23] αφορά δεδομένα η συλλογή των οποίων έγινε από 22.000 χρήστες μέσω smartphone σε χώρες της Σκανδιναβίας στο χρονικό διάστημα από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο του 2016, ωστόσο οι παρεχόμενες πληροφορίες αφορούσαν μόνο για τα ποσοστά δεδομένων και την αδράνεια των αεροπλάνων των χρηστών. Συνεπώς, τόσο η στατιστική αναπαράσταση των δεδομένων μέτρησης όσο και η διαθεσιμότητα που αφορά τις παραμέτρους του δικτύου οδηγούν στη διασφάλιση μιας σταθερής σύγκρισης με τις διάφορες σχεδιαστικές απαιτήσεις και επιτρέπουν στους [19] να καταφέρουν να εντοπίσουν αποκλίσεις.

Οι συνδεδεμένες περιπτώσεις χρήσης κινητικότητας, οι οποίες είναι εστιασμένες στην ασφάλεια και την απόδοση των οδικών οχημάτων, απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση,

υψηλή αξιοπιστία και μηδενικό χρόνο εκτέλεσης. Αυτές οι παράμετροι ορίστηκαν επίσης για την LTE, αλλά χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές, καθώς ο κύριος στόχος ήταν οι ευρυζωνικές και φωνητικές εφαρμογές για κινητά.

1.7. Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα

Είναι επομένως προφανές ότι το LTE αντιμετωπίζει δυσκολίες στην εκπλήρωση αυστηρών απαιτήσεων καθυστέρησης και αξιοπιστίας του URLLC. Ο στόχος της συγκεκριμένης διατριβής, επομένως, είναι να θέσει τη βάση για την υποστήριξη εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών χαμηλού λανθάνοντος χρόνου για το επερχόμενο νέο σήμα 5G, που εστιάζει κυρίως στην κατεύθυνση της κατερχόμενης ζεύξης. Για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη διεργασία, διευρύνονται τα οφέλη των τρεχουσών προηγμένων τεχνικών και προτείνονται νέοι μηχανισμοί που επιτρέπουν την ικανοποίηση των αυστηρών απαιτήσεων URLLC. Οι προτεινόμενες λύσεις αξιολογούνται σε μια δυναμική ρύθμιση σε επίπεδο συστήματος πολλαπλών χρηστών και πολλαπλών κελιών, προκειμένου να διασφαλιστεί υψηλός βαθμός ρεαλισμού και πρακτική συνάφεια των αποτελεσμάτων.

Η αξιοπιστία μπορεί να βελτιωθεί με πολλούς τρόπους. Φυσικά, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί προσαρμογή συνδέσμου για την επίτευξη σχετικά χαμηλού στόχου BLER πρώτης μετάδοσης, π.χ. 1%. Από αυτήν την οπτική, είναι σημαντικό ο δέκτης να εκτιμήσει με ακρίβεια την ποιότητα του έμπειρου καναλιού και να μεταδώσει αξιόπιστα τις αναφορές CSI (μεταξύ άλλων πληροφοριών ελέγχου) στον πομπό. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίζονται οι ακόλουθες προκλήσεις: ο τρόπος εκτέλεσης της αποτελεσματικής προσαρμογής συνδέσμου για μεταδόσεις URLLC, ο τρόπος εκτίμησης με ακρίβεια της ποιότητας του καναλιού που πραγματοποιείται στο δέκτη και ο αντίκτυπος των σφαλμάτων ανάδρασης CSI στην αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Οι τεχνικές διαχείρισης της διαφορετικότητας και των παρεμβολών είναι επίσης απαραίτητες. Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η διακοπή της ποιότητας του σήματος στο δέκτη, καθώς και να αυξηθεί η ανθεκτικότητα έναντι αστοχιών της υποδομής δικτύου. Η μακροσκοπική ποικιλομορφία θα βοηθήσει επίσης τη μετάβαση σε παραδόσεις με σχεδόν μηδενικό χρόνο διακοπής. Ωστόσο, δεδομένου του χρονικού περιορισμού της μελέτης, οι πτυχές που αφορούν την κινητικότητα έχουν μείνει εκτός πεδίου εφαρμογής. Επίσης, δεν λαμβάνονται υπόψη προγράμματα χωρίς

επιχορηγήσεις, όπως ημι-επίμονος προγραμματισμός (SPS – Semi-Persistent Scheduling). Ο λόγος πίσω από αυτό είναι ότι αυτές οι τεχνικές σχετίζονται κυρίως με την κατεύθυνση ανερχόμενης ζεύξης, καθώς αυτές αποφεύγουν την ανάγκη για αίτηση χρονοβόρου προγραμματισμού.

Το αποτελεσματικό πολλαπλό URLLC μαζί με άλλες υπηρεσίες (π.χ. eMBB – enhanced Mobile Broadband και mMTC – Massive Machine-Type Communications) στην ίδια διεπαφή είναι ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται από δύο οπτικές γωνίες στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Από τη μία πλευρά, διερευνώνται οι λειτουργίες που πρέπει να περιλαμβάνει ο προγραμματιστής πακέτων 5G προκειμένου να εξυπηρετούν τους διαφορετικούς χρήστες σύμφωνα με τις μεμονωμένες απαιτήσεις QoS. Από την άλλη πλευρά, αξιολογείται ο τρόπος με τον οποίο οι προτεινόμενες βελτιώσεις URLLC συνυπάρχουν με πτυχές συστήματος σχετικές με άλλες υπηρεσίες, με κύρια εστίαση στην ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου του μέγιστου ρυθμού δεδομένων, δηλαδή την ικανότητα του συστήματος, μεταξύ άλλων συμβατικών μετρήσεων απόδοσης.

Συνοψίζοντας, η συγκεκριμένη διατριβή αντιμετωπίζει το πρόβλημα της επίτευξης αξιόπιστων επικοινωνιών που εστιάζουν σε ένα μεγάλο σύνολο διαδικασιών και λειτουργιών στρώματος φυσικής (PHY) και μεσαίου ελέγχου πρόσβασης (MAC), που καλύπτονται συνήθως με τον όρο «Διαχείριση πόρων ραδιοσυχνοτήτων» (RRM). Τα κύρια ερευνητικά ερωτήματα (Q) που αναφέρονται στη μελέτη παρατίθενται παρακάτω:

1. Πώς αντιμετωπίζεται η στοχαστική φύση του ασύρματου καναλιού και οι συνέπειες των παρεμβολών;
2. Ποια είναι η καλύτερη στρατηγική μετάδοσης για εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες;
3. Πώς μπορεί να πολλαπλασιαστεί αποτελεσματικά το URLLC με την κυκλοφορία eMBB σε ένα κοινό κανάλι;

2. URLLC

Όπως γενικά περιγράφει η συγκεκριμένη εργασία, το 5G οραματίζεται ένα πλήθος νέων σεναρίων που απαιτούν μεγάλες αλλαγές στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας από προηγούμενες γενιές. Ακόμα και στο URLLC, υπάρχουν πολλά διαφορετικά σενάρια και απαιτήσεις. Μερικά απαιτούν αξιοπιστία $1 \cdot 10^{-9}$ και λανθάνοντα χρόνο 1 έως 10 ms, ενώ άλλα απαιτούν χαμηλότερη αξιοπιστία $1 \cdot 10^{-5}$ αλλά με εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο 1 ms.

Αυτός ο συνδυασμός χαμηλής καθυστέρησης (1 ms) και υψηλής αξιοπιστίας ($1 \cdot 10^{-5}$) είναι η πιο απαιτητική περίπτωση. Στις εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο μετράται συνήθως μεταξύ ενός αισθητήρα μέτρησης δεδομένων και ενός ελεγκτή λογικής διεργασίας που επεξεργάζεται τα συλλεγόμενα δεδομένα και καθοδηγεί τους ενεργοποιητές, είτε ο αισθητήρας και ο ελεγκτής λογικής διαδικασίας επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας (επικοινωνία συσκευής σε συσκευή) ή ένας σταθμός βάσης χειρίζεται την επικοινωνία, μεταδίδοντας τις πληροφορίες στις συσκευές. Συνδέοντας τον ελεγκτή λογικής διαδικασίας μέσω καλωδίου στο σταθμό βάσης, η επικοινωνία από άκρο σε άκρο ουσιαστικά λειτουργεί ως μία μετάδοση μεταξύ του σταθμού βάσης και του αισθητήρα.

Οι ασύρματες τεχνολογίες για εργοστασιακές εφαρμογές έχουν λάβει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Οι ασύρματες τεχνολογίες είναι ενδιαφέρουσες, τόσο λόγω του προβλεπόμενου χαμηλότερου κόστους όσο και της αυξημένης ευελιξίας. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση και συντήρηση καλωδίων είναι δαπανηρές διαδικασίες και απαιτούν εκπαιδευμένο προσωπικό. Επιπλέον, ενδέχεται να χρειαστούν αντικαταστάσεις που σταματούν την παραγωγή.

Η ευελιξία της ασύρματης επικοινωνίας καθιστά επίσης δυνατή την ταχεία πραγματοποίηση διαφορετικών εγκαταστάσεων παραγωγής. Ωστόσο, οι ασύρματες τεχνολογίες μέχρι στιγμής δεν είναι σε θέση να πληρούν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις.

2.1. Απαιτήσεις και ορισμός

Η γενική απαίτηση URLLC είναι ότι η αξιοπιστία μιας αποστολής ενός πακέτου 32 bytes θα πρέπει να είναι $1 - 10^{-5}$, με λανθάνουσα κατάσταση επιπέδου χρήστη 1 ms. Η καθυστέρηση και η αξιοπιστία του επιπέδου χρήστη λειτουργούν σύμφωνα με τις τρέχουσες συμφωνίες 3gpp. Άλλες απαιτήσεις για το URLLC ενδέχεται να προστεθούν σε μεταγενέστερα στάδια.

Ο λανθάνων χρόνος χρήστη (L) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την επιτυχή παράδοση ενός πακέτου / μηνύματος επιπέδου εφαρμογής από το σημείο εισόδου στρώματος πρωτόκολλου στο σημείο εξόδου μέσω της διεπαφής και στις δύο κατευθύνσεις UL και DL, όπου καμία λήψη συσκευής ή σταθμού βάσης δεν περιορίζεται από την ασυνεχή λήψη.

Η αξιοπιστία (R) ορίζεται ως η πιθανότητα επιτυχίας μετάδοσης X bit εντός του λανθάνοντος επιπέδου χρήστη (L) με συγκεκριμένη ποιότητα καναλιού. Ο χρόνος των δευτερολέπτων L αντιστοιχεί στον λανθάνοντα χρόνο του επιπέδου χρήστη και περιλαμβάνει τον λανθάνοντα χρόνο μετάδοσης, τον λανθάνοντα χρόνο επεξεργασίας, τον λανθάνοντα χρόνο αναμετάδοσης και τον λανθάνοντα χρόνο αναμονής/προγραμματισμού (συμπεριλαμβανομένου του αιτήματος προγραμματισμού και της λήψης παραχώρησης - εάν υπάρχει).

Το CDF δείχνει την πιθανότητα ότι ο λανθάνων χρόνος θα είναι μικρότερος ή ίσος με μια συγκεκριμένη τιμή. Λόγω σφαλμάτων μετάδοσης, ενδέχεται να μην ληφθούν όλα τα πακέτα. Δεδομένου ότι το CDF (Charging Data Function) δείχνει την πιθανότητα ότι ένα πακέτο θα ληφθεί εντός ορισμένου λανθάνοντος χρόνου ή λιγότερο, αυτή η πιθανότητα πρόκειται για την αξιοπιστία για τη λήψη ενός πακέτου εντός αυτού του λανθάνοντος χρόνου.

2.2. Σενάρια

Για τις προσομοιώσεις URLLC σε επίπεδο συστήματος, έχουν εντοπιστεί δύο βασικά σενάρια από το 3GPP. Τα σενάρια είναι τα Indots Hotspot και Urban Macro. Το

σενάριο Indoor Hotspot θεωρεί έναν ενιαίο όροφο μέσα σε ένα κτίριο που περιέχει πολλά δωμάτια και σταθμούς βάσης. Αυτό το σενάριο είναι επομένως χρήσιμο για την προσομοίωση, για παράδειγμα, ενός δαπέδου σε ένα εργοστάσιο. Στο σενάριο Urban Macro, οι χρήστες θεωρείται ότι βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους σε επίπεδο δρόμου ή σε εσωτερικούς χώρους σε κτίρια, ενώ οι σταθεροί σταθμοί βάσης τοποθετούνται σαφώς πάνω από τα ύψη των γύρω κτιρίων. Οι χρήστες του Urban Macro μπορούν να κινηθούν με ταχύτητα πεζών (3 km / h) ή την αργή κινούμενη ταχύτητα (30 km / h).

Σύμφωνα με τους [24], ο βιομηχανικός έλεγχος τοποθετείται συνήθως σε μια γεωγραφικά περιορισμένη περιοχή αλλά μπορεί επίσης να αναπτυχθεί σε ευρύτερες περιοχές (π.χ. δίκτυα σε ολόκληρη την πόλη) όπου η πρόσβαση σε αυτά ενδέχεται να περιορίζεται σε εξουσιοδοτημένους χρήστες.

Το συγκεκριμένο δίκτυο αντιστοιχεί σε ένα σενάριο Urban Macro. Τόσο το σενάριο Indoor Hotspot όσο και το σενάριο Urban Macro περιλαμβάνουν συγκεκριμένες παρεμβολές.

2.3. Εκτίμηση

Η 3gpp αποφάσισε ότι η χωρητικότητα URLLC θα χρησιμοποιηθεί ως μέτρηση απόδοσης για αξιολόγηση και επιλογή χαρακτηριστικών. Η χωρητικότητα URLLC περιγράφει πόσα UE ή πόση φόρτωση μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο. Για το URLLC, ο αριθμός των UE που μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης φόρτωσης είναι αυτός που προκαλεί γενικό ενδιαφέρον. Στην παρούσα φάση, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χωρητικότητα URLLC διαφέρει από την χωρητικότητα του καναλιού, το μέγιστο ποσοστό με τον οποίο οι πληροφορίες μπορούν να μεταφερθούν μέσω ενός δεδομένου καναλιού επικοινωνίας, το οποίο συνήθως αναφέρεται ως χωρητικότητα στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία.

Η χωρητικότητα συστήματος URLLC, $C(L, R, Y)$ ορίζεται ως το μέγιστο προσφερόμενο φορτίο κάτω από το οποίο το $Y\%$ των χρηστών σε ένα κελί λειτουργούν με αξιοπιστία ζεύξης στόχου R υπό περιορισμό καθυστέρησης L . $X = (100 - Y)\%$, το οποίο είναι το κλάσμα των χρηστών σε διακοπή λειτουργίας.

Ένα UE είναι σε διακοπή εάν το UE δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις προϋποθέσεις αξιοπιστίας L και του συνδέσμου R . Η χωρητικότητα URLLC μετράται σε bits ανά

δευτερόλεπτο [bits/s].

Αυτό σημαίνει ότι για μια δεδομένη τιμή του Y , η χωρητικότητα URLLC είναι το μέγιστο προσφερόμενο φορτίο κυψέλης που το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει ενώ πληροί τις απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας του $Y\%$ αυτών των UE.

2.4. Αριθμολογία για URLLC

Η αριθμολογία στη συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται στην αριθμολογία OFDM, στη διαμόρφωση του διαστήματος υπο-φορέα και στη διάρκεια του συμβόλου για το OFDM. Πριν συζητηθούν οι πραγματικές αριθμολογίες, πρέπει να καθοριστεί η έννοια του υποπλαισίου ως προς αυτή την έννοια. Η 3gpp έχει καθορίσει ότι η διάρκεια του υποπλαισίου είναι επίσης 1 ms σε NR. Ωστόσο, ένα υποπλαίσιο δεν θα είναι πλέον το ίδιο με το LTE-A. Στο LTE-A, ένα υποπλαίσιο αντιστοιχεί στο TTI και είναι η μικρότερη προγραμματιζόμενη μονάδα χρόνου. Σε κάθε TTI αποστέλλεται μία μετάδοση μέσω του συνδέσμου. Για το NR, υποστηρίζονται πολλαπλές αριθμολογίες, όπου κάθε αριθμολογία έχει διαφορετικό TTI. Η ακριβής ονοματολογία για το NR (New Radio) δεν έχει αποφασιστεί και έτσι τόσο το υποπλαίσιο όσο και η υποδοχή μπορούν να βρεθούν σε πλαίσια 3gpp για να καθορίσουν ένα TTI, το οποίο συνήθως δίνει τη θέση του στην ακριβή έννοια.

Η υποδοχή περιλαμβάνει την υποδοχή στο lte-A, 7 σύμβολα OFDM, ενώ η διάρκεια της υποδοχής θα εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη αριθμολογία. Η 3gpp αποφάσισε ότι το NR θα υποστηρίζει πολλαπλές αριθμολογίες για να χειριστεί ένα ευρύ φάσμα επιλογών συχνότητας και ανάπτυξης. Για το κανονικό κυκλικό πρόθεμα, οι αριθμολογίες προέρχονται με κλιμάκωση ενός βασικού διαστήματος υπο-φορέα.

$$f_m = 2m \cdot 15 \text{ kHz},$$

όπου $m = 0$ και αντιστοιχεί στον διάκενο υπο-φορέα που χρησιμοποιείται στο lte-A.

Η διάρκεια ενός OFDM είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση του υπο-φορέα. Επομένως, η αλλαγή του διαστήματος αλλάζει επίσης τη διάρκεια του OFDM. Στο NR, ο αριθμός των OFDM ανά υποδοχή διατηρείται ίσος μεταξύ όλων των αριθμολογιών. Η διάρκεια υποδοχής για το κανονικό κυκλικό πρόθεμα για την αριθμολογία m υπολογίζεται σε,

$$T = 0.5 \text{ ms} ,$$

Έχει επίσης καθοριστεί ότι οι επεκτάσιμες αριθμολογίες θα πρέπει να επιτρέπουν

αποστάσεις υπο-φέροντος από 15 kHz έως 480 kHz. Σε σύγκριση με τη διάρκεια του υποπλασίου 1 ms στο LTE-A, αυτές οι αριθμολογίες μπορούν να υποστηρίξουν πολύ χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο. Για το URLLC, το διάκενο του υπο-φορέα δεν έχει αποφασιστεί ή δεν συνιστάται ακόμη.

2.5. Οφέλη Μαζικών Συστημάτων Πολλαπλών Κεραιών για την URLLC

Οι πολλαπλές κεραιές στο σταθμό βάσης ή στα τερματικά ασύρματου δικτύου παρέχουν αποτελεσματικούς μηχανισμούς στο φυσικό επίπεδο για να εξασφαλίζουν αξιόπιστες και χαμηλού λανθάνοντα χρόνου επικοινωνίες. Δίνεται μεγάλη βαρύτητα σε μαζικά συστήματα κεραιών, που χαρακτηρίζονται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης (base station – BS) και, ενδεχομένως στα τερματικά, σε ζώνες υψηλής συχνότητας, τα οποία έχουν αναδειχθεί ως ένας σημαντικός παράγοντας για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων πέμπτης γενιάς (5th generation - 5G), [25]. Τα μαζικά συστήματα κεραιών θεωρούνται απαραίτητα σε αρκετά μεγάλο βαθμό προκειμένου τόσο για τη μεγέθυνση των ρυθμών δεδομένων όσο και/ή την αύξηση του αριθμού των χρηστών του ευρυζωνικού δικτύου οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να πολλαπλασιάζονται ταυτόχρονα μέσα στο ίδιο εύρος ζώνης. Ταυτόχρονα καθίστανται βασικά εργαλεία για άλλες υπηρεσίες που παρέχονται από το 5G όπως είναι οι μαζικές υπηρεσίες τύπου μηχανής (Machine Type Communication - MTC), [26] και την URLLC. Τα μαζικά συστήματα κεραιάς παρουσιάζουν σημαντικά οφέλη χάρη στη δυνατότητα που έχουν να δημιουργούν μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας (Degrees of Freedom - DoF) επί των οποίων καθορίζονται σημαντικές ιδιότητες της URLLC.

Οι ιδιότητες αυτές είναι:

- 1) Οι υψηλοί σύνδεσμοι του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR), ιδιότητα η οποία προκύπτει από το κέρδος της συστοιχίας.
- 2) Οι σχεδόν ακριβείς σύνδεσμοι αντιστοίχισης πληροφοριών, οι οποίοι είναι πρακτικά άτρωτοι στη γρήγορη εξασθένηση των σημάτων, ιδιότητα που αφορά συστήματα που λειτουργούν σε τιμές συχνότητας μικρότερες από 6 GHz σε πλούσιο περιβάλλον σκέδασης. Πρόκειται για αποτέλεσμα του φαινομένου channel hardening κατά το οποίο ένα κανάλι με εξασθενημένο σήμα συμπεριφέρεται σαν ένα με μη εξασθενημένο σήμα. Σε συνδυασμό με τους υψηλούς συνδέσμους του λόγου σήματος

προς θόρυβο περιορίζεται η ανάγκη ισχυρών προγραμμάτων κωδικοποίησης. Το αποτέλεσμα είναι να διατηρείται η υψηλή αξιοπιστία για τα μικρά πακέτα, γεγονός που έχει σαν αντίκτυπο τη δραματική μείωση για ανάγκη αναμετάδοσης.

3) Η υψηλή δυνατότητα πολυπλεξίας χωρικής διαίρεσης. Εάν πρόκειται για σύστημα πολλών χρηστών, η αξιοποίηση της παραπάνω ιδιότητας μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση του λανθάνοντα χρόνου που είναι το αποτέλεσμα της πολλαπλής πρόσβασης αφού οι χρήστες είναι σε θέση να ανταλλάσσουν ταυτόχρονα δεδομένα. Στο σημείο αυτό όμως πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση επεξεργασίας πολλαπλών κεραιών με σκοπό τον διαχωρισμό των χρηστών μπορεί να επιφέρει περαιτέρω υπολογιστική καθυστέρηση.

Αρχικά, πρέπει να διαπιστωθεί το γεγονός ότι η απόκτηση των πληροφοριών κατάστασης καναλιού (channel state information – CSI) είναι ένας από τους σοβαρότερους περιορισμούς σε σχέση με την URLLC κατά την εκμετάλλευση πολλαπλών κεραιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόκτηση CSI είναι ένα σημαντικό βήμα πρωτοκόλλου στην μέθοδο πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου (multiple input and multiple output – MIMO), επηρεάζοντας τόσο την αξιοπιστία όσο και τον λανθάνοντα χρόνο. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, σχεδιάζονται μέθοδοι διαμόρφωσης δέσμης που βασίζονται κυρίως στη δομή του καναλιού, δηλαδή στην κατεύθυνση της διαδρομής διάδοσης. Λιγότερο φαίνεται να αξιοποιούνται οι πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με εξασθένηση σήματος μικρής κλίμακας. Η δομή του καναλιού ποικίλλει σε κλίμακα, με συνέπεια η απόκτηση του να είναι πιο ισχυρή όσον αφορά την κινητικότητα της συσκευής. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει κατανοητό ότι δεν αποτελεί καινοτομία η χρήση των ενιαίων διανυσμάτων του καναλιού ή της δομής του προκειμένου να κατασκευασθούν πομποδέκτες πολλαπλών χρηστών.

2.6. Δομή Καναλιού

Για να απεικονιστούν οι κύριες έννοιες που έχουν αναφερθεί ως τώρα, χρησιμοποιείται ένα περιβάλλον εργοστασιακού τύπου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Έστω σημείο πρόσβασης εξοπλισμένο με συστοιχία πολύ μεγάλου πλήθους κεραιών και έστω ακόμη τερματικοί σταθμοί (σταθμοί εργασίας) που διαθέτουν πολύ μικρό αριθμό κεραιών (ακόμη και μία). Αναλύεται η περίπτωση δύο μόνο τερματικών

το κάθε ένα εκ των οποίων λαμβάνει μία και μόνο ροή δεδομένων από το προαναφερθέν σημείο πρόσβασης. Τα όποια αποτελέσματα μπορούν να αναχθούν εν συνεχεία στη γενική ιδέα. Το μοντέλο καναλιού που υιοθετείται διαθέτει συμπλέγματα, το κάθε ένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο εντοπισμένων διαδρομών διάδοσης οι οποίες καθορίζονται από δύο κατευθύνσεις, αναχώρησης και άφιξης. Η κάθε διαδρομή διάδοσης ξεχωριστά μπορεί να επηρεαστεί από τον συντελεστή εξασθένησης ο οποίος ακολουθεί συγκεκριμένη κατανομή. Το κανάλι που συνδέει το κ-τερματικό με το σημείο πρόσβασης ορίζεται ως το άθροισμα των διαδρομών διάδοσης που αφορούν όλα τα συμπλέγματα

$$\mathbf{H}^{(k)} = \sum_{i=1}^{N_p^{(k)}} \alpha_i^{(k)} \mathbf{s}_{i,rx}^{(k)} \mathbf{s}_{i,Lx}^{(k)H} \quad (1)$$

(Στην παραπάνω σχέση δεν υπάρχει διάκριση ανάμεσα στα συμπλέγματα)

Όπου $N_p^{(k)}$: ο συνολικός αριθμός διαδρομών,

$\mathbf{s}_{i,rx}^{(k)}$ και $\mathbf{s}_{i,Lx}^{(k)}$: τα ομαλοποιημένα διανύσματα διεύθυνσης που χαρακτηρίζουν την κατεύθυνση άφιξης στο τερματικό και την κατεύθυνση αναχώρησης από το σταθμό βάσης.

Στην οριακή περίπτωση που υπάρχει μόνο μία κεραία ισχύει: $\mathbf{s}_{i,Lx}^{(k)}=1$

Η κατεύθυνση των διαδρομών διάδοσης αντιστοιχεί σε μακροπρόθεσμα στατιστικά, πράγμα που σημαίνει ότι για μια τοπική κίνηση του τερματικού οι κατευθύνσεις παραμένουν αμετάβλητες, ενώ οι συντελεστές $\alpha_i^{(k)}$ αντιστοιχούν σε εξασθένηση σήματος σε μικρή κλίμακα και ποικίλουν για μικρές μετακινήσεις.

2.7. Σχεδιασμός Βάσει της Συνδιακύμανσης

Προκειμένου να προωθηθεί η αξιοπιστία και ο χαμηλός λανθάνων χρόνος, ο γενικός σκοπός του σχεδιασμού διαμόρφωσης δέσμης είναι να βασιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο στη δομή του καναλιού (δηλαδή τη διαδρομή διάδοσης) και όσο το δυνατόν λιγότερο στις περιπτώσεις που έχουμε μικρή εξασθένηση του σήματος, ωστόσο συνεχίζει να επωφελείται από τις ιδιότητες που παρουσιάζει το μεγάλο πλήθος κεραιών. Αυτό, σε γενικές γραμμές, είναι ένα μη τετριμμένο έργο, καθώς αυτές οι ιδιότητες επιτυγχάνονται με συνεκτικό συνδυασμό των σημάτων από κάθε κεραία, ενώ αυτός ο συνδυασμός εξαρτάται από την εξασθένηση σήματος σε μικρή

κλίμακα. Υιοθετείται ένα σχέδιο βασισμένο στον πίνακα συνδιακύμανσης του σήματος κάθε τερματικού στον πομπό και τον δέκτη (οι πίνακες αυτοί παρουσιάζουν τις δομικές ιδιότητες του κάθε καναλιού).

Η αποσύνθεση της μοναδικής αξίας του πίνακα συνδιακύμανσης στον πομπό για το τερματικό k είναι:

$$\mathbf{R}_{\text{tx}}^{(k)} = \mathbf{V}^{(k)} \mathbf{\Lambda}^{(k)} \mathbf{V}^{(k)H} \quad (2)$$

Οι στήλες του $\mathbf{V}^{(k)}$ οι οποίες περιλαμβάνουν τα ενιαία διανύσματα που συμβολίζονται ως $\mathbf{V} \mathbf{i}^{(k)}$ και $\mathbf{\Lambda}^{(k)}$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας που ομαδοποιεί τις μη μηδενικές μοναδικές τιμές. Ομοίως, γράφουμε τον πίνακα συνδιακύμανσης στο τερματικό k ως:

$$\mathbf{R}_{\text{rx}}^{(k)} = \mathbf{U}^{(k)} \mathbf{\Lambda}^{(k)} \mathbf{U}^{(k)H} \quad (3)$$

Τα ενιαία διανύσματα του $\mathbf{R}_{\text{rx}}^{(k)}$ συμβολίζονται ως $\mathbf{u}_i^{(k)}$. Τα ενιαία διανύσματα που σχετίζονται με τη μέγιστη μοναδική τιμή $\mathbf{R}_{\text{tx}}^{(k)}$ και $\mathbf{R}_{\text{rx}}^{(k)}$ ισούνται με $V_{\text{max}}^{(k)}$ και $U_{\text{max}}^{(k)}$.

2.8. Δομή του πομποδέκτη

Οι αρχές που διέπουν τα σχέδια διαμόρφωσης δέσμης είναι οι εξής:

1. **Οι Ιδιότητες των ενδιάμεσων τερματικών :** Η ενδιάμεση παρεμβολή ενδέχεται να αφαιρεθεί μόνο με βάση τα ενιαία διανύσματα του πίνακα συνδιακύμανσης των παρεμβαλλόμενων τερματικών τα οποία καθορίζουν το ποιος θα είναι ο υποχώρος του σήματός τους. Για να εξαιρεθούν οι παρεμβολές θα πρέπει το μεταδιδόμενο σήμα να προβληθεί από το space orthogonal προς τον υποχώρο σήματος των παρεμβολέων. Στην URLLC αυτό είναι πιο πλεονεκτικό αφού η λειτουργία αυτή δεν παρουσιάζει εξάρτηση από την στιγμιαία CSI.

2. **Οι ιδιότητες των ενδο-τερματικών:** Αρκεί η αφαίρεση της ενδιάμεσης παρεμβολής ώστε η μετάδοση σε ένα τερματικό να μπορεί να εκμεταλλεύεται τα επίπεδα γνώσης CSI του πομπού. Η γενική μορφή του μηδενικού προ-κωδικοποιητή για το τερματικό 1 είναι η ακόλουθη:

$$\mathbf{F}_{ZF}^{(1)} = \underbrace{P_{\mathcal{V}^{(2)}}^\perp}_{\text{Term 1}} \underbrace{\mathbf{V}^{(1)}}_{\text{Term 2}} \underbrace{\mathbf{w}}_{\text{Term 3}} \quad (4)$$

Τερματικό 1. Το τερματικό αυτό υποχρεώνει το προ κωδικοποιημένο σήμα να βρίσκεται στο signal subspace orthogonal του τερματικού 2. Το $\mathbf{V}^{(2)}$ περιέχει τα ενιαία διανύσματα του πίνακα συνδιακύμανσης στον πομπό για το τερματικό 2 που σχετίζεται με μη μηδενικές μοναδικές τιμές.

Τερματικό 2. Οι στήλες του πίνακα στο δεύτερο τερματικό καθορίζουν τον υπόχωρο του πίνακα συνδιακύμανσης μετάδοσης του τερματικού 1. Το $\mathbf{V}^{(1)}$ περιέχει τους ενικούς φορείς του πίνακα συνδιακύμανσης που σχετίζονται με μη μηδενικές μοναδικές τιμές.

Τερματικό 3. Το διάνυσμα \mathbf{w} αποτελεί έναν γραμμικό συνδυασμό των στηλών του $\mathbf{V}^{(1)}$. Στην ουσία πρόκειται για μία συνεκτική λειτουργία για την οποία απαιτείται η γνώση της προβολής καναλιού στις στήλες του $\mathbf{V}^{(1)}$. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα τερματικά 1 και 2 εξαρτώνται μόνο από τα μακροπρόθεσμα στατιστικά στοιχεία του καναλιού.

2.8.1 Μέθοδοι Διαμόρφωσης Ακτινών


Εξετάζονται οι ακόλουθες δομές πομποδέκτη οι οποίες ταξινομούνται μειώνοντας το επίπεδο στιγμιαίου CSI που εκμεταλλεύονται.

- **Χωρίς παρεμβολές:** σχεδιάζεται ως ανώτερο όριο απόδοσης, στην περίπτωση όπου αγνοείται η ενδιάμεση παρεμβολή.
- **All SV - Coh:** πομποδέκτης στον οποίο σύμφωνα με την εξίσωση (4) λαμβάνονται υπόψη όλα τα αποτελεσματικά SV και πραγματοποιείται συνεκτικός συνδυασμός. Φυσικά θα πρέπει να υπάρχουν πληροφορίες αναφορικά με το στιγμιαίο CSI.
- **Strongest SV – Inst:** πρόκειται για πομποδέκτη για τον οποίο σύμφωνα με την εξίσωση (4) ισχύει $\mathcal{V}^{(2)} = \mathbf{U}^{(2)}$ και $\bar{\mathbf{V}}^{(1)} = \mathbf{v}_{I,\max}^{(1)}$. Για τη στρατηγική αυτή απαιτείται στιγμιαία CSI στον πομπό. Υποθέτοντας ότι ο δέκτης εφαρμόζει $\mathbf{u}_{\max}^{(1)}$, ο πομπός εκτιμά την προβολή του $\mathbf{H}^{(1)}$ προς τα ενιαία διανύσματα και επιλέγει το ισχυρότερο, το οποίο συμβολίζεται ως $\mathbf{v}_{I,\max}^{(1)}$.

- **All SV – NCoh:** πομποδέκτης στον οποίο σύμφωνα με την εξίσωση (4) λαμβάνονται υπόψη όλα τα SV. Η μετάδοση στα ενιαία διανύσματα πραγματοποιείται μη συνεκτικά, ενώ η ισχύς μετάδοσης κατά μήκος του ενικού διανύσματος $\mathbf{v}_i^{(1)}$ ορίζεται ως $\lambda_i^{(1)}$.
- **Strongest SV - Av:** πρόκειται για τον πομποδέκτη για τον οποίο η εξίσωση (4) γίνεται $\mathcal{V}^{(2)} = \mathbf{U}^{(2)}$ και $\bar{\mathbf{V}}^{(1)} = \mathbf{v}_{\max}^{(1)}$.

Στην περίπτωση των μεθόδων εκείνων που απαιτούν ολόκληρο σύνολο ενιαίων διανυσμάτων (All single vectors - "All SV"), ο συνολικός πίνακας καναλιών $\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{F}_{ZF}^{(1)}$ υπολογίζεται από τον δέκτη το οποίο συνεπάγεται την εφαρμογή του αντίστοιχου φιλτραρίσματος. Για τις άλλες μεθόδους, ο δέκτης εφαρμόζει το φίλτρο που ταιριάζει σύμφωνα με $\mathbf{v}_{\max}^{(1)}$ και απαιτεί μόνο την εκτίμηση της προβολής του συνολικού καναλιού σε $\mathbf{v}_{\max}^{(1)}$.

2.9. Αριθμητικές Αξιολογήσεις

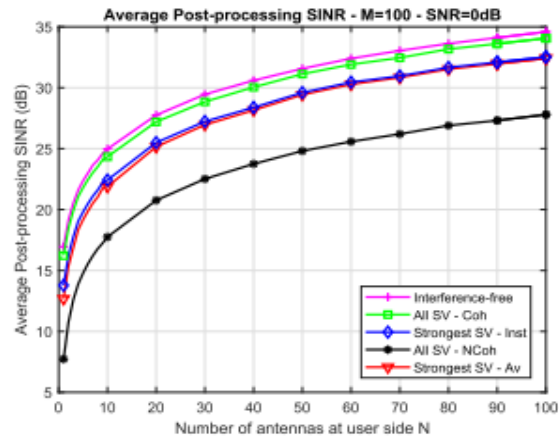
Τα παραπάνω σχήματα (σχήμα 2 και σχήμα 3) παρουσιάζουν την αναλογία σήματος σε σχέση με τις παρεμβολές συν τον θόρυβο (signal-to-interference-plus-noise ratio - SINR) καθώς και το ποσοστό σφάλματος του πακέτου (Packet Error Rate - PER) το οποίο σχετίζεται με τις διαφορετικές δομές πομποδεκτών. Έστω $M=100$ ο συνολικός αριθμός κεραιών στο σημείο πρόσβασης ενώ το SNR ορίζεται ως $\rho = P/\sigma_n^2$ όπου P η συνολική ισχύς μετάδοσης και σ_n^2 η διακύμανση του θορύβου για κάθε κεραία λήψης. Προκειμένου η ισχύς μετάδοσης να κατανέμεται ισάξια ανάμεσα στους χρήστες, πρέπει να πραγματοποιηθεί ομαλοποίηση του \mathbf{F}_{ZF} στην εξίσωση 4. Οι πολλαπλές διαδρομές ενός και μόνο συμπλέγματος παρουσιάζουν διαφορετικές καθυστερήσεις  εκθετικής αποσύνθεσης που αγγίζει μέχρι και τα 20 ντεσιμπέλ (decibel - dB). Στο σχήμα 2 το SINR παρουσιάζεται ως συνάρτηση του πλήθους των κεραιών στην πλευρά του τερματικού. Διαπιστώνεται ένα κενό, όπως αναμενόταν, ανάμεσα στις μεθόδους εκμετάλλευσης του πλήρους CSI και στις μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε μερικό CSI ή σε στατιστικά δεύτερης τάξης. Για τις τελευταίες μεθόδους υπάρχει μικρή διαφοροποίηση. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται το ποσοστό σφάλματος πακέτου (PER) ως μία συνάρτηση της υποδοχής μετάδοσης για την περίπτωση που αντιστοιχεί μία κεραία ανά χρήστη. Η ομαλοποίηση του εύρους

ζώνης γίνεται κατά τέτοιον τρόπο ώστε ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων καναλιών να αντικατοπτρίζει την καθυστέρηση άμεσα. Το ωφέλιμο φορτίο αποτελείται από 100 bits που προέρχονται από μια δυαδική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Binary Phase Shift Keying – BPSK), επομένως μεταδίδεται 1 bit ανά χρήση καναλιού. Θεωρείται ότι η διάρκεια της εκπαίδευσης στην περίπτωση των συνεκτικών τεχνικών μετάδοσης είναι διπλάσια συγκριτικά με τις μεθόδους εκείνες οι οποίες βασίζονται σε μερική και χωρίς στιγμιαία CSI. Με τον όρο υποδοχή μετάδοσης εννοείται η διάρκεια της αποστολής πακέτου (ωφέλιμο και γενικό φορτίο) με τη χρήση συνεκτικής μετάδοσης. Με τη χρήση μη συνεκτικής μετάδοσης είναι δυνατή η αποστολή δύο πακέτων μέσα σε μια υποδοχή μετάδοσης. Επίσης δεν μπορεί να μην αναφερθεί και η περίπτωση πολυπλεγμένων χρηστών τόσο στο χώρο (συμπαγείς γραμμές) όσο και στο χρόνο (διακεκομμένες γραμμές). Για τις επιλεγμένες παραμέτρους προσομοίωσης, μπορούν να επισημανθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

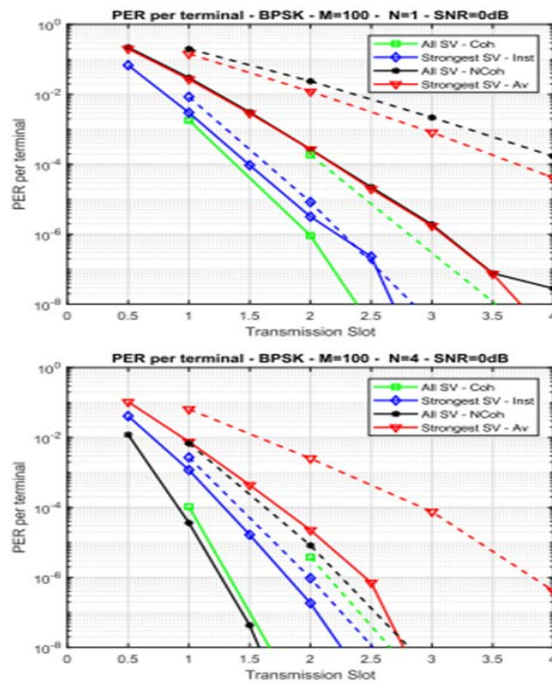
- Η γενική τάση είναι ότι η απόδοση βελτιώνεται όταν υπάρχει αυξημένο επίπεδο εκμετάλλευσης του καναλιού στον πομπό.

- Υπάρχει μια αξιοσημείωτη εξαίρεση όπου όταν τα τερματικά είναι εξοπλισμένα με πολλαπλές κεραιές έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν την αξιοπιστία του σήματος, εξάγοντας πληροφορίες από τα λαμβανόμενα στοιχεία σήματος που μεταδίδονται μέσω πολλαπλών καναλιών με εξασθενημένο σήμα. Στο Σχ. 3, για το $N=4$, αποδίδει καλύτερα η μη συνεκτική στρατηγική ("All SV - NCoh"). Ως εκ τούτου, με βάση το ποσοστό σφάλματος bit (bit error rate – BER), είναι προτιμότερο να μεταδίδεται το σήμα με μη συνεκτικό τρόπο και κατά μήκος κάθε μοναδικού φορέα. Η μη συνεκτική μετάδοση αντισταθμίζεται με συνεκτική επεξεργασία λήψης από πολλαπλές κεραιές που επιτρέπουν την βελτίωση της αξιοπιστίας του σήματος.

- Ανάλογα με το επίπεδο CSI που αξιοποιείται στον πομπό, η πολυπλεξία χώρου δεν είναι πάντα ευνοϊκή.



Εικόνα 2. SINR σε σενάριο 2 χρηστών έναντι αριθμού κεραιών στα τερματικά, $\rho = 0\text{dB}$. (Πηγή: [27]).



Εικόνα 3. Ποσοστό σφάλματος πακέτου σε σενάριο 2 χρηστών έναντι υποδοχής μετάδοσης, $\rho = 0\text{dB}$. Οι συμπαγείς γραμμές αντιστοιχούν σε χρήστες πολυπλεγμένους ως προς το χώρο ενώ οι διακεκομμένες σε χρονικά πολυπλεγμένους χρήστες

(Πηγή: [27]).

3. Πολυσυνδεσιμότητα και Ποικιλομορφία Διεπαφών

Οι κινητές συσκευές σήμερα διαθέτουν πολλαπλές διεπαφές ραδιοφώνου και είναι πιθανό ότι θα υπάρχουν και σε πολλές από τις μελλοντικές συσκευές, το οποίο συνεπάγεται ότι οι ραδιοφωνικές διεπαφές 5G πρόκειται να αναπτυχθούν μαζί με άλλες ραδιοεπαφές. Η ύπαρξη πολλαπλών διεπαφών δε, σύμφωνα με τη URLLC, παρουσιάζει έναν επιπλέον βαθμό ποικιλομορφίας η χρήση του οποίου μπορεί να ικανοποιήσει την εκπλήρωση των αυστηρών απαιτήσεων σε λανθάνοντα χρόνο και φυσικά σε αξιοπιστία. Αυτό είναι κοινώς γνωστό ως πολυ-συνδεσιμότητα [28] ενώ χρησιμοποιούνται οι όροι ποικιλία συνδέσμων ή πολυμορφία διεπαφών, προκειμένου να τονιστεί ο ρόλος της ποικιλομορφίας που διαδραματίζει η διαθεσιμότητα πολλών διαφορετικών διεπαφών επικοινωνίας. Η ιδέα της ταυτόχρονης χρήσης πολλαπλών συνδέσμων ή διεπαφών είναι αρκετά φυσική και έχει ήδη εμφανιστεί σε ορισμένες ρυθμίσεις.

Στο πλαίσιο των συστημάτων του έργου εταιρικής σχέσης 3ης γενιάς (3rd Generation Partnership Project- 3GPP), η τεχνολογία μακροπρόθεσμης εξέλιξης (Long Term Evolution – LTE) έχει υποστηρίξει τη δυνατότητα της πολύ-συνδεσιμότητας μέσω της συγκέντρωσης φορέα (Carrier Aggregation -CA) και της διπλής συνδεσιμότητας (Dual Connectivity - DC).

Το 3GPP εισήγαγε το διπλασιασμό πακέτων με σκοπό την ενίσχυση της αξιοπιστίας. Σύμφωνα με το διπλασιασμό πακέτων, το πακέτο δεδομένων αρχικά αντιγράφεται στο πρωτόκολλο σύγκλισης δεδομένων πακέτων (Packet Data Convergence Protocol – PDCP) και εν συνεχεία μεταδίδεται σε ανεξάρτητα κανάλια. Η μετάδοση γίνεται από το ίδιο το eNB σε διαφορετικούς όμως φορείς μέσω CA, μπορεί όμως να γίνει και από διαφορετικά eNB (eNodeB), τα οποία χρησιμοποιούν DC. Η διαδικασία του διπλασιασμού πακέτων όταν πρόκειται για αρχιτεκτονικές πολλαπλής συνδεσιμότητας αποτελεί ιδανική επιλογή όταν απαιτείται μετριασμός των απωλειών εξαιτίας εξασθένησης και παρεμβολών σε μεμονωμένους συνδέσμους ή εξαιτίας έλλειψης πόρων διασύνδεσης αέρα. Ωστόσο η αξιοπιστία μιας από άκρο σε άκρο σύνδεσης απαιτεί τη σωστή λειτουργία της υποδομής και του βασικού δικτύου κάτι που αρκετά συχνά ανήκει μόνο σε έναν φορέα. Παρά το γεγονός ότι τόσο το βασικό δίκτυο όσο και η υποδομή παρουσιάζουν περιττές λύσεις, συνεχίζουν να υπόκεινται σε ένα ενιαίο σημείο αποτυχίας (Point of Failure -PoF). Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η λανθασμένη διαμόρφωση εξοπλισμού. Η ποικιλομορφία τόσο σε επίπεδο

σύνδεσης όσο και σε επίπεδο διεπαφής επικοινωνίας ή διαδρομής παρέχεται προκειμένου να μετριαστεί η εξάρτηση αυτή από μια ενιαία υποδομή του δικτύου. Το παραπάνω αναπαρίσταται στο σχήμα 4.

Ο όρος «ποικιλομορφίας διεπαφών» (Interface Diversity - IFD) μελετήθηκε από τους [29]. Παρέχει μια ανεξάρτητη διαδρομή από το UE στο διαδίκτυο, με τη χρήση διαφορετικής ασύρματης τεχνολογίας ή/και διαφορετικού φορέα εκμετάλλευσης δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Συνεπώς μπορεί να ληφθεί το IFD απλώς εξοπλίζοντας μια συσκευή με, διεπαφές LTE/5G και Wi-Fi ή με διεπαφές LTE/5G με SIM χρησιμοποιώντας δύο φυσικά ανεξάρτητους φορείς κινητής τηλεφωνίας. Στην περίπτωση του IFD καταργείται η εξάρτηση από ένα μόνο σημείο βλάβης στο τμήμα του δικτύου πρόσβασης και αυτό αποτελεί το σημαντικό πλεονέκτημα του IFD. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι απαιτείται οι συσκευές προέλευσης και προορισμού να έχουν ρυθμιστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι μεν πρώτες να μπορούν να αντιγράψουν πακέτα και οι δεύτερες να είναι σε θέση να χειρίζονται πολλαπλά ληφθέντα αντίγραφα.

Συγκριτικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι η διπλή συνδεσιμότητα είναι διαφανής τόσο σε συσκευές προορισμού όσο και προέλευσης ενώ βρίσκεται πάνω από το επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου (Medium access control - MAC). Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ο διπλασιασμός πακέτων είναι η απλούστερη δυνατότητα της IFD, κατά την οποία τα αντίγραφα πακέτων αποστέλλονται σε διαφορετικές διεπαφές. Τέλος υπάρχουν και πιο προηγμένες λύσεις IFD, στις οποίες περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι κωδικοποίησης σε επίπεδο πακέτων καθώς και τμηματοποίησης δεδομένων.

Υποθέτοντας την αξιοπιστία συνδέσμων/εξαρτημάτων όπως υποδεικνύεται στο σχήμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αναλογία συστημάτων σε σειρά/παράλληλα, για να εκφραστεί η αξιοπιστία από άκρο σε άκρο των αρχιτεκτονικών τους ως εξής:

$$R_{\text{single}} = r_1 r_e r_f \quad (5)$$

$$R_{\text{DC}} = \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - r_1^{(i)}) \right) r_e r_f \quad (6)$$

$$R_{\text{IFD}} = \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - r_1^{(i)} r_c^{(i)}) \right) r_c \quad (7)$$

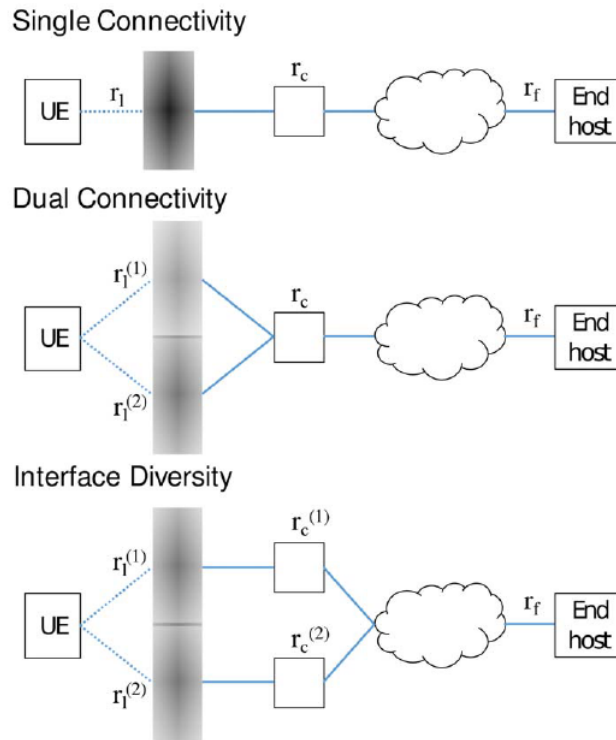
Όπου R_{single} , R_{DC} και R_{IFD} χρησιμοποιούνται για έναν μόνο σύνδεσμο,

N : ο αριθμός των συνδέσμων για τη διπλή συνδεσιμότητα καθώς και ο αριθμός των διεπαφών που αφορά την ποικιλομορφία των διεπαφών,

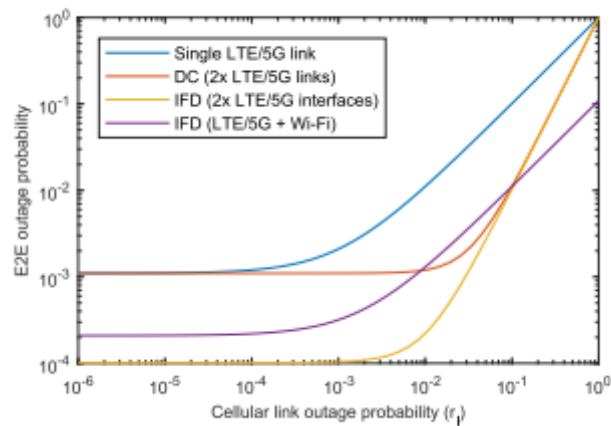
$r_1^{(i)}$: αναφέρεται στην αξιοπιστία της σύνδεσης/διεπαφής και

$r_c^{(i)}$: αναφέρεται στην αξιοπιστία του κεντρικού δικτύου,

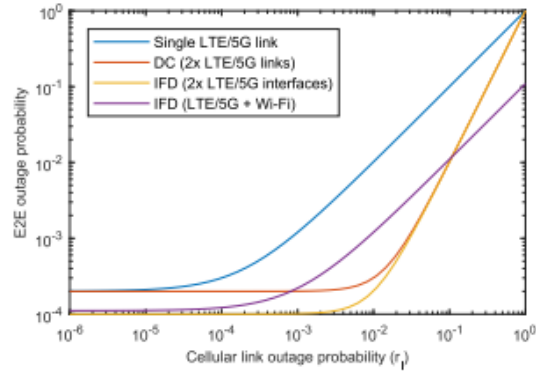
Με την παραδοχή ότι στην παραπάνω εξίσωση (7) οι υπό εξέταση διεπαφές δεν συσχετίζονται, ότι δηλαδή οι αποτυχίες που συμβαίνουν, συμβαίνουν ανεξάρτητα, το οποίο στην πράξη μπορεί να διασφαλιστεί με τη χρήση διαφορετικών δικτύων κινητής τηλεφωνία χωρίς κοινή φυσική υποδομή. Σε πρώτη φάση καλούνται να εξεταστούν δύο σύνδεσμοι/διεπαφές όπως σκιαγραφούνται στο σχήμα 4. Στον πίνακα 1 αναγράφονται οι υποτιθέμενες παράμετροι που έχουν ήδη επιλεγεί. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας από άκρο σε άκρο που προκύπτει υπό διαφορετικές διακοπές στη σύνδεση του κυψελοειδούς δικτύου. Από τα παραπάνω προέκυψε ότι η IFD η οποία χρησιμοποιεί δύο ανεξάρτητα δίκτυα, είναι διαρκώς ανώτερη ή ίση όσον αφορά σε διακοπές λειτουργίας συγκριτικά με το DC. Συγκεκριμένα, όταν οι κυψελοειδείς σύνδεσμοι είναι καλοί, η διακοπή λειτουργίας της IFD είναι καλύτερη σε σύγκριση με το DC. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η εναλλακτική διαμόρφωση κατά την οποία ένα LTE/5G συμπληρώνεται από μία ανεξάρτητη σύνδεση Wi-Fi, η οποία όμως είναι κατώτερη, θα συνεχίζει να είναι προτιμότερη σε σχέση με μία DC για διακοπές συνδέσμων $<10^{-2}$. Επιπλέον, εικάζεται ότι το DC αποτελεί καλύτερη επιλογή σε σχέση με τη χρήση ενός μόνο συνδέσμου, εκτός εάν η διακοπή του συνδέσμου είναι πολύ χαμηλή και αντ' αυτού η διακοπή λειτουργίας από άκρο σε άκρο κυριαρχείται από την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του πυρήνα. Συγκρίνοντας τις καμπύλες στο διάγραμμα του σχήματος 6 φαίνεται καθαρά ότι ο πυρήνας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας θεωρείται πιο αξιόπιστος, ενώ η διαφορά ανάμεσα σε DC και IFD είναι αμελητέα. Η σύγκριση για τη χρήση ενός μόνο συνδέσμου για διακοπή σύνδεσης ανάμεσα στο 10^{-3} και 10^{-2} καταδεικνύει τη σημασία του πλεονεκτήματος.



Εικόνα 4. Αρχιτεκτονικές διπλής συνδεσιμότητας και διασύνδεσης. (Πηγή: [27]).



Εικόνα 5. Πιθανότητα διακοπής σύνδεσης από άκρο σε άκρο για διάφορες περιπτώσεις διακοπών της κυψελοειδούς σύνδεσης. Η υποτιθέμενη αξιοπιστία σύνδεσης Wi-Fi θεωρείται ότι είναι $r_{l_2} = 0.9$ (Πηγή: [27]).



Εικόνα 6. Πιθανότητα διακοπής σύνδεσης από άκρο σε άκρο για διάφορες περιπτώσεις διακοπών της κυβελοειδούς σύνδεσης με $r_c = 0.9999$. Για υποτιθέμενη αξιοπιστία σύνδεσης Wi-Fi : $r_{l_2} = 0.9$ (Πηγή: [27]).

	LTE/5G	Wi-Fi
r_l	0.99	0.9
r_c	0.999	0.99
r_f	0.9999	0.9999

Πίνακας 1. Υποτιθέμενοι προεπιλεγμένοι παράμετροι αξιοπιστίας. (Πηγή: [27]).

4. URLLC ΣΕ MASSIVE MIMO

Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών εμφανίζονται ως ένας φυσικός ενεργοποιητής για την URLLC, καθώς οι επικοινωνίες πολλαπλών κεραιών παρέχουν υψηλούς συνδέσμους SNR (Signal-to-noise ratio) και ποικιλομορφίας, καθώς και ικανότητα χωρικής πολυπλεξίας. Οι παραπάνω ιδιότητες χαρακτηρίζονται από σημαντική συμβολή είτε όσον αφορά την αύξηση της αξιοπιστίας, είτε του λανθάνοντα χρόνου, είτε και των δύο. Εν τούτοις οι μηχανισμοί αυτοί δεν θεωρείται ότι μέχρι τώρα έχουν εξερευνηθεί πλήρως. Στην εργασία [30] οι συγγραφείς διερεύνησαν έναν στατιστικό χαρακτηρισμό για τα συστήματα πολλαπλής εισόδου ή για τα συστήματα ενιαίας εξόδου που υπόκεινται σε στατιστικούς περιορισμούς καθυστέρησης, με τη χρήση εργαλείων υπολογισμού στοχαστικού δικτύου. Στην [31], θεωρήθηκε ότι για την ανύψωση ενός ενιαίου και τεράστιου συστήματος MIMO (Massive MIMO) με 64 κεραιές στο σταθμό βάσης, δοκιμάζονται διάφορα σχήματα πολλαπλών κεραιών: συνεκτικοί και μη συνεκτικοί πομποδέκτες, πομποδέκτες υποθέτοντας ότι το κανάλι είναι άγνωστο στον πομπό και χρησιμοποιώντας χωροχρονικούς κωδικούς, όπου η προτίμηση δίνεται σε μη συνεκτικούς πομποδέκτες. Στην εργασία τους οι [32] διαπίστωσαν ότι δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην καθυστέρηση της επεξεργασίας εξαιτίας της επεξεργασίας πολλαπλών κεραιών σε σταθμό βάσης, στην περίπτωση ενός τεράστιου συστήματος MIMO μεγάλου αριθμού χρηστών. Επιπλέον και σύμφωνα με την [33], ένα τεράστιο δίκτυο συστήματος MIMO πολλαπλών χρηστών, βελτιστοποιείται υπό έναν πιθανολογικό περιορισμό στο μέγεθος της ουράς για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της URLLC. Στο σύστημα πολλαπλών κεραιών το καίριο ερώτημα είναι προφανώς η απόκτηση στιγμιαίου CSI και περιλαμβάνεται στους πολύ αυστηρούς περιορισμούς προκειμένου να επιτευχθεί η URLLC όσον αφορά την εκμετάλλευση πολλαπλών κεραιών σε περιβάλλον κινητής συσκευής, η οποία υπόκειται στους περιορισμούς που σχετίζονται με το χρόνο συνοχής του καναλιού και τις ακραίες απαιτήσεις καθυστέρησης. Η πιο κρίσιμη απόκτηση προκύπτει σε σύστημα συστοιχίας κεραίας που για λειτουργία μετάδοσης χρησιμοποιείται η CSI. Στην περίπτωση συστήματος διπλής διαίρεσης συχνοτήτων (frequency division duplex - FDD), η απόκτηση CSIT (Centre for Secure Information Technologies) απαιτεί έναν βρόχο ανατροφοδότησης από τους τερματικούς σταθμούς προκαλώντας σημαντική χρονική καθυστέρηση καθώς ο αριθμός των συνδέσμων προς αναφορά είναι μεγάλος.

Έστω η περίπτωση ενός massive MIMO συστήματος κάτω των 6 GHz το οποίο αποτελείται από τερατικά με μικρό αριθμό κεραιών. Στη περίπτωση αυτή προκαλείται μεγάλος προβληματισμός στον σταθμό βάσης (BS) κατά τη μετάδοση κατερχόμενη ζεύξης. Εφόσον πρόκειται για συστήματα διμερούς διαίρεσης χρόνου (time division duplex – TDD) μπορεί μεν η καθυστέρηση να μειώνεται χάρη στην αμοιβαιότητα του καναλιού, ωστόσο παραμένει σε κρίσιμη κατάσταση. Στην περίπτωση συστήματος χιλιοστομετρικών κυμάτων με πλήθος κεραιών στο τερατικό του συστήματος, το παραπάνω πρόβλημα επηρεάζει και τις δύο κατευθύνσεις των συνδέσεων επικοινωνίας. Η απόκτηση CSI στον δέκτη, δεδομένου ότι η καθυστέρηση ανάμεσα στην ανίχνευση δεδομένων και την εκτίμηση του καναλιού είναι μικρή, είναι λιγότερο κρίσιμη σε σχέση με τον πομπό. Εντούτοις εφόσον υπάρχουν ακραίες περιπτώσεις κινητικότητας (τέτοια περίπτωση είναι η URLLC) από την πλευρά του δέκτη, είναι πολύ πιθανόν να απαιτηθεί μία εναλλακτική λύση για τη συνεκτική ανίχνευση. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, οι μη συνεκτικές μέθοδοι ανίχνευσης μπορούν να αποτελέσουν πλεονέκτημα.

Μία μέθοδος η οποία εκμεταλλεύεται την παρουσία του μεγάλου πλήθους των κεραιών και που ταυτόχρονα είναι ιδιαίτερα απλή, επωφελείται από την ανίχνευση της ενέργειας της ανερχόμενης ζεύξης σε ένα σύστημα massive MIMO. Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή ενός ενιαίου ρεύματος δεδομένων και εν συνεχεία να ακολουθήσει συλλογή και συγκέντρωση της ενέργειας από όλες τις κεραιές. Τελικώς για την ανίχνευση απαιτείται η μέση ενέργεια του καναλιού της συστοιχίας των κεραιών η οποία φαίνεται να τείνει σε μία ντετερμινιστική ποσότητα για εντοπισμένες κινήσεις που αφορούν το χρήστη και για το λόγο αυτό καθίσταται πιο ισχυρή από την συνεκτική ανίχνευση όσον αφορά την κινητικότητα του χρήστη. Τέλος τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις συνεκτικές επικοινωνίες σε χαμηλή κινητικότητα μπορούν να βοηθήσουν έναν σχεδιασμό αστερισμού να μεταβαίνει στην ανίχνευση ενέργειας προκειμένου να εξασφαλίσει όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες επικοινωνίες σε υψηλή κινητικότητα.

4.1 Ανατομία ενός συστήματος επικοινωνίας

Το σύστημα επικοινωνίας, το οποίο επιβλέπει την παράδοση των δεδομένων, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην εκπλήρωση των απαιτήσεων καθυστέρησης και

αξιοπιστίας. Το σύστημα χρησιμοποιεί buffer μετάδοσης ειδικά για το χρήστη, όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από υψηλότερου επιπέδου εφαρμογές. Σε κάθε μετάδοση Latency and Reliability in LTE Networks time interval (TTI), η οντότητα προγραμματισμού στον πομπό εκχωρεί ραδιοηλεκτρικές πηγές στους χρήστες, με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και την ποιότητα του καναλιού, όπως αναφέρεται στις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI). Η δυναμική προσαρμογή συνδέσμου εφαρμόζεται συνήθως στη μετάδοση δεδομένων κάθε χρήστη, προσπαθώντας να προσαρμόσει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) για να ικανοποιήσει έναν περιορισμό συγκεκριμένου ποσοστού σφάλματος (BLER). Οι αβεβαιότητες στο ασύρματο κανάλι, λόγω θορύβου και παραλλαγής χρόνου και επιλεκτικής συχνότητας εξασθένισης και παρεμβολών, μπορούν να μειωθούν εκμεταλλευόμενες τον χρόνο, τη συχνότητα και τη χωρική ποικιλομορφία. Το τελευταίο επιτυγχάνεται συνήθως χρησιμοποιώντας τεχνικές κεραίας πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO). Στον δέκτη, εφαρμόζεται μετά την επεξεργασία του σήματος για να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα επιτυχούς αποκωδικοποίησης των δεδομένων. Σε περίπτωση αποτυχημένης αποκωδικοποίησης, αποστέλλεται στον πομπό μια αρνητική επιβεβαίωση (NACK), η οποία συνήθως ενεργοποιεί μηχανισμούς ελέγχου σφαλμάτων όπως το υβριδικό αυτόματο αίτημα επανάληψης (HARQ). Εκτός αυτού, η κινητικότητα του πομπού και / ή του δέκτη θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεταβιβάσεις με δυνητικά λίγο χρόνο διακοπής δεδομένων κατά τη μεταφορά της επικοινωνίας από τον ένα κόμβο στον άλλο.

4.2 Καθυστέρηση και αξιοπιστία στα δίκτυα LTE

Το πρότυπο LTE σχεδιάστηκε κυρίως για τη μεταφορά δεδομένων που επικεντρώνονται στον άνθρωπο. Επομένως, οι περισσότερες από τις λειτουργίες στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, ο σταθμός βάσης LTE εκχωρεί πόρους στους χρήστες με ανάλυση 1 ms TTI, η οποία αντιπροσωπεύει το κατώτερο όριο του λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίας. Η προσαρμογή συνδέσμου πραγματοποιείται για να επιτευχθεί ένας σχετικά υψηλός στόχος BLER πρώτης μετάδοσης 10% -20%. Τα πακέτα που έχουν αποκωδικοποιηθεί λανθασμένα μεταδίδονται ξανά.

Το HARQ προσθέτει τουλάχιστον 8 ms στην καθυστέρηση κάθε εκπεμπόμενου πακέτου. Οι περισσότερες από τις εμπορικές εφαρμογές LTE χρησιμοποιούν διαμορφώσεις κεραίας 2x2 MIMO. Ενώ τα σχήματα MIMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή υψηλής τάσης χωρικής ποικιλομορφίας, η χωρική πολυπλεξία παράλληλων ροών δεδομένων προτιμάται συνήθως για χρήστες που έχουν καλή ποιότητα καναλιού. Σε περίπτωση κινητικότητας σε όλα τα κελιά, το LTE χρησιμοποιεί μεταβιβάσεις break-before-make, το καθένα με αποτέλεσμα τυπική διακοπή σύνδεσης δεδομένων 40-60 ms [34].

Στην συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιείται αναφορά στα αποτελέσματα επιδόσεων πεδίου για να δοθεί μια ένδειξη της απόδοσης καθυστέρησης και αξιοπιστίας που παρέχουν τα συστήματα LTE στην πράξη. Για παράδειγμα, το έργο των [17] μετρά την καθυστέρηση end-to-end (E2E) και την παράδοση τριών εμπορικών δικτύων LTE με βάση δοκιμές οδήγησης 19.000 km στη Βόρεια Δανία. Ένα βασικό εύρημα είναι ότι η βασική ρύθμιση δικτύου για συγκεκριμένο χειριστή θέτει σε κίνδυνο τη συνολική απόδοση καθυστέρησης RTT. Παρόμοια απόδοση καθυστέρησης παρατηρείται από τις καμπάνιες μέτρησης που αναφέρονται στο έργο των [18]. Αυτά τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν επίσης το πώς ο λανθάνων χρόνος ποικίλλει δραστικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με το φορτίο εμπειρίας στο σύστημα. Όπως συζητήθηκε στο έργο των [17], η καθυστέρηση RTT επιπέδου χρήστη του LTE, εξαιρουμένου του κεντρικού δικτύου, είναι περίπου 19 ms. Ο μονόδρομος λανθάνων χρόνος ραδιοσυχνοτήτων, εκτιμώμενος ως $19/2 \text{ ms} = 9,5 \text{ ms}$, επομένως δεν επαρκεί για την κάλυψη των απαιτήσεων καθυστέρησης URLLC. Όσον αφορά την απόδοση της κινητικότητας, τα αποτελέσματα από το έργο των [17] δείχνουν παρόμοιους χρόνους διακοπής των δεδομένων παράδοσης για τους τρεις χειριστές: περίπου 40 ms στη διάμεση και έως 200 ms στο 99%. Η παρατηρούμενη απόδοση ευθυγραμμίζεται επίσης με τις αναφερόμενες σε άλλες δοκιμαστικές εκστρατείες πεδίου.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις URLLC, φαίνεται ότι τα παραδοσιακά σχήματα MIMO με διαμορφώσεις κεραίας 2x2 ή 4x4 δεν επαρκούν για την επίτευξη του στόχου SINR 0 dB στο 10 the5 εκατοστημόριο. Αυτά πρέπει να συμπληρωθούν με μακροσκοπική ποικιλία και / ή τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών για να διασφαλιστεί η απόδοση διακοπής του SINR στόχου. Για παράδειγμα, στο κανονικό δίκτυο μακροεντολών που

ορίζεται από το 3GPP, ένα σχήμα κεραίας 4x4 με 2 μακροσκοπικούς συνδέσμους παρουσιάζεται ως η πιο εφικτή διαμόρφωση για την επίτευξη των απαιτήσεων αξιοπιστίας. Αντίστοιχη απόδοση μπορεί να προκύψει με ακύρωση της λαμβανομένης ισχύος εκ των τριών πιο ισχυρών παρεμβαινόντων. Ωστόσο, η ιδανική ακύρωση τριών παρεμβολών είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη [35].

Τα αποτελέσματα απόδοσης στο συγκεκριμένο μοντέλο δικτύου δείχνουν γενικά χαμηλότερο κέρδος από τις τεχνικές που έχουν μελετηθεί για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας. Αυτό είναι συνέπεια των πιο ρεαλιστικών χαρακτηριστικών διάδοσης και της ακανόνιστης ανάπτυξης του σταθμού βάσης. Για παράδειγμα, απαιτείται ένα μικροσκοπικό σχήμα 4x4 με 3 μακροσκοπικούς συνδέσμους προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις αξιοπιστίας, δηλαδή μία επιπλέον σειρά μακροσκοπικής ποικιλομορφίας σε σύγκριση με τη διάταξη δικτύου 3GPP [36]. Αποδεικνύεται τελικώς ότι με την μακροσκοπική ποικιλομορφία μειώνεται η χωρητικότητα του συστήματος ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι παρεμβολές μεταξύ των κελιών εξαιτίας του γεγονότος ότι αυτό το είδος της ποικιλομορφίας καταναλώνει πόρους για έναν χρήστη σε πολλαπλά κελιά.

Αποδεικνύεται ότι τα παράθυρα μακροσκοπικής ποικιλομορφίας μεταξύ 6 dB και 10 dB (δηλαδή, η μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά ισχύος που λαμβάνονται μεταξύ του ισχυρότερου κελιού και των πρόσθετων κυψελών που εξυπηρετούν τον χρήστη) παρέχουν έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ κέρδους ποικιλίας και κατανάλωσης πόρων. Η ποικιλομορφία αποτελεί μια συνήθη τεχνική προκειμένου να αντιμετωπιστεί το κανάλι εξασθένισης και τυπικά μπορεί να επιτευχθεί σε οιονδήποτε τομέα από τον χώρο το χρόνο και τη συχνότητα. Στην μελέτη [37] παρουσιάστηκε διεξοδικά η σημασία της χωρικής ποικιλομορφίας σε συστήματα επικοινωνιών.

Ο κατάλληλος συνδυασμός των πολλαπλών λαμβανόμενων σημάτων έχει ουσιαστική σημασία για την απόδοση SINR. Τεχνικές συνεργασίας πολλαπλών κυττάρων, όπως κοινή μετάδοση και συντονισμένος προγραμματισμός, για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και των ποσοστών δεδομένων. Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας SINR ενός κοινού συστήματος μετάδοσης αναλύεται στην εργασία των [38]. Ωστόσο, η αξιολόγηση στο έργο αυτό περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο κινητό τερματικό σε μια προκαθορισμένη θέση στο δίκτυο. Στην πρόσφατη βιβλιογραφία,

πρέπει να σημειωθεί ότι η ποικιλομορφία αξιολογείται ως ένας εκ των κυρίων παραγόντων που συντελούν στην εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία. Για παράδειγμα, οι [39] διερευνά τη χρήση πολλαπλών αδύναμων συνδέσμων αντί για έναν ισχυρό σύνδεσμο για να εξασφαλίσει υψηλή διαθεσιμότητα σε ασύρματο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη ότι οι [40] αξιολογούν διαφορετικές διαμορφώσεις κεραιάς πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων (MIMO) προκειμένου να επιτευχθεί εξαιρετικής αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία. Εξαιτίας του ότι οι μελέτες που διεξάγονται αφορούν σενάρια για έναν χρήστη, η ανάλυση δεν μπορεί να περιλάβει αποτελέσματα παρεμβολών από πολλαπλούς χρήστες και πολλαπλές κυψέλες. Η διαχείριση των παρεμβολών γενικά αποτελεί μια προσέγγιση που δρα συμπληρωματικά και έχει σαν σκοπό της τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος. Έχει υπάρξει και ακόμα υπάρχει τεράστια δουλειά για τεχνικές μετριασμού και καταστολής παρεμβολών, που κυμαίνονται από μοτίβα επαναχρησιμοποίησης στατικών συχνοτήτων έως προχωρημένους δέκτες με δυνατότητες καταστολής παρεμβολών. Αυτό που τελικά αποδεικνύεται από τα προαναφερθέντα είναι ότι η απαίτηση εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών προϋποθέτει τη διενέργεια πλήθους μελετών

Οι εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες μέσω ασύρματης σύνδεσης είναι ένα ενεργό ερευνητικό θέμα που θα επεκτείνει τη δυνατότητα νέων εφαρμογών. Υπάρχουν περιπτώσεις οι οποίες απαιτούν διασφαλίσεις επιπέδων αξιοπιστίας έως και 99,999% όσον αφορά τις καθυστερήσεις μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η μέτρηση εκείνη η οποία συνδέεται άρρηκτα με την επιτεύξιμη αξιοπιστία σε κυψελωτά συστήματα είναι η αναλογία του σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR) είναι μια μέτρηση στενά συνδεδεμένη με την επιτεύξιμη αξιοπιστία στα κυψελοειδή συστήματα και μάλιστα όσο πιο υψηλό είναι το SINR, τόσο πιο εφικτή φαίνεται η επίτευξη χαμηλής πιθανότητας σφάλματος πακέτων καθώς και η επίτευξη χαμηλού λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίας.

Στόχο της εν λόγω εργασίας αποτελεί η μελέτη των διαφορετικών τεχνικών και η δυνατότητά τους προκειμένου να επιτευχθεί η πιθανότητα διακοπής στο SINR που απαιτείται στις εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες. Διαπιστώθηκε ότι οι μικροσκοπικές και μακροσκοπικές τεχνικές χωρικής ποικιλομορφίας δείχνουν να είναι πολλά υποσχόμενες. Για παράδειγμα, η εργασία των [41] αξιολογεί τις διαφορετικές διαμορφώσεις κεραιών πολλαπλών εισροών (MIMO) για να επιτύχει

την υψηλή αξιοπιστία σε ένα περιβάλλον εργοστασίων, ενώ ο [42] αναλύει την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της μικροσκοπικής ποικιλομορφίας και των υβριδικών μηχανισμών αυτόματης επαναλαμβανόμενης αίτησης (HARQ). Η εργασία των [43] μελετά το όφελος των συνδυασμένων μικροσκοπικών και μακροσκοπικών συστημάτων ποικιλομορφίας σε διαφορετικές θέσεις ενός κανονικού εξαγωνικού δικτύου, χωρίς να συνυπολογίζονται οι πολυκυτταρικές παρεμβολές πολλαπλών χρηστών, οι οποίες συνήθως λειτουργούν ως ένας παράγοντας υποβάθμισης της απόδοσης.

Προς το παρόν οι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στον περιορισμό της αξιοπιστίας και της απόδοσης στον τελικό χρήστη είναι οι παρεμβολές και η εξασθένηση. Εξαιτίας όμως των αυστηρών απαιτήσεων που υπάρχουν για την αξιοπιστία θα πρέπει στις αναλύσεις να συμπεριλαμβάνονται επιπλέον και άλλοι παράγοντες που προκαλούν αστάθεια και σφάλματα. Ένα δίκτυο επί παραδείγματι, θα μπορούσε να μην πετύχει τις αναμενόμενες επιδόσεις εξαιτίας της δυσλειτουργίας ή της αποτυχίας δικτυακών στοιχείων. Οι αποτυχίες μπορεί να οφείλονται σε αιτίες όπως η ισχύς, το λογισμικό ή το hardware είτε των σταθμών βάσης, των κόμβων συνάθροισης, ακόμη και των συνδέσεων backhaul, ωστόσο δεν έχει ακόμη ποσοτικοποιηθεί ο αντίκτυπος αυτών των γεγονότων σε εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι αφενός μεν ο προσδιορισμός του απαιτούμενου επιπέδου ποικιλομορφίας και αφετέρου η διαχείριση των παρεμβολών ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη δυνατότητα διακοπής SINR προκειμένου για εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες. Στηρίχθηκε σε μελέτες [42] με τις εξής συνεισφορές: i) Την ανάλυση της πραγματικής ανάπτυξης δικτύου η οποία βασίζεται σε δεδομένα ανά τόπο. Σε σύγκριση με τα κανονικά σενάρια 3GPP, η χρήση μοντέλων ειδικά για τον ιστότοπο παρέχει υψηλότερο βαθμό ρεαλισμού και πρακτικής συνάφειας των αποτελεσμάτων. ii) Αξιολόγηση σε επίπεδο συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων των παρεμβολών πολλαπλών χρηστών/πολυκυττάρων και της αυξημένης κατανάλωσης πόρων λόγω της μακροσκοπικής ποικιλομορφίας και (iii) επιπτώσεις της αστάθειας και των επιρρεπών σε αστοχίες χαρακτηριστικών των πραγματικών κυτταρικών αναπτύξεων με την χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου για γεωγραφικά συσχετιζόμενες και μη συσχετιζόμενες αποτυχίες εξοπλισμού. Η μεθοδολογία αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε είναι οι προσομοιώσεις Monte-Carlo σε επίπεδο

συστήματος έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι πολλαπλές πτυχές της πραγματικότητας.

4.3 Διάταξη του δικτύου

Η διάταξη του δικτύου αναπαριστά και αναπαράγει τη διάταξη δικτύου για μία συγκεκριμένη τοποθεσία μιας υπάρχουσας ανάπτυξης μακροεντολών LTE. Εν προκειμένω, χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατος τοπογραφικός χάρτης όσον αφορά την πυκνή αστική περιοχή. Στον χάρτη περιέχονται τρισδιάστατα δεδομένα δρόμων πλατειών, πάρκων, κτιρίων κλπ. Τα κελιά των μακροεντολών τοποθετούνται στην υπό εξέταση περιοχή μετά από ρεαλιστική ανάπτυξη. Οι κεραιές μακροσκοπικών αναπτύσσονται σε διαφορετικά ύψη, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά χαρακτηριστικά περιβάλλοντος για να υπάρξει καλή και ευρεία κάλυψη περιοχής. Το μέσο ύψος της συγκεκριμένης μακρο-κεραίας είναι τα 30 μέτρα, ενώ χρησιμοποιήθηκαν μερικοί βαθμοί κεραιάς κάτω από την προκαθορισμένη κλίση. Η περιοχή περιλαμβάνει μικρές εκατοντάδες μακρο-τοποθεσιών που διαθέτουν 2 και 3 τομείς ενώ η μέση διατομεακή απόσταση φθάνει τα 350 μέτρα. Με τον τρόπο αυτό καλύπτεται μια γεωγραφική περιοχή της τάξης των 30 km². Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση περιορίζεται στις υπαίθριες τοποθεσίες του τμήματος 1,2 km². Ο εξωτερικός χώρος περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο δρόμους, λεωφόρους και πλατείες.

Συνεπώς η εν λόγω μελέτη σχετίζεται με υπαίθριες περιπτώσεις χρήσης υψηλής αξιοπιστίας.



Εικόνα 7. Απεικόνιση της διάταξης δικτύου. Οι μακρο-κυψέλες επισημαίνονται με μπλε κύκλους και με γραμμή προς την κατεύθυνση του κύριου λοβού της κεραιάς (a.k.a. broadside). Το ανοιχτό γκρι χρώμα αντιστοιχεί σε εξωτερικούς χώρους ενώ το σκούρο γκρι εσωτερικούς.

Για τη λήψη των χαρακτηριστικών διάδοσης χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ανίχνευσης

ακτίνων τελευταίας τεχνολογίας βασισμένες στο κυρίαρχο μοντέλο διαδρομής (PDM), στο οποίο περιλαμβάνονται τα εμπόδια και η εξασθένιση (η οποία εξαρτάται από τα εμπόδια). Η περιοχή κάλυψης κάθε μακρο-κυψέλης ποικίλει σημαντικά, καθώς οι διάφορες περιοχές διαμορφώνονται από τους δρόμους τα κτίρια και όλων των άλλων στοιχείων που υπάρχουν στο μοντέλο.

4.4 Η μεθοδολογία της προσομοίωσης

Πραγματοποιείται αξιολόγηση η οποία στηρίζεται στην ανάλυση της κάθε κατανομής που χαρακτηρίζεται από διαφορετικούς βαθμούς μακροσκοπικής και μικροσκοπικής ποικιλομορφίας καθώς και από τεχνικές σχετικές με τη διαχείριση παρεμβολών. Η μετάδοση των κυψελών γίνεται σε συχνότητα φορέα 2.6 GHz και με πλήρη ισχύ (συνθήκη πλήρους φορτίου), ενώ τα MTS ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή στον αντίστοιχο φορέα ενδιαφέροντος. Η διαδικασία προσομοίωσης είναι η ακόλουθη:

Το κάθε MT πρέπει να επιλέξει το ενεργό σύνολο με μέγεθος M μέσα από το σύνολο των υποψηφίων κελιών σύμφωνα πάντα με τη μέση λαμβανομένη ισχύ (το M αντιστοιχεί σε μακροσκοπική σειρά ποικιλομορφίας). Το σύνολο των υποψηφίων κελιών περιλαμβάνει τα κελιά που βρίσκονται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας και υπολογίζεται σε κάθε στιγμιότυπο της προσομοίωσης (ακολουθώντας το μοντέλο στοχαστικής αστοχίας). Τα κελιά που βρίσκονται σε κατάσταση αποτυχίας θεωρούνται από το μοντέλο ότι έχουν μηδενική ισχύ μετάδοσης. Στην προσομοίωση δεν περιλαμβάνονται οι παραδόσεις και η κινητικότητα των χρηστών. Όσον αφορά ωστόσο το περιθώριο παράδοσης η επίδρασή του διαμορφώνεται σιωπηρά μέσα τον αλγόριθμο επιλογής του ενεργού συνόλου. Κάθε MT πρέπει να προσδιορίσει τα ισχυρότερα λαμβανόμενα κελιά εντός συγκεκριμένου παραθύρου παράδοσης συγκρινόμενα με το ισχυρότερο κελί. Εν συνεχεία επιλέγεται τυχαία ένα κελί από αυτά που βρίσκονται εντός του παραθύρου παράδοσης για το MT. Με τη μέθοδο αυτή διαμορφώνεται το αποτέλεσμα όταν δεν εξυπηρετούνται όλα τα MT από το πιο ισχυρό κελί εξαιτίας της χρήσης περιθωρίων παράδοσης. Μετά την επιλογή συνόλου υπολογίζεται το έμπειρο στιγμιαίο SINR για κάθε MT ανάλογα το μοντέλο.

Για κάθε φάση, η γρήγορη εξασθένιση είναι ανεξάρτητη και κατανέμεται πανομοιότυπα για κάθε ζεύγος κεραιών μετάδοσης-λήψης, μετά από πολύπλοκη κατανομή Gaussian. Θεωρείται ότι τα MTs κατανέμονται με εύρος ζώνης 10 MHz, με

αποτέλεσμα μια ισχύ θορύβου 96 dBm όταν ο Αριθμός θορύβου 8 dB στο MT μιμείται την περιορισμένη ικανότητα ανάδρασης των πραγματικών συστημάτων, προϋπολογίζοντας την ποσοτικοποίηση και τον περιορισμό του προκαθορισμένου συνόλου κωδικών λέξεων που χρησιμοποιούνται μακροπρόθεσμα.

Τα δείγματα SINR που παράγονται από τις προσομοιωμένες φάσεις χρησιμοποιούνται προκειμένου να δημιουργήσουν εμπειρικές λειτουργίες αθροιστικής κατανομής. (CDF)

Σύμφωνα με την εργασία του [44], ο βασικός δείκτης απόδοσης (KPI) είναι το SINR στο εκατοστημόριο 10–5, όπου το SINR των 0 db αξιολογείται ως ο κατάλληλος στόχος για λήψη χωρίς σφάλματα και συνεπώς για την εκπλήρωση χαμηλών απαιτήσεων σε λανθάνοντα χρόνο σε περιπτώσεις χρήσης εξαιρετικής αξιοπιστίας.

5. Προσομοίωση Διάδοσης Σήματος με Διαφορετικά Κεραιοστοιχεία

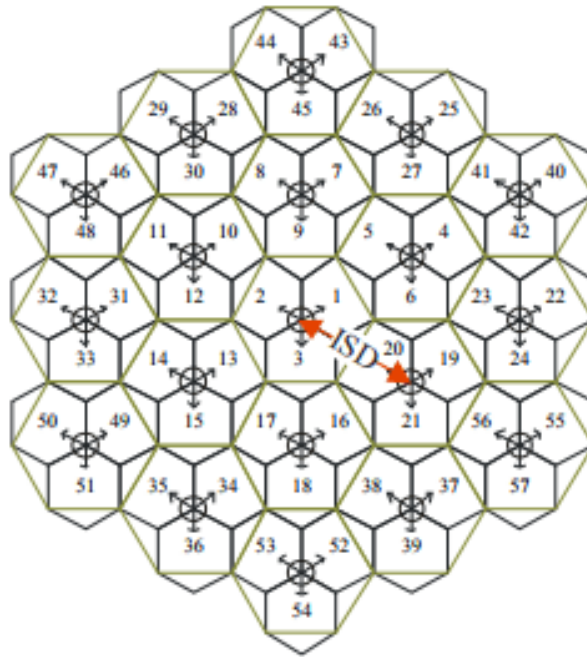
Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε μια προσομοίωση για να δείξουμε τη διαφορά κάλυψης με μια κεραία και με πολλαπλές κεραιές. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει τοποθέτηση των κεραιών σε ένα χάρτη σε αστικό περιβάλλον και χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα κεραιών θα συγκρίνουμε την κάλυψη. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήσαμε το MATLAB 2020b με τις βιβλιοθήκες Antenna Toolbox και Phased Array System Toolbox.

Σε αυτό το παράδειγμα θα κατασκευάσουμε ένα αστικό περιβάλλον δοκιμής με κυψέλες 5G και θα απεικονίσουμε τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Interference and noise ratio - SINR) σε έναν χάρτη. Το περιβάλλον δοκιμής βασίζεται στις οδηγίες που ορίζονται στην έκθεση ITU-R M.[IMT-2020.EVAL]¹ για την αξιολόγηση τεχνολογιών τηλεπικοινωνιών 5G. Αυτή η αναφορά ορίζει διάφορα περιβάλλοντα δοκιμής και σενάρια χρήσης. Το περιβάλλον δοκιμής σε αυτό το παράδειγμα βασίζεται στο αστικό περιβάλλον με υψηλή πυκνότητα χρήστη και φορτία κυκλοφορίας που επικεντρώνονται σε χρήστες πεζών και οχημάτων. Το περιβάλλον δοκιμής περιλαμβάνει ένα εξαγωνικό δίκτυο κυψελών καθώς και μια προσαρμοσμένη συστοιχία κεραιών που υλοποιείται χρησιμοποιώντας το Phased Array System Toolbox.

Οι οδηγίες περιβάλλοντος δοκιμής για τεχνολογίες 5G επαναχρησιμοποιούν τη διάταξη δικτύου δοκιμής για τεχνολογίες 4G που ορίζεται στην Έκθεση ITU-R M.2135-1², η οποία φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 1. Η διάταξη του δικτύου αποτελείται από 19 τοποθεσίες τοποθετημένες σε μια εξαγωνική διάταξη, η καθεμία με 3 κελιά. Η απόσταση μεταξύ γειτονικών τοποθεσιών είναι η απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών (inter-site distance - ISD) και εξαρτάται από το σενάριο χρήσης δοκιμής. Για αυτό το σενάριο σε αστικό περιβάλλον, το ISD είναι 200 m.

¹ Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL], "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020", 2017. <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>

² Report ITU-R M.2135-1, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced", 2009. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf



Εικόνα 8. Διάταξη δικτύου κυψελών.

Οπότε, με τον παρακάτω κώδικα Matlab, αρχικά ορίζουμε τις θέσεις που αντιστοιχούν σε τοποθεσίες κυψελών στη διάταξη δικτύου.

```
% Ορισμός κέντρου του χάρτη
centerSite = txsite('Name','MathWorks Glasgow', ...
    'Latitude',55.862787,...
    'Longitude',-4.258523);

% Αρχικοποίηση πινάκων αποστάσεων και γωνιών από το κέντρο για κάθε
% τοποθεσία όπου κάθε κεραία έχει 3 κελιά.
numCellSites = 19;
siteDistances = zeros(1,numCellSites);
siteAngles = zeros(1,numCellSites);

% Ορισμός αποστάσεων και γωνιών για τις εσωτερικές (inner ring)
% κυψέλες(κελιά) (4-21)
isd = 200; % ISD = Inter-site distance - Απόσταση μεταξύ κεραίων
siteDistances(2:7) = isd;
siteAngles(2:7) = 30:60:360; % δημιουργία εξάγωνου

% Ορισμός αποστάσεων και γωνιών για τις μεσαίες κυψέλες (middle)
% (22-39)
siteDistances(8:13) = 2*isd*cosd(30);
siteAngles(8:13) = 0:60:300;
```

```

% Ορισμός αποστάσεων και γωνιών για τις εξωτερικές κυψέλες (40-57)
siteDistances(14:19) = 2*isd;
siteAngles(14:19) = 30:60:360;

```

Όπως προαναφέραμε, κάθε θέση κυψέλης έχει τρεις πομπούς που αντιστοιχούν σε κάθε κύτταρο. Παρακάτω δημιουργούμε πίνακες με τα ονόματα, τα γεωγραφικά πλάτη, τα γεωγραφικά μήκη και τις γωνίες κεραίας κάθε πομπού κυψέλης.

```

% Αρχικοποίηση πινάκων για τις παραμέτρους διάδοσης των κυψελών
numCells = numCellSites*3; % κάθε κεραία έχει 3 πομπούς
cellLats = zeros(1,numCells);
cellLons = zeros(1,numCells);
cellNames = strings(1,numCells);
cellAngles = zeros(1,numCells);

% ορισμός γωνιών που αντικρίζει η κεραία
cellSectorAngles = [30 150 270];

% Για κάθε κυψέλη
cellInd = 1;
for siteInd = 1:numCellSites
    % Υπολογισμός συντεταγμένων από τις αποστάσεις και τις γωνίες
    [cellLat,cellLon] = location(centerSite, siteDistances(siteInd),
siteAngles(siteInd));

    % Αρχικοποίηση τιμών για την εύρεση τοποθεσίας της κάθε κυψέλης
    for cellSectorAngle = cellSectorAngles
        cellNames(cellInd) = "Cell " + cellInd;
        cellLats(cellInd) = cellLat;
        cellLons(cellInd) = cellLon;
        cellAngles(cellInd) = cellSectorAngle;
        cellInd = cellInd + 1;
    end
end
end

```

Στη συνέχεια δημιουργούμε τις τοποθεσίες των πομπών και ανοίγουμε ένα παράθυρο «Site Viewer», το οποίο δείχνει έναν χάρτη (Εικόνα 9).

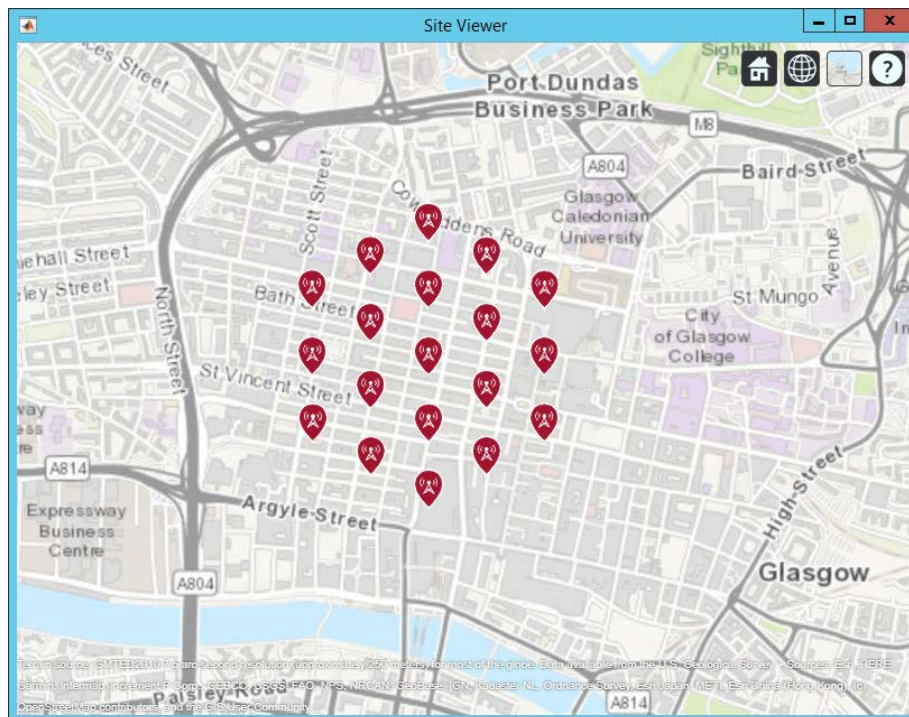
```

% Παράμετροι μετάδοσης με βάση το Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL]
fq = 4e9; % Carrier frequency (4 GHz) for Dense Urban-eMBB
antHeight = 25; % m
txPowerDBm = 44; % Total transmit power σε dBm
txPower = 10.^((txPowerDBm-30)/10); % Μετατροπή dBm σε W

% Δημιουργία τοποθεσιών με τις παραπάνω παραμέτρους
txs = txsite('Name',cellNames, ...
    'Latitude',cellLats, ...
    'Longitude',cellLons, ...
    'AntennaAngle',cellAngles, ...
    'AntennaHeight',antHeight, ...
    'TransmitterFrequency',fq, ...
    'TransmitterPower',txPower);

% Δημιουργία χάρτη (Site Viewer)
viewer = siteviewer;
% Απεικόνιση δεδομένων που έχουμε ορίσει προηγουμένως
show(txs);
viewer.Basemap = 'topographic';

```



Εικόνα 9. Οι τοποθεσίες των κεραιών σε χάρτη.

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε τις παραμέτρους κάθε κεραιοστοιχείου. Η κεραία έχει μοντελοποιηθεί ότι έχει ένα ή περισσότερα πάνελ κεραιάς, όπου κάθε πάνελ έχει ένα ή περισσότερα στοιχεία κεραιάς. Αρχικά θα ορίσουμε ότι υπάρχει μόνο ένα κεραιοστοιχείο. Το μοντέλο διάδοσης φαίνεται στην Εικόνα 10. Παρατηρούμε ότι το σήμα διαδίδεται σχεδόν σφαιρικά στο χώρο.

```

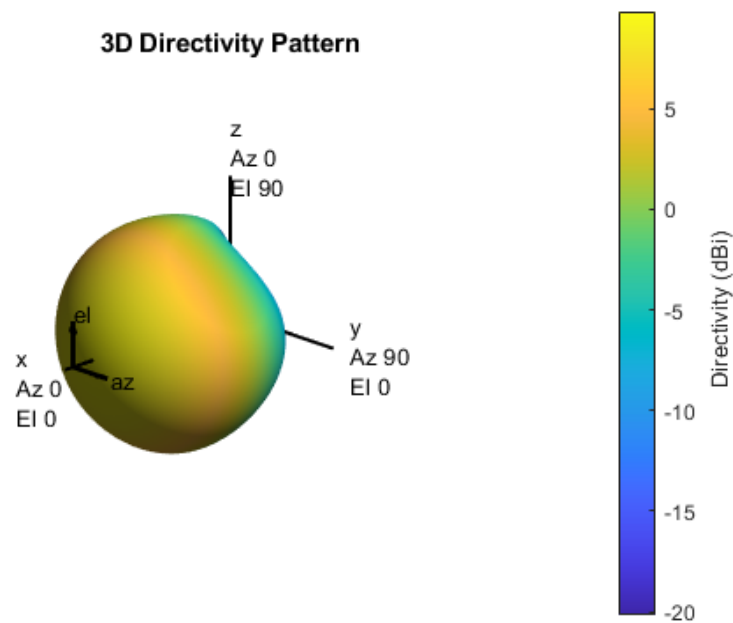
% Ορισμός παραμέτρων (πολικές συντεταγμένες)
azvec = -180:180;
elvec = -90:90;
Am = 30; % Maximum attenuation (dB)
tilt = 0; % Tilt angle
az3dB = 65; % 3 dB bandwidth in azimuth
el3dB = 65; % 3 dB bandwidth in elevation

% Δημιουργία κεραιών με τις προηγούμενες παραμέτρους
[az,el] = meshgrid(azvec,elvec);
azMagPattern = -12*(az/az3dB).^2;
elMagPattern = -12*((el-tilt)/el3dB).^2;
combinedMagPattern = azMagPattern + elMagPattern;
combinedMagPattern(combinedMagPattern<-Am) = -Am; % Saturate at max
attenuation
phasepattern = zeros(size(combinedMagPattern));

% Δημιουργία αντικειμένου κεραιάς
antennaElement = phased.CustomAntennaElement(...
    'AzimuthAngles',azvec, ...
    'ElevationAngles',elvec, ...
    'MagnitudePattern',combinedMagPattern, ...
    'PhasePattern',phasepattern);

% Σχεδιασμός διάδοσης σήματος κεραιάς
f = figure;
pattern(antennaElement,fq);

```

Εικόνα 10. Μοντέλο διάδοσης μεμονωμένου κεραιοστοιχείου.

Για το σενάριο δοκιμής χρησιμοποιώντας ένα μόνο στοιχείο κεραίας και το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου, υπολογίζουμε το SINR και το εμφανίζουμε στο χάρτη (Εικόνα 11). Για κάθε θέση στον χάρτη εντός της εμβέλειας των τοποθεσιών πομπού, η πηγή σήματος είναι η κυψέλη με τη μεγαλύτερη ισχύ σήματος και όλες οι άλλες κυψέλες είναι πηγές παρεμβολών. Οι περιοχές χωρίς χρώμα υποδεικνύουν περιοχές όπου το SINR είναι κάτω από το προεπιλεγμένο όριο των -5 dB. Επομένως παρατηρούμε στην Εικόνα 11 ότι σε αρκετά σημεία του δικτύου δεν έχουμε ικανοποιητική κάλυψη, δηλαδή το σήμα είναι κάτω από το προαναφερθέν όριο, οπότε εμφανίζονται χωρίς χρωματισμό. Ωστόσο, ακόμα και στα σημεία που έχουμε κάλυψη, η μέγιστη τιμή του SINR είναι περίπου 5dB (ανοιχτό γαλάζιο), το οποίο είναι μια σχετικά μικρή τιμή και εμφανίζεται μόνο κοντά στις κεραίες.

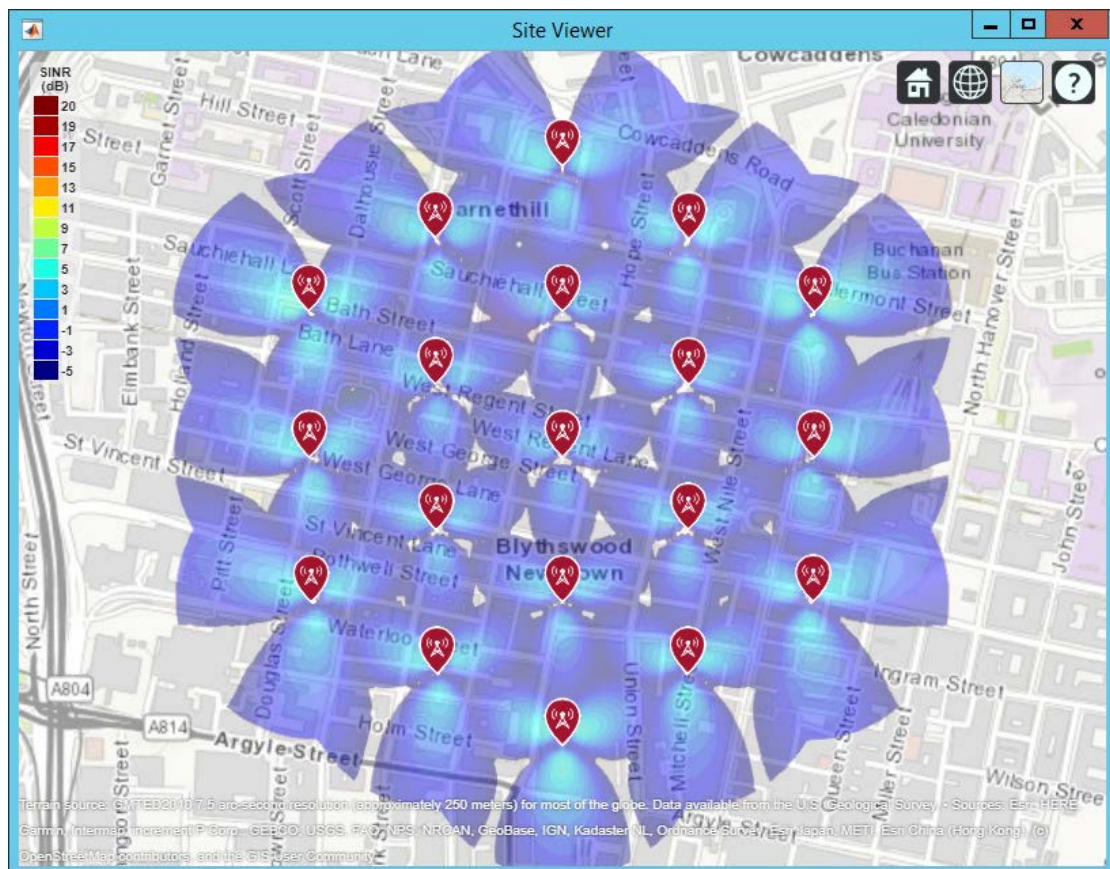
```
% Σε κάθε κυψέλη προσθέτουμε μια κεραία όπου δημιουργήσαμε
προηγουμένως
for tx = txs
    tx.Antenna = antennaElement;
end
```

```

% Ορισμός παραμέτρων λήψης με χρήση πίνακα 8-2 (b)
% με βάση το Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL]
bw = 20e6; % 20 MHz bandwidth
rxNoiseFigure = 7; % dB
rxNoisePower = -174 + 10*log10(bw) + rxNoiseFigure;
rxGain = 0; % dBi
rxAntennaHeight = 1.5; % m

% Δημιουργία χάρτη με τιμές SINR
if isvalid(f)
    close(f)
end
sinr(txs,'freespace', ...
    'ReceiverGain',rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight',rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower',rxNoisePower, ...
    'MaxRange',isd, ...
    'Resolution',isd/20)

```



Εικόνα 11. Χάρτης SINR για κεραίες μεμονωμένων στοιχείων.

Ύστερα, στην επόμενη προσομοίωση ορίζουμε ότι η κάθε κεραία φέρει ένα πάνελ πολλαπλών στοιχείων. Με μια συστοιχία κεραιών αναμένεται να αυξηθεί το κατευθυντικό κέρδος και να έχουμε μέγιστες τιμές του SINR. Επομένως, δημιουργούμε μια ομοιόμορφη ορθογώνια διάταξη κεραιών 8 επί 8. Σε αυτή την ανάλυση χρησιμοποιούμε ένα στοιχείο κεραίας που ορίστηκε χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που καθορίζονται στην έκθεση ITU-R [1]. Το στοιχείο κεραίας πρέπει να παρέχει μέγιστη απολαβή 9,5 dBi και αναλογία εμπρός προς πίσω περίπου 30 dB. Το μοντέλο διάδοσης του σήματος για αυτή την περίπτωση φαίνεται στην Εικόνα 12.

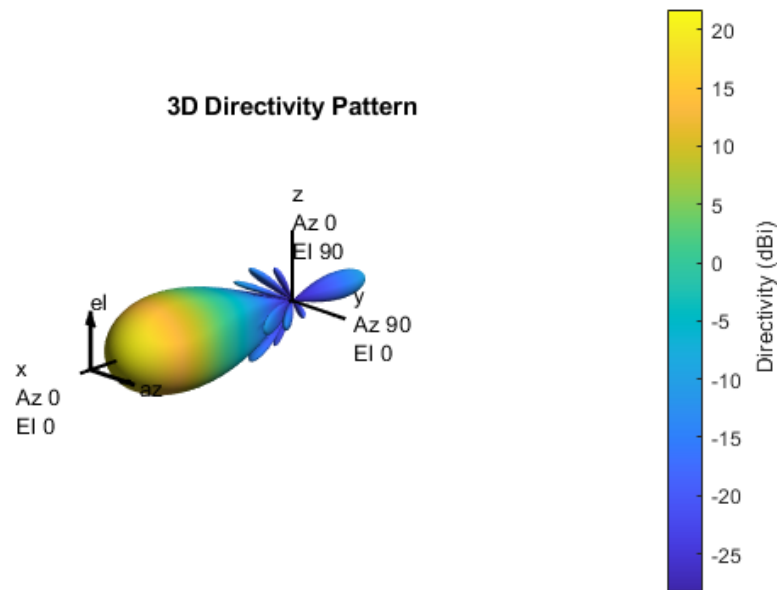
```
% Μέγεθος συστοιχίας
nrow = 8;
ncol = 8;

% Χώρος μεταξύ στοιχείων συστοιχίας
lambda = physconst('lightspeed')/fq; % Μήκος κύματος
% Το κάθε κεραιοστοιχείο θα απέχει μισό μήκος κύματος από το άλλο
drow = lambda/2;
dcol = lambda/2;

% Ορισμός "κωνοειδή" (taper) για τη μείωση πλευρικών λοβών (sidelobes)
dBdown = 30;
taperz = chebwin(nrow,dBdown);
tapery = chebwin(ncol,dBdown);
tap = taperz*tapery.'; % Multiply vector tapers to get 8-by-8 taper
values

% Δημιουργία συστοιχίας κεραιών με πίνακα 8-by-8
cellAntenna = phased.URA('Size',[nrow ncol], ...
    'Element',antennaElement, ...
    'ElementSpacing',[drow dcol], ...
    'Taper',tap, ...
    'ArrayNormal','x');

% Σχεδιασμός διάδοσης σήματος κεραίας
f = figure;
pattern(cellAntenna,fq);
```



Εικόνα 12. Μοντέλο διάδοσης συστοιχίας κεραιών 8x8.

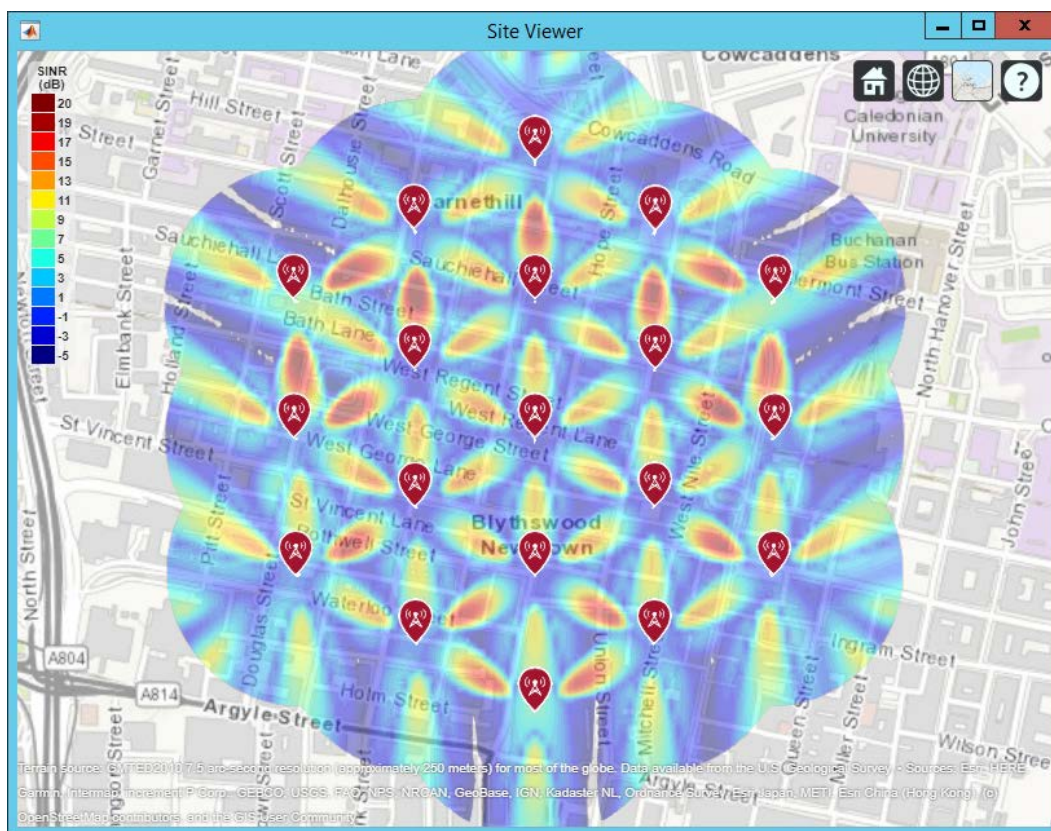
Μετά, με χρήση αυτής ορθογώνια διάταξη κεραιών και το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου, υπολογίζουμε και εμφανίζουμε στο χάρτη το SINR (Εικόνα 13). Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την Εικόνα 13, σε αυτή την περίπτωση έχουμε πολύ καλύτερη κάλυψη του χώρου, όπως φαίνεται από τις υψηλότερες τιμές του SINR. Πιο αναλυτικά, υπάρχουν ελάχιστα κενά στο χάρτη, δηλαδή σημεία με μικρή κάλυψη (SINR < -5 dB). Επίσης, παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιοχές το SINR έχει αυξηθεί, φτάνοντας μέχρι και τα 20 dB (βαθύ κόκκινο χρώμα). Οι περιοχές με πολύ υψηλές τιμές εμφανίζονται στις «ακμές» των κυψελών, το οποίο είναι αποτέλεσμα της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών. Επομένως, γίνεται φανερό ότι τα συστήματα πολλαπλών κεραιοστοιχείων, όπως τα massive MIMO υπερτερούν έναντι ενός δικτύου απλών κεραιών, παρέχοντας καλύτερη κάλυψη με λιγότερο θόρυβο και παρεμβολές, όπως φαίνεται από τις αυξημένες τιμές του SINR. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα massive MIMO μπορούν να παρέχουν ενισχυμένη αξιοπιστία στην επικοινωνία.

```
% Ορισμός τύπου κεραιάς σε κάθε κυψέλη
downtilt = 15; % Στροφή 15° προς το έδαφος
for tx = txs
    tx.Antenna = cellAntenna;
    tx.AntennaAngle = [tx.AntennaAngle; -downtilt];
```

```

end
% Προβολή χάρτη SINR
if isValid(f)
    close(f)
end
sinr(txs, 'freespace', ...
    'ReceiverGain', rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight', rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
    'MaxRange', isd, ...
    'Resolution', isd/20)

```



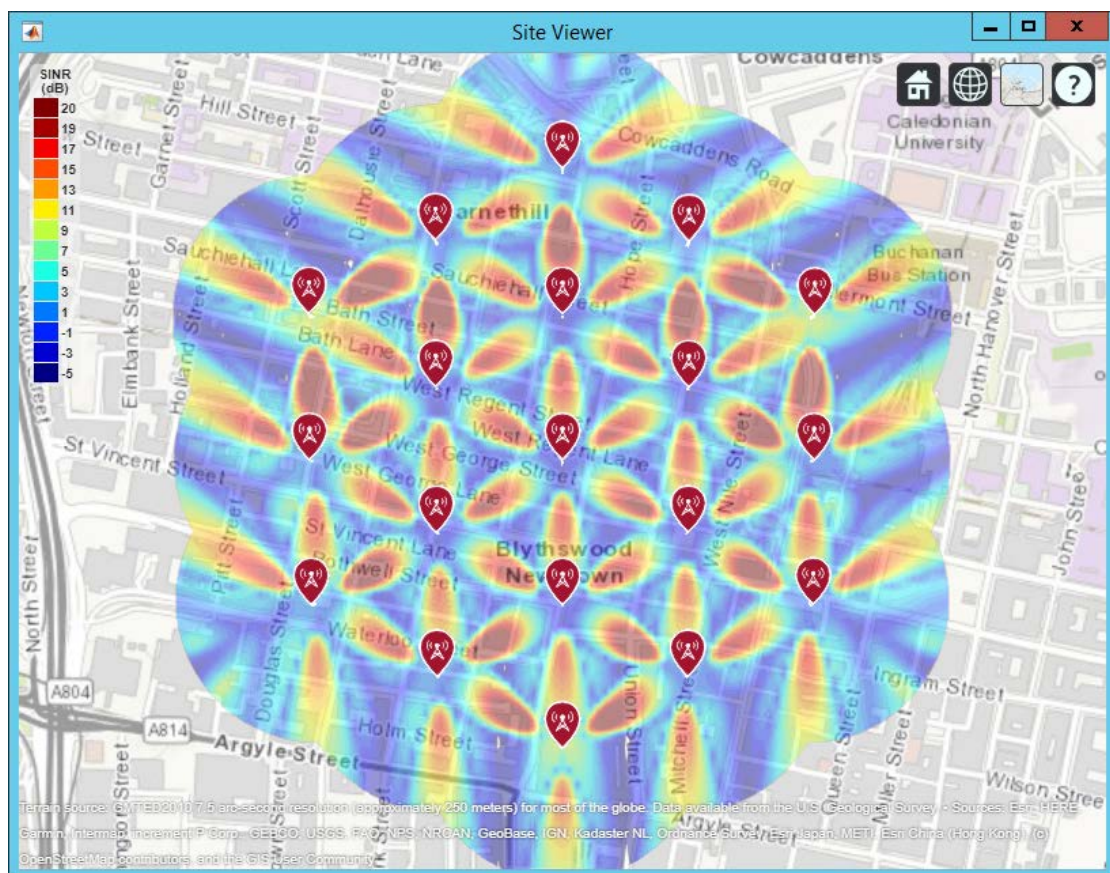
Εικόνα 13. Χάρτης SINR για κεραίες με 8x8 στοιχεία σε ορθογώνια διάταξη.

Στη συνέχεια, αλλάζουμε το μοντέλο διάδοσης και χρησιμοποιούμε το Close-In [45], το οποίο είναι ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο για σενάρια αστικών κυψελών 5G, καθώς λαμβάνει υπόψη του την απώλεια διαδρομής. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 14. Αυτό το μοντέλο παράγει έναν χάρτη SINR που δείχνει μειωμένα αποτελέσματα παρεμβολής σε σύγκριση με το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου. Δηλαδή τα κενά στο χάρτη έχουν σχεδόν εξαφανιστεί, ενώ οι «λοβοί» που έχουν υψηλές τιμές φαίνονται να είναι πιο πλατιοί. Η μέγιστη τιμή παραμένει στα 20 dB.


```

sindr(txs, 'close-in', ...
      'ReceiverGain', rxGain, ...
      'ReceiverAntennaHeight', rxAntennaHeight, ...
      'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
      'MaxRange', isd, ...
      'Resolution', isd/20)

```



Εικόνα 14. Χάρτης SINR για κεραιές με 8x8 στοιχεία σε ορθογώνια διάταξη με μοντέλο διάδοσης close-in.

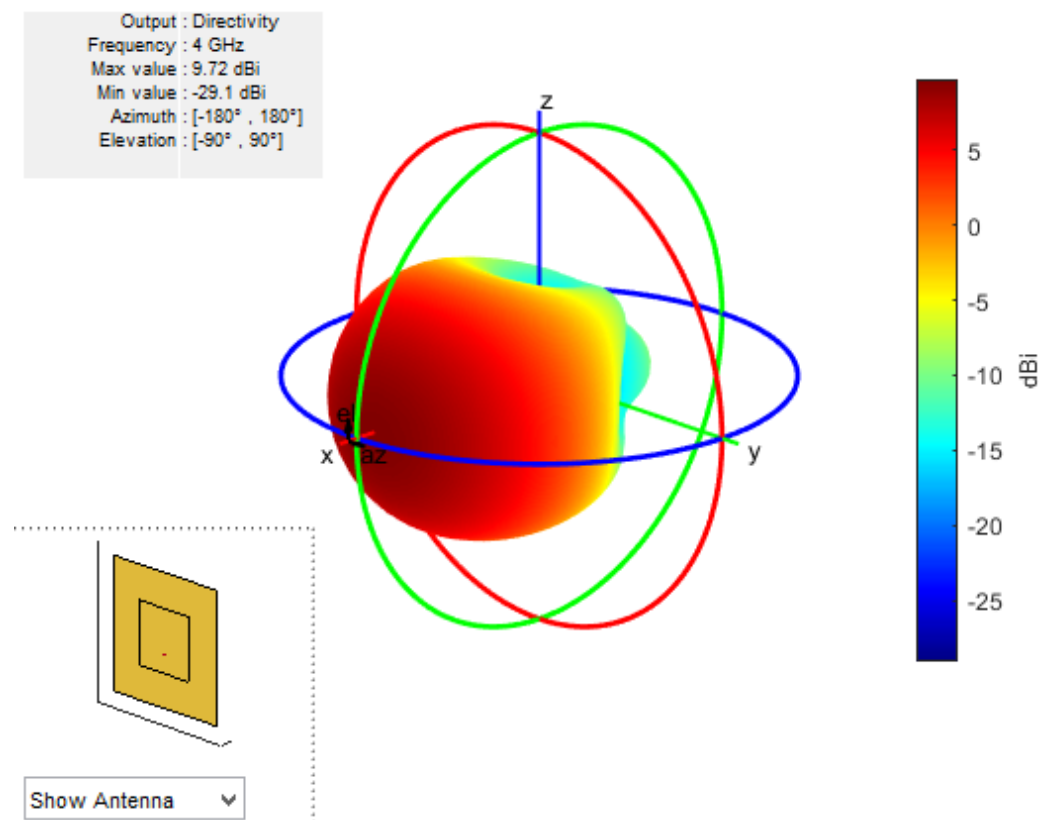
Τέλος, θα δοκιμάσουμε ένα διαφορετικό μοντέλο κεραιάς ως στοιχείο του πίνακα, την Rectangular Patch κεραιά. Σε αυτή την περίπτωση αντικαθιστούμε τον ορισμό του στοιχείου κεραιάς που βασίζεται σε εξισώσεις με ένα πραγματικό μοντέλο κεραιάς που χρησιμοποιεί μια τυπική κεραιά rectangular microstrip patch μισού μήκους κύματος. Το στοιχείο κεραιάς παρέχει κέρδος περίπου 9 dBi, αν και με χαμηλότερη αναλογία εμπρός προς πίσω. Το μοντέλο διάδοσης αυτής της κεραιάς φαίνεται στην Εικόνα 8.

```

% Δημιουργία κεραίας τύπου rectangular microstrip patch
patchElement = design(patchMicrostrip,fq);
patchElement.Width = patchElement.Length;
patchElement.Tilt = 90; % Κάθετη κεραία για κατεύθυνση σήματος
patchElement.TiltAxis = [0 1 0];

% Σχεδιασμός διάδοσης σήματος κεραίας
f = figure;
pattern(patchElement,fq)

```



Εικόνα 15. Μοντέλο διάδοσης σήματος κεραίας τύπου rectangular microstrip patch .

Οπότε, ορίζουμε τις κεραίες να χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο κεραίας διατηρώντας την διάταξη σε ορθογώνια συστοιχία 8 επί 8, καθώς και το μοντέλο διάδοσης Close-In και παράγουμε τον χάρτη με την απεικόνιση του SINR (Εικόνα 16). Παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα είναι πολύ παρόμοιο με πριν. Δηλαδή όλα τα σημεία του δικτύου βρίσκονται υπό κάλυψη, ενώ το σήμα έχει αρκετά υψηλό SINR, που φτάνει σε

ορισμένες περιοχές τα 20 dB.

```
% ορισμός τύπου κεραίας σε κάθε κυψέλη
```

```
cellAntenna.Element = patchElement;
```

```
% Προβολή χάρτη SINR
```

```
if isValid(f)
```

```
    close(f)
```

```
end
```

```
sinr(txs, 'close-in', ...
```

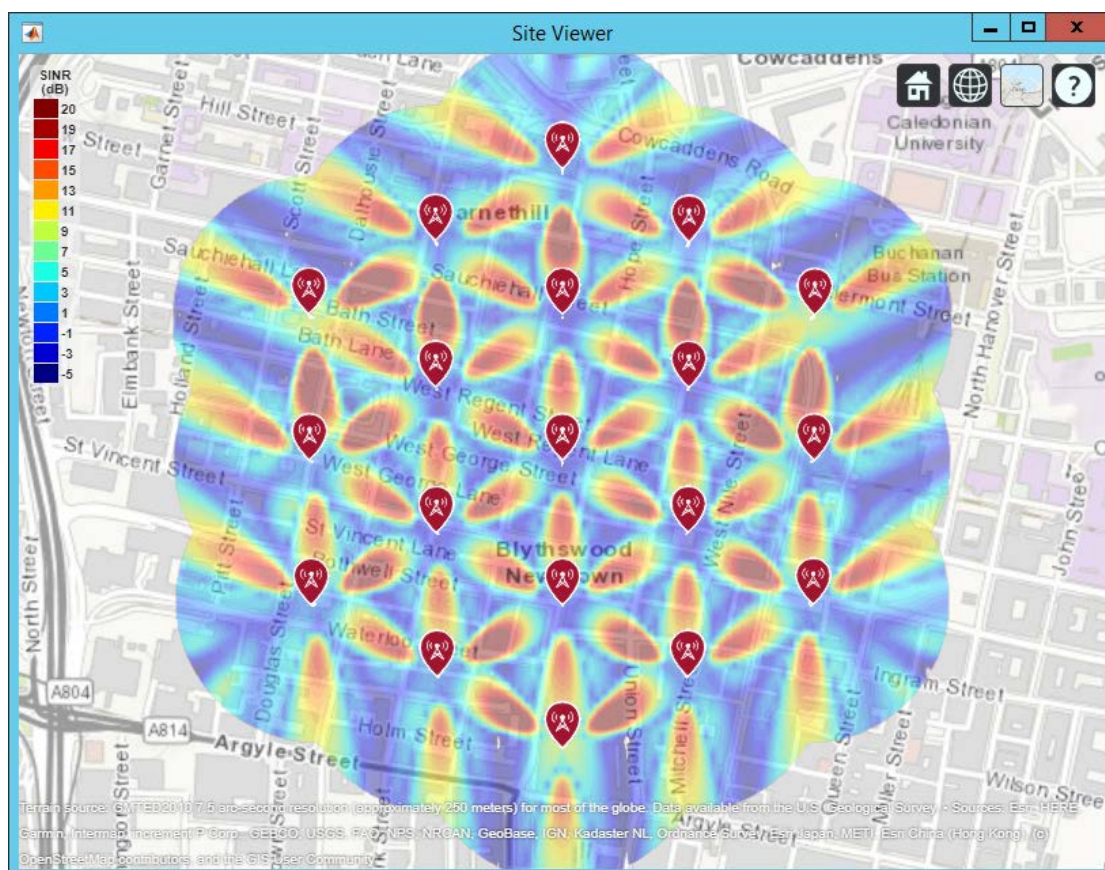
```
    'ReceiverGain', rxGain, ...
```

```
    'ReceiverAntennaHeight', rxAntennaHeight, ...
```

```
    'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
```

```
    'MaxRange', isd, ...
```

```
    'Resolution', isd/20)
```



Εικόνα 16. Χάρτης SINR για κεραίες τύπου rectangular microstrip patch με 8x8 στοιχεία σε ορθογώνια διάταξη.

6. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία κατασκευάσαμε σε μια προσομοίωση με χρήση MATLAB ένα αστικό περιβάλλον δοκιμής κυψελών 5G που αποτελείται από ένα εξαγωνικό δίκτυο 19 τοποθεσιών, καθεμία από τις οποίες περιέχει 3 κυψέλες. Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβος (SINR) απεικονίζεται σε έναν χάρτη για διαφορετικές κεραιές (μεμονωμένη κεραία, ορθογώνια συστοιχία κεραιών και ορθογώνια συστοιχία κεραιών με πιο ρεαλιστικό μοντέλο κεραιάς). Παρατηρούμε ότι μια ορθογώνια διάταξη πολλαπλών κεραιοστοιχείων μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και επομένως μέγιστες τιμές SINR σε σύγκριση με τη χρήση ενός μόνο στοιχείου κεραιάς. Δοκιμάζοντας δύο στοιχεία κεραιάς στη συστοιχία: α) ένα στοιχείο που βασίζεται σε εξίσωση που χρησιμοποιεί το Phased Array System Toolbox και β) ένα στοιχείο κεραιάς patch που χρησιμοποιεί το Antenna Toolbox, παρήχθησαν παρόμοιοι χάρτες SINR. Επίσης, χρησιμοποιήσαμε δύο μοντέλα διάδοσης: α) το ελευθέρου χώρου και β) το close-in, καθώς το τελευταίο εκτιμά την αυξημένη απώλεια διαδρομής. Ωστόσο και το δεύτερο μοντέλο οδηγεί επίσης σε υψηλότερες τιμές SINR σε σύγκριση με τις μεμονωμένες κεραιές λόγω λιγότερων παρεμβολών. Οπότε, η προσομοίωση δείχνει ότι τα συστήματα massive MIMO οδηγούν σε καλύτερη κάλυψη των περιοχών. Αυτό σημαίνει ότι μειώνονται ο θόρυβος και οι παρεμβολές, άρα και τα σφάλματα κατά τη μετάδοση πληροφορίας. Επομένως, σύμφωνα με τα αποτελέσματά μας, τα συστήματα massive MIMO μπορούν να παρέχουν επικοινωνία με αυξημένη αξιοπιστία.

Βιβλιογραφία

- [1] Afolabi, L. A., Olawole, E. T., Taofeek-Ibrahim, F. A., Mohammed, T. N., & Shogo, O. E. (2018). Evolution of wireless networks technologies, history and emerging technology of 5G wireless network: A review. *Journal of Telecommun System Management*, 7(176), 2167-0919.
- [2] Kim, J., & Lee, I. (2015). 802.11 WLAN: history and new enabling MIMO techniques for next generation standards. *IEEE Communications Magazine*, 53(3), 134-140.
- [3] Devi, J., & Datta, P. (2021). Nanoelectronics: A Tool for Next-Generation 5G Wireless Communication Systems. In *Handbook of Research on 5G Networks and Advancements in Computing, Electronics, and Electrical Engineering* (pp. 20-35). IGI Global.
- [4] Li, W., Lee, Y. H., Chen, Y. L., Tseng, H. W., & Yang, C. F. (2021). Proposed Model for Performance Analysis of Fourth-generation Mobile Wireless Communication System. *Sensors and Materials*, 33(4), 1375-1385.
- [5] Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE communications magazine*, 52(2), 186-195.
- [6] Rusek, F., Persson, D., Lau, B. K., Larsson, E. G., Marzetta, T. L., Edfors, O., & Tufvesson, F. (2012). Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE signal processing magazine*, 30(1), 40-60.
- [7] Gao, X., Tufvesson, F., Edfors, O., & Rusek, F. (2012, November). Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz. In *2012 Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)* (pp. 295-299). IEEE.
- [8] Hoydis, J., Hoek, C., Wild, T., & ten Brink, S. (2012, August). Channel measurements for large antenna arrays. In *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)* (pp. 811-815). IEEE.
- [9] Yang, H., & Marzetta, T. L. (2013). Performance of conjugate and zero-forcing beamforming in large-scale antenna systems. *IEEE Journal on Selected Areas in*

Communications, 31(2), 172-179.

- [10] Studer, C., & Larsson, E. G. (2013). PAR-aware large-scale multi-user MIMO-OFDM downlink. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(2), 303-313.
- [11] Mohammed, S. K., & Larsson, E. G. (2013). Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 61(3), 1059-1071.
- [12] Ngo, H. Q., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2013). Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 61(4), 1436-1449.
- [13] Woo, T. K. (2021). Patching Based Extra Short Packet Forward Error Control Coding for Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) in 5G. *Wireless Personal Communications*, 121(3), 2159-2180.
- [14] Seo, J. B., Toor, W. T., & Jin, H. (2021). Analysis of Two-Step Random Access Procedure for Cellular Ultra-Reliable Low Latency Communications. *IEEE Access*, 9, 5972-5985.
- [15] Brighente, A., Mohammadi, J., Baracca, P., Mandelli, S., & Tomasin, S. (2021). Interference Prediction for Low-Complexity Link Adaptation in Beyond 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communications. *arXiv preprint arXiv:2105.05152*.
- [16] Salh, A., Audah, L., Shah, N. S. M., Alhammedi, A., Abdullah, Q., Kim, Y. H., ... & Almohammed, A. A. (2021). A Survey on Deep Learning for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications Challenges on 6G Wireless Systems. *IEEE Access*, 9, 55098-55131.
- [17] Kamyod, C., Nielsen, R. H., Prasad, N. R., Prasad, R., & Aunsri, N. (2016). End-to-End Reliability and Optimization of Intra and Inter-Domain IMS-based Communication Networks. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 5(3), 233-256.
- [18] Petrov, V., Lema, M. A., Gapeyenko, M., Antonakoglou, K., Moltchanov, D., Sardis, F., ... & Dohler, M. (2018). Achieving end-to-end reliability of mission-critical traffic in softwarized 5G networks. *IEEE Journal on Selected Areas in*

Communications, 36(3), 485-501.

- [19] Lauridsen, M., Gimenez, L. C., Rodriguez, I., Sorensen, T. B., & Mogensen, P. (2017). From LTE to 5G for connected mobility. *IEEE Communications Magazine*, 55(3), 156-162.
- [20] Laner, M., Svoboda, P., Romirer-Maierhofer, P., Nikaein, N., Ricciato, F., & Rupp, M. (2012, May). A comparison between one-way delays in operating HSPA and LTE networks. In *2012 10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)* (pp. 286-292). IEEE.
- [21] Elnashar, A., & El-Saidny, M. A. (2013). Looking at LTE in practice: A performance analysis of the LTE system based on field test results. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 8(3), 81-92.
- [22] Holma, H., & Toskala, A. (2011). *LTE for UMTS: Evolution to LTE-advanced*. John Wiley & Sons.
- [23] Signal, O. (2016). Global state of mobile networks.
- [24] Pokhrel, S. R., Ding, J., Park, J., Park, O. S., & Choi, J. (2020). Towards enabling critical mMTC: A review of URLLC within mMTC. *IEEE Access*, 8, 131796-131813.
- [25] Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., & Popovski, P. (2014). Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE communications magazine*, 52(2), 74-80.
- [26] Liu, L., & Yu, W. (2017, June). Massive device connectivity with massive MIMO. In *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)* (pp. 1072-1076). IEEE.
- [27] Popovski, P., Stefanović, Č., Nielsen, J. J., De Carvalho, E., Angelichinoski, M., Trillingsgaard, K. F., & Bana, A. S. (2019). Wireless access in ultra-reliable low-latency communication (URLLC). *IEEE Transactions on Communications*, 67(8), 5783-5801.
- [28] Sachs, J., Wikstrom, G., Dudda, T., Baldemair, R., & Kittichokechai, K. (2018).

5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication. *IEEE network*, 32(2), 24-31.

- [29] Nielsen, J. J., Liu, R., & Popovski, P. (2017). Ultra-reliable low latency communication using interface diversity. *IEEE Transactions on Communications*, 66(3), 1322-1334.
- [30] Arnau, J., & Kountouris, M. (2018, May). Delay performance of MISO wireless communications. In *2018 16th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)* (pp. 1-8). IEEE.
- [31] Panigrahi, S. R., Bjorsell, N., & Bengtsson, M. (2017, March). Feasibility of large antenna arrays towards low latency ultra reliable communication. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1289-1294). IEEE.
- [32] Tarneberg, W., Karaca, M., Robertsson, A., Tufvesson, F., & Kihl, M. (2017, June). Utilizing massive MIMO for the tactile Internet: Advantages and trade-offs. In *2017 IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops)* (pp. 1-6). IEEE.
- [33] Vu, T. K., Liu, C. F., Bennis, M., Debbah, M., Latva-Aho, M., & Hong, C. S. (2017). Ultra-reliable and low latency communication in mmWave-enabled massive MIMO networks. *IEEE Communications Letters*, 21(9), 2041-2044.
- [34] Rafiqul, I. M., Rafiq, S., Yasmin, M. S., & Habaebi, M. H. (2017). A 2X2 MIMO Patch Antenna for Multi-Band Applications. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)*, 5(4), 383-389.
- [35] Idowu-Bismark, O. B., Ibhaze, A. E., & Atayero, A. A. (2017). Mimo optimization techniques and their application in maximizing throughput for 3GPP HSPA+. *J. Wirel. Netw. Commun*, 7(1), 1-8.
- [36] Neri, M., Di Benedetto, M. G., Pecorella, T., Carlini, C., Castellani, A., Obino, P., & Sciarratta, P. (2017, September). Ultra-broadband mobile networks from LTE-Advanced to 5G: evaluation of massive MIMO and multi-carrier aggregation effectiveness. In *2017 AEIT International Annual Conference* (pp.

- 1-6). IEEE.
- [37] Kumar, A. (2018). Design and simulation of MIMO and massive MIMO for 5G mobile communication system. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 14(2), 197-207.
- [38] Liang, J., & Shudong, F. A. N. G. (2019, May). Cell Capacity Evaluation of Downlink 2x2 and 4x4 MIMO with Respect to 2R and 4R CPEs. In *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [39] Anzum, M. S., Rafique, M., Sarder, M., Ishrak, A., Tajrian, F., & Shams, A. B. (2021). Downlink Performance Enhancement of High Velocity Users in 5G Networks by Configuring Antenna System. *arXiv preprint arXiv:2108.04451*.
- [40] Singh, C., & Kishoreraja, P. C. (2021). An Energy Efficient Resource Allocation and Transmit Antenna Selection Scheme in mm-Wave Using Massive MIMO Technology.
- [41] Sharma, P. K., & Nallam, N. (2021, June). A Frequency-and-Spatial Blocker Tolerant Butler Matrix based 4×4 MIMO Receiver using a Switched-Capacitor Quadrature Coupler. In *2021 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)* (pp. 79-82). IEEE.
- [42] Basha, A. R. (2021). Reconfigurable Design of Hybrid MIMO Detection Scheme for Spatially Multiplexed MIMO System.
- [43] Oughton, E. J., Lehr, W., Katsaros, K., Selinis, I., Bublely, D., & Kusuma, J. (2021). Revisiting wireless internet connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy*, 45(5), 102127.
- [44] Galindo Cardenas, S. (2020). *Photonic antenna for MIMO transmission towards 5G applications* (Doctoral dissertation, Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych).
- [45] Sun, S., Rappaport, T. S., Thomas, T. A., Ghosh, A., Nguyen, H. C., Kovács, I. Z., ... & Partyka, A. (2016). Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(5),

2843-2860.