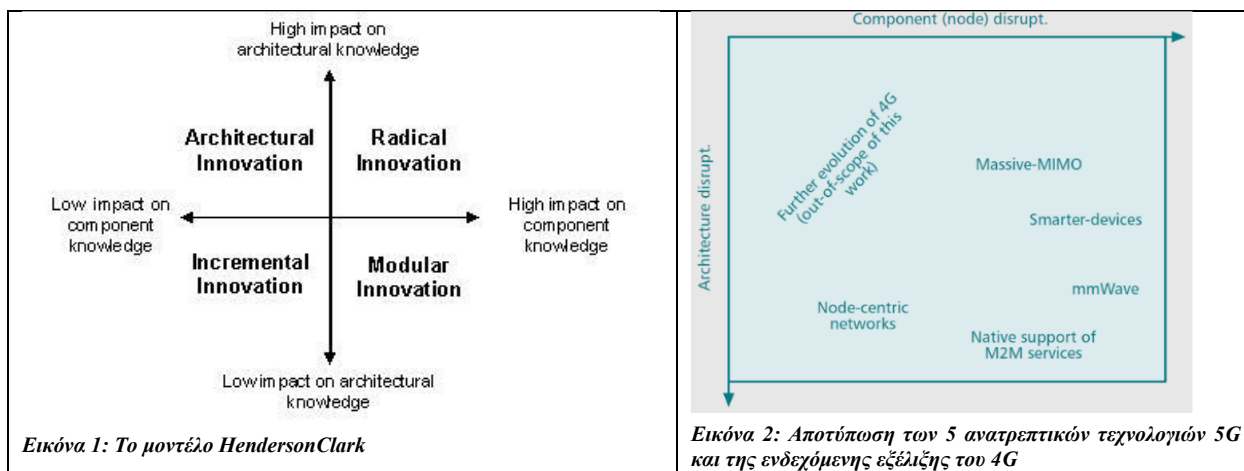


Five Disruptive Technology Directions For 5G by, Federico Boccardi, Robert W. Heath Jr., Angel Lozano, Thomas L. Marzetta, Petar Popovski

Η δημοσίευση με τίτλο “Five Disruptive Technology Directions For 5G” από τους Federico Boccardi, Robert W. Heath Jr., Angel Lozano, Thomas L. Marzetta, Petar Popovski εστιάζει στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} Γενιάς (5th Generation – 5G) πριν ακόμα αυτά ξεκινήσουν επίσημα (2013-2014) και βρίσκονταν ακόμα σε επίπεδο έρευνας. Παρουσιάζονται 5 ανατρεπτικές τεχνολογίες οι οποίες θα οδηγούσαν σε καθοριστικές αλλαγές όσων αφορά την τρέχουσα τότε αρχιτεκτονική των κυψελοειδών δικτύων και την ευρύτερη δομή των εξαρτημάτων που συνθέτουν το υλικό των δικτύων αυτών. Οι 5 τεχνολογίες που αναλύονται στην εργασία αυτή είναι: i) Device-centric architectures, ii) Millimeter wave (mmWave), iii) Massive multi-input-multiple-output (MIMO), iv) Smarter Devices, v) Native support for machine-to-machine (M2M) communication. Αναλύονται η γενική ιδέα πίσω από αυτές, η πιθανή προσφορά τους στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς καθώς και τυχόν εκκρεμότητες που υπολείπονται.

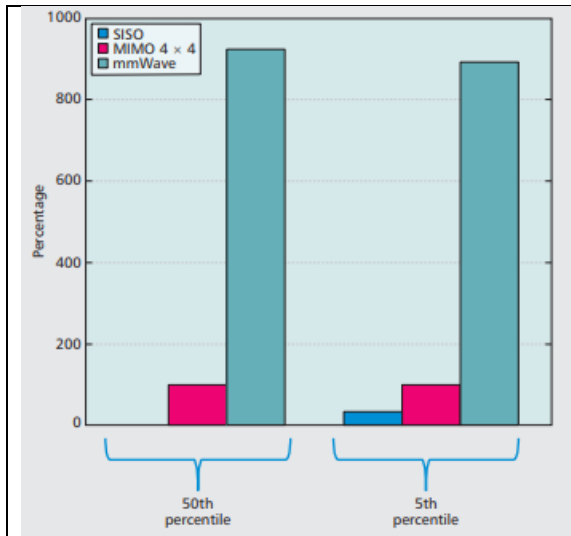
Κατά την εισαγωγή εκφράζονται οι ανησυχίες των συγγραφέων σχετικά με την έλευση του 5G, για το αν αυτή θα είναι μια απλή εξέλιξη στα τεκταινόμενα ή οι τεχνολογίες που το ακολουθούν θα επιφέρουν μια ενιαία αλλαγή στα πράγματα όπως τα ξέραμε έως σήμερα. Έπειτα, αξιοποιώντας το μοντέλο καινοτομίας Henderson-Clark (Εικόνα 1, Εικόνα 2), κατηγοριοποιούνται οι καινοτομίες από τις πιο μικρές στις πιο μεγάλες-ανατρεπτικές με γνώμονα τις όποιες αλλαγές εμπίπτουν επί των επιπέδων αρχιτεκτονικής και της components / hardware (υλικοδομής) και της γνώσης αυτών. Μνημονεύοντας τις απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση (low latency) και για μεγάλη χωρητικότητα (bandwidth), στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, παρουσιάζονται ονομαστικά και με μια σύντομη περιγραφή οι 5 τεχνολογίες κλειδιά οι οποίες φέρεται να φέρνουν μαζί τους αλλαγές στην αρχιτεκτονική και υλικοδομή όπως τη γνωρίζαμε μέχρι τότε. Ξεκινώντας από τις αρχιτεκτονικές με επίκεντρο τις συσκευές (**device centric architectures**) οι οποίες αναλόγως το σκοπό και τη προτεραιότητα μεταξύ διαφορετικών δικτυακών κόμβων δρομολογούν και τη ροή της πληροφορίας. Συνεχίζοντας στη τεχνολογία millimeter wave γνωστή και ως **mmWave**, στην οποία το φάσμα είναι άφθονο, αναφέρονται σχετικές προοπτικές για εφαρμογή στο 5G. Έπειτα, δίνεται η σκυτάλη στις κεραίες μαζικά πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (**Massive MIMO**), μια τεχνολογία όπου με χρήση πολλαπλών κεραίων, επιτυγχάνουμε κατευθυντική κάλυψη και περιορίζουμε παρεμβολές εντός και εκτός κυψέλης. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη συζήτηση όσων αφορά την «εξυπνάδα» (intelligence) την οποία θα πρέπει να διαθέτουν οι τερματικές συσκευές (**Smarter Devices**) και όχι η υποδομή και τέλος ξετυλίγονται νέοι μέθοδοι και ιδέες για την εγγενή υποστήριξη της επικοινωνίας συσκευή-σε-συσκευή **Machine-to-Machine (M2M)**.



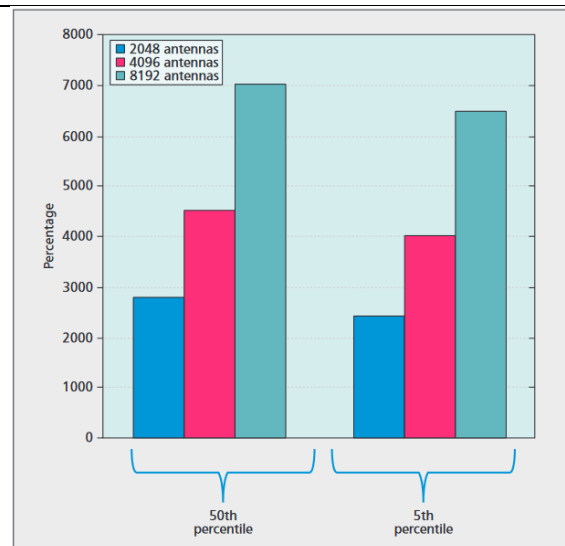
Στο κεντρικό κομμάτι της δημοσίευσης κάθε μια τεχνολογία αναλύεται εκτενέστερα από τους συγγραφείς.

Αρχιτεκτονικές με επίκεντρο τις συσκευές (device centric architectures): Αρχικά, παρουσιάζεται το πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο επικοινωνίας το οποίο αναφέρεται και ως κυψέλο-κεντρικό καθώς οι κυψέλες, στο συγκεκριμένο μοντέλο, αποτελούν το βασικό στοιχείο. Έπειτα οι συγγραφείς απαριθμούν νέες τάσεις οι οποίες βοηθούν στην αποκοπή από αυτό το μοντέλο και οδηγούν σε ένα όπου οι δικτυακές δομές προσαρμόζονται με βάση τη συσκευή και τη συνεδρία επικοινωνίας, οδηγώντας παράλληλα και σε αλλαγές στη τωρινή αρχιτεκτονική. Μερικές από αυτές τις τάσεις είναι: η ανάπτυξη σταθμών βάσης με διαφορετικές δυνατότητες μετάδοσης όπου διαφορετικός όγκος πληροφορίας περνάει από κάθε δικτυακό κόμβο επικοινωνίας, η χρήση έξυπνων συσκευών όπου η device-to-device (D2D) επικοινωνία και το smart caching όπου το βάρος «φεύγει» από το πυρήνα του δικτύου και μεταφέρεται στα περιφερειακά, συνύπαρξη διαφορετικών συχνοτήτων όπου η πληροφορία ελέγχου στέλνεται σε μικροκυματικές συχνότητες ενώ τα δεδομένα (payload data) σε mmWave, οι συνεργατικές επικοινωνίες όπως το Cooperative Multipoint (CoMP) ή η αναμετάδοση (relaying) που απαιτούν επαναδιαπραγματεύσεις των δικτυακών πόρων και τέλος η έλευση του C-RAN (Cloud Radio Access Networks) που προσφέρει τη δυνατότητα οικονομικοποίησης (virtualization) ώστε οι πόροι του υλικολογισμικού να μπορούν αν διανεμηθούν δυναμικά.

Επικοινωνίες mmWave: Η 2η τεχνολογία που καλούνται να ασχοληθούν οι συγγραφείς είναι η επικοινωνία στα mmWave. Αρχικά, γίνεται μια παρουσίαση της τρέχουσας κατάστασης κατά την οποία γίνεται χρήση του μικροκυματικού φάσματος το οποίο και διανέμεται ανάμεσα στους (τηλεπικοινωνιακούς) παρόχους. Καθίσταται σαφές, ότι πλέον υπάρχει κορεσμός σε αυτό το φάσμα όσες ενέργειες και αν ακολουθηθούν (πχ κοινή χρήση φάσματος ή εκ νέου εκμετάλλευση – επαναδιαπραγμάτευση) και αντ' αυτού αναδεικνύεται το μεγάλο φάσμα συχνοτήτων που υπάρχει διαθέσιμο στις mmWave συχνότητες. Γίνεται αναφορά σε μετρήσεις που έχουν γίνει όπου φαίνεται ότι και οι δύο (μικροκυματικό και mmWave) μοιράζονται παρόμοια γενικά χαρακτηριστικά όπως εξασθένηση μονοπατιού (path loss) αναλόγως την απόσταση ή την πιθανότητα επικοινωνίας εκτός οπτικού πεδίου. Οι συγγραφείς καθιστούν σαφές ότι οι mmWave συχνότητες είναι πιο επιρρεπείς σε παρεμποδίσεις (επικοινωνία εκτός οπτικού πεδίου). Οπότε πρέπει να μελετηθούν διάφορες μέθοδοι για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα όπως: διαχωρισμός των επιπέδων ελέγχου – δεδομένων, χρήση relaying και πιο «πυκνές» υποδομές. Στη συνέχεια παρουσιάζουν 2 μεθόδους για την βελτίωση των επικοινωνιών στις mmWave συχνότητες. Τη χρήση μεγάλων συστοιχιών από κεραιές για σταθερό διάφραγμα σε αντίθεση με τη χρήση πολύ-κατευθυντικών και τη χρήση προσαρμοστικών συστοιχιών με στενές δέσμες για μείωση παρεμβολών. Γίνεται γνωστό ότι για τις παραπάνω λύσεις απαιτούνται νέα RAN πρωτόκολλα καθώς και χρήση αλγόριθμων επεξεργασίας ειδικά στη λύση με των προσαρμοστικών συστοιχιών σε περίπτωση που οι δέσμες μπλοκάρονται ή οι κεραιές παρεμποδίζονται. Έπειτα, καταγράφονται επιπρόσθετοι περιορισμοί στα συστήματα mmWave ως προς την υψηλή κατανάλωση ενέργειας των analog-digital conversion (ADC) και digital-analog conversion (DAC) όπου χρειάζεται μεγάλη πρόοδος στην τεχνολογία των ημιαγωγών μιας και η συμβατική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται στη μικροκυματική τεχνολογία δε μπορεί να εφαρμοστεί και εδώ. Παρουσιάζονται 2 εναλλακτικές λύσεις για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό. Τέλος, μέσω μιας προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας οι μικροκυματικές και οι mmWave τεχνολογίες και τα αποτελέσματα κάνουν ξεκάθαρη την υπεροχή των mmWave όσον αφορά τον υψηλό ρυθμό δεδομένων (Εικόνα 3). Τέλος, γίνεται σαφές ότι όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η mmWave τεχνολογία απαιτεί ριζικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική και στην τρέχουσα υλικοδομή.



Εικόνα 3 Σύγκριση ρυθμού δεδομένων κοπέλης μεταξύ συστημάτων μικροκυμάτων που χρησιμοποιούν 50 MHz εύρους ζώνης (ενός χρήστη, μονής κεραίας και MIMO ενός χρήστη) και ένα σύστημα mmWave με εύρος ζώνης 500 MHz και έναν μόνο χρήστη. Τα αποτελέσματα δίνονται σε όρους κέρδους (%) με βάση την απόδοση του MIMO 4 × 4

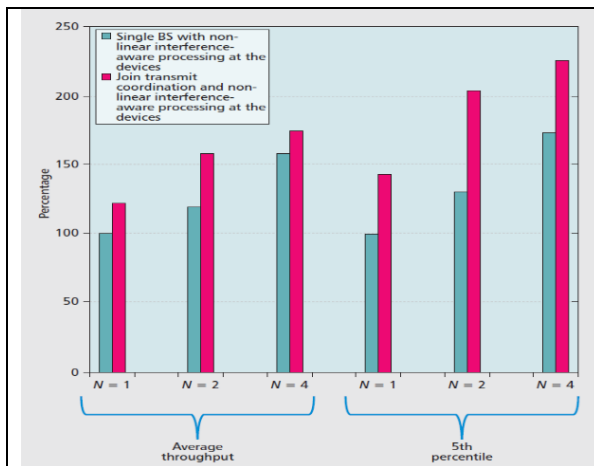


Εικόνα 4 Σύγκριση ρυθμού δεδομένων κοπέλης για μια εφαρμογή σταθερής πρόσβασης μαζικού (massive) MIMO. Μια συστοιχία κεραιών 2048, 4096 ή 8192, που χρησιμοποιεί 50 MHz και ακτινοβολεί συνολικά 120 W, εξυπηρετεί 1000 χρήστες που βρίσκονται τυχαία σε μια κοπέλη ακτίνας 6 km. Τα αποτελέσματα δίνονται σε όρους κέρδους (%) με βάση την απόδοση του MIMO 4 × 4

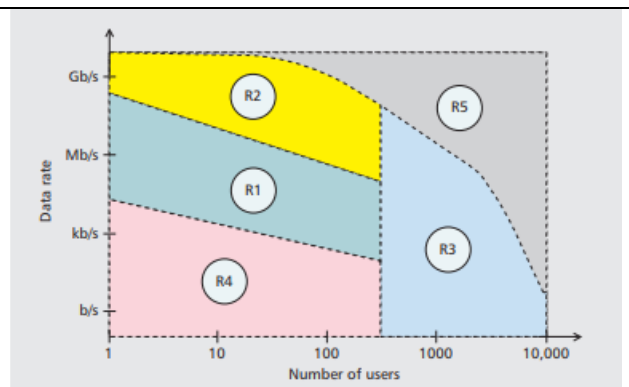
Μαζικά MIMO (Massive MIMO): Η 3η τεχνολογία που αναλύεται στη συνέχεια, ως ανατρεπτική για τα δίκτυα 5ης γενιάς είναι τα συστήματα κεραιών μαζικά πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (μαζικά MIMO). Γίνεται σαφές ότι στα συστήματα αυτά, όπου ο αριθμός των κεραιών υπερτερεί αυτού των συσκευών, τα κανάλια είναι σχεδόν ορθογώνια χωρίς να υπάρχει επίρεια του ενός στο άλλο και οι διαδικασίες πολυπλεξίας και από-πολυπλεξίας στο πεδίο του χώρου είναι σχεδόν άριστες. Ειδικότερα, υποστηρίζεται και αποτυπώνεται γραφικά ότι το κέρδος στη φασματική απόδοση είναι ανάλογο με τον αύξοντα αριθμό των κεραιών (Εικόνα 4). Έπειτα, οι συγγραφείς με βάση το μοντέλο Henderson-Clark συγκρίνουν το μαζικά MIMO με το 4G ως προς την επεκτασιμότητα στο επίπεδο των κόμβων και αναδεικνύουν την υπεροχή του πρώτου κυρίως λόγω της χρήσης μεγάλου αριθμού κεραιών για τις οποίες είναι δυνατή η εκτίμηση καναλιού (channel estimation) μέσω επικοινωνίας σε χρονοσχισμές/διαίρεσης χρόνου των καναλιών ανερχόμενης ζεύξης. Μια ακόμη διαφορά που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι τα μαζικά MIMO επιτρέπουν τη χρήση κεραιών συντονισμού χαμηλού κέρδους προς αντικατάσταση των Macro σταθμών, συμπεριλαμβανομένων συστοιχιών οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν σε προσόψεις κτιρίων ή σε δεξαμενές νερού σε αγροτικές περιοχές. Καταλήγοντας, οι συγγραφείς παραδέχονται την μεγάλη δυναμική και την υπεροχή των μαζικών MIMO αλλά αναφέρονται σε κάποιες προκλήσεις οι οποίες δε θα πρέπει να περνούν απαρατήρητες όπως για παράδειγμα η παρουσία κινήσεων των χρηστών η οποία αποτελεί μεγάλο περιορισμό για την εκτίμηση των καναλιών, καθώς και ότι πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες όσον αφορά τη χρήση οικονομικότερου και ενεργειακά πιο αποδοτικού υλικού.

Έξυπνες συσκευές (smarter devices): Στη 4η τεχνολογία γίνεται λόγος από τους συγγραφείς για πιθανότητες χρήσης συσκευών με πιο ενεργό ρόλο, από αυτόν που διαθέτουν σήμερα ονομάζοντάς τες «Έξυπνες Συσκευές», εστιάζοντας σε 3 τεχνολογίες που μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτές κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου 5G. Η 1^η από αυτές είναι η επικοινωνία **D2D** (Device-to-Device) όπου δίνεται έμφαση στην ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ συστεγαζόμενων συσκευών για αλληλεπίδραση

και διαμοιρασμό υλικού σε αντίθεση με τα φωνο-κεντρικά συστήματα. Επισημαίνουν, ότι για αυτού του είδους την επικοινωνία, εάν χρησιμοποιηθεί, συμβατική δικτυακή ζεύξη προκύπτουν δυσχέρειες όπως υψηλές καθυστερήσεις, υψηλή κατανάλωση και χαμηλές φασματικές αποδόσεις. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε καταστάσεις όπου η χρήση επικοινωνίας D2D θα ήταν ιδανική για χρήση σε επικοινωνία μεταξύ χρηστών σε επαυξημένη πραγματικότητα και ειδικά μελλοντικά στο baseband centralization και στο radio virtualization. Στη συνέχεια αναφέρονται σε ανοικτές προκλήσεις της επικοινωνίας D2D. Η 2η τεχνολογία είναι η τοπική προσωρινή αποθήκευση **Local Caching**, για την οποία οι συγγραφείς τονίζουν τη διαλείπουσα φύση της συνδεσιμότητας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και την ιδέα χρήσης των περιόδων συνδεσιμότητας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει η περιορισμένη ή καθόλου συνδεσιμότητα. Υπογραμμίζουν, τη μακροχρόνια επίγνωση αυτού του ζητήματος και την εξέταση ευκαιριακών στρατηγικών για τη βελτίωση της εμπειρίας χρήστη σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Υποδηλώνουν ότι, οι στρατηγικές προσωρινής αποθήκευσης είναι πιο κατάλληλες και πιο σημαντικές σε συστήματα με επίκεντρο τα δεδομένα σε σύγκριση με τα φωνο-κεντρικά. Τέλος, δίνουν έμφαση στα οφέλη της προσωρινής αποθήκευσης ως προς την αποτελεσματική και αποδοτική προσέγγιση μεταφοράς δημοφιλούς υλικού στα κινητά δίκτυα, εκμεταλλεύομενη την αυξημένη χωρητικότητα μνήμης και τις προόδους στις ασύρματες τεχνολογίες. Η τελευταία τεχνολογία είναι η ενεργή άρνηση παρεμβολών (**Active Interference Rejection**) μαζί με την κατευθυντική μετάδοση (**beamforming**) και την πολυπλεξία στο πεδίο του χώρου (**spatial multiplexing**). Οι συγγραφείς αποτυπώνουν σε γράφημα (Εικόνα 5) τα ποσοστά κέρδους έπειτα από την ενσωμάτωση της επίγνωσης των μη γραμμικών φαινομένων παρεμβολής εσωτερικά και εξωτερικά στην κυψέλη (*nonlinear, intra and inter-cluster interference-awareness*) σε συσκευές, με $N = 1, 2$ και 4 κεραίες. Οι συγγραφείς ενθαρρύνουν τους ερευνητές να δώσουν μεγάλη βάση στη συγκεκριμένη τεχνολογία.



Εικόνα 5: Κέρδη απόδοσης που προέκυψαν με την ενσωμάτωση επίγνωσης των μη γραμμικών φαινομένων παρεμβολής εσωτερικά και εξωτερικά στην κυψέλη (*nonlinear, intra and inter-cluster interference-awareness*) σε συσκευές, με $N = 1, 2$ και 4 κεραίες. Τα αποτελέσματα δίνονται σε όρους κέρδους (%) με βάση το MIMO 4×4



Εικόνα 6: Λειτουργικές περιοχές ως προς τον ρυθμό δεδομένων σε σχέση με το μέγεθος του πληθυσμού

Εγγενή υποστήριξη επικοινωνίας μηχανής-σε-μηχανή (active support for M2M communication): Στο τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό μέρος, οι συγγραφείς αναφέρουν κάποιες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται προκειμένου να υποστηρίζεται μια ευρεία γκάμα κρίσιμων υπηρεσιών μεγίστης σημασίας για M2M (Machine-to-Machine) επικοινωνία. Αρχικά, αναφέρεται η ανάγκη για: την ταυτόχρονη σύνδεση πολλαπλών συσκευών (αισθητήρες, έξυπνοι μετρητές κλπ), υψηλή αξιοπιστία

στις ασύρματες ζεύξεις για ασφάλεια, έλεγχο και παραγωγή και η επίτευξη χαμηλών καθυστερήσεων και λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο για κρίσιμες αναφορές και έλεγχο πχ σε περίπτωση κυκλοφοριακής κίνησης. Πιο αναλυτικά, στην Εικόνα 6 γίνεται μια αναπαράσταση αυτών των απαιτήσεων για υπηρεσίες αποτυπώνοντας των ρυθμό δεδομένων με το πλήθος των χρηστών. Αυτή η εικόνα δείχνει την τρέχουσα κατάσταση και πως πρέπει να επεκταθεί. Οι περιοχές R1 και R2 αποτυπώνουν το τρέχον εύρος τιμών ρυθμού δεδομένων το οποίο ελαττώνεται όσο αυξάνονται οι χρήστες και το εύρος ρυθμών που οι επιστήμονες θέλουν να φτάσουν έπειτα από τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης αντίστοιχα. Τα R3 και R4 αφορούν την ανάγκη για ταυτόχρονη σποραδική εκπομπή αισθητήρων με μικρά block δεδομένων και υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και προαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση αντίστοιχα. Από την συζήτηση και με αναφορά στο μοντέλο Henderson-Clark, οι συγγραφείς συμπεραίνουμε ότι η εγγενής υποστήριξη του M2M στο 5G απαιτεί ριζικές αλλαγές τόσο σε επίπεδο κόμβου όσο και σε επίπεδο αρχιτεκτονικής.

Συνοπτικά, η υποστήριξη επικοινωνιών M2M σε δίκτυα 5G απαιτεί ουσιαστικές αλλαγές τόσο σε επίπεδο κόμβου όσο και σε επίπεδο αρχιτεκτονικής. Αυτές οι αλλαγές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων μεθόδων κωδικοποίησης ειδικά όταν μιλάμε για σύντομα block δεδομένων, τη βελτιστοποίηση της σύζευξης μεταξύ επιπέδων δεδομένων και ελέγχου, τον επανασχεδιασμό της αρχιτεκτονικής του δικτύου και τη διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας για τη λειτουργικότητα της επικοινωνίας M2M σε δίκτυα 5G.