



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ

ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ

ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

*UD/SMALL CELLS, UDD,
SMALLCELLS, FEMTOCELLS,
PICOCELLS, MICROCELLS*

ΦΟΙΒΟΣ ΑΛΛΑΓΙΩΤΗΣ

A.M 1056636

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΠΟΥΡΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2021

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	I
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	III
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: SMALL CELLS.....	6
2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ SMALL CELL	6
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	8
2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΟΙΠΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	10
3.1 FEMTOCELLS	10
3.2 PICOCELLS	11
3.3 MICROCELLS	12
3.4 MACROCELLS	14
3.5 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	19

4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	19
4.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	20
4.3 ΣΥΝΔΕΣΗ 5G ΜΕ SMALL CELLS.....	22
4.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΕΛΛΟΝ	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	29
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	31

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
1G	FIRST GENERATION
2G	SECOND GENERATION
3G	THIRD GENERATION
4G	FOURTH GENERATION
5G	FIFTH GENERATION
3GPP	3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT
BS	BASE STATION
CBRS	CITIZENS BROADBAND RADIO SERVICE
eMBB	ENHANCED MOBILE BROADBAND
FPGA	FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY
GPRS	GENERAL PACKET RADIO SERVICE
GSM	GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATION
IoT	INTERNET OF THINGS
LTE	LONG-TERM EVOLUTION
MMWAVE	MILLIMETER WAVE

NR	NEW RADIO
QoS	QUALITY OF SERVICE
TVS	TRANSIENT-VOLTAGE-SUPPRESSION
UE	USER EQUIPMENT
UHF	ULTRA HIGH FREQUENCY
VHF	VERY HIGH FREQUENCY
VoIP	VOICE OVER INTERNET PROTOCOL
WiMAX	WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τρόπος με τον οποίο οι άνθρωποι θα συνδέονται χρησιμοποιώντας τις κινητές συσκευές τους γίνεται όλο και πιο σημαντικός καθώς προχωράμε στην Πέμπτη γενιά των κινητών δικτύων. Τα κινητά δίκτυα Πέμπτης γενιάς βασίζονται στις mmWave συχνότητες. Αν και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες, ένα από τα αρνητικά τους είναι ότι μπορούν να καλύψουν μικρότερες περιοχές απ'ότι οι προηγούμενες γενιές. Επομένως, για να καλυφθεί το σημερινό πλήθος χρηστών, και επίσης η αναμενόμενη αύξηση χρηστών, χρειάζεται να αναπτυχθούν περισσότερα μέσα μετάδοσης.

Μία λύση, στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα small cells. Αποτελούν μία από τις καλύτερες λύσεις στο πρόβλημα που αναφέραμε παραπάνω. Το μικρό τους κόστος μας επιτρέπει να τοποθετήσουμε αρκετά small cells, τόσο εντός όσο και εκτός για να καλύψουμε την ζήτηση που θα προκύψει στο μέλλον.

Η σημασία των small cells μπορεί να φανεί και από το πλήθος των ερευνών που έχει πραγματοποιήσει η επιστημονική κοινότητα. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή δεν είναι καινοτόμα, καθώς κατηγορίες των small cells, συγκεκριμένα τα femtocells τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια, έχουν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες γενιές κινητών δικτύων.

Η εργασία αυτή, έχει ως σκοπό, πρώτα να ορίσει τα small cells και να αναφερθούν τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα τους. Στην συνέχεια, αναλύονται οι κατηγορίες των small cells που υπάρχουν μαζί με τα χαρακτηριστικά τους. Παρακάτω, επεξηγούνται τα δίκτυα Πέμπτης γενιάς και σημειώνεται η σύνδεση των δικτύων αυτών και των small cells. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες στον τομέα αυτό.

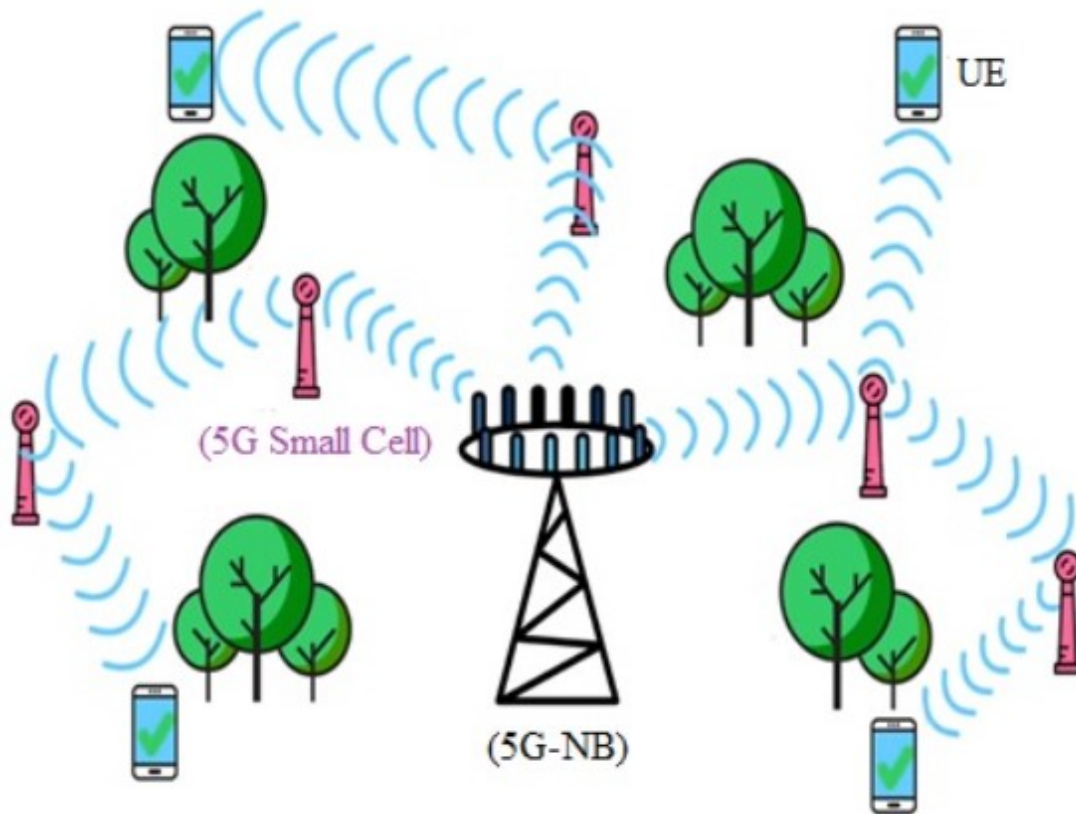
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: SMALL CELLS

2.1 Ορισμός Small Cell

Σύμφωνα με το [1], ο όρος small cell αναφέρεται σε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, χαμηλής ισχύς, όπου χρησιμοποιούνται τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους, για την αναμετάδοση πληροφορίας μεταξύ κινητών συσκευών. Η εμβέλεια τους μπορεί να είναι από 10 μέτρα έως και κάποια χιλιόμετρα.

Είναι μικροσκοπικοί σταθμοί βάσης που χωρίζουν μια τοποθεσία κυψελών σε πολύ μικρότερες περιοχές. Έχουν τις ίδιες ιδιότητες που έχουν οι συμβατικοί BSs, αλλά προσφέρουν καλύτερο data rate σε κάθε χρήστη. Προτάθηκαν στην 9^η έκδοση των προδιαγραφών προδιαγραφές 3GPP. Χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλού latency σε προχωρημένους LTE-advanced και 5G NR. Επίσης χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη κρίσιμων υπηρεσιών αποστολής που απαιτούν χαμηλό latency και εξαιρετικά αξιόπιστο δίκτυο. Βρίσκουν, περαιτέρω, διάφορες εφαρμογές σε βιομηχανικό IoT, έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, έξυπνη πόλη και έξυπνο σπίτι. Επιπλέον, τοποθετούνται για υποστήριξη τεράστιου αριθμού χρηστών κατά τη διάρκεια ειδικών εκδηλώσεων όπως αθλητικών και παιχνιδιών.

Η ακριβής εμβέλεια καθορίζεται από την κάθε κατηγορία. Τα small cells τοποθετούνται σε πολύ πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπως αθλητικούς χώρους, εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια, σιδηροδρομικούς σταθμούς κοκ. Παρακάτω απεικονίζεται ένα απλό παράδειγμα:



Εικόνα 1. Ένα δίκτυο με small cells [2]

Τα small cells λειτουργούν ακριβώς παρόμοια με τη συμβατική ιδέα κυττάρων με προηγμένες τεχνικές όπως MIMO, διαμόρφωση δέσμης και mmWaves για μετάδοση. Οι σταθμοί μετάδοσης χαμηλής ισχύος μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας την έννοια small cells. Επιπλέον, οι μονάδες υλικού σμαλλ ψελλο έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν την πολυπλοκότητα και έτσι η εφαρμογή είναι ταχύτερη και ευκολότερη.

Οι small cells BSs μπορούν να στερεωθούν σε τοίχο για εσωτερικές εφαρμογές και οι μικροί πύργοι ή στύλοι λάμπας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξωτερικές εφαρμογές. Οι συνδέσεις Backhaul μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας συνδέσεις ινών, ενσύρματη σύνδεση και μέσω συνδέσμων μικροκυμάτων. Η διαμόρφωση είναι λιγότερο περίπλοκη, απλώς πρέπει να συνδεθεί με backhaul και πηγή ενέργειας.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι θεωρούνται ένας γενικός όρος στον οποίο συμπεριλαμβάνονται οι όροι των femtocells, picocells, microcells και macrocells. Στις περισσότερες φορές όταν χρησιμοποιείται ο όρος small cells αναφέρεται στα femtocells.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Σύμφωνα με το [3], η ιδέα ενός συμπαγούς αυτο-βελτιστοποιημένου οικιακού ιστότοπου αναφέρθηκε πρώτη φορά το 1999. Η Alcatel ανακοίνωσε τον Μάρτιο του 1999 ότι θα έφερνε στην αγορά έναν βασικό σταθμό GSM που θα ήταν συμβατός με τα υπάρχοντα τυπικά τηλέφωνα GSM.

Παρακάτω, διάφορα ερευνητικά έργα συνέχισαν να δουλεύουν σε πρωτότυπα προϊόντα femtocell. Το 2002, μηχανικοί της Motorola, ισχυρήθηκαν ότι κατασκεύασαν τον πρώτο πλήρη 3G BS το 2002. Επίσης, αρκετές εταιρείες προσπαθούσαν να χαμηλώσουν το κόστος και το μέγεθος του υπάρχοντος εξοπλισμού 2G. Αυτά, στην συνέχεια, ονομάστηκαν picocells όπου ήταν απλώς μικρότερες και χαμηλότερου κόστους εκδόσεις μεγαλύτερου εξοπλισμού.

Η πρώτη χρήση του όρου femtocell καταγράφεται από τον αναλυτή Dean Buble. Η εμπορική χρήση ξεκίνησε για πρώτη φορά από την Sprint στις ΗΠΑ τον Αύγουστο του 2008. Τον Γενάρη του 2009 ανακοινώθηκε η κυκλοφορία του 3G femtocell από την Softbank Japan, ενώ τον Ιούνη παρουσιάστηκε η Access Gateway από την Vodafone UK. Τα femtocells υψηλότερης χωρητικότητας αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας chipset δεύτερης και τρίτης γενιάς, καθιστώντας το κατάλληλο για επιχειρήσεις με υψηλότερη απόδοση κίνησης και απαιτήσεις κάλυψης.

Στην συνέχεια, τα femtocells ξεκίνησαν να αναπτύσσονται σε εξωτερικούς χώρους, ώστε να συμπεριλαμβάνονται εξωτερικές αστικές περιοχές και ακόμη και αγροτικές/απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό το αυξημένο εύρος οδήγησε σε μια εξέλιξη στον όρο Small Cell.

2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Στο [2], αναφέρεται ότι τα small cells επεκτείνουν την κάλυψη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε εσωτερικούς χώρους, το οποίο αυξάνει την συνολική χωρητικότητα ενός δικτύου και γενικά το QoS. Χρησιμοποιούνται για να συνδέσεις σε τοποθεσίες όπου η κάλυψη είναι είτε αδύνατη είτε δεν υπάρξει καθόλου, και ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές για να εγκατασταθεί μία αδιάκοπη σύνδεση συνεχώς. Στην συνέχεια, τα small cells, είναι φθηνότερα από τους συμβατικούς BSs. Επίσης, χρησιμοποιούν καλύτερα το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων επαναχρησιμοποιώντας τις ίδιες συχνότητες ενός μίας γεωγραφικής

περιοχής. Περαιτέρω, οι χρήστες των small cells αντιμετωπίζουν χαμηλότερο χρόνο καθυστέρησης για τις υπηρεσίες δεδομένων και απολαμβάνουν γρηγορότερο download και upload χρόνο. Καταναλώνουν χαμηλή ισχύ σε σύγκριση με τα συμβατικά BS. Εκφορτώνουν την κυτταρική κίνηση και αυξάνουν διαδοχικά την αποδοτικότητα του δικτύου. Μπορούν επίσης, να τοποθετηθούν πιο γρήγορα και να λειτουργούν εύκολα. Τέλος, η εφαρμογή ενός δικτύων small cells είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς θα μειώσει τον αριθμό των cell towers και παρέχει ένα καθαρότερο σήμα με λιγότερη ισχύ.

Συνήθως το 90% της κίνησης δεδομένων δικτύου μεταφέρεται στο 10% των κυψελιών του δικτύου. Η χωρητικότητα αυτών των βαρέων φορτίων κυψελών μπορεί να αυξηθεί με την ανάπτυξη μεγαλύτερου φάσματος (το οποίο κοστίζει). Εναλλακτικά, είναι δυνατή η αναβάθμιση σε μια τεχνολογία όπως το LTE-Advanced, στη λειτουργία MIMO και την κατάτμηση. Τα small cells μπορούν να αναπτυχθούν με πιο στοχευμένο τρόπο για την ανακούφιση της κυκλοφορίας. Η εγγύτητα με τον χρήστη και το μικρότερο εύρος κάλυψης σημαίνει καλύτερη κάλυψη και ποιότητα, άρα υψηλότερη απόδοση.

Σε γενικές γραμμές, τα μεγάλα macrocells προσφέρουν μια πιο οικονομική λύση για κινητές υπηρεσίες ανά μονάδα περιοχής. Ωστόσο, χρειάζονται ένα μεγαλύτερο κεφάλαιο για να αναπτυχθούν και προσφέρουν περιορισμένη ικανότητα χειρισμού της δυναμικής κίνησης. Για παράδειγμα, ο μεγάλος όγκος κυκλοφορίας μπορεί να μετατοπιστεί από το αστικό κέντρο σε υποαστικές περιοχές μετά τη δουλειά. Επομένως, τα macrocells μπορεί να μην αποφέρει έσοδα ενώ τα small cells που αντικαθιστούν macrocells μπορεί να προσφέρουν καλύτερη οικονομία δικτύου αφού η επένδυση είναι σχετικά μικρότερη.

Αν και προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, παρουσιάζουν και διάφορα αρνητικά. Συγκεκριμένα, έχουν ένα μικρότερο εύρος κάλυψης απ'ότι οι συμβατικοί BS. Διαχειρίζονται λιγότερες ταυτόχρονες κλήσης και περιηγήσεις με την χρήση δεδομένων. Επίσης, είναι ακριβότερα από τους repeaters και relays, και ως αποτέλεσμα απαιτείται μεγαλύτερος προϋπολογισμός, για να αναπτυχθούν μεγάλα δίκτυα τα με small cells που καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή. Περαιτέρω, αντιμετωπίζουν θέματα παρεμβολών, διαχείρισης πόρων κ.λπ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΟΙΠΕΣ

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

3.1 Femtocells

Το Femtocell είναι ο μικρότερος τύπος small cell που χρησιμοποιείται για την επέκταση της συνδεσιμότητας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας εντός μιας στοχευμένης γεωγραφικής περιοχής (συνήθως μια μικρή, μοναδική τοποθεσία). Εκτός από το ότι είναι το μικρότερο στην οικογένεια τεχνολογιών small cell, τα Femtocells χρησιμοποιεί επίσης το μισθωμένο ποσό ισχύος, και, ως εκ τούτου, δεν προσφέρουν τόσο μεγάλο αντίκτυπο όταν επιχειρούν να επεκτείνουν τη συνδεσιμότητα δικτύου.

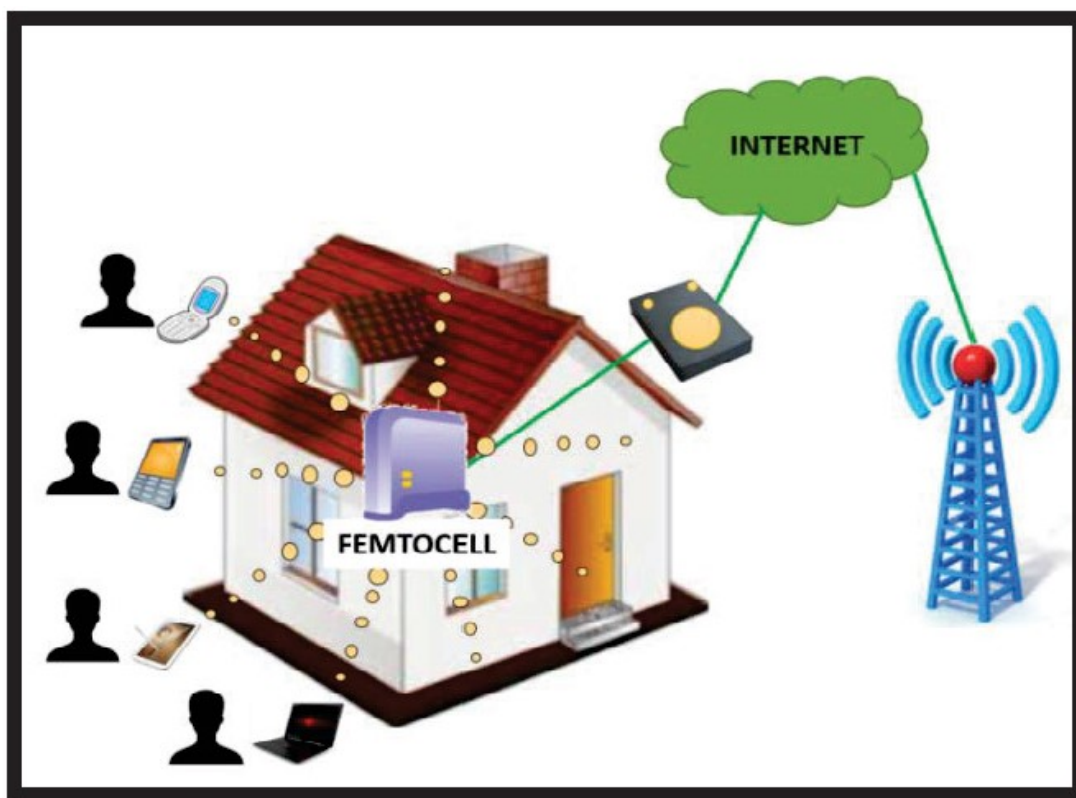
Το [4] ορίζει τα femtocells ως σταθμούς βάσης χαμηλής ισχύος. Χρησιμοποιούνται τόσο σε εσωτερικούς, όπου μπορούν να επεκτείνουν την κάλυψη σε σπίτια ή/και σε επιχειρήσεις κατά 10 μέτρα, όσο και σε εξωτερικούς χώρους όπου η επιπλέον κάλυψη μπορεί να φτάσει μέχρι και το 1 χιλιόμετρο. Τα femtocells χωρίζονται και αυτά σε υποκατηγορίες, η κάθε μία με ξεχωριστό εύρος κάλυψης καθώς και χωρητικότητα, τα οποία αναλογούν σε διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Αποτελούν επίσης, την πιο αξιόπιστη λύση των παρόχων κινητής τηλεφωνίας για να αυξήσουν την κάλυψη σε αραιοκατοικημένες περιοχές, αλλά και την χωρητικότητα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Οι παρόχοι δεν περιορίζονται μόνο στα femtocells αλλά εκμεταλλεύονται και άλλα είδη small cells για περαιτέρω κάλυψη των αναγκών των πελατών τους. Στην ορολογία 3GPP, ένα LTE femtocell ονομάζεται Home eNode B (HeNB).

Η τεχνολογία Femtocell ενσωματώνεται σε κυψελοειδή δίκτυα με σχεδόν τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται όλα τα άλλα συστήματα small cells, αλλά το κύριο πλεονέκτημά του είναι ότι δεν απαιτεί κεντρικό διανομέα, το οποίο απαιτείται από άλλες λύσεις δικτύου, όπως τα συστήματα κατανεμημένων κεραιών. Συνήθως, τα Femtocells εφαρμόζονται σε τοποθεσίες όπου υπάρχει υπάρχουσα backhaul δικτύου ή

σε μια τοποθεσία όπου η backhaul μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς υπερβολική δυσκολία ή επένδυση κεφαλαίου.

Το femtocell πρέπει να συνυπάρχει με γειτονικούς χρήστες και πιθανώς με γειτονικά femtocells. Αυτό δεν είναι πολύ δύσκολο. ένα femtocell μπορεί να “μυρίσει” το φάσμα και να εντοπίσει άλλα femtocells. Ένα femtocell θα χρησιμοποιεί μόνο τις ζώνες συχνοτήτων που έχει εκχωρηθεί. Το μικρό εύρος και η ενσωματωμένη νοημοσύνη του σημαίνει ότι μπορεί να προσαρμόσει την ισχύ μετάδοσης προς τα πάνω ή προς τα κάτω, ανάλογα με το πού βρίσκονται οι χρήστες του και αν οι γειτονικοί χρήστες χρησιμοποιούν το φάσμα.

Στο [5], ένα απλό femtocell δίκτυο παρουσιάζεται ως εξής:



Εικόνα 2. Ένα femtocell δίκτυο [5]

3.2 Picocells

Τα picocells είναι μικρές εκδόσεις σταθμών βάσης. Το μέγεθος του μπορεί να παρομοιάζεται από ένα φορητό υπολογιστή έως μία βαλίτσα. Αν και ιστορικά τα picocells έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως σε κυψελοειδή δίκτυα, ο σχεδιασμός θα χρησιμοποιηθεί επίσης σε δίκτυα WiMAX και για τον ίδιο λόγο: Ανεξάρτητα από το

ασύρματο πρότυπο που χρησιμοποιείται, δυστυχώς ούτε και οι καλύτεροι BSs δεν μπορούν να διεισδύσουν την κάθε γωνιά κτιρίου ή εξωτερικού χώρου.

Οι αναμεταδότες και τα κατανεμημένα συστήματα κεραιών είναι δύο εναλλακτικές λύσεις για τα picocells, αλλά δεν αποτελούν την ιδανική λύση για όλες τις καταστάσεις. Ένας λόγος είναι η χωρητικότητα: Εκτός από την τοποθέτηση οπών κάλυψης, τα picocells χρησιμοποιούνται επίσης συχνά για την προσθήκη χωρητικότητας φωνής και δεδομένων - κάτι που δεν μπορούν να κάνουν οι αναμεταδότες και τα κατανεμημένα συστήματα κεραιών.

Το συμπαγές μέγεθος των Picocells τα καθιστά κατάλληλα για τα μέρη που χρειάζονται όλη τη χωρητικότητα. Για παράδειγμα η Νέα Υόρκη, η οποία είχε περίπου 3 εκατομμύρια ασύρματους χρήστες το 1999 ενώ στα τέλη του 2003, είχε 10,5 εκατομμύρια χρήστες κινητών. Αλλά ο διαχωρισμός των κελιών για προσθήκη χωρητικότητας είναι δαπανηρός, χρονοβόρος και περιστασιακά αδύνατος σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα όπως το Μανχάταν.

Διασφαλίζοντας ότι οι χρήστες μπορούν πάντα να πραγματοποιούν κλήσεις ή να λαμβάνουν μια σύνδεση δεδομένων, τα picocells βελτιώνουν τις πιθανότητες οι χρήστες να επιλέξουν κυψελοειδή αντί για εναλλακτικές λύσεις όπως το Wi-Fi έτσι τα picocells μπορούν να βελτιώσουν την θέση ενός φορέα κινητής τηλεφωνίας.

3.3 Microcells

Τα microcells είναι ουσιαστικά μικροί ιστοί που μπορούν να τοποθετηθούν στην υπάρχουσα φυσική υποδομή σε περιοχές όπου δεν είναι πρακτικό να εγκατασταθεί έναν κινητό πύργο πλήρους μεγέθους ή ακόμα και πιο τυπικές κινητές κεραιές που βρίσκονται σε στέγες ψηλών κτιρίων.

Τα microcells δεν καταλαμβάνουν πολύ χώρο, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε έπιπλα δρόμου, όπως λαμπτήρες, στάσεις λεωφορείων ή στο πλάι ενός κτηρίου. Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας μπορούν στη συνέχεια να παρέχουν επιπλέον χωρητικότητα για να καλύψουν μεγάλο αριθμό χρηστών σε μια πολυσύχναστη περιοχή - όπως μια δημόσια πλατεία, ένα εμπορικό κέντρο ή ένα γήπεδο ποδοσφαίρου.



Εικόνα 3: Ένα microcell σε λάμπα δρόμου [6]

Η εμβέλεια τους μπορεί να φτάσει μέχρι τα 2km. Αν χρησιμοποιούνται mmWaves για την μετάδοση, μπορεί αν υπάρξουν παρεμβολές στο σήμα από κτίρια. Επιπλέον, ο αριθμός των χρηστών ενδέχεται να υπερβαίνει τη χωρητικότητα του microcell.

Η λύση που υιοθετούν οι παροχείς κινητής τηλεφωνίας είναι η χρήση περισσότερων microcells. Έτσι, μπορεί να παρέχεται σε ένα χρήστη συνεχής κάλυψη καθώς κινείται μέσα σε ένα τοπικό δίκτυο και διασφαλίζεται ότι το δίκτυο δεν θα υπερφορτωθεί από υπερβολική ζήτηση. Με αυτό τον τρόπο, παρέχονται στον χρήστη πολλά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι: καλύτερες ταχύτητες, αδιάκοπη συνδεσιμότητα, και πιθανώς καλύτερη διάρκεια της μπαταρίας του, επειδή συνδέεται με μια πιο κοντινή του κυψέλη.

Όμως δεν επωφελούνται μόνο οι χρήστες που χρησιμοποιούν smartphone. Η πρόσθετη χωρητικότητα που παρέχεται από τη δομή αυτή είναι απαραίτητη για τις υπόλοιπες εφαρμογές τις οποίες προσφέρει το 5G. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο μιας έξυπνης πόλης ο αριθμός των συσκευών που μπορεί να είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, φτάνει τις εκατοντάδες. Τα microcells φροντίζουν, οι απαιτήσεις αυτές να ικανοποιούνται.

Μερικοί από τους περιορισμούς που ισχύουν για υποδομές με small cells ισχύουν επίσης και για τα microcells. Οι χειριστές πρέπει να διασφαλίσουν ότι έχουν backhaul - είτε μέσω ινών είτε ασύρματο - στον ιστότοπο. Πρέπει να υπάρχει μια

κατάλληλη πηγή ενέργειας και οι χειριστές πρέπει να έχουν φυσική πρόσβαση στον ιστότοπο. Αυτό μπορεί να σημαίνει περίπλοκες ή μακρές διαπραγματεύσεις με τον ιδιοκτήτη της γης ή μέσω δημόσιας αρχής.

3.4 Macrocells

Ως macrocells, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα μεγάλο κυψελλοειδή BS, που βλέπουμε παντού σε πόλεις, συνήθως στους αυτοκινητόδρομους ή σε αγροτικές περιοχές. Συνήθως είναι περίπου 15-60 μέτρα σε ύψος και παρέχουν κάλυψη σε μερικά χιλιόμετρα.

Όπως δείχνει και το όνομα του αποτελεί το μεγαλύτερο είδος στην κατηγορία των small cells. Προσφέρουν την μεγαλύτερη κάλυψη επίσης μεταξύ των ομοειδών τους. Παρά το γεγονός αυτό δεν χρησιμοποιούνται συχνότερα, καθώς κοστίζουν περισσότερο από όλα τα άλλα για να αναπτυχθούν. Λεπτομέρειες στις διαφορές τους παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο. Επίσης, παρακάτω παρέχεται μία φωτογραφία ενός microcell BS.



Εικόνα 4: Ένας macrocell BS [7]

3.5 Διαφορες και Λειτουργιες

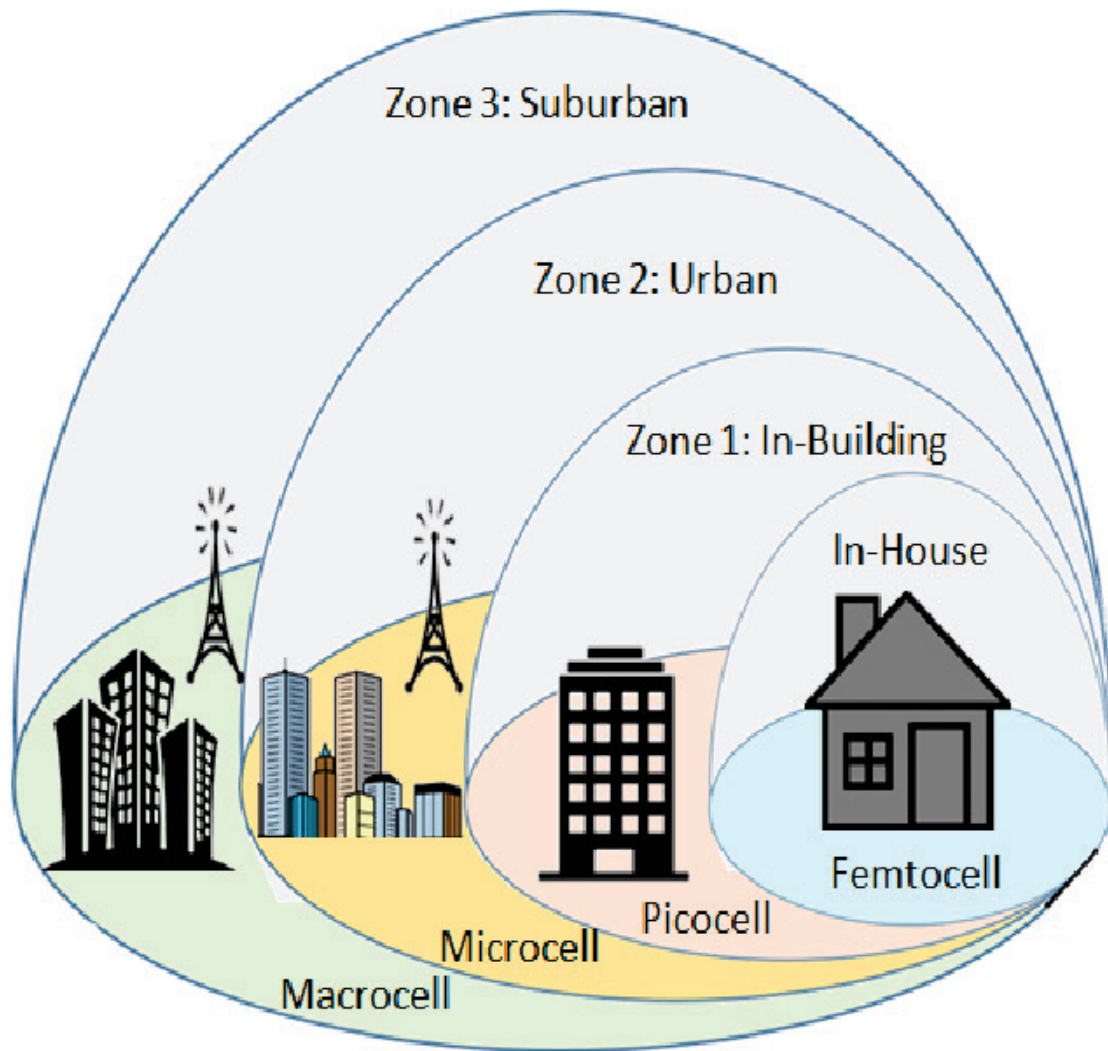
Καταρχάς, οι βασικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων ειδών, είναι το πλήθος των χρηστών, το εύρος κάλυψης, το εύρος ζώνης και η ραδιοσυχνότητα. Περαιτέρω,

μπορούμε να εξετάσουμε διαφορές μεταξύ που τοποθετείται το κάθε είδος small cell και ποιοι είναι οι χρήστες. Οι βασικές διαφορές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα όπως αυτά ορίζονται στο [8].

Είδος small cell	Πλήθος χρηστών	Εύρος κάλυψης (m)	Εύρος ζώνης (MHz)	Ραδιοσυχνότητα (W)
Femtocell	1 έως 30	0,01 έως 0,1	10	0,001 έως 0,25
Picocell	30 έως 100	0,1 έως 0,2	20	0,25 έως 1
Microcell	100 έως 2000	1 έως 2	20 έως 40	1 έως 10
Macrocell	>2000	5 έως 32	60 έως 75	10 έως >50

Πίνακας 1: Βασικές διαφορές small cells

Οι διαφορές ως προς τοποθεσίες που τοποθετούνται είναι ότι τα femtocells είναι για εσωτερικούς χώρους ενώ τα picocells και microcells χρησιμοποιούνται τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους, ενώ τα macrocells χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε εξωτερικούς χώρους. Οι διαφορές ως προς την τοποθεσία και ως προς την κάλυψη μπορούν να γίνουν πιο ξεκάθαρες με την παρακάτω εικόνα, όπου φαίνονται ότι τα femtocells είναι ιδανικά για την κάλυψη μέσα σε ένα σπίτι όπου καλύπτει μία οικογένεια. Στην συνέχεια, τα picocells μπορούμε να δούμε ότι καλύπτουν ένα κτίριο σε αρκετά καλό βαθμό και να καλύψουν τους χρήστες ικανοποιητικά. Περαιτέρω, μπορούμε να δούμε ότι τα microcells είναι για αστικές περιοχές, δηλαδή μία ολόκληρη πόλη και τέλος τα macrocells είναι για υπεραστικά περιοχές, δηλαδή μία πόλη μαζί με τις γύρω περιοχές τους. Οι λειτουργίες τους αναλύονται περαιτέρω στην συνέχεια και η εικόνα είναι η εξής:



Εικόνα 5: Κάλυψη κάθε είδους small cell [5]

Ως προς την χρήση και τις λειτουργίες τους, ορίζονται ως εξής:

Τα Femtocells είναι συνήθως σχεδιασμένα για οικιακή ή εταιρική χρήση [9]. Παρέχουν ραδιοφωνική πρόσβαση μικρής εμβέλειας μέσω της ζώνης συχνοτήτων με άδεια. Είναι plug-and-play και επιτρέπουν την ad hoc ανάπτυξη έως ιδιοκτήτες σπιτιών ή επιχειρήσεων σε περιοχές που τους ενδιαφέρουν, ιδιαίτερα σε hotspots με υψηλές απαιτήσεις χρηστών ή σε όρια κάλυψης όπου η απόδοση υποβαθμίζεται σημαντικά. Η κυκλοφορία εκφορτώνεται από Macrocells σε Femtocells, ενισχύοντας έτσι την κάλυψη. Τα Femtocells προσφέρουν μια οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του χωρικού φάσματος. Όπως αναφέρθηκε και πριν χρησιμοποιούνται σε σπίτια ή/και μικρές επιχειρήσεις και συμπληρώνει την υπάρχουσα πρόσβαση στο διαδίκτο.

Σύμφωνα με το [10], το picocell έχει υψηλότερη ισχύ και μεγαλύτερη ακτίνα κυψελίδας, γεγονός που το καθιστά πιο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερα ίχνη κάλυψης (> 100 μέτρα). Παραδείγματα είναι πυκνά «αστικά φαράγγια», υπαίθρια θεματικά πάρκα και ούτω καθεξής. Αυτές οι περιοχές χρειάζονται υψηλή χωρητικότητα, αλλά ένα υψηλό ποσοστό κίνησης είναι φωνή (που απαιτεί από κάθε κελί να συνδέει μεγαλύτερο αριθμό ενεργών χρηστών). Επίσης, το UE μπορεί να κινείται με ταχύτητα οδήγησης, οπότε απαιτούνται μεγαλύτερες ακτίνες κυττάρων και ταχύτερη παράδοση. Τα Picocells έχουν γενικά υψηλότερη ισχύ, υψηλότερη ισχύ επεξεργασίας και μπορούν να συνδέσουν μεγαλύτερο αριθμό ταυτόχρονων ενεργών χρηστών. Είναι συνήθως πιο ακριβά από τα femtocells, αλλά ταυτόχρονα καλύτερα και σεβρίζει υπαίθρια hotspot.

Στο [11], αναφέρεται ότι το εύρος ενός microcell είναι μικρότερο από δύο χιλιόμετρα, ενώ οι τυπικοί BSs μπορεί να φτάσουν έως και 35 χιλιόμετρα. Όπως τα picocells, τα microcells χρησιμοποιούνται συνήθως για να προσθέσουν χωρητικότητα δικτύου σε περιοχές με πολύ πυκνή χρήση τηλεφώνου, όπως σιδηροδρομικούς σταθμούς. Τα μικροκύτταρα τοποθετούνται συχνά προσωρινά κατά τη διάρκεια αθλητικών εκδηλώσεων και άλλων περιπτώσεων στις οποίες είναι γνωστό ότι απαιτείται επιπλέον χωρητικότητα σε συγκεκριμένη τοποθεσία εκ των προτέρων.

Τέλος, το [12] αναλύει ότι ένα macrocell παρέχει την μεγαλύτερη κάλυψη σε small cell δίκτυα. Συνήθως, οι κεραιές macrocell είναι τοποθετημένες σε πύργους ή/και ιστούς των κυψελωτών BSs. Αυτά μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες τοποθεσίες, όπως: Σε στέγες, Σε στύλους ή πύργους, Οποιοσδήποτε άλλες ψηλές κατασκευές όπως κτίριο και ακόμη και σε ορισμένες περιπτώσεις, στο έδαφος. Η μόνη προϋπόθεση για σωστή τοποθέτηση είναι ότι οι κεραιές πρέπει να βρίσκονται σε τοποθεσία υψηλότερη από τα γύρω κτίρια ή σε υψηλό έδαφος. Αυτό είναι απαραίτητο για την αποφυγή τυχόν παρεμβολών του μεταδιδόμενου σήματος. Διαφορετικά, η ποιότητα του δικτύου μπορεί να πέσει σοβαρά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

4.1 Ορισμος και Χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με το [13], το 5G ορίζεται ως το νέο τεχνολογικό πρότυπο για τα κινητά δίκτυα Πέμπτης Γενιάς. Οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησαν να το παρέχουν το 2019 και αποτελεί τον προκάτοχο των κινητών δικτύων 4G Στο [14], αναφέρεται ότι παρά την εξάπλωση του COVID-19, οι παρόχοι κινητής τηλεφωνίας, συνέχισαν την ανάπτυξη του δικτύου 5G, παγκόσμια. Κατά το τρίτο τρίμηνο του 2020 σημειώθηκε μία προσθήκη 11 εκατομμυρίων συνδρομών 5G. Επίσης, σημειώνεται ότι έως το τέλος του 2026, προβλέπονται 8,8 δισεκατομμύρια συνδρομές για κινητά συνολικά, εν των οποίων οι 3,5 δισεκατομμύρια θα αποτελούν συνδέσεις 5G, δηλαδή περίπου το 40%. Τα δίκτυα LTE προβλέπεται να παραμείνουν τα κυρίαρχα όπου πρόκειται να φτάσουν μέχρι τα 4,8 δισεκατομμύρια στο τέλος του 2021, ενώ μέχρι το 2026 θα ξεκινήσουν να πέφτουν γύρω στα 3,9 δισεκατομμύρια όπου όλο και περισσότεροι χρήστες θα μεταβούν στα δίκτυα 5G.

Οι προηγούμενες γενιές, αν και γνωστές, αξίζει να αναφερθούν. Αυτές είναι:

- 1G Networks: Βασίζονταν σε αναλογικά ραδιοσυστήματα. Οι χρήστες μπορούσαν να πραγματοποιούν μόνο τηλεφωνικές κλήσεις, δεν μπορούσαν να στέλνουν ή να λαμβάνουν μηνύματα κειμένου. Για να γίνει πραγματικότητα, έπρεπε να χτιστούν κυψελωτοί BSs σε όλη τη χώρα. Έτσι, η κάλυψη σήματος θα μπορούσε να επιτευχθεί από μεγαλύτερες αποστάσεις. Ωστόσο, το δίκτυο ήταν αναξιόπιστο και αντιμετώπισε ορισμένα ζητήματα ασφαλείας, όπως συνεχές παρεμβολές από άλλα ραδιοσήματα, παραβιάσεις λόγω έλλειψης κρυπτογράφησης, κ.α.
- 2G Networks: Το δίκτυο 1G δεν ήταν τέλειο, αλλά παρέμεινε μέχρι το 1991 όταν αντικαταστάθηκε με το 2G. Αυτό το νέο δίκτυο κινητής

τηλεφωνίας λειτουργούσε με ψηφιακό σήμα, όχι αναλογικό, το οποίο βελτίωσε σημαντικά την ασφάλειά του αλλά και τη χωρητικότητά του. Στο 2G, οι χρήστες μπορούσαν να στείλουν μηνύματα SMS και MMS (αν και συχνά χωρίς επιτυχία) και όταν το GPRS εισήχθη το 1997, οι χρήστες μπορούσαν να λαμβάνουν και να στέλνουν μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

- **3G Networks:** Το 3G ήταν πολύ πιο γρήγορο από τις προηγούμενες γενιές και μπορούσε να μεταδώσει μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων. Έδωσε την δυνατότητα στους χρήστες να κάνουν βιντεοκλήση, να μοιραστούν αρχεία, να σερφάρουν στο Διαδίκτυο, να παρακολουθήσουν τηλεόραση στο διαδίκτυο καθώς και να παίξουν διαδικτυακά παιχνίδια στα κινητά τους για πρώτη φορά.
- **4G Networks:** Είναι πέντε φορές πιο γρήγορα από το δίκτυο 3G και μπορεί (θεωρητικά) να παρέχει ταχύτητες έως και 100Mbps. Μπορεί να προσφέρει συνδεσιμότητα για tablet και φορητούς υπολογιστές καθώς και για smartphone. Πλέον οι χρήστες μπορούν να βιώσουν αυξημένη ταχύτητα και ως συνέπεια λιγότερες καθυστερήσεις, υψηλότερη ποιότητα φωνής, εύκολη πρόσβαση σε υπηρεσίες ανταλλαγής άμεσων μηνυμάτων και κοινωνικά μέσα και να κάνουν ταχύτερες λήψεις.

4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το εύρος ζώνης είναι το ποσό του "χώρου" που διατίθεται για άτομα που χρησιμοποιούν δεδομένα για λήψη αρχείων, προβολή σελίδων στο Διαδίκτυο και παρακολούθηση βίντεο. Όσο λιγότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης, τόσο πιο αργά θα λειτουργούν όλες οι συσκευές.

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της νέας πέμπτης γενιάς ασύρματης τεχνολογίας είναι ότι θα υπάρχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης στα δίκτυα δεδομένων εταιρειών. Αυτό σημαίνει ότι οι άνθρωποι δεν θα αισθάνονται ότι αγωνίζονται για δεδομένα με όλους τους άλλους χρήστες όταν εισέρχονται σε πολυσύχναστους χώρους, όπως αθλητικούς χώρους και αεροδρόμια. Με περισσότερο εύρος ζώνης διαθέσιμο, οι χρήστες θα μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν αυτό το εύρος ζώνης για

να κάνουν περισσότερα με τις συσκευές τους, καθιστώντας τις πιο ευέλικτες από ποτέ.

Με περισσότερα άτομα να μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτό το αυξημένο εύρος ζώνης, ορισμένοι ενδέχεται να ανησυχούν για τις ταχύτητές τους σε δίκτυο 5G. Αυτό θα είναι πρόβλημα του παρελθόντος, καθώς τα άτομα που χρησιμοποιούν ένα δίκτυο 5G θα μπορούν να περιηγούνται στον Ιστό, να κατεβάζουν αρχεία, ακόμη και να μεταδίδουν βίντεο με ταχύτητες. Αυτό δεν θα είναι πρόβλημα με τα δίκτυα 5G. Λόγω του αυξημένου εύρους ζώνης, οι χρήστες θα μπορούν να το χρησιμοποιούν περισσότερο χωρίς να συσσωρεύουν άλλους χρήστες. Με περισσότερο από το δίκτυο αφιερωμένο σε κάθε μεμονωμένη έξυπνη συσκευή, οι έξυπνες συσκευές θα μπορούν να λειτουργούν γρηγορότερα από ποτέ.

Πρώιμες έρευνες σχετικά με την τεχνολογία 5G δείχνουν ότι οι έξυπνες συσκευές που λειτουργούν σε ένα δίκτυο 5G ενδέχεται να μπορούν να λειτουργούν σε ταχύτητες που είναι χιλιάδες φορές γρηγορότερες από ότι σε ένα δίκτυο 4G. Με την αρχική ανάπτυξη έξυπνων συσκευών, εργασίες που θα μπορούσαν να εκτελεστούν μόνο σε επιτραπέζιο ή φορητό υπολογιστή στο παρελθόν θα μπορούσαν ξαφνικά να εκτελεστούν σε μια έξυπνη συσκευή, όπως η ηλεκτρονική αλληλογραφία και η περιήγηση στον ιστό.

Καθώς οι ταχύτητες δικτύου έχουν αυξηθεί, όλο και περισσότερες εργασίες μεταβαίνουν από τον κόσμο των υπολογιστών στον κόσμο των έξυπνων συσκευών. Με τις αυξανόμενες ταχύτητες δικτύου, αυτό θα μπορούσε να ανοίξει νέες πόρτες για τεχνολογία έξυπνων συσκευών που ενδέχεται να μην ήταν διαθέσιμες.

Μερικά παραδείγματα είναι αυτοκίνητα τα οποία θα οδηγούν μόνα τους και θα μπορούν λόγω της αυξημένης ταχύτητας και του χαμηλού latency, να επικοινωνούν μεταξύ σε πραγματικό χρόνο έτσι ώστε να εξασφαλιστεί το γεγονός ότι δεν θα γίνει κάποιο ατύχημα. Στην συνέχεια, αναφέρουμε και το γεγονός ότι θα επιτρέπεται σε χειρουργούς να κάνουν εγχειρήσεις εξ αποστάσεως, με χρήση ρομποτικών εξαρτημάτων. Επιπλέον θα γίνουν τεράστιες βελτιώσεις σε ότι αφορά το virtual reality, όπου πλέον ο κάθε χρήστης θα μπορεί να βιώσει μία εικονική πραγματικότητα πιο αληθινή απ'ότι ποτέ.

Όπως κάθετι, και τα δίκτυα 5G έχουν μειονεκτήματα έναντι των προηγούμενων γενιών. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των 3G BS ήταν ότι θα

μπορούσαν να καλύψουν τεράστια περιοχή με σχετικά λίγα κελιά. Αυτό συμβαίνει επειδή το δίκτυο δεν απαιτεί τόσο εύρος ζώνης, που σημαίνει ότι τα δίκτυα έπρεπε να αναπτύξουν λιγότερα κελιά. Όταν η τεχνολογία εξελίχθηκε σε δίκτυα 4G, τα κελιά παρήγαγαν περισσότερο εύρος ζώνης, πράγμα που σημαίνει ότι η ακτίνα κάλυψης κάθε κυψέλης ήταν μικρότερη. Οι χρήστες μπορεί παρατηρήσουν ότι η κάλυψή τους μπορεί να μειωθεί απ'ότι στο δίκτυό 3G. Καθώς το δίκτυο 5G κυκλοφορεί, αυτή η τάση θα συνεχιστεί. Απαιτούνται περισσότεροι πύργοι κυψέλης για την παραγωγή αυτού του τεράστιου εύρους ζώνης, επειδή τα κελιά δεν μπορούν να καλύψουν τόσο χώρο όσο ένα κελί 3G ή 4G. Επειδή θα πρέπει να διατεθούν περισσότερα κελιά, οι χρήστες 5G πρέπει να περιμένουν ότι η κάλυψη τους ενδέχεται να μην είναι τόσο διαδεδομένη στην αρχή.

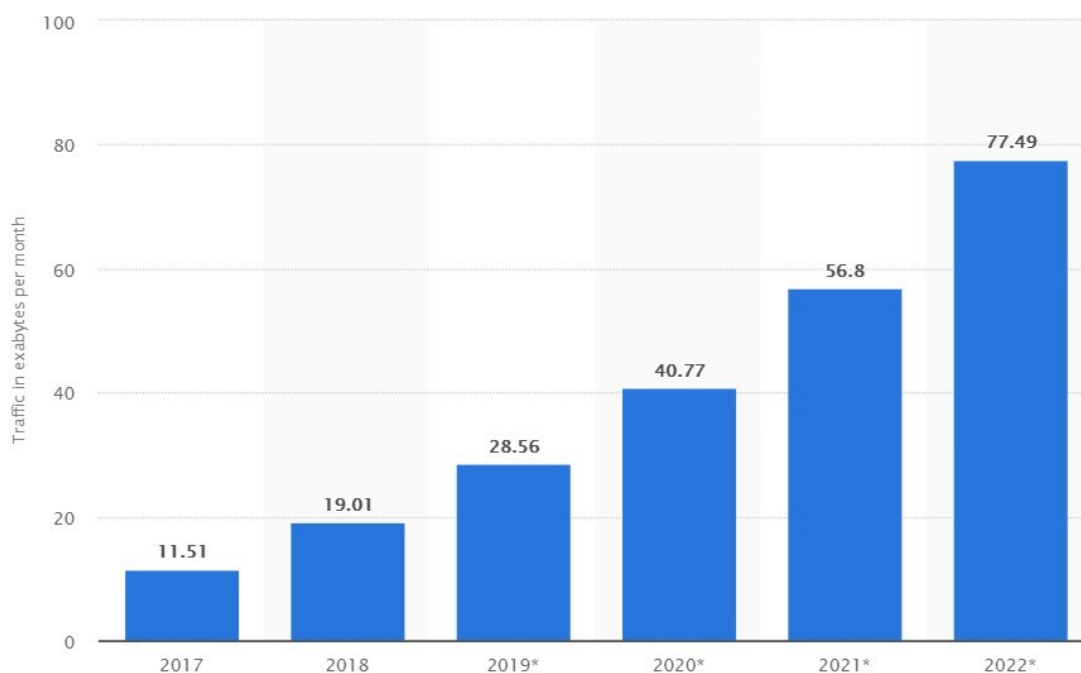
Ακόμη ένα μειονέκτημα είναι ότι ραδιόφωνα, BSs, ακόμη και δορυφόροι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ραδιοσυχνότητες. Η συχνότητα μετράται σε Hz και οι ραδιοσυχνότητες τείνουν να λειτουργούν στην περιοχή GHz. Οι πρώτες αναφορές στο δίκτυο 5G δείχνουν ότι αυτό το δίκτυο πρόκειται να μεταδώσει τα δεδομένα του στο εύρος περίπου 6 GHz. Δυστυχώς, αυτό το εύρος ραδιοσυχνοτήτων είναι ήδη γεμάτο από άλλα σήματα, όπως δορυφορικές συνδέσεις. Με πολλούς τύπους σημάτων που λειτουργούν στην περιοχή των 6 GHz, αναρωτιόμαστε εάν ο υπερπληθυσμός θα δημιουργήσει πρόβλημα ή όχι καθώς οι άνθρωποι προσπαθούν να μεταδώσουν τα σήματα δεδομένων τους σε αυτήν τη συχνότητα. Ο χρόνος θα δείξει, αν αυτό αποτελέσει πρόβλημα, καθώς αυτή η συχνότητα δικτύου αρχίζει να εξαπλώνεται.

4.3 Συνδεση 5G με Small Cells

Για να γίνει το όραμα του 5G πραγματικότητα, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας, έχουν επιλέξει τα small cells ως μία από τις καλύτερες λύσεις. Σύμφωνα με το [15] εκτιμάτε ότι θα υπάρχουν 800.000 small cells στις ΗΠΑ έως το 2026. Θα χρησιμοποιήσουν τα small cells για να προσθέσουν χωρητικότητα δεδομένων σε περιοχές κυκλοφοριακής συμφόρησης. Ως αποτέλεσμα, αναμένεται να αυξηθούν τα ραδιοκύμματα ανά συνδρομητή και οι συνδρομητές να έχουν μία βελτιωμένη ποιότητα σήματος. Η μικρότερη απόσταση μεταξύ ραδιοφωνικών τοποθεσιών συμβάλλει επίσης στην καταπολέμηση της μικρής εμβέλειας σήματος υψηλότερης συχνότητας ραδιοφάσματος 5G.

Τα small cells έχουν γίνει όλο και πιο κοινά τα τελευταία πέντε χρόνια για τη βελτίωση τόσο της κάλυψης όσο και της χωρητικότητας του δικτύου. Η αρχική προτεραιότητα για τους παροχείς στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης κυψελοειδών δικτύων ήταν η ευρεία κάλυψη σήματος και η παροχή ενός ελάχιστου επιπέδου υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας στον μεγαλύτερο δυνατό αριθμό πελατών. Μεγάλες και υψηλής ισχύος κυψελοειδείς ραδιοφωνικές macrocells BSs κατασκευάστηκαν σε περιοχές με τον μεγαλύτερο αριθμό πιθανών πελατών. Αυτό οδήγησε στην πρόωρη ανάπτυξη σε αστικές περιοχές αλλά και σε καθυστερημένη ανάπτυξη σε αγροτικές περιοχές. Στη συνέχεια, ο αριθμός των ιστότοπων αυξήθηκε με την πάροδο του χρόνου καθώς επεκτάθηκε η κάλυψη. Σήμερα, η προτεραιότητα των επενδύσεων σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι η αύξηση της χωρητικότητας που οφείλεται στις υπηρεσίες δεδομένων.

Η ζήτηση και η χωρητικότητα δεδομένων για κινητά έχουν αυξηθεί με εκθετικό ρυθμό για τρεις δεκαετίες. Η Εικόνα 6 δείχνει την παγκόσμια ανάπτυξη δεδομένων κινητής τηλεφωνίας σύμφωνα με το [16]. Η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας έχει αυξηθεί κατά 500% περίπου από το 2017. Αυτή η ζήτηση για δεδομένα έχει οδηγήσει σε τεράστια επέκταση χωρητικότητας στο δίκτυο καθ'όλη την εποχή της 4G. Αναμένεται συνεχής αύξηση ~ 40% ετησίως καθώς ο κλάδος κινείται προς το 5G, την πέμπτη γενιά τεχνολογίας κυψελοειδούς δικτύου.



Εικόνα 6: Αύξηση δεδομένων ανα χρονιά [17]

Η ασύρματη τεχνολογία 5G, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ανοίγει τον δρόμο, για υψηλότερη χωρητικότητα δεδομένων, με eMBB ως μία από τις κύριες περιπτώσεις χρήσης του προτύπου 5G. Η τεχνολογία 5G βελτιώνει την χωρητικότητα δεδομένων χρησιμοποιώντας νέο ραδιοφάσμα. Το ραδιοφάσμα όμως είναι ένας περιορισμένος πόρος και οι άδειες έχουν υψηλό κόστος.

Η προσθήκη ραδιοτοποθεσιών είναι πιο ευέλικτη. Ενώ είναι επίσης ακριβό και πάλι απαιτεί έγκριση από τις δημοτικές αρχές, οι ραδιοτοποθεσίες μπορούν να προστεθούν όταν απαιτείται, υπό τον έλεγχο του διαχειριστή δικτύου. Οι παροχές προσθέτουν συνεχώς, για να καλύψουν την αυξημένη ζήτηση.

Επομένως, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Πρώτα είναι η περιορισμένη κάλυψη που συμβαίνει όταν ο αριθμός των ιστότοπων έχει οριστεί για κάλυψη και όχι χωρητικότητα. Στην συνέχεια έχουμε το θέμα του περιορισμένου φάσματος. Συμβαίνει όταν το φάσμα είναι πολύ περιορισμένο και ο αριθμός των ραδιοτοποθεσιών αυξάνεται για να ανταποκρίνεται στην χωρητικότητα δεδομένων. Τέλος, έχουμε το πρόβλημα του ελάχιστου κόστους, όπου πρέπει να βεθεί λύση αντιστοιχίας του φάσματος με τον αριθμό των ιστότοπων, που επιφέρει το χαμηλότερο κόστος.

Το κόστος ανάπτυξης νέων ιστότοπων παραμένει ένα σοβαρό θέμα για τους πάροχους. Η λύση είναι για ακόμη μία φορά τα small cells, τα οποία μειώνουν το κόστος του ιστότοπου. Οι κύριοι παράγοντες κόστους σε αυτά τα δίκτυα είναι η διανομή των ινών και ισχύος και οι εναλλακτικές λύσεις παρέχουν περαιτέρω μεγάλη εξοικονόμηση στο κόστος δικτύου. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ ιστότοπων μειώνεται σημαντικά, πράγμα που επιτρέπει τη χρήση ενός ευρύτερου φάσματος φάσματος χαμηλότερου κόστους.

Συνοπτικά, η συνεχής αύξηση της κίνησης δεδομένων οδηγεί στην ανάγκη επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου, επομένως η προσθήκη ραδιοτοποθεσιών είναι αναπόφευκτη. Εδώ εισέρχονται τα small cells για να παρέχουν μια οικονομική λύση. Για να αυξηθεί η χωρητικότητα, μία ιδέα είναι η προσθήκη νέων ζωνών φάσματος. Αυτό απαιτεί όμως πιο πυκνές ραδιοτοποθεσίες. Τέλος, ως προς το οικονομικό κομμάτι, η χρήση των small cells για την επέκταση της χωρητικότητας, επιτυγχάνουν το χαμηλότερο κόστος με έναν ισορροπημένο συνδυασμό αυξημένου

φάσματος και αυξημένων ραδιοτοποθεσιών. Αυτοί οι ισχυροί βασικοί λόγοι εξηγούν γιατί τα small cells θα είναι ένα σημαντικό μέρος των δικτύων 5G.

4.4 Προκλήσεις στο Μέλλον

Στο [18], τα small cells πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να χωράνε στον διαθέσιμο χώρο. Αυτό μπορεί να είναι για παράδειγμα η κορυφή μίας λάμπας στον δρόμο, οι στέγες ορισμένων κτιρίων ή οι φωτεινοί σηματοδότες. Αυτό δημιουργεί περιορισμούς στο σχεδιασμό του συστήματος. Έτσι, ένας βασικός στόχος σχεδιασμού είναι αυτά τα συστήματα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα.

Η απαγωγή θερμότητας ολόκληρου του συστήματος πρέπει επίσης να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη για ανάπτυξη σε εξωτερικούς χώρους, ιδίως λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι πρέπει να είναι μικρά σε μέγεθος. Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί ένα σύστημα small cells πρέπει να είναι μικρότερα και να εξάγουν πολύ χαμηλή θερμότητα. Επειδή ενδέχεται να απαιτείται εφεδρική μπαταρία σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι κρίσιμο το σύστημα να μπορεί να αλλάξει σε battery mode σε διακοπή ρεύματος. Επιπλέον, η μόνωση και η προστασία έναντι της τάσης και του ρεύματος πρέπει να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό για να διασφαλιστεί ότι αυτά τα συστήματα είναι ανθεκτικά και μακροχρόνια.

Τα small cells συνήθως δεν έχουν ανεμιστήρες ή άλλη ενεργή ψύξη ενσωματωμένη στο σχεδιασμό. Τα εξαρτήματα του συστήματος πρέπει να έχουν πολύ χαμηλές ιδιότητες απαγωγής θερμότητας. Οι σύγχρονοι μικροεπεξεργαστές και τα FPGA είναι βελτιστοποιημένα για λειτουργίες χαμηλής ισχύος (που σχετίζονται άμεσα με την απαγωγή θερμότητας). Ωστόσο, ο ρυθμιστής που τροφοδοτεί διάφορες στάθμες τάσης μέσα στο σύστημα μπορεί να είναι μία από τις κύριες πηγές απαγωγής θερμότητας. Τα μικρά κελιά μπορούν να λειτουργήσουν είτε από πηγή τροφοδοσίας 24V, πηγή τροφοδοσίας 48V εάν το σύστημα τροφοδοτείται μέσω Ethernet ή από μακροχρόνια μπαταρία. Σε κάθε περίπτωση, το τροφοδοτικό πρέπει να παράγει αποτελεσματικά ρυθμιζόμενες στάθμες τάσης (5, 3 και 1.8 V) για τα ηλεκτρονικά του συστήματος, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος.

Τα 5G small cells πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστα, επειδή μία αστοχία του συστήματος σημαίνει απώλεια πρόσβασης στο δίκτυο 5G. Επίσης, πρέπει να συνεχίσουν να λειτουργούν πέρα κάθε συμβάντος σε επίπεδο συστήματος, όπως αιχμές τάσης και τυχαία shorts. Για να καταστεί ένα τέτοιο σύστημα απρόσβλητο,

πρέπει να διατεθούν επιπλέον οικονομικοί πόροι για να μπορεί να γίνει, κάτι που δεν συμφωνούν όλοι οι παρόχοι. Υπάρχει μια νέα κατηγορία ολοκληρωμένων συστημάτων προστασίας που παρέχει έξυπνη προστασία και προσαρμόζει πως χειρίζεται το σύστημα τέτοια συμβάντα. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι συσκευές επιβαρύνονται με επιπλέον κόστος, είναι πιθανώς η χαμηλότερου κόστους ασφάλεια για το σύστημα.

Για παράδειγμα, σκεφτείτε ένα συμβάν που προκαλεί ξαφνική αύξηση της τάσης. Συνήθως, μία TVS δίοδος στο σύστημα καταστέλει την τάση σε έως και 53.3 V. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που είναι συνδεδεμένα πρέπει να αντέχουν τουλάχιστον 53.3 V. Αν και σπάνια, μερικές φορές η εσφαλμένη καλωδίωση μπορεί να προκαλέσει βραχυκύκλωμα στην είσοδο ή ακόμα και ένα συμβάν αντίστροφης τάσης. Αυτό καταστρέφει το σύστημα και πρέπει να αντιμετωπιστεί πολύ γρήγορα. Ορισμένα συστήματα έχουν έναν πυκνωτή μαζικής αναμονής ή υπερκατασκευαστές που αντλούν υψηλό ρεύμα κατά την εκκίνηση. Αυτή η ακμή υψηλής τάσης μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους συνδετήρες ή ακόμα και να ανατινάξει τις ασφάλειες.

Περαιτέρω, σύμφωνα με το [19], τα small cells έχουν σχεδιαστεί για να τοποθετούνται σε δρόμους και οι τοπικές κυβερνήσεις θέλουν να παρέχουν ελκυστικά τοπία για τους κατοίκους τους. Η ικανοποίηση των ποικίλων τεχνικών και αισθητικών απαιτήσεων ενώ ενσωματώνοντας επίσης μελλοντικές και εξελισσόμενες τεχνολογίες μπορεί να είναι μια πρόκληση. Ενώ όλα τα μέλη θέλουν και προχωρούν γρήγορα στις αναπτύξεις των συστημάτων αυτών, είναι δύσκολο να συμβαδίσουν με τις τεχνικές απαιτήσεις, ειδικά για τους δήμους και τις δημόσιες υπηρεσίες που ενδέχεται να μην είναι τόσο εξοικειωμένοι με τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Εδώ εισέρχεται η κοινότητα σχεδιασμού και κατασκευής για να συνεργαστεί με το οικοσύστημα των ενδιαφερομένων για να σχεδιάσουν λύσεις που πληρούν τις σημερινές απαιτήσεις καθώς και μελλοντικές εκτιμήσεις.

Τα small cells απαιτούν περισσότερη ισχύ πέρα από αυτό που παρέχεται για φώτα δρόμου και ίνες. Αν και ακούγεται απλό, το να αναπτυχθεί ένα σύστημα εκεί μπορεί να μία δαπανηρή και μακρά διαδικασία. Οι δημόσιες υπηρεσίες κοινής ωφέλειας και οι δήμοι μπορούν να συνεργαστούν με άλλα έργα υποδομής, για τη μείωση του χρόνου και του κόστους μακροπρόθεσμα.

Στην συνέχεια, ένα σχετικά αχρησιμοποίητο φάσμα mmWave προσφέρει εξαιρετικές ευκαιρίες για αύξηση της χωρητικότητας των κινητών. Το mmWave (28/39 GHz) έχει 100-400 MHz, ενώ το CBRS (3.5 GHz) διαθέτει μεταξύ 10 MHz έως 40 MHz ελεύθερο φάσμα. Δυστυχώς όμως λίγα είναι γνωστά για τα χαρακτηριστικά διάδοσης καναλιών για δίκτυα πρόσβασης για κινητά σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Επομένως, είναι σημαντικό να αναφερθούν οι προκλήσεις ανάπτυξης small cells mmWave [20].

Πρώτα είναι η απώλεια διείσδυσης όπου είναι πραγματικός εχθρός για mmWaves και η απώλεια διείσδυσης μέσω δέντρων είναι ιδιαίτερα καταστροφική. Σε VHF και UHF, 50 μέτρα θόλων δέντρου προκαλούν απώλεια 15dBm έως 20dBm. λαμβάνοντας υπόψη ότι στα 28 GHz, μόνο 8 μέτρα από θόλο δέντρου μπορεί να οδηγήσει σε παρόμοια απώλεια.

Τα UHF και VHF επωφελούνται επίσης από την αύξηση του ύψους της κεραίας. Τα υψηλότερα ύψη συμβάλλουν στη μείωση του πρώτου αποκλεισμού της ζώνης Fresnel από τη γη. Ενώ στο mmWave, το πρώτο πλάτος των ζωνών Fresnel στο κέντρο του είναι τόσο στενό που ποτέ δεν εμποδίζεται από την επιφάνεια της Γης. Με απόσταση διάδοσης μικρότερη από 500 μέτρα, ύψη κεραίας από 9 έως και 12 μέτρα είναι αρκετά για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη mmWave.

Σε πυκνές αστικές περιοχές, η απώλεια διάθλασης είναι μια πιο σημαντική πρόκληση. Οι απώλειες περίθλασης μειώνονται με τη σωστή απόσταση από τη διαδρομή. Ωστόσο, ακόμη και μια μικρή παραβίαση στη διαδρομή μετάδοσης οδηγεί σε εκθετική αύξηση της απώλειας. Σκεφτείτε πώς το mmWave δεν μπορεί να διεισδύσει σε παράθυρα που έχουν υποστεί επεξεργασία με διαφανή μεταλλική μεμβράνη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες περίθλασης που κυμαίνονται από 40dBm έως 60dBm.

Αν και οι αντανάκλασεις και οι διαθλάσεις μειώνουν το εύρος των mmWave, διευκολύνουν επίσης την επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή. Με το μήκος κύματος να είναι τόσο μικρό, όλα τα εμπόδια της πόλης φαίνονται τεράστια, προκαλώντας «φιλικές» αντανάκλασεις, γεγονός που αυξάνει την ισχύ του σήματος. Επομένως απαιτείται ένας ακριβής σχεδιασμός με χρήση τρισδιάστατων μοντέλων για το έδαφος αλλά και για τα κτίρια για να μπορεί να γίνει καλύτερη πρόβλεψη τέτοιων

προβλημάτων. Επίσης με την καλύτερη σχεδίαση παρέχεται καλύτερη πρόβλεψη για απώλεια κατά την διάδοση, απώλεια κάλυψης αλλά και πυκνότητας του χρήστη.

Μετά υπάρχει και το θέμα της μοντελοποίησης των λειτουργιών. Οι ακριβείς γεωγραφικές καταστροφές αποτελούν βασικό ρόλο για τη σωστή μοντελοποίηση. Ως αποτέλεσμα, πρέπει να παρέχονται πολύ ακριβείς πληροφορίες στα εργαλεία σχεδιασμού. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να σχετίζονται με τις τοποθεσίες των δέντρων, τα κτίρια, τους δρόμους, τη στέγαση χαμηλής πυκνότητας, τη στέγαση υψηλής πυκνότητας, τις περιοχές στο κέντρο της πόλης με ψηλά κτίρια κ.λπ. Άλλες εισόδους περιλαμβάνουν περιλήψεις κτιρίων από αεροφωτογράφιση, καθώς και τρισδιάστατες απόψεις δρόμου, συμπεριλαμβανομένων των λεπτομερειών του κτιρίου και της βλάστησης. Οι προκλήσεις προκύπτουν όταν τα πλέγματα δεν ευθυγραμμίζονται.

Τέλος, κοιτάμε και το θέμα επιλογής τοποθεσίας. Τα small cells έχουν τις δικές τους προκλήσεις και περιορισμένες δυνατότητες λόγω του εύρους κάλυψης. Ωστόσο, σε ευνοϊκές περιπτώσεις χρήσης, όπου υπάρχει αρκετό εύρος ζώνης, τα small cells μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο. Αν βρεθεί η σωστή τοποθεσία με ένα χαμηλό κόστος, επισπεύεται ο προγραμματισμός του δικτύου. Επίσης, μειώνεται η ανάγκη για επισκέψεις πεδίου, ειδικά δεδομένης της τρέχουσας κατάστασης των κοινοτήτων που εξακολουθούν να επηρεάζονται από το COVID-19. Με τη συλλογή των πιο πρόσφατων και ενημερωμένων πληροφοριών, όπως εναέριων εικόνων, αρχείων καταγραφής κλήσεων κ.λπ., μια πλατφόρμα σχεδιασμού αποθέματος 5G μπορεί να μειώσει σημαντικά τους χρόνους ανακύκλωσης.

Αξίζει να αναφερθεί και το γεγονός της κατανάλωσης της ενέργειας που σημειώνεται στο [21]. Λόγω του μικρού εύρους κάλυψης των small cells, αναμένεται μία τεράστια αύξηση των συστημάτων αυτών για να μπορούν να καλυφθεί η ζήτηση. Μαζί με την αύξηση των small cells, θα σημειωθεί και μία αύξηση στην κατανάλωση της ενέργειας. Ωστόσο, σημειώνεται ότι η κατανάλωση ενέργειας σε ένα small cell είναι πολύ χαμηλότερη από ότι σε μια συμβατική κυψέλη. Όμως, ο μεγάλος όγκος small cells που θα αναπτυχθούν καθιστά δύσκολο να προβλέψουμε πόσο μεγάλη θα είναι η καθαρή κατανάλωση ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στην εργασία αυτή αναλύσαμε πρώτα τι είναι το small cell. Στην συνέχεια, εξηγήσαμε την κάθε λοιπή κατηγορία small cell ξεχωριστά, καθώς και τις λειτουργίες κάθε κατηγορίας και τις διαφορές μεταξύ τους. Περαιτέρω, εξηγήσαμε τι είναι τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς, τα πλεονεκτήματα που θα μας προσφέρουν αλλά και τα μειονεκτήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Τέλος, δείξαμε πως συνδέονται τα small cells με τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς και ποιες προκλήσεις πρέπει πρώτα να ξεπεραστούν πριν να ξεκινήσει η οποιαδήποτε διαδικασία.

Τα small cells είναι ιδανικά για να παρέχουν συνδέσεις 5G όπου χρειάζονται περισσότερο. Μπορούν να αξιοποιηθούν για να αντιμετωπίσουν ακόμη και τα πιο πολυσύχναστα περιβάλλοντα όπως τα στάδια και τους σιδηροδρομικούς σταθμούς, βελτιώνοντας τα οικονομικά για τους φορείς κινητής τηλεφωνίας και επομένως ανοίγοντας την πόρτα για πιο προσιτά σχέδια δεδομένων. Τα small cells απέχουν πολύ από ένα νέο φαινόμενο, έχοντας ξεκινήσει την ανάπτυξη με 3G και έχουν βελτιωθεί σημαντικά με 4G, είναι πλέον έτοιμα για σημαντική ανάπτυξη με 5G.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι παροχείς δικτύου κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να συμπεριλάβουν τα small cells ως βασικό στοιχείο της στρατηγικής τους για την ανάπτυξη δικτύου 5G, καθώς είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή αξιόπιστων και συνεπών εμπειριών για τους συνδρομητές τους. Με απλά λόγια, τα small cells 5G ισοδυναμούν με πιο αξιόπιστη κάλυψη, καλύτερη απόδοση φάσματος και βελτιωμένη συνολική απόδοση και χωρητικότητα δικτύου, δημιουργώντας μια ευκαιρία για μείωση του κόστους ανά bit. Φανταστείτε να κατεβάσετε μια ταινία HD 5 GB σε λίγα δευτερόλεπτα πριν ξεκινήσετε μια διεθνή πτήση, χωρίς να χρειάζεται να ανησυχείτε για τα όρια δεδομένων ή το υπερβολικό κόστος.

Η σημασία της συμπερίληψης small cells ως βασικού στοιχείου της στρατηγικής ανάπτυξης 5G φαίνεται περισσότερο από το 5G mmWave. Το mmWave διαθέτει τεράστιο δυναμικό για ταχύτητα, χωρητικότητα και χαμηλό latency, αλλά

δεν είναι πρακτικό να αναπτυχθεί μέσω macro δικτύου, δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά διάδοσης περιορίζουν την ικανότητα του mmWave να διεισδύσει σε τοίχους, δέντρα, κτίρια ή άλλες κατασκευές. Για να λάβουν οι καταναλωτές τα πλήρη οφέλη που υπόσχεται η mmWave τεχνολογία, θα απαιτηθούν πυκνές εφαρμογές small cells, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους όπου καταναλώνονται τα περισσότερα δεδομένα.

Όσον αφορά τις αναπτύξεις δικτύου 5G, δεν υπάρχει πραγματικά ένα μέγεθος για όλους. Τα small cells μπορούν να αναπτυχθούν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους και να χρησιμοποιηθούν για φορητή συνδεσιμότητα καθώς και σταθερή ασύρματη πρόσβαση (παρέχοντας internet υψηλής ταχύτητας σε σπίτια και χώρους, αντί για ίνα ή ομοαξονικά). Για την αντιμετώπιση διαφόρων περιπτώσεων χρήσης, οι αναπτύξεις small cell μπορούν να καλύπτουν κατανεμημένες ή/και κεντρικές αρχιτεκτονικές ανάπτυξης 5G. Είτε διανέμεται με ενσωματωμένα small cells είτε συγκεντρωτικά, παρέχοντας κάλυψη και χωρητικότητα 5G, τα small cells πρέπει να αποτελούν ουσιαστικό μέρος του σχεδιασμού δικτύου 5G για να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη εμπειρία για τους χρήστες.

Συνοψίζοντας, ήδη γνωρίζουμε τον ρόλο που έχουν παίξει τα small cells στα δίκτυα 4G. Τον ίδιο μεγάλο ρόλο αναμένουμε να δούμε ότι θα έχουν στα δίκτυα 5G. Ωστόσο, η επιτυχής ανάπτυξη και λειτουργία των small cells εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν σημαντικά ζητήματα. Υπάρχει ακόμη η ανάγκη για αντιμετώπιση προκλήσεων και εύρεση λύσεων για την επιτυχή ανάπτυξη δικτύων με small cells.

Μερικά παραδείγματα είναι, η ανάπτυξη χαρακτηριστικών αυτο-οργάνωσης. Αυτό οργάνωση, όπως αυτό αναλύεται στο [22] αναφέρεται ως μια τεχνολογία αυτοματισμού που έχει σχεδιαστεί για να κάνει τον σχεδιασμό, τη διαμόρφωση και τη διαχείριση των κινητών δικτύων απλούστερη και ταχύτερη. Επίσης τον συντονισμό παρεμβολών, όπου σύμφωνα με το [23] οι τεχνικές συντονισμού παρεμβολών μεταξύ κυττάρων προσφέρουν μια λύση εφαρμόζοντας περιορισμούς στο μπλοκ διαχείρισης ραδιοφωνικών πόρων, βελτιώνοντας ευνοϊκές συνθήκες καναλιού σε υποσύνολα χρηστών που επηρεάζονται σοβαρά από την παρεμβολή και επιτυγχάνοντας έτσι υψηλή φασματική απόδοση. Στο [24] αναλύεται ο ρόλος που θα παίξει η ενεργειακή απόδοση στα small cells δίκτυα ενώ στο [25] την επίδραση που θα έχει το δίκτυο 5G στην απόδοση του φάσματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell#cite_note-Micro_Markets-1
- [2] <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Small-Cells.html>
- [3] <https://www.thinksmallcell.com/FAQs/femtocell-history.html>
- [4] A. S. Chekkouri, A. Ezzouhairi, S. Pierre, “Vehicular Communications and Networks: Architectures, Protocols, Operation and Deployment”, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2015, Pages 193-221
- [5] M. D. Jundhare and A. V. Kulkarni, "An overview and current development of femtocells in 5G technology," 2016 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT), Pune, India, 2016, pp. 204-209, doi: 10.1109/ICAECCT.2016.7942583.
- [6] <https://www.landmarkdividend.com/microcells-technology-what-is-it-and-how-does-it-work/>
- [7] Faruk, Nasir & Ayeni, Adeseke & Muhammad, Mujahid & Abiodun, Olawoyin & Abdulkarim, A. & Agbakoba, J. & Olufemi, Moses. (2013). Techniques for Minimizing Power Consumption of Base Transceiver Station in Mobile Cellular Systems. International journal of sustainability (IJS). 2. 1-11.
- [8] N. Lemieux, M. Zhao, “Small Cells, Big Impact: Designing Power Solutions for 5G Applications”, Texas Instruments
- [9] C. Peng, Y. Li, Z. Li, J. Zhao and J. Xu, "Understanding and diagnosing real-world Femtocell performance problems," IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 1-9, doi: 10.1109/INFOCOM.2016.7524590.
- [10] “High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell?”, Fujitsu
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcell>

- [12] <https://www.intraway.com/blog/macro-cells-in-5g-revolutionizing-network-connectivity/>
- [13] 5G PPP Architecture Working Group (July 2016). "View on 5G Architecture"
- [14] Ericsson Mobility Report November 2020
- [15] <https://www.ctia.org/infrastructure-channel>
- [16] <https://www.statista.com/statistics/271405/global-mobile-data-traffic-forecast/>
- [17] <https://www.statista.com/statistics/271405/global-mobile-data-traffic-forecast/>
- [18] <https://www.evaluationengineering.com/industries/communications/wireless-5g-wlan-bluetooth-etc/article/21158044/enabling-5g-small-cells-with-efficient-power-solutions>
- [19] <https://www.thefastmode.com/expert-opinion/17505-overcoming-small-cell-deployment-challenges>
- [20] <https://www.isemag.com/2020/09/telecom-5g-small-cells-mmwave-cbrs-deployment-challenges/>
- [21] <https://spectrum.ieee.org/energywise/telecom/wireless/will-increased-energy-consumption-be-the-achilles-heel-of-5g-networks>
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Self-organizing_network
- [23] C. Kosta; B. Hunt; A. Quddus; R. Tafazolli (31 July 2013). "On Interference Avoidance through Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) based on OFDMA mobile systems". IEEE Communications Surveys and Tutorials. 15 (3): 973–995, doi:10.1109/SURV.2012.121112.00037
- [24] X. Ge, J. Yang, H. Gharavi and Y. Sun, "Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 5, pp. 184-191, May 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600788.
- [25] <https://www.telecompetitor.com/ctia-5g-will-provide-big-spectral-efficiency-gains/>