ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Τ.Ε.Ι. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε.

Τεχνολογίες «πράσινων» 5G Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών

Σπουδαστής: Λυκούργος Λεβεντζώνης

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Μποζαντζής Βασίλειος

Ευχαριστίες

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλειο Μποζαντζή για την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους λοιπούς **επιστημονικούς** και **εργαστηριακούς** καθηγητές και **δοικητικούς** υπαλλήλους του Τμήματος, για την βοήθεια και τη στήριξή τους στην οποιαδήποτε ακαδημαϊκή ανάγκη των φοιτητών.

Επιπρόσθετα, οφείλω να αφιερώσω την πτυχιακή μου εργασία στους γονείς μου που μου συμπαραστάθηκαν όλα τα χρόνια της φοίτησης μου στο Τ.Ε.Ι. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

"Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων.

Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δε μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας."

Όνομα και Επώνυμο Συγγραφέα (Με Κεφαλαία): ....

Υπογραφή (Ολογράφως, χωρίς μονογραφή): ....

Ημερομηνία (Ημέρα – Μήνας – Έτος): ....

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα εικόνων

Κεφάλαιο 1: ΠράσινηΔικτύωση

1.1 Τι είναι η Πράσινη Δικτύωση

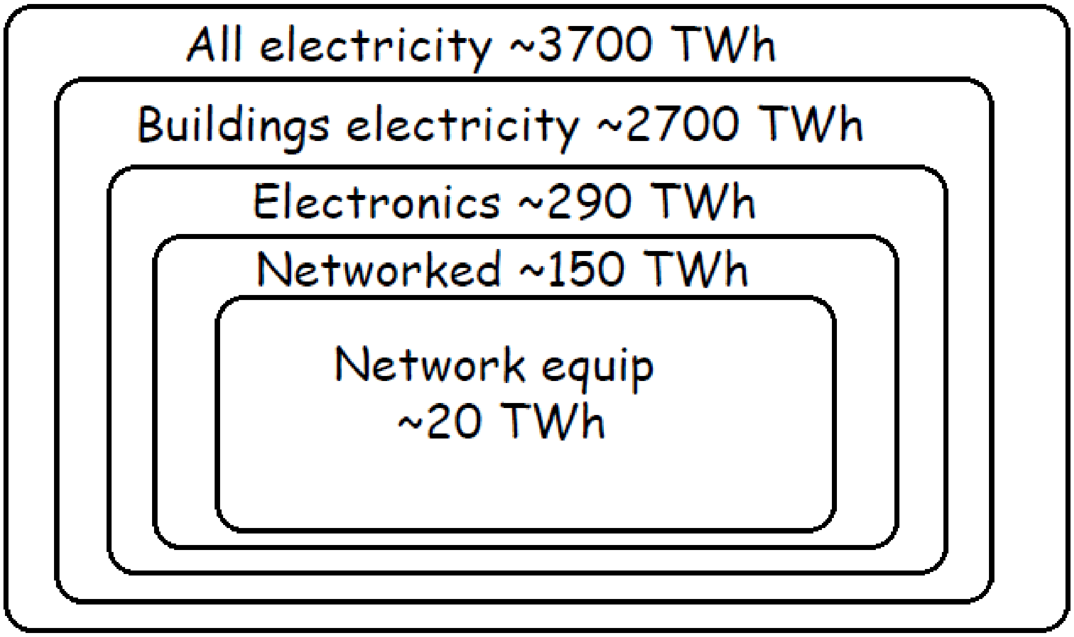
Την περασμένη δεκαετία σημειώθηκε μια ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων (wireless), προσφέροντας συνδεσιμότητα και άμεση πρόσβαση σε κάθε είδους πληροφορία στον τελικό χρήστη. Για να είναι αποδοτικό το νέο αυτό δίκτυο που δημιουργήθηκε, τέθηκε η ανάγκη για επαρκή και αποτελεσματικό εύρος ζώνης ενώ ταυτόχρονα, αυξήθηκαν οι απαιτήσεις όσον αφορά την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Ωστόσο, η εμφάνιση των ασύρματων δικτύων αύξησε κατά πολύ την κατανάλωση ενέργειας ενώ συνέβαλε αρνητικά στην μόλυνση του φυσικού περιβάλλοντος λόγω των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, ο τομέας της Πληροφορίας και της Επικοινωνίας (ΤΠΕ) είναι υπεύθυνος για την παραγωγή του 2 - 3% του συνολικού διοξείδιο του άνθρακα (Carbondioxide, CO_2), ενώ καταναλώνει το 3% της παγκόσμιας ενέργειας. Από την άλλη, οι εκτιμώμενες συνολικές εκπομπές CO_2 από την κινητή, ασύρματη και ενσύρματη επικοινωνία εκτιμάται ότι ανέρχεται στο 25-31% του συνολικού εκπεμπόμενου CO_2.[3, 4]

Οι περισσότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα σημερινά ασύρματα δίκτυα και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψηπαράγοντες μη ενεργειακά συναφείς, όπως η απόδοση (throughput), η ποιότητα της υπηρεσίας (QualityofServices, QoS),τη διαθεσιμότητα (availability), την επεκτασιμότητα (scalability) και άλλα. Η αύξηση των απαιτούμενων ενεργειακών πόρων και κατά συνέπεια η αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας είχε σαν αποτέλεσμα, δραματικές κλιματικές αλλαγές. Έτσι θεωρήθηκε αναγκαία η σχεδίαση πράσινων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων ώστε το δίκτυο να μπορεί να επεκτείνεται με τέτοιο τρόπο που να θεωρείται βιώσιμο. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσηςμε ταυτόχρονη μείωση του συνολικού κόστους. Έτσι, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου και τωνυποδομών του είναι το βασικό αντικείμενο έρευνας τόσο στην εκπαίδευση όσο και στην βιομηχανία, από διάφορους οργανισμούς, όπως οι IEEE, IETF και 3GPP. [3, 4]

Με τον όρο πράσινη δικτύωση (GreenNetworking) αναφερόμαστε στην επιλογή τεχνολογιών και προϊόντων δικτύωσης υψηλής ενεργειακής απόδοσης με στόχο την ελαχιστοποίηση της χρήσης πόρων όσο αυτό είναι δυνατό. Η πράσινη δικτύωση εμφανίστηκε και έχει σημειώσει μεγάλη ανάπτυξη κατά τον 21^{o} αιώνα λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που συλλέγονται και επεξεργάζονται κάθε δευτερόλεπτο της ημέρας. Η σχεδίαση αποτελεσματικών πράσινων δικτύων έχει σαν στόχο τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και την εξοικονόμηση ενέργειας, με αποτέλεσμα να έχει ισχυρή επιρροή τόσο στον οικονομικό όσο και στον περιβαλλοντικό τομέα αλλά και στον τομέα της δικτύωσης.[1, 2]

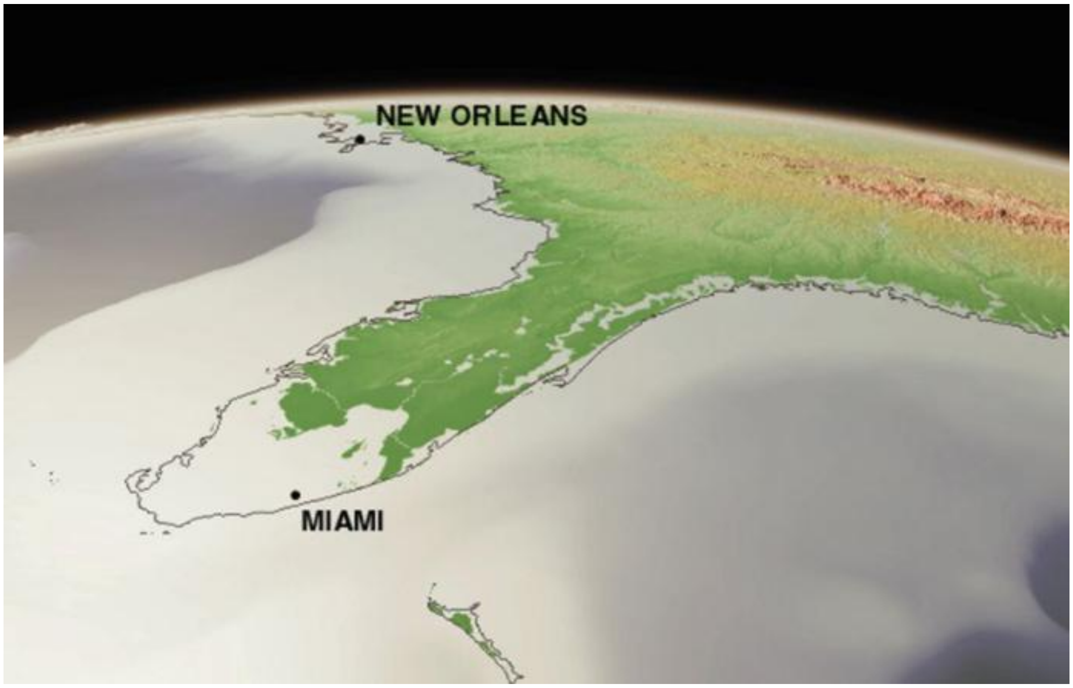
Υπάρχουν διάφορες πρακτικές για να επιτευχθεί αυτό, όπως για παράδειγμα, η χρήση virtualization, η τηλεργασίαή ακόμα και η αντικατάσταση του παλιού εξοπλισμού με νεότερο ο οποίος είναι ενεργειακά πιο αποδοτικός. Για να είναι δυνατόν να ορίσουμε ακριβώς τον όρο πράσινη δικτύωση θα πρέπει να ακολουθήσει μια ανάλυση από διαφορετικούς τομείς.[1]

Για να καταλάβουμε πόσο επιτακτική είναι η ανάγκη για πράσινη δικτύωση αρκεί να δούμε την ακόλουθη εικόνα. Στην εικόνα αυτή φαίνεται η συνολική δαπανηθείσαενεργεία, το 2006, στις ΗΠΑ. Όπως βλέπουμε, η συνολική ενεργεία που χρησιμοποιείται από τα δίκτυα και τον εξοπλισμό αυτών ξεπέρασε τα 170 TWh.[17]



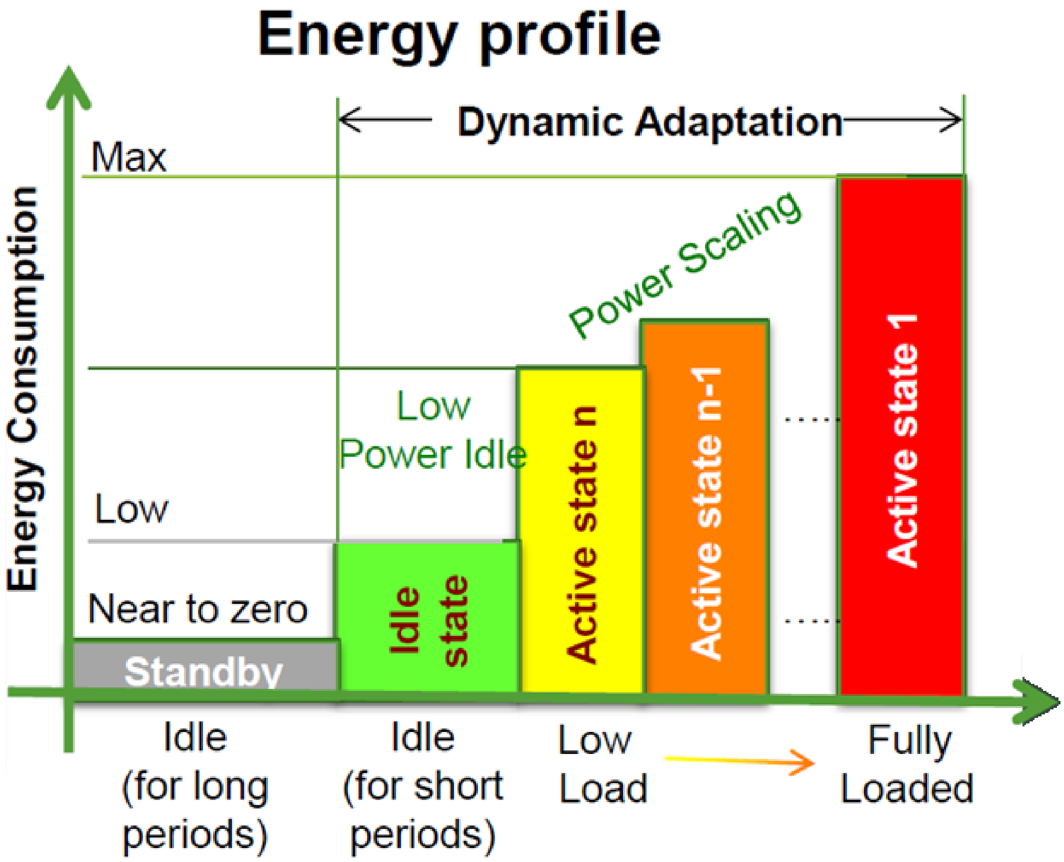
Εικόνα 1:Ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε συνολικά, το 2006, στις ΗΠΑ.
Πηγή: LawrenceBerkeleyNationalLaboratory (LBNL)

Από περιβαλλοντικής άποψη, στόχος της πράσινης δικτύωσης είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GreenhouseGas - GHG).Αυτό έχει αρκετές επιπτώσεις στην καθημερινή μας ζωή.Σύμφωνα με την ΕυρωπαϊκήΕπιτροπή για το Περιβάλλον,οι πρώτες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι ήδη ορατές στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο κόσμο. Ανάμεσα σε αυτές είναι η αύξηση της θερμοκρασίας, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα πλημμύρες και ξηρασίες, η μεταβολή στη συχνότητα των βροχοπτώσεων, το λιώσιμο των πάγων και η αύξηση της στάθμης των θαλασσών. Είναι φανερό, λοιπόν πως αν η εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου παραμείνουν στο σημερινό επίπεδο, οι επιπτώσεις θα είναι ακόμα πιο δραματικές στο άμεσο μέλλον μας. Στην ακόλουθη εικόνα, βλέπουμε την αύξηση στη στάθμη της θάλασσας, κατά το 2100, δεδομένων των σημερινών εκπομπών αερίων.[1, 2, 17, 14]



Εικόνα 2: Επίπεδο της θάλασσας το 2100, σε περίπτωση που συνεχιστούν οι υψηλές εκπομπές αερίων. [17]
Πηγή: U.N. IntergovernmentalPanelonClimateChange

Για να είναι αυτό εφικτό να αποφύγουμε όλες αυτές τις επιπτώσεις, ένα πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, είναι η χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα τωντηλεπικοινωνιών και της πληροφορικής. Εναλλακτικά, μία άλλη λύση είναι η επανασχεδίαση του υλικού (hardware) με στόχο την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας αλλά παράλληλα με το ίδιο επίπεδο απόδοσης. Για παράδειγμα, τα κέντρα δεδομένων και η υποδομή δικτύωσης τους περιλαμβάνει μηχανές υψηλής απόδοσης και υψηλής διαθεσιμότητας. Στην επανασχεδίαση του υλικού, μπορεί να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα υλικά όπως σιλικόνη για την αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας ενώ ταυτόχρονα να μειωθεί και η πολυπλοκότητα της συσκευής.Οι συσκευές μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται η δυνατότητα κλιμακωτής απόδοσης αλλά να προσφέρεται καιαδρανής λογική. Για παράδειγμα, θα ήταν αποδοτικό να προσφέρονταν δύο αδρανής καταστάσεις ανάλογα με το χρονικό διάστημα που η συσκευή παραμένει σε αυτή την κατάσταση.Η ενεργειακή απόδοση μίας τέτοιας συσκευής φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.Για να είναι όλα αυτά δυνατά, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, θα πρέπει ο σχεδιασμός του δικτύου να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνειδιακομηστή (proxy). [1, 2, 19]



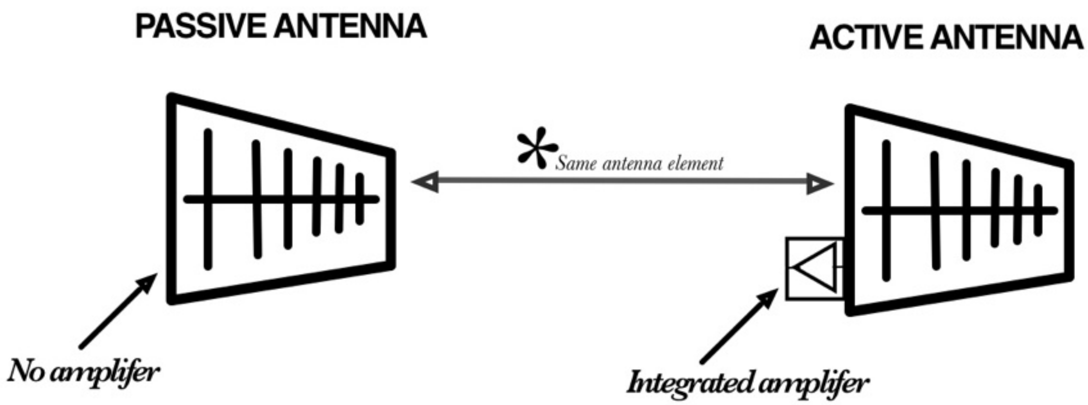
Εικόνα 3: Ενεργειακή απόδοση συσκευών κλιμακωτής απόδοσης και αδρανής λογικής. [19]

Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχτεί και με τον επανασχεδιασμότης αρχιτεκτονική και της τοπολογίας ενός δικτύου. Για παράδειγμα, η επανατοποθέτηση του εξοπλισμού σε νέα στρατηγικά σημεία, μπορεί να προσφέρει επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εμφανίζεται απώλεια ενέργειας όταν τα σημεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας είναι μακριά μεταξύ τους καθώς η ενέργεια εμφανίζει απώλειες όταν μεταφέρεται. Θα πρέπει επίσης να σκεφτούμε ότι η αποθήκευση και η επεξεργασία των δεδομένων γίνονται ολοένα και πιο τεράστια.[1, 2]

Ένας άλλος λόγος που τα κέντρα δεδομένων έχουν υψηλή κατανάλωση ενέργειας είναι λόγω της ανάγκης για ψύξη των ηλεκτρονικών συσκευώνπου χρησιμοποιούνται σε αυτά.Οι ισχυρές συσκευές κλιματισμού που χρησιμοποιούνται, επίσης καταναλώνουν ενέργεια για την ενίσχυση της λειτουργίας των κέντρων δεδομένων. Με την μεταφορά των κέντρων δεδομένων σε ψυχρότερα κλίματα μπορεί να μειωθεί σημαντικά αυτή η δαπάνη ενέργειας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ψύξη μπορεί να γίνει είτε χρησιμοποιώντας φυσικό νερό, όπως για παράδειγμα νερό από ποτάμια ή μέσω φρέσκου αέρα. Πρόκειται για μια νέα μέθοδο ψύξης που ονομάζεται chilled-liquidcooling.[1, 2, 4]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα, προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί το Καναδικό ερευνητικό κέντρο CANARIE, που με την χρήση virtualizationέχει μετεγκαταστήσει τα δίκτυα του σε περιοχές με διαθέσιμες πηγές ενέργειας.Άλλες εταιρίες κολοσσοί στον κλάδο της πληροφορικής, όπως ηGoogle κινούνται επίσης προς την ίδια κατεύθυνση. Η Google μετέφερε τους servers της στις όχθες του ποταμού Κολούμπια με στόχο την εκμετάλλευση της ενέργειας από το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο που υπάρχει εκεί. Επιπλέον η ροή του νερού του ποταμού χρησιμοποιείται σαν σύστημα ψύξης. Η Microsoft, με τη σειρά της, τοποθέτησε τους servers σε ανοιχτό χώρο για να επιτύχει τις ανάγκες για την ψύξη τους. Και τέλος, η Amazonμετακόμισε τα κέντρα δεδομένων της για επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας. Παρόλο που επιτυγχάνεταιεξοικονόμηση ενέργειας, μπορεί να υπάρξουν διάφορα περιβαλλοντικά θέματα: όπως για παράδειγμα, ο πολλαπλασιασμός των φυκιών πολλαπλασιασμό στον ποταμό Κολούμπια αλλά και η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.[1, 2]

Άλλες βελτιώσεις, για την καταναλωμένη ενέργεια μπορούν να γίνουν σε διάφορους τομείς. Μερικάπαραδείγματα είναι η χρήση υπερβολικά αποδοτικών ενισχυτών ισχύος στα σήματα μετάδοσης ή η χρήση ενεργώνκεραιών (activeantennas). Με το όρο ενεργή κεραία αναφερόμαστε σε κάθε κεραία με ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως τρανζίστορ και με ενσωματωμένους ενισχυτές σήματος. Σε αντίθεση, οι περισσότερες κεραίες αποτελούνται μόνο από παθητικά εξαρτήματα όπως μεταλλικές ράβδους, πυκνωτές και επαγωγής. Οι ενεργές κεραίες επιτρέπουν ευρύτερο εύρος συχνοτήτων (bandwidth) σε σχέση με αντίστοιχες παθητικές ακόμα και με μικρότερο μέγεθος. Οι ενεργές κεραίεςχρησιμοποιούνται όπου δεν είναι δυνατή η χρήση μιας μεγαλύτερης παθητικής κεραίας, όπως για παράδειγμα σε ένα φορητό ραδιόφωνοείτε σε μια προαστιακή κατοικημένη περιοχή που δεν επιτρέπει τη χρήση μεγάλων υπαίθριων κεραιών χαμηλής συχνότητας.Τέλος, η χρήσηαυτό-οργανωτικώνκινητών δικτύωνμε παθητικά συστήματα ψύξης, δυναμική κατανάλωση ενέργειας, εικονική και προγραμματιζόμενη δικτύωση, παραλληλισμό και digitalbaseband επεξεργαστές με μικρότερη κατανάλωση ενέργειαςείναι άλλη μία λύση προς αυτή την κατεύθυνση. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται μια παθητική και μία ενεργή κεραία. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε πρόκειται για δύο πανομοιότυπες κεραίες, μόνο που στην περίπτωση της ενεργής είναι προσαρτημένος ένας ενισχυτής σήματος.[2, 4, 16]



Εικόνα 4: Διαφορές μεταξύ μίας παθητικής και μίας ενεργής κεραίας. Οι ενεργές κεραίες είναι κοινές κεραίες με ενσωματωμένους ενισχυτές σήματος στη μονάδα.[16]
Πηγή: http://blog.rfvenue.com/2014/12/15/active-v-passive-anntennas

Η γεωγραφική μετεγκατάστασης των δικτύωναποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση και από οικονομικής άποψη. Η αγορά ενέργειαςπροσφέρει ασταθής και χρονικά μεταβαλλόμενα τιμές. Για παράδειγμα, οι τιμές μπορεί να είναι πολύ χαμηλές όταν εμφανίζεταιπλεόνασμα στην παραγωγή ενέργειας χωρίς να υπάρχει αντίστοιχη ζήτηση από τη πλευρά των πελατών, καθώς δεν είναι δυνατή η αποτελεσματική αποθήκευση της ενέργειας. Έτσι η Amazon αναζητά μέρη με σκοπό την μείωση των λειτουργικών δαπανώνπου σχετίζονται με την παροχή ενέργειας.[1]

Έχοντας όλα τα παραπάνω κατά νου, κανείς μπορεί να φανταστεί ότι τα φυσικά μηχανήματα μπορούν να «μετακινούνται» με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας. Με άλλα λόγια, κάθε στιγμή να τοποθετούνται στο βέλτιστο γεωγραφικό μέρος με βάση τη θερμοκρασία ή και το χρόνο.Για παράδειγμα, επιχειρήσεις με υψηλές απαιτήσεις σε CPU, μπορεί να λειτουργούν σε κάποιο ημισφαίριο ανάλογα με τους κύκλους νύχτας – μέρας αλλά και τις εποχές του χρόνου. Σκοπός αυτής της «τεχνολογικής μετανάστευσης» είναι η διατήρηση όλων των υπηρεσιών με ανοχή σε βλάβες και σφάλματα αλλά και η ασφάλεια των δεδομένων.[1]

Όλες οι προηγούμενες προτάσεις στοχεύουν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και δεν εξετάζουν τις πιθανές συνέπειες που μπορεί να υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον. Για να επέλθει αυτή η ισορροπία μεταξύ των οφελών των επιχειρήσεων αλλά και του φυσικού περιβάλλοντος θα πρέπει να υπάρξει ένα ρυθμιστικό σημείο. Αυτό μπορεί να επέλθει, για παράδειγμα, μέσω της νομοθεσίας. Μπορεί να υπάρξουν νόμοι που για παράδειγμα, επιβάλλουν φόρους σε κάποια επιχείρηση με βάση τις εκπομπές της σε αέρια θερμοκηπίου αλλά ταυτόχρονα να χρηματοδοτείται κάποια έρευνα προς την ενεργειακή απόδοση. [1]

Τέλος, από τεχνική άποψη, μέσω της πράσινης δικτύωσηςμπορεί να επιτευχθεί ένας τρόπος για μείωση της απαιτούμενης ενέργειας ώστε να εκτελέσει μια δεδομένη εργασία διατηρώντας το ίδιο επίπεδο απόδοσης.[1]

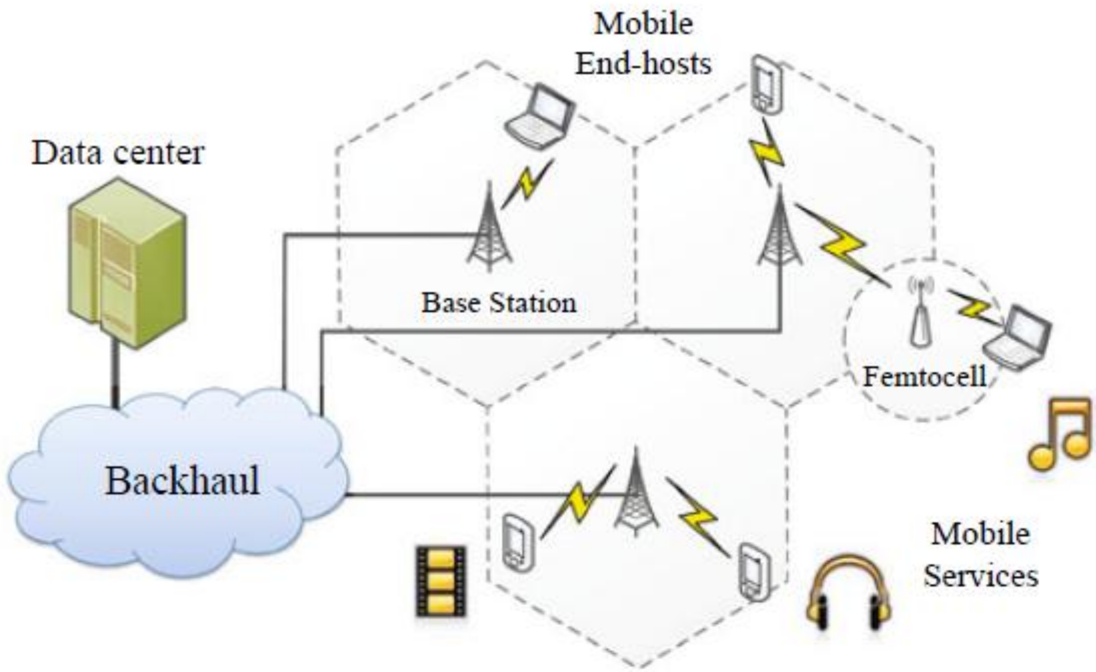
Από όλα τα παραπάνω, μπορούμε να καταλάβουμε ότι ο όρος πράσινη δικτύωση, σχετίζεται με πολλές παραμέτρους όπως οικονομικούς, νομοθετικούς και περιβαλλοντικούς.Στα πλαίσια της «πράσινης» δικτύωσης, τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη μείωση της περιττής ενεργειακής δαπάνης που προκαλείται λόγω της μαζικής αύξησης της κυκλοφορίας δεδομένων. [1, 2]

1.2 Στρατηγικές Πράσινης Δικτύωσης

Τασυστήματα δικτύωσης που έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα βασίζονται σε αρχές που είναι αντίθετες με την πράσινη δικτύωσης. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύουν στην παροχή υπηρεσιών στο μέγιστο δυνατό βαθμό (over-provisioning) ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στην κυκλοφορία κατά τις ώρες αιχμής αλλά και σε απρόβλεπτα γεγονότα. Αυτό συμβαίνει λόγω της έλλειψης ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου.Μία άλλη τεχνική των χρησιμοποιούμενων δικτύων είναι ο πλεονασμός (redundancy), ώστε να προσφέρεται ανθεκτικότητα και ανοχή σε σφάλματα. Πιο συγκεκριμένα, τα δίκτυα είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία και ανοχή σε σφάλματα. Για να είναι αυτό εφικτό, προστίθενται πολλές συσκευές στην υποδομή μεμοναδικό στόχο την ανάληψη καθηκόντων όταν κάποια άλλη συσκευή στο δίκτυο αποτυγχάνεται. [1, 2]

Η επιπλέον υποδομή που υπάρχει ώστε να χρησιμοποιηθεί κάθε φορά που κάποια άλλη συσκευή αποτυγχάνει αλλά και η απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία του δικτύου, ακόμα και σε περιόδους χαμηλής επισκεψιμότητας συμβάλουν στην επιπλέον κατανάλωση ενέργειας.Η πράσινη δικτύωση αντιτίθεται σε όλα τα παραπάνω, μετατρέποντάς τη σε ένα ενδιαφέρον και πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας. Στόχος της είναι ο σχεδιασμός δικτύων που θα έχουν γνώση της καταναλωμένης ενέργειαςχωρίς να υπονομεύεται ούτε η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών ούτε η αξιοπιστία του δικτύου.[1]

Για να είναι κατανοητό το μέγεθος των αλλαγών που απαιτούνται να γίνουν για την μετατροπή ενός δίκτυο σε πράσινο, αρκεί να παρατηρήσουμε την παρακάτω εικόνα. Σε αυτή απεικονίζεται ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, το όποιο αποτελείται από πέντε βασικά στοιχεία: κέντρο δεδομένων στο backhaul, macrocells, femtocells, τελικοί χρήστες (end-hosts) και προσφερόμενες υπηρεσίες.Στην εποχή μας, τα κέντρων δεδομένων (servers) αυξάνοντας με τον μεγαλύτερο ρυθμό στον τομέα της πληροφορικής λόγω των υψηλών απαιτήσεων για αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων. Κατ' επέκταση, αυξάνονται και τα ποσά ενέργειας που δαπανούνται για υπολογισμό, αποθήκευση, μετάδοση και ψύξη των δεδομένων. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι διάφοροι τρόποι με τους οποίουςείναι εφικτό να δημιουργηθεί ένα πράσινο δίκτυο χρησιμοποιώντας σαν σημείο αναφοράς το δίκτυο αυτό.[1, 4]



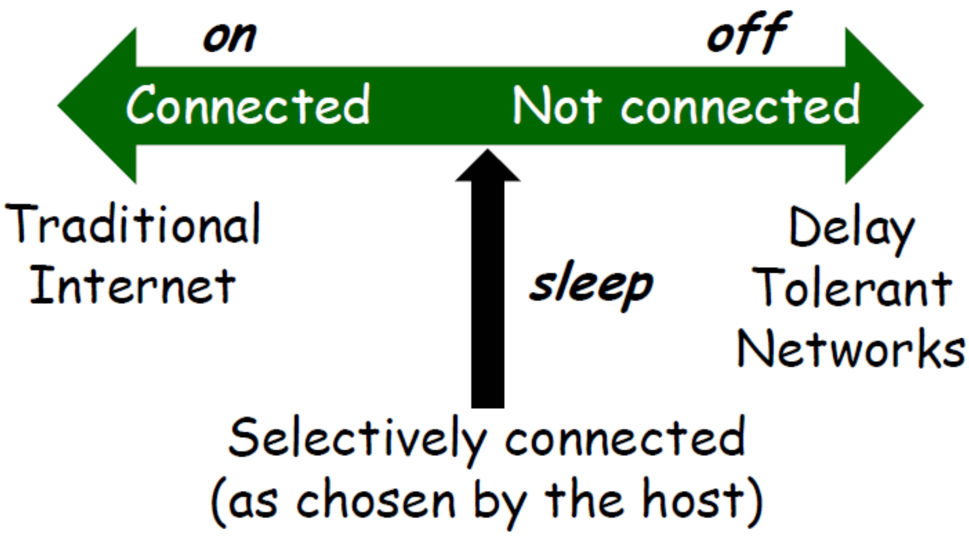
Εικόνα 5: Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας πέντε βασικών στοιχείων: κέντρο δεδομένων, macrocells, femtocells, end-hosts και προσφερόμενες υπηρεσίες. [4]

Μία πρώτη κατεύθυνση που χρησιμοποιείται είναι η ενοποίηση πόρων(resourceconsolidation). Τα κέντρα δεδομένων έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πάντα προσιτά. Ωστόσο, το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η χρήση του κέντρου δεδομένων, όσον αφορά το φορτίο και την υπολογιστικήισχύς, είναι πολύ πιο κάτω από την προσφερόμενη.Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε κέντρα δεδομένων που έχουν δυναμικές απαιτήσεις χρήσης και φόρτου κυκλοφορίας. Αυτή στοχεύει στην μείωση της καταναλωμένης ενέργειας λόγω των μη-χρησιμοποιούμενων συσκευών κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Για να είναι αυτό εφικτό, γίνεται η υπόθεση ότι το δίκτυο έχει ένα περίπου γνωστό επίπεδο κυκλοφορίας σε καθημερινή και εβδομαδιαία βάση. Σαν αποτέλεσμα, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι απαιτούμενες παρεχόμενες υπηρεσίες κάθε δεδομένη χρονική στιγμή για ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Έτσι, το απαιτούμενο επίπεδο απόδοσης του δικτύου βασίζεται στην τρέχουσα ζήτηση της κυκλοφορίας και όχι στην μέγιστη ζήτηση κατά τις ώρες αιχμής. Αυτό μπορεί, για παράδειγμα, να επιτευχθεί απενεργοποιώντας κάποιους δρομολογητές (routers) με μικρή σχετικά κίνηση και δρομολογώντας την στον υπόλοιπο εξοπλισμό του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο ο ενεργός εξοπλισμού δικτύου είναι πολύ μικρότερος. Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε άλλους τομείς όπως τα κέντρα δεδομένων και τις χρησιμοποιούμενες CPU. Για παράδειγμα, έχουν υλοποιηθεί μέθοδοι, όπως η ElasticTree όπου ορισμένες αδρανείς συσκευές δικτύου, ανεξάρτητα καλώδια και αχρείαστοι σύνδεσμοι απενεργοποιούνται, μετατρέποντας ένα κέντρο δεδομένων σε πράσινο. [1, 2, 4]

Μία διαφορετική τεχνική είναι η επιλεκτική συνδεσιμότητα (selectiveconnectedness)συσκευών. Σε ένα συμβατό δίκτυο, ένας κόμβος αυτού δεν είναι λειτουργικός όταν δεν είναι «παρών». Με άλλα λόγια κάθε κόμβος θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκρίνεται σε αιτήματα και να είναι σε θέση να διατηρεί τις συνδέσεις του. Για παράδειγμα, θα πρέπει να είναι σε θέση να απαντά σε ARP αιτήματα, να διατηρεί την IPδιεύθυνση του, να υποστηρίζει DNS, κ.α..Στην τεχνική της επιλεκτικής συνδεσιμότητας, χρησιμοποιούνται μηχανισμοί που επιτρέπουν σε μεμονωμένα κομμάτια του εξοπλισμού να παραμείνουν αδρανείς για κάποιο χρονικό διάστημα, παραμένοντας διαφανείς για το υπόλοιποδίκτυο.Έτσι, θεωρείται ο πιο αξιόπιστος τρόπος σύνδεσης.Αντίνα είναι συνδεδεμένες όλες τις συσκευές που μπορεί να είναι ή όχι χρήσιμες κάθε δεδομένη στιγμή, συνδέονταιμόνο οι απαραίτητες από αυτές. Σαν αποτέλεσμα, μειώνεται η δαπάνη της περιττής ενέργειας. [1, 2, 18]

Για να είναι η στρατηγική αυτή εφικτή, ορισμένοι δρομολογητές θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα απενεργοποίησης και ενεργοποίησης ανάλογα με τη χρήση τους αλλά και με βάση τον αριθμό των διεργασιών και υπηρεσιών που χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό. Αυτή η στρατηγική βασίζεται στο γεγονός ότι μια μοναδική συσκευή που είναι σε πλήρη λειτουργία καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με το να τρέχουν ταυτόχρονα πολλαπλές συσκευές.[2]

Για παράδειγμα, ορισμένοι κόμβοι μπορούν να μεταβούν σε μία αδρανής κατάσταση για την αποφυγή των μηνυμάτων συνδεσιμότητας από το δίκτυο.Τέτοια μηνύματα μπορεί να είναι η περιοδική αποστολή των heartbeats, η λήψη περιττών μηνυμάτων broadcast, κ.α.. Κατάτην διάρκεια αδρανοποίησης ορισμένων κόμβων, κάποιοι άλλοι κόμβοι θα μπορούν να λειτουργούν ως proxy αυτών, ώστε να μην υπάρχει καμία θεμελιώδης αλλαγή στα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα του δικτύου. Επιπλέον, δεν απαιτείται ανάπτυξη νέου λογισμικού αλλά και σχεδίαση μίας νέας αρχιτεκτονικής. Πιο συγκεκριμένα, για να γίνει ένα δίκτυο πράσινο μπορεί να απαιτείται μια σημαντική βελτιστοποίηση του ή ακόμα και ανακατασκευή όλων των στρωμάτων και των εξαρτήσεων στο σύστημα. Ένα τέτοιο παράδειγμα, φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, όπου κάποιοι κόμβοι παραμένουν συνδεδεμένοι, ενώ κάποιοι άλλοι παραμένουν αδρανείς περιμένοντας ένα μήνυμα ενεργοποιήσεις από τον κόμβο proxy. Ο proxy έχει την δυνατότητα έλεγχου και διατήρησης της κατάστασης και της ασφάλειας του δικτύου.[1, 2, 4, 18]

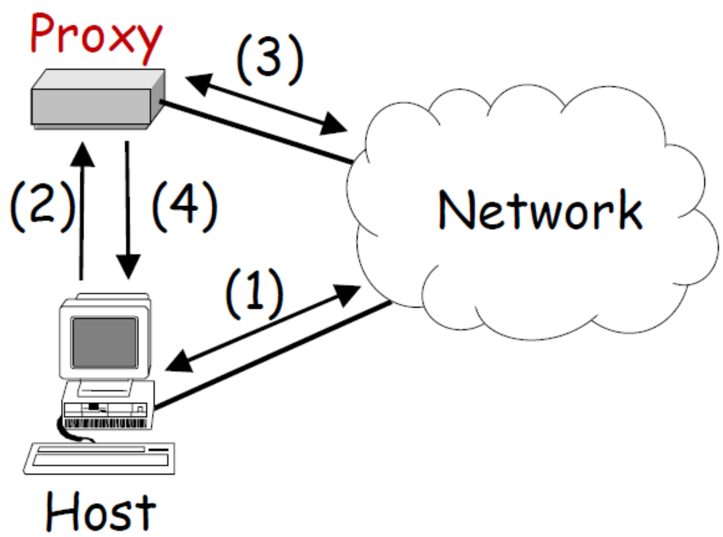


Εικόνα 6:Κάποιοι κόμβοι παραμένουν αδρανείς περιμένοντας ένα μήνυμα ενεργοποίσης από ένα κόμβο proxy. [18]

Αφαιρετικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα παρακάτω:

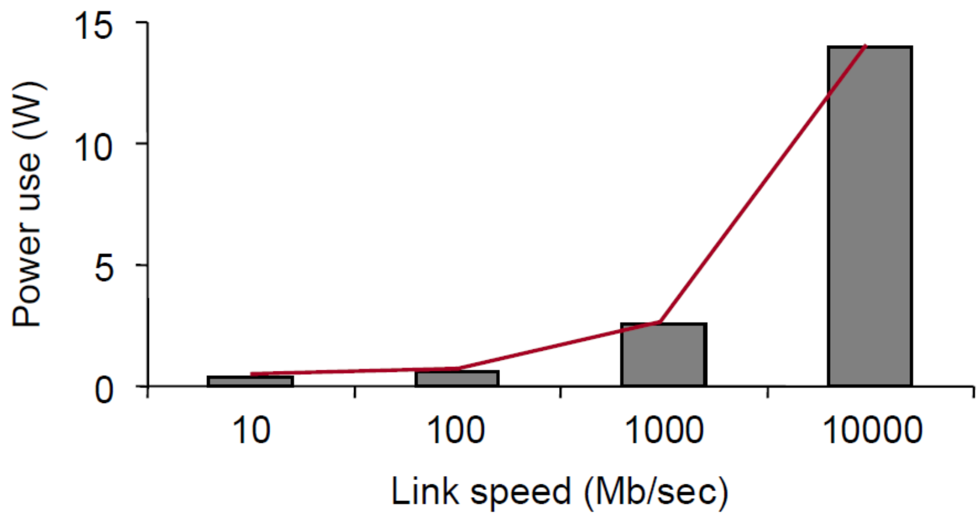
1. Αρχικά ο host είναι ξύπνιος. Στη συνέχεια όμως γίνεται αδρανής
2. Ο host ενημερώνει τον proxy, για την νέα του κατάσταση και ότι πρόκειται να μεταβεί σε μία κατάσταση αδράνειας.
3. Ο proxyανταποκρίνεται στην τρέχουσα επισκεψιμότητα όσο ο host είναι σε αδρανή κατάσταση.
4. Ο proxy ξυπνάει το host ανάλογα με τις ανάγκες.[18]

Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



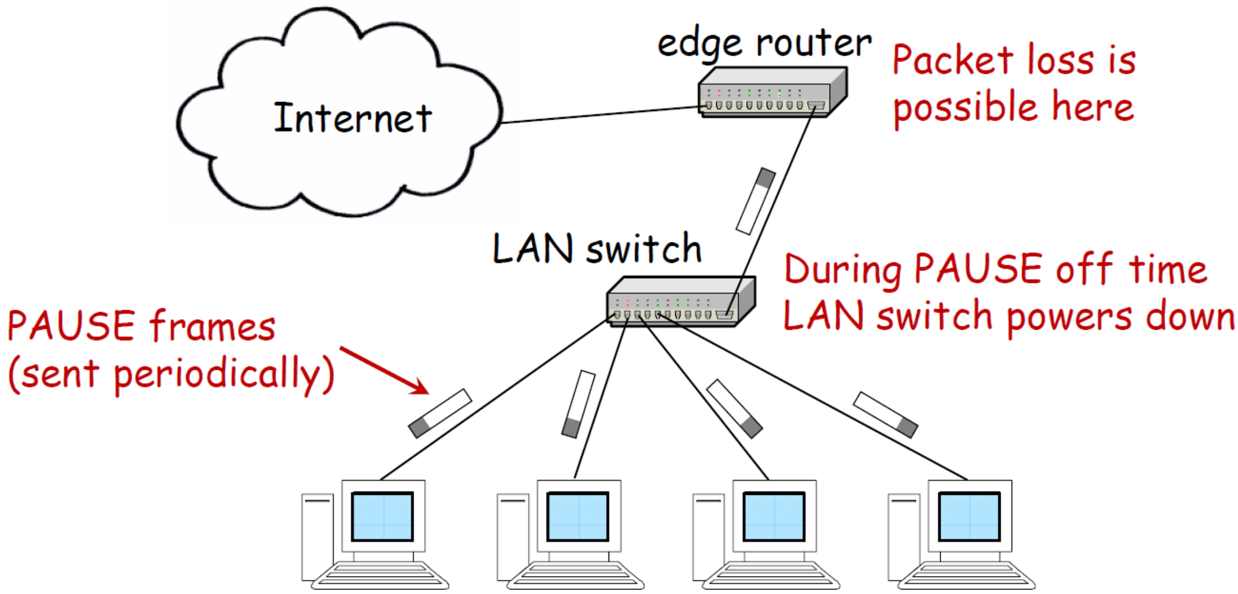
Εικόνα 7: Υψηλό επίπεδο αφαίρεσης για την λειτουργία του proxy. [18]

Μια διαφορετική παρατήρηση προς αυτή την κατεύθυνση είναι η χρήση συνδέσεων μεταξύ των κόμβων δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Σε αυτό οδήγησε το γεγονός ότι οι περισσότεροι σύνδεσμοι χρησιμοποιούνται ελάχιστα, σε ποσοστό που είναι κατά μέσο όρο είναι 1%. Από την άλλη, οι συνδέσεις με υψηλότερο ρυθμό χρησιμοποιούν περισσότερη ισχύς. Η ισχύς που καταναλώνεται είναι ανάλογη του ρυθμού δεδομένων, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη γραφική παράσταση.Για να επιτευχτεί κάτι σε αυτή την κατεύθυνση, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός εναλλαγής σε χαμηλότερο ρυθμό σύνδεσης, και κατ' επέκταση σε εξοικονόμηση ενέργειας, σε περιόδους χαμηλής χρήσης. Μετά από σχετικές έρευνες, προτάθηκε ένα είδους Ethernet, η EnergyEfficientEthernet (IEEE 802.3az), η οποία πετυχαίνει χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση αδράνειας. Σύμφωνα με την IEEE Spectrum, Μάιος 2008, εκτιμάται ότι συσκευές δικτύωσης σε σπίτια, γραφεία καικέντρα δεδομένων με ταχύτητα 1 Gb/s, αλλάζοντας σε 100 Mb/s, μπορούν να εξοικονομήσουν περισσότερα από 300 εκατομμύρια δολάρια, στις ΗΠΑ, όσον αφορά το ενεργειακό κόστος.[18]



Εικόνα 8: Η ισχύς που καταναλώνεται είναι ανάλογη του ρυθμού δεδομένων, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη γραφική παράσταση.[18]

Ένας διαφορετικός τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας θα ήταν η ελεγχόμενη διακοπή λειτουργίας των switches. Σε αυτή την περίπτωση, θα ήταν χρήσιμη η διαμόρφωση και ο έλεγχος της κυκλοφορίας σε περιόδους χαμηλής χρήσης, ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφτούν τυχόν περίοδοι αναμονής.Για να είναι αυτό εφικτό, θα πρέπει να στέλνονται περιοδικά πακέτα PAUSE, κατά την διάρκεια των οποίων οι συνδέσεις μεταξύ switch και hosts είναι απενεργοποιημένες. Δίκτυα αυτής της μορφής θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που είναι ανεκτή κάποια τυχόν καθυστέρηση στα πακέτα αλλά και πιθανό χάσιμο κάποιων εξ' αυτών. Ένα σχέδιο αυτής της περίπτωσης φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.[18]



Εικόνα 9: Περιοδική απενεργοποίηση συνδέσεων κατά την διάρκεια αποστολής των PAUSE πακέτων. [18]

Έχει υπολογιστεί ότι η ενέργεια που εξοικονομείται είναι $(1 - D)$, όπου Dδίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

όπου: t_{off} = χρονικό διάστημα κατά τον οποίο οι συνδέσεις είναι απενεργοποιημένες και αποστέλλονταιPAUSE πακέτα.

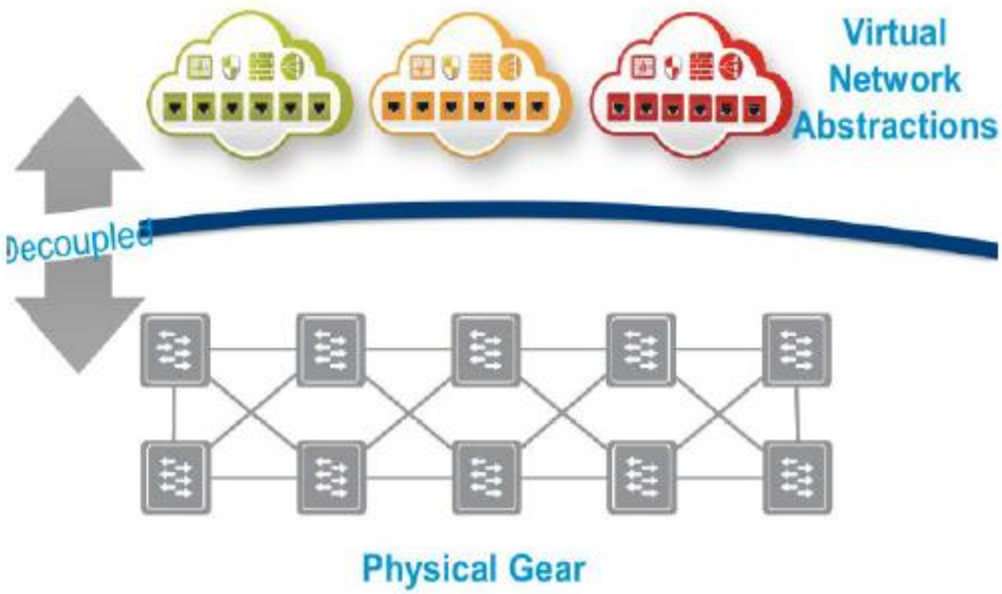
t_{on} = χρονικό διάστημακανονικήςλειτουργίας

D = κύκλος λειτουργίας

Τέλος, αντί για την κλιμακωτή χρήση των συσκευών του δικτύου, μια επιπλέον βελτίωση θα μπορούσε να υπάρξει από τη μεριά του λογισμικού (software).Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κλιμάκωση σε όλα τα επίπεδα του συστήματος. Έτσι, για παράδειγμα από την μεριά του λογισμικού, είναι δυνατόν να οριστούν απαιτήσεις ως προς την λειτουργικότητα του συστήματος αλλά και ως προς το φόρτο εργασίας του χρήστη. Για να είναι αυτό δυνατό, κάθε στοιχείο στην συσκευή, θα πρέπει να εξετάζεται αυτόνομα και στη συνέχεια να συγκρίνεται με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην βέλτιστη περίπτωση, κάθε στοιχείο θα πρέπει να είναι σε θέση να μειώνει την δαπανούμενη ενέργεια του σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.[1, 2]

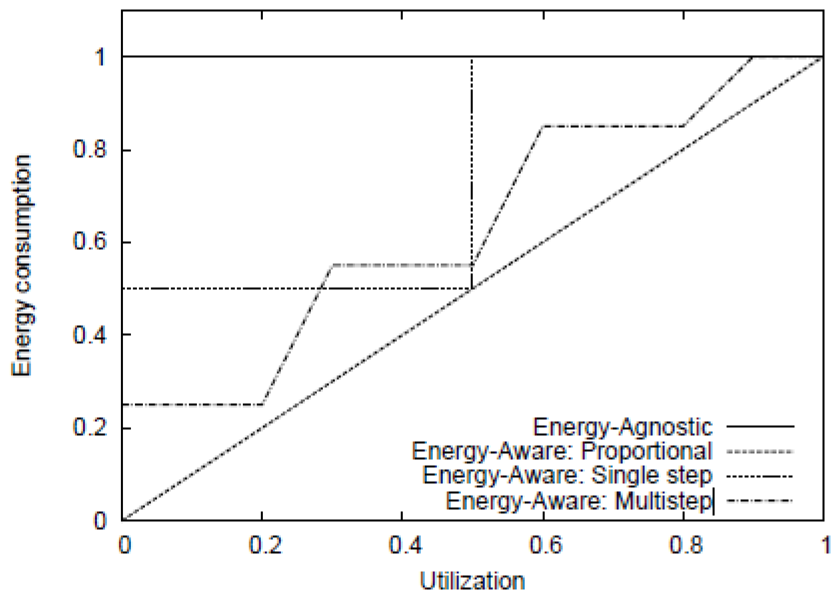
Η εικονοποίηση (virtualization) εξετάζει τη βελτίωση του δικτύου μέσω της αξιοποίησης του υλικού. Με την εικονοποίηση, μια φυσική μηχανή αντιστοιχεί σε πολλές εκδοχές του λειτουργικού συστήματος.Γιανα το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιούνται εικονικές μηχανές (VirtualMachines). Οι εικονικές μηχανές συμβάλλουν στην μείωση του χρησιμοποιούμενου υλικού ενώ μετατρέπει την επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων πιο ευέλικτη και αποτελεσματική.Πιο συγκεκριμένα, συγκεντρώνουν ένα σύνολο μηχανισμών που επιτρέπουν σε μία ή περισσότερες υπηρεσίες να εκτελούνται από το ίδιο υλικό. Με την εικονοποίηση είναι δυνατή η μείωση της καταναλωμένης ενέργειας, εφ 'όσον ένα μόνο μηχάνημα μπορεί να αντικαταστήσει πολλά περισσότερα. Η εικονοποίηση αποτελεί μια πολύ δημοφιλής στρατηγική στην κοινή χρήση διακομιστών στα κέντρα δεδομένων, προκειμένου να μειωθεί το κόστος υλικού, να βελτιωθεί η διαχείριση ενέργειας και να μειωθεί η δαπάνη άνθρακα στα κέντρα δεδομένων. Για να είναι αυτό εφικτό, όπως και στην περίπτωση της ενοποίησης πόρων, θα πρέπει να είναι δυνατή ο δυναμικός υπολογισμός των απαιτήσεων του δικτύου. Η εικονοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλαπλά είδη πόρων, όπως για παράδειγμα, συνδέσεις δικτύου, συσκευές αποθήκευσης,πόρους λογισμικού, κ.α.. Ένα τυπικό παράδειγμα εικονοποίησηείναι η κοινή χρήση διακομιστών (servers) σε κέντρα δεδομένων, μειώνοντας το κόστος του υλικού, βελτιώνοντας τη διαχείριση της ενέργειας και μειώνοντας την απαιτούμενη ενέργεια για την ψύξης. Έτσι, η ταχυδρομική υπηρεσία των ΗΠΑ (USPostalService έχειεικονοποιήσει 791 από τους 895 servers. Η εικονοποίηση είναι το πεδίο που έχει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη από όλα τα παραπάνω.[1, 2, 4]

Η εικονοποίηση δικτύου αποσκοπεί στην παροχή του συνόλου των στοιχείων του δικτύου και της παρεχόμενης ασφάλειας μέσω λογισμικού. Πιο συγκεκριμένα, το εικονικό δίκτυο λειτουργεί αυτόνομα και ανεξάρτητα από το υλικό ενώ χρησιμοποιεί φυσικές συσκευές δικτύωσης για τη μεταφορά και τη διαβίβαση πακέτων. Έτσι με την εικονοποίηση του δικτύου, μπορούν να παρέχονται εικονικά δίκτυα, που περιλαμβάνουν λογικούς διακόπτες (logicalswitches), δρομολογητές (routers), τείχη προστασίας (firewalls), εξισορρόπησες φορτίου (loadbalancers), VPN και ασφάλεια φόρτου εργασίας (workloadsecurity). Η δημιουργία ενός τέτοιου δικτύου γίνεται σε λίγα μόνο λεπτά παρά σε ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες. Η ακόλουθη εικόνα δείχνει το βασικό τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η εικονοποίηση δικτύου.[14]



Εικόνα 10: Εικονοποίηση δικτύου. [2]
Πηγή: http://www.techopsguys.com/wp-content/uploads/2013/08/network-virtualization.png

Ο όρος αναλογική πληροφορική (proportionalcomputing) είναι ένα μέτρο σχετικά με την ενέργεια που καταναλώνεται από ένα σύστημα σε σχέση με την χρήσιμη δουλεία που επιτέλεσε. Η μετρική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα σύστημα ως σύνολο, σε πρωτόκολλα δικτύου, αλλά και σε μεμονωμένες συσκευές και εξαρτήματα. Για να είναι πιο κατανοητή η έννοια αυτή, η επόμενη γραφική παράσταση απεικονίζει την κατανάλωση ενέργειαςμιας συσκευής σε συνάρτηση με το βαθμό χρήσης της. [1]



Εικόνα 11: Κατανάλωση ενέργειας σε συνάρτηση με τη χρήση[1]

Οι μετρήσεις έχουν ομαλοποιηθεί και ο άξονας κυμαίνεται από 0 έως 1. Οι διαφορετικές γραφικές παραστάσεις προσφέρουν διαφορετικές ευκαιρίες βελτιστοποίησης. Συσκευές με γνωστή κατανάλωση ενέργειας (energy-agnostic) απαιτούν σταθερή κατανάλωση ενέργειας, ανεξάρτητα από τη χρήση τους. Αυτού του είδους οι συσκευές αντιπροσωπεύουν το χειρότερο τύπο συσκευών καθώς είτε είναι ενεργοποιημένες είτε είναι αδρανής καταναλώνουν τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας. [1]

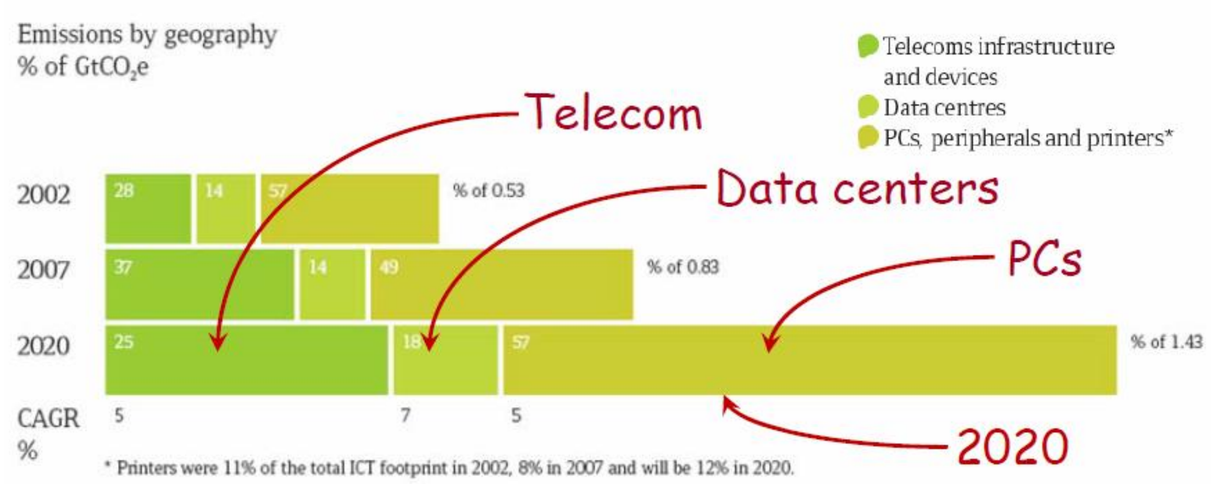
Σε αντίθεση, οι συσκευές στις οποίες είναι πλήρως γνωστή η κατανάλωση ενέργειας (energy-aware) παρουσιάζουν κατανάλωση ενέργειας ανάλογη με το επίπεδο χρήσης τους. Παράδειγμα τέτοια περίπτωσης είναι οι δύο γραφικές παραστάσεις single-step και multi-step που εμφανίζονται στην γραφική παράσταση. Η κατανάλωση ενέργειας, στην ουσία, προσαρμόζεται στο φορτίο τους. Οι συσκευές single-step έχουν μόνο δύο διαφορετικές λειτουργίες ενώ οι multi-step έχουν πολλαπλά κατώτατα όρια στην κατανάλωση ενέργειας. [1]

Για να επιτευχτεί η αναλογική πληροφορική υπάρχουν δύο διαφορετικές ταχτικές. Από τη μία, η δυναμική κλιμάκωση της τάσης (DynamicVoltageScaling) και από την άλλη, ο προσαρμοστικός ρυθμός σύνδεσης (AdaptiveLinkRate). Η δυναμική κλιμάκωση της τάσης μειώνει την ενεργειακή κατάσταση της CPU σαν συνάρτηση του φορτίου του συστήματος. Αντίθετα, ο προσαρμοστικός ρυθμός σύνδεσης εφαρμόζει παρόμοια συμπεριφορά με τις συνδέσεις δικτύου, μειώνοντας τη χωρητικότητά τους και, κατά συνέπεια, την κατανάλωση, σαν συνάρτηση του φορτίου σύνδεσης.[1]

1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας: Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη

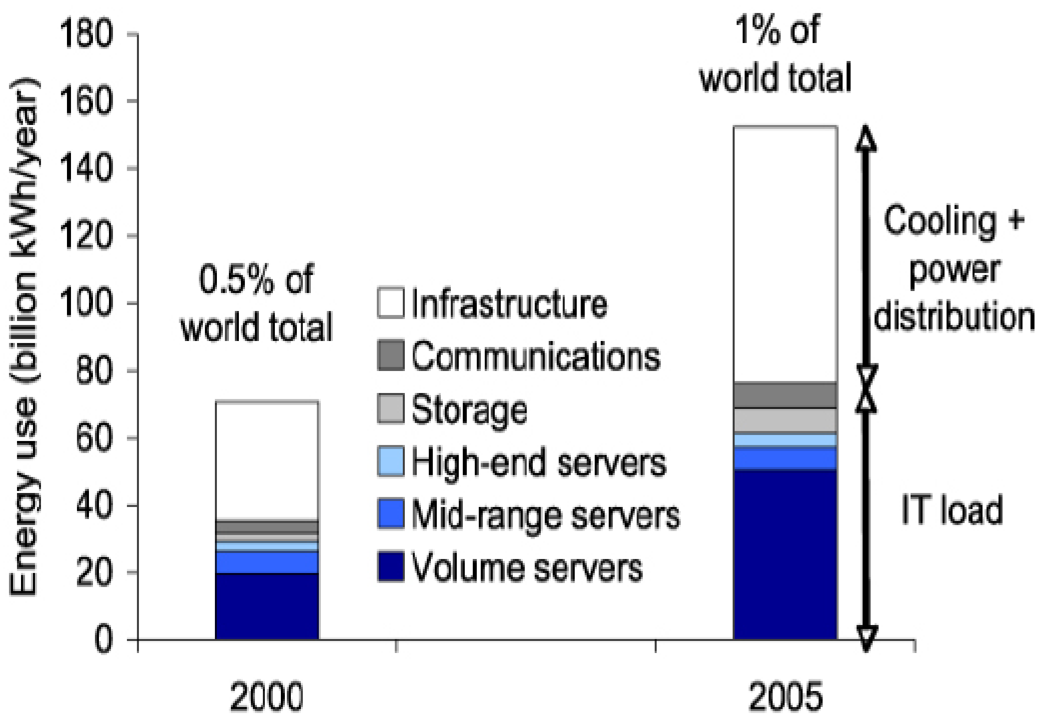
Η πράσινη δικτύωση αποσκοπεί στην μείωση της περιττής κατανάλωσης ενέργειας της ενσύρματης και ασύρματης δικτύωσης, στα πιθανά οικονομικά οφέλη και τα αναμενόμενα θετικά αποτελέσματα στο φυσικό περιβάλλον.Για να είναι αυτό εφικτό, ο σχεδιασμός, οι συσκευές και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, επιλέγονται με βάση την ενεργειακή κατανάλωσή τους.[1]

Η στροφή προς τις πράσινες τεχνολογίες συνδέεται άρρηκτα με την παρατήρηση της αύξησης των περιβαλλοντικών προβλημάτων, που σχετίζεται με τις εκπομπές τωναέριων του θερμοκηπίου (Green-HouseGases - GHG), στους τομείς της πληροφορίας και της επικοινωνίας (ΤΠΕ),τα τελευταία χρόνια. Μόνο ο τομέας ΤΠΕ, κατά το 2007, παρήγαγε περίπου το 2% του συνολικού CO_2 από τις συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με μια έρευνα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, θα πρέπει οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου να μειωθούν κατά 15% -30% πριν από το 2020 για να παραμείνει η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από 2°C.[1, 2]



Εικόνα 12: Εκπομές CO_2 στον τομέα τηλεποικινωνιών και πληροφορικής. [17]
Πηγή: Smart 2020

Σύμφωνα με την κλιματική ομάδα, GeSIReport, το 2007, η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από υπολογιστές, περιφερειακά και εκτυπωτές ήταν 57% (820 εκατομμύρια τόνοι CO_2), από συσκευές και την τηλεπικοινωνιακή υποδομή ήταν 25% (360 εκατομμύρια τόνοι CO_2), ενώ από τα κέντρα δεδομένων ήταν 18% (260 εκατομμύρια τόνοι). Οι εκπομπές αυτές αναμένεται να αυξηθούν κατά 4% έως το 2020. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της κυκλοφορίας στο διαδίκτυο διπλασιάζεται κάθε δύο χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση από τα βίντεο στο διαδίκτυο είναι υψηλότερη από την κίνηση των ασύρματων δεδομένων και της ασύρματης φωνής. Η επόμενη εικόνα δείχνει την αύξηση στη χρήση ενέργειας, για την ψύξη των κέντρων δεδομένων μεταξύ των 2000 και 2005. [2]



Εικόνα 13: Κατανάλωση ενέργειας σε κέντρα δεδομένων το 2000 σε σύγκριση με το 2005. [2]
Πηγή: https://lukenotricks.blogspot.gr/2010/05/power-limit-of-cloud-computing.html

Συνολικά, οι διακομιστές (servers) και τα κυψελωτά δίκτυα (cellularnetworks) καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας από το διαδίκτυο, τόσο της ασύρματης όσο και της ενσύρματης επικοινωνίας, είναι συγκριτικά μικρότερη από την ποσότητα που καταναλώνουν τα συστήματα ΤΠΕ σε σπίτια και γραφεία, και κυρίως λόγω των φορητών υπολογιστών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή τεράστιας ποσότητας CO_2 κάθε χρόνο, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την αλλαγή του κλίματος. [2]

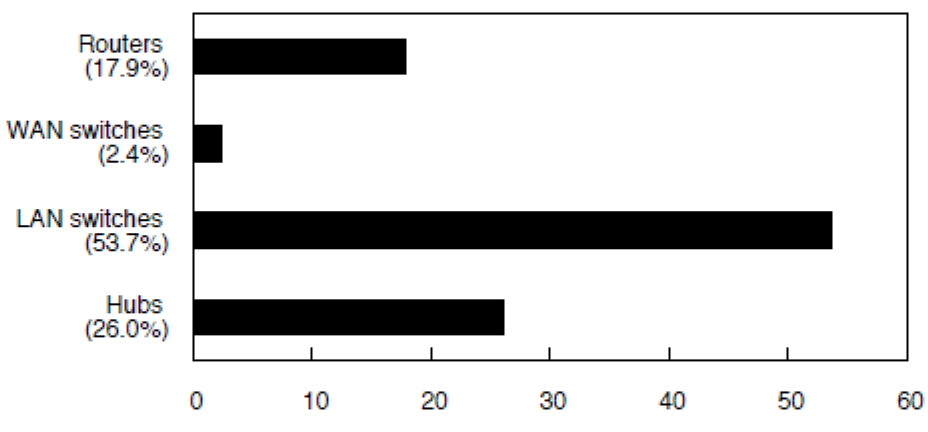
Επιπλέον της παραπάνω ενέργειας, απαιτείται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για τον κλιματισμό ηλεκτρικών συσκευών υψηλής θερμοκρασίας, τόσο σε διακομιστές όσο και σε κυψελωτά δίκτυα. Έρευνες έχουν δείξει ότι η μίση δαπανούμενη ενέργεια στις ΤΠΕ χρησιμοποιείται για την ψύξη των συστημάτωνστα κέντρα δεδομένων, αναμιγνύοντας τον ζεστό και κρύο αέρα. Σαν αποτέλεσμα, μπορούμε να πούμε ότι οι serversχρησιμοποιούν σχεδόν τα ¾ της δαπανούμενης ενέργειας χωρίς να παράγουν έργο. Διακομιστές όπως αυτοί είναι αναποτελεσματικοί και δεν οδηγούν στην πράσινη δικτύωση.[2]

Ωστόσο, οι επιπτώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, δεν έχουν μόνο επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον. Επηρεάζουν και την οικονομία, ενώ έχει υπολογιστεί ότι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κατά 1/3, μπορεί να αποφέρει οικονομικό όφελος υψηλότερο από τις επενδύσεις που απαιτούνται για την επίτευξη αυτού του στόχου. Επιπλέον με την επένδυση στην πράσινη δικτύωση και την αντικατάσταση των συσκευών με άλλες αντίστοιχες πράσινες, μπορεί να επιφέρει σημαντικέςμείωσειςστο λειτουργικό κόστος (OPEX) της εταιρείας.Τέλος ακόμα και οι πολιτικές δυνάμεις στοχεύουν προς την πράσινη ανάπτυξη με στόχο μία βιώσιμη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη αλλά και σαν ένα πιθανό παράγοντα οικονομικής ανάκαμψης. [1, 19]

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ο κύριος άξονας γύρω από τον οποίο λειτουργεί η σύγχρονη βιομηχανία. Αυτό έχει επίδραση σε οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και εμπορικούς παράγοντες. Κατά συνέπεια, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχει επηρεάσει πολλούς κλάδους της βιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένης της Τεχνολογίας Πληροφορίας και Επικοινωνίας (ΤΠΕ). Βασικός παράγοντας είναι η χρήση αυτών των τεχνολογιών στην καθημερινή ζωή. Έτσι στην πληροφορική, αυτό επηρεάζει τον τομέα της σχεδίασης ηλεκτρονικών καθώς και τον τομέα της δικτύωσης. Αυτό συμβαίνει καθώς τα κέντρα δεδομένων και η υποδομή δικτύωσης περιλαμβάνει συσκευές υψηλής απόδοσης και διαθεσιμότητας. Για να είναι αυτό εφικτό, απαιτούνται ισχυρές συσκευές καθώς και κλιματισμός για την ψύξη τους, οι οποίες με τη σειρά τους καταναλώνουν ενέργεια. Όλα αυτά οργανώνονται σε περιττή αρχιτεκτονική ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στο ζητούμενο φορτίο κατά την ώρα αιχμής αλλά σε συνθήκες υπό-χρησιμοποίησης, δεν χρησιμοποιούνται σε κανονικό επίπεδο. Αυτό αποτελεί ευκαιρία εξοικονόμησης ενέργειας. Όλες οι προσπάθειες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια και αποσκοπούν στη μείωση της περιττής ενεργειακής δαπάνης και χαρακτηρίζονται σαν πράσινες τεχνολογίες.[1]

Όπως αναφέραμε, έχει υπολογιστεί ότι ο όγκος των εκπομπών του CO_2, που παράγονται μόνο από τον τομέα των ΤΠΕ, αποτελούν περίπου το 2% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών.Ενώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στιςαναπτυγμένες χώρες, όπως για παράδειγμα το Ηνωμένο Βασίλειο, ο αριθμός αυτός φτάνει έως και το 10%. Ωστόσο, ακόμα και η ακριβής αξιολόγηση αυτών των αριθμών είναι μια δύσκολη διαδικασία και δεν μπορεί να είναι ακριβείς, ούτε ενημερωμένες ανά πάσα στιγμή. Παρόλα αυτά, όλες οι μελέτες που έχουν γίνει συμφωνούν στο γεγονός ότι οι ΤΠΕ αποτελούν σημαντική πηγή κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. [1]

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, είναι απαραίτητο να εντοπιστούν τα σημεία όπου αυτές οι βελτιώσειςμπορούν να γίνουν. Το διαδίκτυο, για παράδειγμα, σχεδιάστηκε πριν από 40 χρόνια, και πρόκειται να αντιμετωπίσει πολλές διαφορετικές πρότυπες προκλήσεις στο άμεσο μέλλον. Αναμένεται ότι η παγκόσμια κίνηση στο διαδίκτυο και τη κινητή τηλεφωνία θα αυξηθούν με μεγάλο ρυθμό τα επόμενα πέντε χρόνια. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν ο επανασχεδιασμός του διαδικτύουσαν ένα κεντρικό δίκτυο, το οποίο χωρίζεται σε διάφορους επιμέρους τύπους δικτύων πρόσβασης, όπως για παράδειγμα ασύρματα, ενσύρματα και υβριδικά δίκτυα. Σε αυτά τα διαφορετικά τμήματα δικτύων, ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός καιοι στόχοι όσον αφορά τις αναμενόμενες επιδόσεις και την κατανάλωση ενέργειαςδιαφέρουν. Έτσι κάποιος θα περίμενε, ότι οι πιθανές βελτιώσεις διαφέρουν σημαντικά. Ωστόσο, όλες αυτές οι στρατηγικές προς την πράσινη δικτύωση αναμένεται να εξοικονομήσουν περίπου το 30-35% της ενέργειας.Η κατανάλωση ενέργειας όσον αφορά το διαδίκτυο και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, φαίνεται στην ακόλουθη γραφική παράσταση, σύμφωνα με μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2002.[1, 2]



Εικόνα 14: Συνεισφορά των διάφορων συσκευών δικτύου στην συνολική κατανάλωση ενέργειας το 2002. [1]

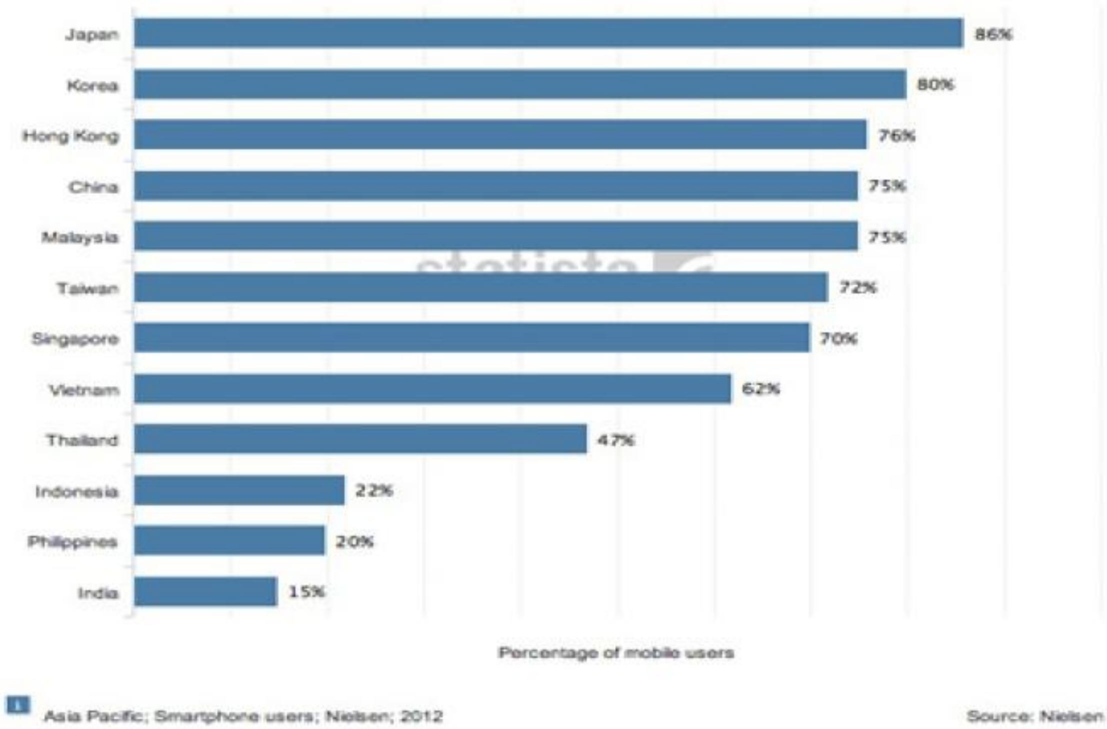
Όπως φαίνεται από τη γραφική παράσταση, το 80% περίπου της συνολικής κατανάλωσης του διαδικτύου οφείλεται στα τοπικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα τα hub και τα switch. Ωστόσο μία πιο πρόσφατη έρευνα, το 2005, έδειξε ότι οι κάρτες δικτύου (NetworkInterfaceCard - NIC) ευθύνονται το μισό περίπου της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.[1]

Καθώς ο τομέας της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών εξελίσσεται ταχύτατα, θα πρέπει να γίνονται συνεχώς έρευνες όπως τις παραπάνω. Κατά συνέπεια, τα προαναφερθέντα στοιχεία μπορούν γρήγορα να θεωρηθούν ξεπερασμένα και ανακριβείς. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για μια μόνιμη αξιολόγηση ώστε να επιδιωχτούν οι στόχοι εξοικονόμησης ενέργειας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες, αφού απαιτεί η συνεργασία εταιριών κατασκευής εξοπλισμού, παρόχων υπηρεσιών διαδικτύου και κυβερνήσεων, το οποίο όμως δεν είναι ιδιαίτερα εφικτό. [1]

1.5 Είδη δικτύων και εξοικονόμηση ενέργειας

Οι μέχρι τώρα έρευνες σχετίζονται με δίκτυα στα οποία μπορεί να επιτευχτεί εξοικονόμηση ενέργειας. Τέτοια δίκτυα είναι τα ενσύρματα, τα ασύρματα και τα υβριδικά δίκτυα. Οι έρευνες σχετίζονται με τους χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους και τις φυσικές στρατηγικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχτείμείωση στην κατανάλωση της ενέργειας στο δίκτυο. [2]

Τόσο τα ασύρματα όσο και τα ενσύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό. Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται σχεδόν από όλα tasmartphones, tabletκαι τους φορητούς υπολογιστές. Όλα αυτά αναφέρονται με τον όρο «ασύρματα» και χρησιμοποιούν συνδέσεις από κινητά τοπικά δίκτυα Wi-Fi. Όλες οι υπόλοιπες συσκευές, που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία, χρησιμοποιούν ενσύρματες συνδέσεις δικτύου, λόγω της υψηλής χρήσης τους.Καθώς αυτές οι δύο μορφές δικτύων χρησιμοποιούνται κατά κόρον, έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές για την ενεργειακή βελτίωση των δικτύων αυτών. Τα ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα διαφέρουν ως προς την κατανάλωση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στα ενσύρματα δίκτυα καταναλώνεται περισσότερο από το 70% της ηλεκτρικής ενέργειας από τον εξοπλισμό του χρηστή, ενώ μόνο το 10% της ενέργειας εξαιτίας του κινητού χρήστη. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η χρήση τωνασύρματου δικτύου μέσων smartphones ανά χώρα το 2012.[2]

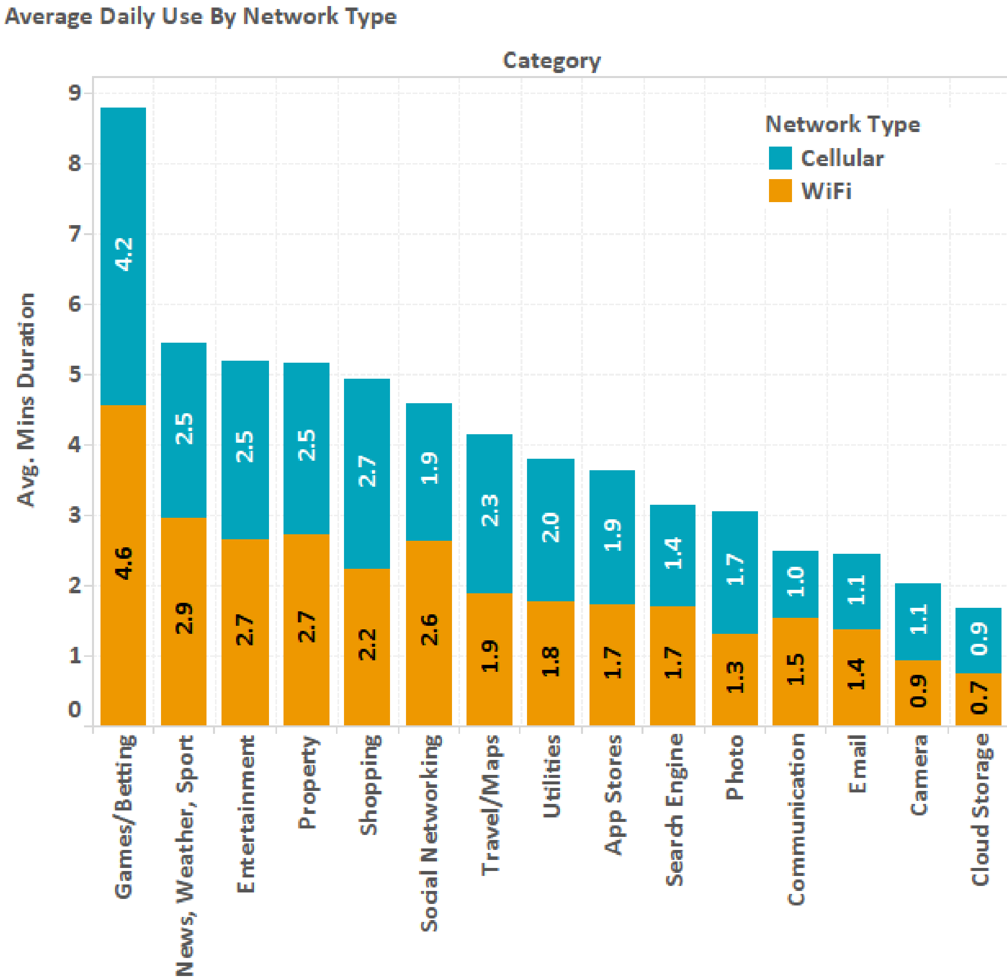


Εικόνα 15: Χρήση διαδικτύου από smartphones σε επιλεγμένες Ασιατικές χώρες κατά το 2012.[2]
Πηγή: http://www.asiabriefing.com/news/wp-content/uploads/2013/03/MobUsage.jpg

Καθώς τα υβριδικά δίκτυα αποτελούνται από εξοπλισμό δικτύου και υποδομή δικτύου από πολλαπλούς προμηθευτές, συμβάλουν σημαντικά στη βαριά χρήση του δικτύου. Αυτή τη στιγμή, τα υβριδικά δίκτυα είναι τα πιο δημοφιλή σε καθημερινή χρήση δίκτυα και για αυτό το λόγο εξετάζονται επίσης στα πλαίσια της πράσινης δικτύωσης.

Για να καταλάβουμε το εύρος χρήσης των ασύρματων και των κινητών δικτύων, αρκεί να αναλογιστούμε ότι στις μέρες μας υπάρχουν πάνω από 4 δισεκατομμυρίων συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως. Για την μετάδοση δεδομένων, οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν ένα από τα τρία δίκτυα 3G, GSM και Wi-Fi. Έρευνες έχουν δείξει ότι περισσότεροι από το 15% συνδρομητές παγκοσμίως χρησιμοποιούν 3G, ενώ σε ορισμένες χώρες το ποσοστό αυτό φτάνει έως και 70%.Εκτιμάται, ωστόσο, ότι το 57% της ενεργειακής κατανάλωσης της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών και επικοινωνιών αποδίδεται σε χρήστες κινητών και ασύρματων δικτύων.Ενώ, το πιο ανησυχητικέ είναι ότι το ποσοστό αυτό εξακολουθεί να αυξάνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό. [2, 4]

Για να είναι δυνατόν να υπολογιστή, με ακρίβεια, η ενεργειακή δαπάνη και στη συνέχεια αυτή να μειωθεί, σε κάθε μία περίπτωση, θα πρέπει να υπάρξει μία σύγκριση μεταξύ αυτών των τριών ειδών δικτύων.Αρχικά έγιναν έρευνες που σχετίζονται με την ποσοτικοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται σε σχέση με την μετάδοση δεδομένων μέσω 3G, GSM και Wi-Fi. Αυτές έδειξαν ότι η δαπανούμενη ενέργεια σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του φόρτου εργασίας (workload)και όχι μόνο με το συνολικό μέγεθος μετάδοσης.Για παράδειγμα, μερικές εκατοντάδες byte που μεταφέρονται με χρήση 3G δικτύου μπορεί να χρειάζονται περισσότερη ενέργεια από τη μεταφορά ενός megabyte. Η ακόλουθη εικόνα δείχνει μια σύνοψη αυτών των ευρημάτων.Για να είναι αξιόπιστα τα παρακάτω αποτελέσματα, η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές πόλεις διακύμανσης σε ημερήσια βάση χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοτίβα κινητικότητας και συσκευές.Όπως βλέπουμε από το παρακάτω διάγραμμα, τα ασύρματων δικτύων φαίνονται να χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό συγκρινόμενα με τα κινητά και ενσύρματα δίκτυα. [2]



Εικόνα 16: Χρήση ασύρματων δικτύων.[2]
Πηγή: http://www.realitymine.com/wp-content/uploads/2013/08/Average-Daily-Use-By-Network-Type.png?f29246

1.5Προκλήσεις Πράσινης Δικτύωσης

Οι τεχνικές με βάση τις οποίες έχουν σχεδιαστεί τα σημερινά δίκτυα σχετίζονται με διάφορα χαρακτηριστικά όπως τη χωρητικότητα (capacity), την απόδοση (throughput), την ποικιλομορφία (variety), την διαθεσιμότητα (availability),τη σταθερότητα (stability) και την ποιότητατων παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS) επικοινωνίας, χωρίς να έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην ενεργειακή απόδοση (energyefficiency) τους. Ωστόσο το αυξανόμενο ενεργειακό κόστος και οι επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλονέχουν εγείρει ανησυχία σε πολλαπλούς τομείς.[4, 18]

Τοφαινόμενο του θερμοκηπίου γίνεται όλο και πιοσοβαρό πρόβλημα, το οποίο οφείλεται κυρίως στις υπερβολικές εκπομπέστου διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) συγκρινόμενο με τον περασμένο αιώνα. Σαν αποτέλεσμα, έχει δημιουργηθείεπιτακτική ανάγκηγια στροφή σε ενεργειακά πιο αποδοτικά πράσινα δίκτυα.Για να γίνει κατανοητό, πόσο σοβαρή είναι η κατάσταση, αρκεί να αναλογιστούμε ότιοι βιομηχανικές και οι ανθρώπινες δραστηριότητες εκπέμπουν δύο φορέςπερισσότερο CO_2 από ότι μπορούν να απορροφήσουν οι φυσικές διεργασίες του περιβάλλοντος αυτή τη στιγμή.[4, 18]

Ως εκ τούτου, οι κυβερνήσεις και η βιομηχανία έχουν εκφράσει έντονα την ανησυχία τους σχετικά με τα κρίσιμα ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση στον τομέα των ΤΠΕ. Υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν, ώστε να μεταβούμε στην πράσινη δικτύωση. Κύριος στόχος είναι πάντα η ελαχιστοποίηση στην κατανάλωση ενέργειας κυρίως σε περιπτώσεις χαμηλής κίνησης. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τα τεχνικά μειονεκτήματα των σημερινών δικτύων τηλεφωνίας έτσι ώστε να είναι πιο αποδοτική η μετάβαση προς τα πράσινα δίκτυα.[4, 18]

Αρχικά θα πρέπει να τεθούν κάποιες μετρικές και μοντέλα ώστε να είναι δυνατόν να υπολογιστούν και να διαμορφωθούν τα αποθέματα της ενεργειακής απόδοσηςκατ' αναλογία με την κίνηση του δικτύου. Διάφορα θεσμικά όργανα, ήδη κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση, ώστε να θέσουν, τυποποιημένες μετρικές ενεργειακής απόδοσης.Οι τεχνικές μετρικές που χρησιμοποιούνται, στις μέρες μας, αποσκοπούν στην μεγιστοποίηση της απόδοση (throughput), της ποιότητα (QoS) και της αξιοπιστίας (reliability) χωρίς να καταβάλλεται καμία προσοχή στην κατανάλωση ενέργειας. Οι μετρικές και τα μοντέλα αυτά θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζονται εξ' αποστάσεως, χωρίς τη φυσική παρουσία κάποιου μηχανικού στο χώρο του κέντρου δεδομένων ή του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει ανά πάσα στιγμή, θα πρέπει να είναι γνωστή η κατάσταση χρήσης και η δαπανούμενη ισχύς. Έτσι θα είναι δυνατόν να σχεδιάζονται συσκευές και συστήματαπροσανατολισμένα στην ενεργειακή απόδοση.[4, 18]

Από την άλλη, θα πρέπει να σχεδιαστεί μία νέα αρχιτεκτονική για το δίκτυο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της επιλεκτικής συνδεσιμότητας, που περιγράψαμε προηγουμένως, χρειάζονται μηχανισμοί και πρωτόκολλα για την επιλεκτική συνδεσιμότητα των στοιχείων του δικτύου με βάση την τρέχουσα κίνηση κάθε χρονική στιγμή. Επιπλέον στοιχεία που θα έχουν το ρόλο του proxy, θα πρέπει να προστεθούν σε αυτό. [18]

Αλλαγές θα πρέπει να υπάρξουν και στον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό στοδίκτυο. Νέες συσκευές, όπως για παράδειγμα, πράσιναrouters και switchesθα πρέπει να σχεδιαστούν και να τοποθετηθούν στο δίκτυο. Σκοπός αυτών θα είναι η καλύτερη ενεργειακή απόδοση.Σε αυτό μπορούν να συμβάλλουν και συσκευές αποθήκευσης (caching)δεδομένων ώστε να μειωθεί ο φόρτος του δικτύου αλλά και ο αριθμός των διακομιστών (servers). Ένα τέτοιο σύστημα αναπτύχθηκε από τουςChengming Li etal., ο οποίος κατάφερε να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών κατά την προώθηση πακέτων στο δίκτυο. O Chengming Li etal. αξιοποίησαν τον παραλληλισμό και τα στοχαστικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης «AntColony».[3, 18]

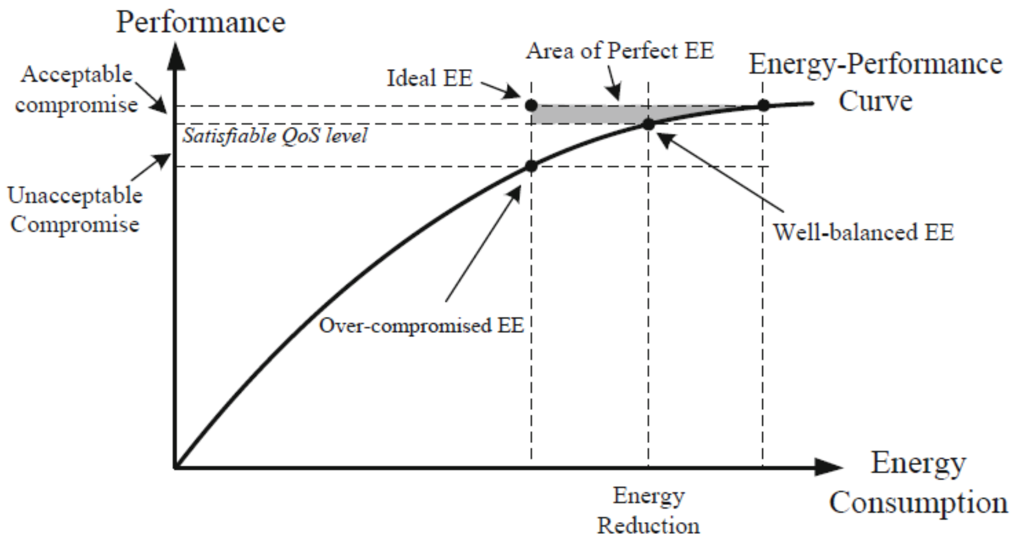
Ένα ακόμα βασικό πρόβλημα με τον εξοπλισμό του δικτύου, είναι ότι οι συσκευές, εκτός από το χρόνο αιχμής, δεν χρησιμοποιούνται στην μέγιστη χωρητικότητά τους και κατά συνέπεια το απαιτούμενο επίπεδο ενέργειας είναι πολύ μικρότερο απότην παρεχόμενη ισχύς στο μέγιστο επίπεδο. Με άλλα λόγια, ηκαταναλωμένη ηλεκτρική ενέργειαδεν μπορεί να ρυθμιστεί δυναμικά ανάλογα με τιςσυνθήκες δικτύωσης ή την τρέχουσα κυκλοφορία. [4]

Στην βραχυπρόθεσμη περιοδική απενεργοποίηση των συσκευών του δικτύου, συμβάλλει η διαμόρφωση της κυκλοφορίας του. Αυτό επίσης συμβάλλει στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου. Τέλος για την μακρόχρονηπεριοδική απενεργοποίηση των συσκευών του δικτύου θα πρέπει να διαμορφωθεί η μηχανική κυκλοφορία του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η μακρόχρονη διακοπή λειτουργίας μπορεί να ρυθμιστεί με την ενοποίηση διάφορων διαδρομών.Από την μεριά τους, οι κόμβοι του δικτύου, θα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν την δυνατότητα να ανακαλύπτουν και να επικοινωνούν με τις ενεργές συσκευές κάθε χρονική στιγμή. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να είναι σε θέση να ανακαλύπτουν τις συσκευές χαμηλής ισχύος.[18]

Όσον αφορά τα κέντρα δεδομένων, για να είναι δυνατή το δυναμικόvirtualization, είναι επιθυμητό να παρέχεται από την μία υψηλό εύρος ζώνης (bandwidth) και από την άλλη, χαμηλός λανθάνοντας χρόνος (latency). Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις, είναι δυνατή η απενεργοποίηση των servers όποτε αυτό είναι εφικτό. Τέλος, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα κέντρα δεδομένων μπορεί να επιτύχουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με την μετακίνηση τους σε περιοχές όπου η ισχύς είναι φθηνότερη και υπάρχουν φυσικοί τρόποι ψύξης. [18]

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, το κέρδος από την εξοικονόμηση ενέργειας στην πράσινη δικτύωση επιτυγχάνεται συνήθως με την υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS). Αυτή η ισορροπία μεταξύ απόδοσης και ενέργειας, σε κάθε περίπτωση, πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά.[4]

Η σχέση μεταξύ ενέργειας και απόδοσης φαίνεται στην ακόλουθη γραφική παράσταση. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, πολλές από τις υπάρχουσες τεχνικές δεν έλαβαν σοβαρά υπόψη την κατανάλωση ενέργειας, μόνο ορισμένεςαποσκοπούν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειαςσε ένα μικρό βαθμό. Όπως βλέπουμε, από την ακόλουθη εικόνα, θα ήταν δυνατόν να εξοικονομηθεί ένα ποσοστό ενέργειας εάν η απαιτούμενη ποιότητα ήταν σε χαμηλότερο βαθμό. Σαν αποτέλεσμα, η τεχνολογία της πράσινης δικτύωσης θα πρέπει να κινηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να πετύχει την τέλεια ενεργειακή απόδοση, πάνω από την απαιτούμενο επίπεδο παρεχόμενης ποιότητας. Πολύ σημαντικό είναι να τονίσουμε, ότι ελάχιστη μείωση στην ποιότητα των υπηρεσιών μπορεί να είναι ανεπαίσθητη στον τελικό χρήστη, ενώ μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Παρόλα αυτά, είναι δύσκολο να σχεδιαστούν πράσινα δίκτυα με την ιδανική ενεργειακή απόδοση και την αντίστοιχη ιδανική επίδοση, οι οποίες να πετυχαίνουν τα απαιτούμενα αποτελέσματα. [4]



Εικόνα 17: Ενεργειακή απόδοση σε ένα τυπικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας σε σχέση με την απόδοση. Η καμπύλη δείχνει απόδοση σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας. Η τομή της καμπύλης με το απαιτούμενο επίπεδο των παρεχόμενων υπηρεσιών αποτελεί το σημείο της βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης[4]

Κεφάλαιο 2: Δίκτυα 5^{ης}γενιάς

2.1 Εισαγωγή

Το 5G αναμένεται να αυξήσει την πρόσβαση των κινητών συσκευών στο διαδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, τα επόμενα χρόνια, οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες κάθε κινητού τηλεφώνου θα έχει τη δυνατότητα να συνδεθούν με οτιδήποτεανά πάσα στιγμή. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τόσο ανθρώπους όσο και μηχανήματα και να γίνεται με έγκυρο, ευέλικτο, αξιόπιστο και ασφαλήτρόπο. Με άλλα λόγια, το 5G πρόκειται να επεκτείνει τις δυνατότητες και τις υπηρεσίες που προσφέρονται από τα δίκτυακινητής τηλεφωνίας. [6]

Το δίκτυο5G προσφέρει τεράστιες δυνατότητες τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τη σύγχρονη βιομηχανία, καθώς είναι πολύ ταχύτερο από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Έτσι, το 5G αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία κυρίως για τις εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης, δημιουργώντας μια υπέρ-συνδεδεμένη κοινωνία.Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του 5G είναι όχι μόνο η διασύνδεση των ανθρώπων μεταξύ τους αλλά και μηχανημάτων όπως αυτοκίνητα, υποδομές πόλεων, δημόσια ασφάλεια και πολλά άλλα.[5, 20]

Ξεκινώντας από την αναλογική εποχή (1G) μέχρι και το LTE (4G), κάθε γενιά κινητής τεχνολογίας έχει δημιουργηθεί από την ανάγκη να ικανοποιηθεί μια νέα απαίτηση που δεν προσφέρεται από τον προκάτοχότης. Για παράδειγμα, η μετάβαση από 2G σε 3G αποσκοπούσε στηνενεργοποίηση του διαδικτύου στις κινητές συσκευές. Στη συνέχεια το 3.5G, αποτελούσε ένα συνδυασμό των κινητών συσκευών (smartphones) με τα ευρυζωνικά δίκτυα.Έτσι αναπτύχτηκαν εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης αλλά και αυτές που επιτρέπουν τον έλεγχο των συσκευών του σπιτιού σας από οπουδήποτε στον κόσμο. Η κινητή ευρυζωνικότητα έχει αποφέρει τεράστια οφέληκαι έχει αλλάξει θεμελιωδώς τη καθημερινή ζωή πολλών ανθρώπων.[5]

Στη συνέχεια, η μετάβαση από υπηρεσίες 3.5G σε 4G δίνουν την δυνατότητα σε χρήστες να έχουν πρόσβαση σε πιο μεγάλεςταχύτητες δεδομένων με ταυτόχρονα μικρότερες καθυστερήσεις. Έρευνες τηλεπικοινωνιακών παρόχων, ανά τον κόσμο, αναφέρουν ότι χρήστες4G καταναλώνουν δύο έως τρεις φορές περισσότερη ποσότητα δεδομένων σε σχέση με μη χρηστών 4G. [5]

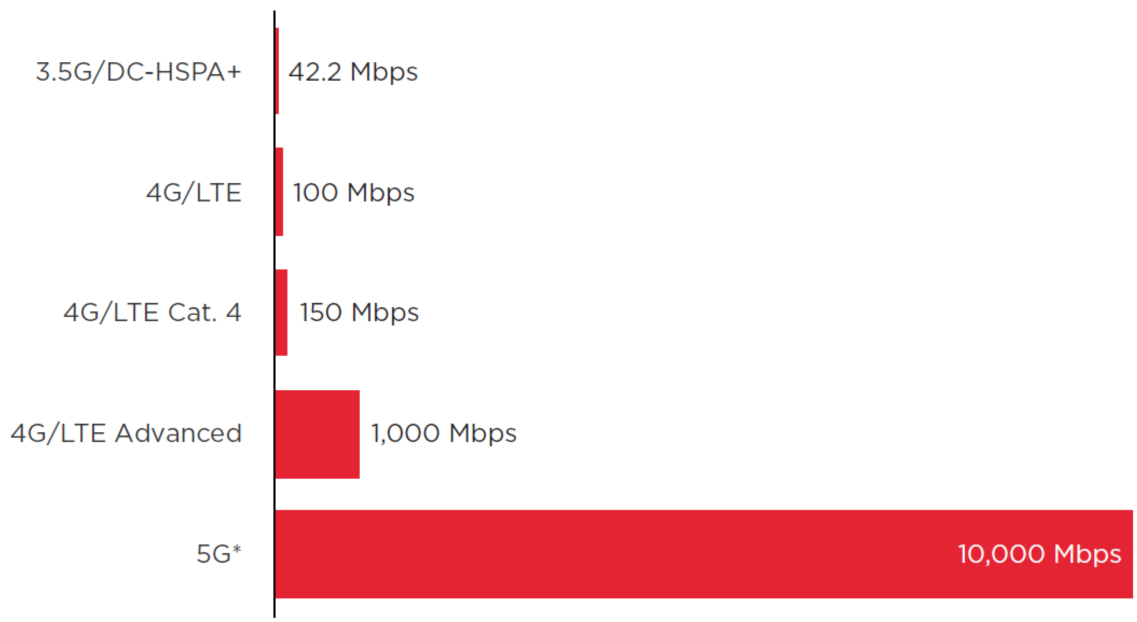
Το 5G δεν αποτελεί μόνο μια εξέλιξη στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, προσφέρει νέες μοναδικές δυνατότητες δικτύου και υπηρεσιών. Για παράδειγμα, δίνει την δυνατότητα συνδεσιμότητας σε δύσκολες καταστάσεις όπως η υψηλή κινητικότητα, για παράδειγμα κίνηση με αμαξοστοιχίες, οι πολύ πυκνές ή αραιοκατοικημένες περιοχές και η σύνδεση σε ταξίδια που καλύπτονται από πολλές διαφορετικές ετερογενείς τεχνολογίες. Επιπλέον, το 5G έρχεται να καλύψει ανάγκες κρίσιμων υπηρεσιών που απαιτούν πολύ υψηλή αξιοπιστία, παγκόσμια κάλυψη ή / και πολύ μικρή καθυστέρηση, οι οποίες μέχρι τώρα αντιμετωπίζονται από συγκεκριμένα δίκτυα. Παράδειγμα τέτοιων υπηρεσιών είναι αυτές της δημόσιας ασφάλειας.[13]

Από την άλλη, η εμφάνιση του InternetofThings (IoT) αποτελεί ένα βασικός παράγοντας εξέλιξης για το 4G. Ο όρος InternetofThings χρησιμοποιείται για να περιγράψει συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, το InternetofThings (IoT) αποτελεί ένα δίκτυο φυσικών συσκευών, όπως για παράδειγμα οχήματα ή ενσωματωμένα με ηλεκτρονικά, λογισμικό και αισθητήρες. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα IoT και η χρήση του στην καθημερινή ζωή.

Εικόνα 18: Παράδειγμα IoT στην καθημερινή ζωή. [24]
Πηγή: https://wireless.kth.se/wp-content/uploads/sites/19/2014/08/M2M_TUTORIAL_5GREEN_2014_FINAL_Jesus.pdf

Οι συσκευέςIoT αυτές έχουν την δυνατότητα συλλογής και ανταλλαγής δεδομένων αλλά και ανίχνευσης και ελέγχου από απόσταση.Επιπλέον, η νέα πρόκληση είναι η παροχής δικτύων χαμηλής ισχύς και συχνότητας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη Machine-to-Machine (M2M) υπηρεσιών.Το 5G πρόκειται να παρέχει μια πλατφόρμα στην οποία θα δια-συνδέεται ένας τεράστιος αριθμός αισθητήρων, συσκευές απόδοσης και ενεργοποιητές με αυστηρούς περιορισμούς ενέργειας και μετάδοσης.Οι υπηρεσίες αυτές αναμένεται να παρέχονται από το 5G και προσφέρουν πιο άμεση ενσωμάτωση του φυσικού κόσμου σε συστήματα βασισμένα σε υπολογιστή παράλληλα με αποτελεσματικότητα, ακρίβεια, οικονομικό όφελος και μειωμένη ανθρώπινη παρέμβαση.Στη συνέχεια θα αναλύσουμε σε βάθος το επερχόμενο δίκτυο 5G.. [5,13, 19,22]

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το εύρος ζώνης που παρέχεται από κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες.



Εικόνα 19: Μέγιστη θεωρητική ταχύτητα downlink (σε Mbps) στις διάφορες τεχνολογίας.
(* 10 Gbps είναι η ελάχιστη θεωρητική ανώτερη ταχύτητα που καθορίζεται για το 5G)
Πηγή: GSMA Intelligence

2.2 Ορισμός δικτύων 5ης γενιάς

5G είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της επόμενης γενιάς κινητών δικτύων πέρα από τα 4GLTE κινητά δίκτυα, που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σήμερα. Εναλλακτικά, το 5G ονομάζεται δίκτυο 5ης γενιάς (5thgenerationmobilenetworks) ή ασύρματοσύστημα 5ης γενιάς (5th generationwirelesssystems). Σκοπός των δικτύων αυτών είναι η υψηλότερη χωρητικότητα (capacity) και η χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) σε σχέση με τα δίκτυα 4G. Από την άλλη, όσο αφορά την τεχνολογία InternetofThings (IoT), στοχεύει στην χαμηλότερη κατανάλωση μπαταρίας.[19, 21]

Μέχρι και σήμερα, δεν υπάρχει πρότυπο, οπότε ο ορισμός εξακολουθεί να είναι πολύ ρευστός.Έτσι, υπάρχουν δύο διαφορετικοί ορισμοί σχετικά με το 5G. Ο ένας ορισμός υποστηρίζει ότι πρόκειται για μία υπηρεσία στην οποίαοι φορείς κινητής τηλεφωνίας, θα δημιουργήσουνε μία νέα τεχνολογία, που ονομάζεται5G αποτελεί ένα συνδυασμός τωνπροϋπαρχόντων τεχνολογιών 2G, 3G, 4G,Wi-fi και άλλες.Η προσέγγιση αυτή συχνά αναφέρεται σαν το όραμα υπερσύνδεσης (hyper-connectedvision). Το 5G αναμένεται να παρέχειμεγαλύτερη κάλυψη (coverage), αξιοπιστία (reliability), διαθεσιμότητα (availability)και την πυκνότητα δικτύου (networkdensity). Η μεγαλύτερη συνδεσιμότητα, που προσφέρει αποτελείπαράγοντας ενεργοποίησης της διασύνδεσης των M2M και του IoT.[5, 21]

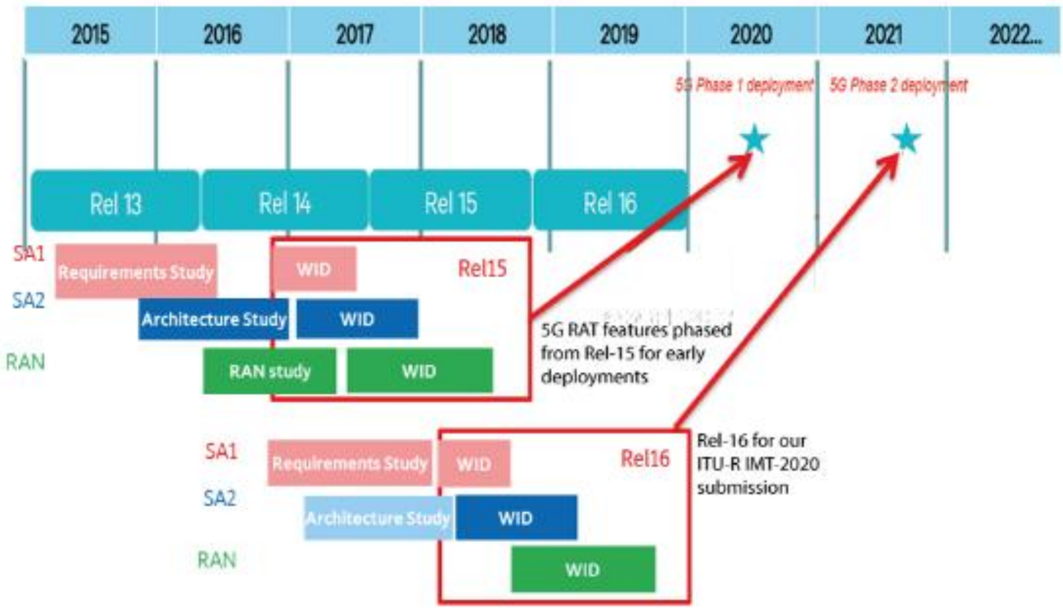
Η δεύτερη άποψη, στηρίζεται στην αλλαγή της ταχύτητας των δεδομένωνκαι τη μείωση της συνολικής καθυστέρησης στο δίκτυο. Αναφέρεται στο 5G σαν την τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης επόμενης γενιάς (Next-generationradioaccesstechnology). Αυτός ο ορισμός είναι πιο κοντά στους παραδοσιακούς ορισμούς των προηγούμενων γενιών, καθώς χρησιμοποιεί σαν κριτήρια το ρυθμό δεδομένων και την καθυστέρηση του δικτύου. Σαν αποτέλεσμα, αυτός ο ορισμός πολλές φορές είναι πιο αποδοτικός καθώς προσφέρει μια σαφή οριοθέτηση μεταξύ μιας τεχνολογίας που πληροί τα κριτήρια για το 5G και κάποιας άλλης που όχι. [5]

Ο πρώτος ορισμός, καθιστά το 5G κάπως άυλο. Από την άλλη, ο δεύτερος, ορίζει ένα σύνολο τεχνικών στόχων σχετικά με μία τεχνολογία, οπότε κάθε φορά που εκπληρώνονται οι στόχοι αυτού θα μπορούμε να μιλάμε για 5G. Ωστόσο, και οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις είναι εξίσου σημαντικές για την εξέλιξη της βιομηχανίας, καθώς δεν θέτουνδιαφορετικές απαιτήσεις ως προς τη νέα αυτή υπηρεσία. Πολύ συχνά μάλιστα. οι δύο αυτές απόψεις λαμβάνονται ως ένα ενιαίο σύνολο και για αυτό το λόγο ομαδοποιούνται. [5]

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (InternationalTelecommunicationsUnion - ITU) είναι ο επίσημος οργανισμός τυποποίησης που θα δημοσιεύσει το τελικό πρότυπο του 5G. Καθώς, αναμένεται ότι τα δίκτυα 5G δεν θα είναι διαθέσιμα στην αγορά μέχρι και πριν το 2020, ο ITU αναφέρεται επίσης και σαν InternationalMobileTelecommunications (IMT)-2020. Από τη μεριά του, το 3GPP είναι ο υπεύθυνος φορέας των πρότυπων κινητής τηλεφωνίας που θα υποβάλει μια προτεινόμενη προδιαγραφή στην ITU ως μέρος του προτύπου IMT-2020. Παράλληλα συμμετέχουν τόσο οι φορείς κινητής τηλεφωνίας όσο και πωλητές στη διαδικασία προδιαγραφής 3GPP.[21]

Η GSMA, επίσης, σαν εκπρόσωπος της κινητής βιομηχανία, παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση του 5G. Πιο συγκεκριμένα, η GSMA θα διαδραματίσει ένα σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση και την ανάπτυξη του 5G οικοσυστήματος. Αυτό περιλαμβάνει τομείς όπως ο ορισμός της περιαγωγής και της διασύνδεσης στο 5G καθώς και η ταυτοποίηση και η ευθυγράμμιση των κατάλληλων ζωνών φάσματος. Σε πρώτο στάδιο, σκοπός είναι η θέσπιση του ορισμού του 5G και στη συνέχεια ο εντοπισμός και η ανάπτυξη της εμπορικής πλευράς του 5G με την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. [5, 21]

Στην ακόλουθη εικόνα μπορούμε να δούμε το χρονοδιάγραμμα που ακολουθείται σχετικά με το 5G. Το 5G καθίσταται σαφέστερο καθώς πλησιάζουμε στο 2020. Οι περισσότεροι ειδικοί λένε ότι το 5G θα αγγίζει ταχύτητες δικτύου που είναι απίστευτα γρήγορες, έως και τα 20 G/bps ή υψηλότερες που θα έχουν καθυστέρηση μόνο κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου. Τα δίκτυα 5G, επίσης, αναμένεται να είναι ενεργειακά αποδοτικά, τα οποία πιθανόν να απαιτούν νέα πρωτόκολλα και τεχνολογίες πρόσβασης.[21]



Εικόνα 20: Χρονικό διάγραμμα ανάπτυξης 5G. [21]
Πηγή: https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/what-is-5g/

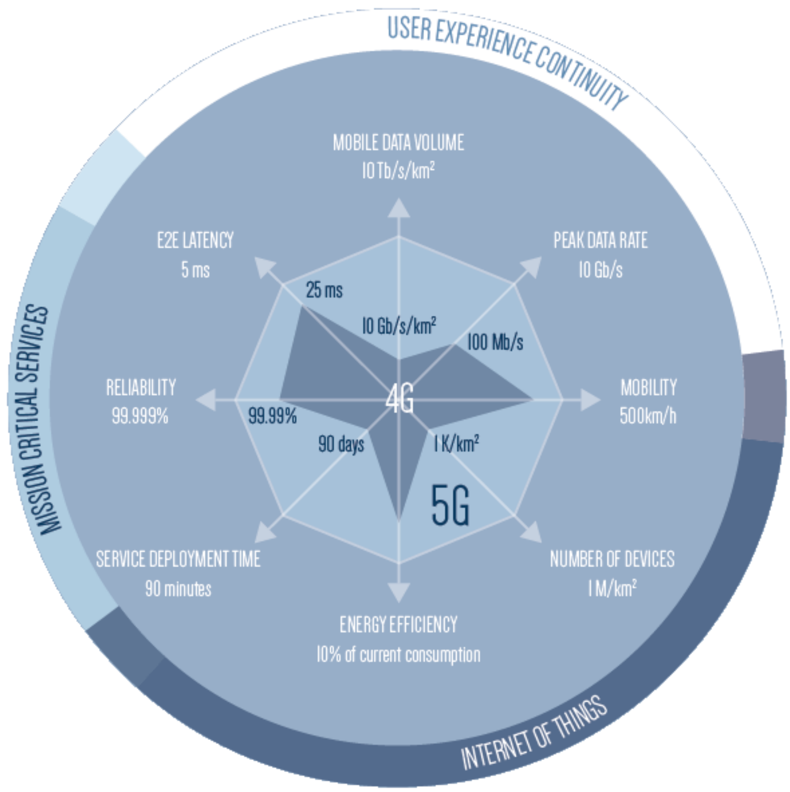
2.3 Απαιτήσεις δικτύων 5ης γενιάς

Ορισμένες από τις απαιτήσεις του 5G, προέρχονται και μπορούν να καλυφθούν από προγενέστερα δίκτυα όπως το 4G. Προς το παρόν δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο πρότυπο για την ανάπτυξη5G. Ωστόσο, η NextGenerationMobileNetworksAlliance έχει ορίσει οχτώ βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ένα πρότυπο 5G:

- Συνδέσεις 1-10Gbps στο τελικό σημείο του χρήστη
- Μείωση της καθυστέρησης (latency) σε σύγκριση με το LTE σε λιγότερο από 1ms. Αυτό σημαίνει 1ms καθυστέρηση για μία end-to-end διαδρομή. Πετυχαίνοντας καθυστέρηση μικρότερη του 1ms αποτελεί μία πραγματική πρόκληση που θα προσδιορίζει μοναδικά το 5G. Ίσως ο χρόνος αυτός να αποτελεί μία χαλαρή κατάσταση ενός δικτύου.
- Εύρος ζώνης μεγαλύτερο του 1Gbps ανά περιοχή
- Αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες ταυτόχρονες συνδέσεις συσκευών (10-100x).
- 99,999% διαθεσιμότητα

- Βελτίωση της παρεχόμενης κάλυψης. Παροχή έως και 100% κάλυψη.
- Έως και90% μείωση στη χρήση ενέργειας του δικτύου
- Αύξηση του χρόνου ζωής της μπαταρίας έως και δέκα χρόνια για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται οι παραπάνω απαιτήσεις, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του 4G. Επίσης, φαίνονται οι περιπτώσεις χρήσεις των διάφορων απαιτήσεων του 5G. [5]



Εικόνα 21: Οι απαιτήσεις του δικτύου 5G, συγκρινόμενες με αυτές του 4G και οι διάφορες υπηρεσίες οι οποίες ικανοποιούν.[13]
Πηγή: 5GPP 5G Visiondocument

Πολλές φορές, οι απαιτήσεις αυτές καθορίζονται από διαφορετικές προοπτικές, χωρίς να υπάρχει μια συνοχή μεταξύ τους. Έτσι, είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς μια νέα τεχνολογία που θα μπορούσε να συνδυάσειόλες αυτές τις συνθήκες ταυτόχρονα.Από την άλλη, δεν υπάρχει υπηρεσία ή εφαρμογή που να απαιτεί ταυτόχρονα και τις οκτώ αυτές παραμέτρους. Στην πραγματικότητα, οι απαιτήσεις αυτές δεν συνδέονται με περιπτώσεις χρήσης ή υπηρεσίες, αλλά έχουν καταγράψει ώστε να είναι σαφές πώς θα πρέπει να κατασκευαστεί το δίκτυο, ανεξάρτητα από την υπηρεσία ή την τεχνολογία που θα το χρησιμοποιεί. [5]

Σαν αποτέλεσμα, θα είναι εφικτοί συνδυασμοί ενός υποσυνόλου των αρχικών απαιτήσεων με σκοπό την δημιουργία του δικτύου που επιθυμεί ο κάθε πάροχος κινητής τηλεφωνίας. Πράγματι, κάθε πάροχος είναι διαθέσιμος να πληρώσει λιγότερα για την κατασκευή και τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου δικτύου. [5]

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τις παραπάνω οκτώ απαιτήσεις:

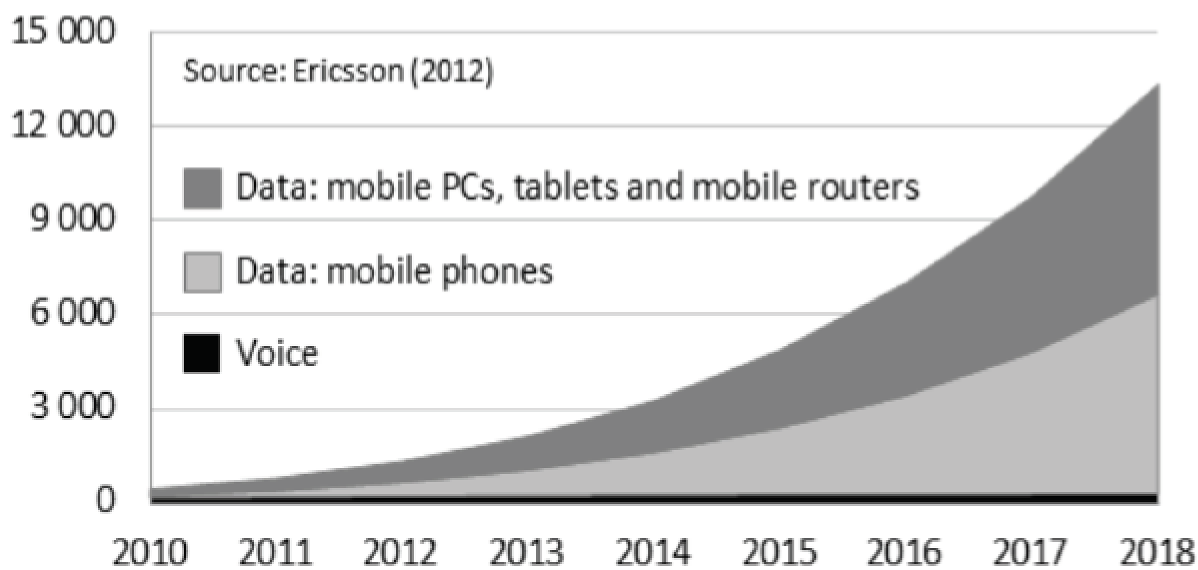
- Αναγνωρισμένη διαθεσιμότητα 99,999% και γεωγραφική κάλυψη 100%

Οι τρέχουσες τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν 99,999% διαθεσιμότητα και κάλυψη 100% με την τοποθέτηση των απαραίτητων κυψελών σε μία περιοχή έτσι ώστε να καλύψει μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.Αυτό αποτελεί μια δύσκολη δύσκολων επιχειρηματική απόφαση για το ποιες περιοχές έχουν ανάγκη κάλυψης. Με το 5G, κάθε δίκτυο που θα πληροί τα κριτήρια ποιότητάς του θα παρέχει 100% κάλυψη και 99,999% διαθεσιμότητα. Έτσι, η διαθεσιμότητα θα παραμείνει μια επιχειρηματική απόφαση παρά ένας δύσκολος τεχνικός στόχος.[5]

- Πυκνότητα σύνδεσης (1000x εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας με αριθμό συνδέσεων 10-100x)

Το κριτήριο αυτό αποτελεί μια συσσωρευτική απαίτηση του 5G, καθώς καλείτε να υποστηρίξει το σύνολο τωνπροϋπαρχόντωνγενιών τεχνολογιών αλλά και να είναι συμβατό με τις αυτές που πρόκειται να ακολουθήσουν. Επιπλέον, αυτό είναι απαραίτητο για να είναι σε θέση το 5G να υποστηρίξει τις προγενέστερεςτεχνολογίες.Η υποστήριξη 10-100 φορές του αριθμούτων συνδέσεων προκύπτει από το γεγονός ότι το 5G στηρίζεται σε μια σειρά τεχνολογιών που λειτουργούν από κοινού, μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για τις τεχνολογίες 2G, 3G, 4G, Wi-Fi, Bluetoothκαι άλλες συμπληρωματικές τεχνολογίες, καθώς το 5G αναμένεται να παρέχει τόσο κυψελωτά όσο και δορυφορικά δίκτυα ως λύσεις. Έτσι το 5Gδεν θα πρέπει να θεωρείται ως μία τελική λύση, αλλά ως ένα επιπλέονκομμάτι μιας ευρύτερης εξέλιξης για να καταστεί δυνατή η συνδεσιμότητα των μηχανών. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να παρέχεται αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας. Θα πρέπει να έχουμε κατά νου, ότι το IoTέχει αναπτυχθεί αρκετά ανεξάρτητα από την εξέλιξη του 5G.[5, 13]

Ο αριθμός των κινητών ευζωνικών συνδέσεων, αυξάνεται παγκοσμίως κατά 40%ετησίως τα τελευταία έξι χρόνια, καθιστώντας την κινητή ευρυζωνικότητα την πιο δυναμική αγορά σε ολόκληρο τον τομέα ΤΠΕ.Επιπλέον, αναμένεται ο όγκος της κυκλοφορίας των δεδομένων να αυξηθεί εκθετικά ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα. Όπως φαίνεται, ο όγκος των δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί περίπου 10 φορές μεταξύ 2012 και 2018.[12]



Εικόνα 22: Εξέλιξη της κίνησης δεδομένων κινητού ανά μήνα μέχρι το 2018 [12]
Πηγή: http://ieeexplore.ieee.org/document/6673363/

Η απαίτηση για εύρος ζώνης 1Gbps ανά μονάδα επιφάνειας συνδέεται άρρηκτα με το IoT και την απαίτηση όλο και περισσότερων συσκευών να συνδέονται με υψηλότερο εύρος ζώνης γιαμεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Άλλωστε ήδη το LTE έχει τροποποιηθεί ως προς το εύρος ζώνης που καταναλώνεται σε μια οποιαδήποτε συγκεκριμένη περιοχή και αυτό θα αλλάξει όταν εμφανιστεί και το 5G. Σε αυτό έχει συμβάλει πολύ και η επέκταση του Wi-Fi. [5]

Για να είναι εφικτές όλες αυτές οι αλλαγές θα πρέπει να επενδυθούν χρήματα τόσο στο backhaul όσο και την ισχύς που χρησιμοποιείται. Δηλαδή, θα έχει επιπτώσεις στο OPEX. Αυτό είναι αναγκαίο ώστε κάθε hotspot να είναι ικανό να τροφοδοτηθεί όλη την πρόσθετη κυκλοφορία που θα παραχθεί. [5]

Το 5G, επίσης, θα καθοδηγείται μέσω του λογισμικού. Οι λειτουργίες δικτύου αναμένεται να εκτελούνται σε ένα ενιαίο λειτουργικό σύστημα με πολλαπλά σημεία διασύνδεσης. Για να είναι αυτό εφικτό, θα πρέπει να βασίζεται σε διάφορες σύγχρονες τεχνολογίες, όπως οιSoftwareDefinedNetworking (SDN), η Εικονοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (NetworkFunctionsVirtualization - NFV), η MobileEdgeComputing (MEC) και η FogComputing (FC) για την επίτευξη της απαιτούμενηςεπίδοσης, της επεκτασιμότητας και της ευελιξίας. [13]

- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου και βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας:

Η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας από τα δίκτυα και τις συσκευές είναι θεμελιώδους σημασίας τόσο από οικονομικής όσο και από οικολογικής πλευράς όπως αναλύσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ελαχιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας τουδικτυού και τουτερματικούεξοπλισμού αποτελεί ένα οικολογικό στόχο, και αναμένεται να έχει μία θετική επίδραση στο OPEX που συνδέεται με τη λειτουργία ενός δικτύου. Ωστόσο, παρότι αυτό αποτελεί μία από τις απαιτήσεις του 5G, προς το παρόν, δεν είναι σαφές πώς το 5G θα το καταστήσει αυτό δυνατό. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει το 5G, θα αποτελεί μία επικάλυψη (και όχι αντικατάσταση) του προϋπάρχοντοςεξοπλισμού δικτύου, προσφέροντας υψηλότερο εύρος ζώνης. Έτσι δεν είναι σαφές, πως αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε καθαρή μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. [5]

Σε πολλές περιπτώσεις χρήσης, το M2M απαιτεί οι συνδεδεμένες συσκευές να παραμένουν αδρανής για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένας τρόπος όπου αυτές οι συσκευές θα είναι μονίμως συνδεδεμένες και θα ενεργοποιούνται και θα επικοινωνούν με άλλες μόνο όταν είναι απαραίτητο. Το 5G θα επιτρέψει τη σύνδεση πολλών περισσότερων συσκευών ταυτόχρονα και θα βελτιώσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του τερματικού. Πιο συγκεκριμένα, οι συσκευές θα είναι δυνατόν να λειτουργούν και να αποδίδουν το ίδιο με μικρότερο ποσό ενέργειας. Αυτή η απαίτηση είναι παράλληλη με τα δίκτυα αισθητήρων, που θα λειτουργούν στην περίοδο του 5G. [5, 13]

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για το δίκτυο 5G, αναμένεται να κατασκευαστεί με αποδοτικότερο εξοπλισμό. Τα υλικό που θα χρησιμοποιηθούν πρόκειται να είναι πιο αποδοτικά, ενεργειακά πιο ευαίσθητα και ευέλικτα έτσι ώστε να είναι δυνατή η διασύνδεση σε πολύ διαφορετικά περιβάλλοντα. Σαν αποτέλεσμα, η δημιουργία μίας αποτελεσματικής υποδομής 5G θα επιτρέψει στο κόστοςνα μειωθεί δραματικά.[13]

Τέλος, το 5G αναμένεται να διευκολύνει και ωα βελτιστοποιήσει τις λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου. Η ανάπτυξη γνωστικών χαρακτηριστικών και η προηγμένη αυτοματοποίηση της λειτουργίας του μέσω κατάλληλων αλγορίθμων θα επιτρέψουν τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων επιχειρηματικών στόχων, όπως η κατανάλωση ενέργειας από άκρο σε άκρο. Επιπλέον, μέσω των τεχνικών της ανάλυσης δεδομένων και του μεγάλου όγκου δεδομένων, θα είναι δυνατή η παρακολούθηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών μέσω της εμπειρίας των χρηστών. έτσι, θα παρέχονται νέες μετρικές που θα συνδυάζουν τα δεδομένα δικτύου και θαεγγυώνται την ιδιωτικότητα του χρήστη. [13]

Όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα 5G θα πρέπει να παρέχουν πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών. Ορισμένεςαπό αυτές, καλούνται«ενισχυμένες υπηρεσίες» και έχουν πολύ αυστηρά καθο-ρισμένες απαιτήσεις σχετικά με το δίκτυο. Οι απαιτήσεις αυτές είναι:

- Διαφάνεια στη συνδεσιμότητα

Η διαφάνεια είναι απαραίτητη για τη συνεχή παροχή υπηρεσιών σε ετερογενή περιβάλλοντα. Πλήθος διαφορετικών συσκευών με διαφορετικές απαιτήσεις και υπό διαφορετικές συνθήκες θα πρέπει να συνδεθούν σε ένα κοινό δίκτυο. Έτσι ο κάθε χρήστης, θα πρέπει να μπορεί να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες που χρειάζεται χωρίς να επιβαρυνθεί με ενδιάμεσες δικτυακές πληροφορίες.

- Γνώση τοποθεσίας

Οι πληροφορίες σχετικά με μία υπηρεσία, που ζητείται από κάποιον χρήστη, πρέπει να είναι γνωστές στο δίκτυο ώστε να είναι δυνατή η παροχή άμεσων και εξατομικευμένωναποτελέσματων. Μία τέτοια πληροφορία είναι η θέση του χρήστη στον τρισδιάστατο χώρο και μάλιστα με μεγάλη ακρίβεια. Θα πρέπει να δίνεται το 1-10m στο 80% των περιπτώσεων και λιγότερο από 1m για υπηρεσίες που παρέχονται σε εσωτερικούς χώρους. Η ακρίβεια αυτού του είδους των πληροφοριών, βελτιώνεται με εξωτερικές τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούν δεδομένα και από άλλες κοντινές πηγές και το συνολικό κόστος της διαδικασίας είναι μικρότερο από την αντίστοιχη με χρήση δορυφόρων.

- Ασφάλεια

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να διαχειρίζονται τεράστιο όγκο δεδομένων, τα οποία θα ανταλλάσσονται μεταξύ ανθρώπων και μηχανών. Ορισμένα δεδομένα μπορεί να είναι ευαίσθητα και θαπρέπει να προστατεύονταιαπό ανεπιθύμητη πρόσβαση, χρήση, τροποποίηση ή και καταστροφή. Επιπλέον η 5G τεχνολογία θα χρησιμοποιηθεί σε τομείς που εξορισμού απαιτούν τη μέγιστη ασφάλεια όπως η δημόσια ασφάλεια και η παροχή υπηρεσιών υγείας.

- Αξιοπιστία

Ο ρυθμός αξιοπιστίας ορίζεται ως το ποσοστό των επιτυχώς απεσταλμένων πακέτων δεδομένων ως προς τα συνολικά απεσταλμένα πακέτα και ορίζεται μόνο όταν ένα δίκτυο είναι διαθέσιμο. Ο απαιτούμενος ρυθμός αξιοπιστίας διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Η τεχνολογία 5G αναμένεται να έχει τη δυνατό-τητα να επιτύχει ρυθμό αξιοπιστίας 99.999%.

Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις έχουν προκύψει από τις σύγχρονες ανάγκες της βιομηχανίας. Λόγω αυτών, και της εξέλιξης της τεχνολογίας δικτύου και της τοπολογίας έχουν αλλάξει πολλά από τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες του υλικού. Ωστόσο, ακόμα και σήμερα ελάχιστα βήματα έχουν γίνει προς αυτή την κατεύθυνση, καθώς υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί από τις απαιτήσεις του 5G. Επιπλέον από οικονομικής πλευράς δεν είναι ξεκάθαρο, πως αυτές οι νέες τεχνολογίες θα έχουν οικονομικά οφέλη. Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, θα πρέπει να γίνουν πιο αυστηρές μετρήσεις όσον αφόρα τα δίκτυα. [5]

2.4 Σχεδιαστικές αρχές δικτύων 5^{ης} γενιάς

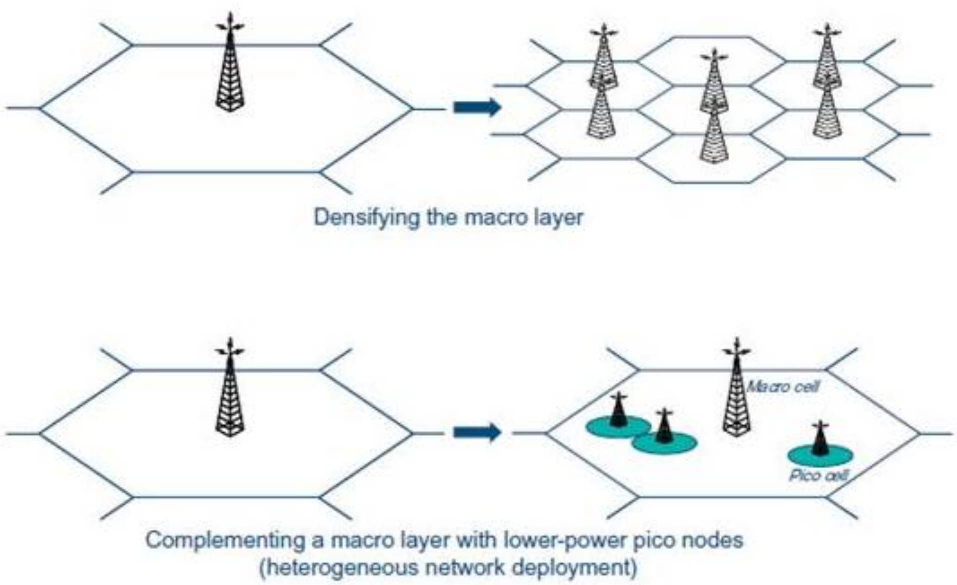
Για να είναι δυνατή η ανάπτυξη των δικτύων 5G και των τεχνολογιών που θα κάνουν χρήση αυτού πρέπει να αναπτυχθούν αρχικά κάποιες σχεδιαστικές αρχές. Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε αυτές τις σχεδιαστικές αρχές ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η ανάλυση της αρχιτεκτονικής του 5G.

- Πύκνωση δικτύου (Network Densification)

Η πύκνωση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με την πύκνωση των κυψελών που χρησιμοποιούνται. Πρόκειται για μια γνωστή τεχνική που εφαρμόζεται και σε προγενέστερες τεχνολογίες με στόχο την αύξηση των δυνατοτήτων των υπαρχόντων δικτύων σε τοπικό επίπεδο. Ο σωστός σχεδιασμός και διαχωρισμός των κυψελών μπορεί να αύξηση τη χωρητικότητα του δικτύου όπου αυτό ήταν απαραίτητο.Έτσι,για παράδειγμα, σεπολύ πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως μια πόλη μερικών εκατομμυρίων κατοίκων μπορεί να χρειάζονται έως και 1000 μακροκυψέλες. Για την ακόμα μεγαλύτερη πύκνωση του δικτύου, στα επόμενα χρόνια αναμένεται κάθε μία από αυτές τις μακροκυψέλες να αποτελείται από 100 μικρές κυψέλες.

Με άλλα λόγια απαιτείται η μετατροπή των κυψελών και κατ’ επέκταση των κελιώντους σε μικρότερα. Παράδειγμα τέτοιων κελιών είναι tapicocells και τα femtocells.Σκοπός είναι σε κάθε μακροκυψέλη να αντιστοιχούν περίπου 500-1000 σπίτια, καταστήματα ή και γραφεία. Σε ορισμένες από αυτές τις κυψέλες είναι δυνατόν να υπάρχουν μικρότερες κυψέλες εσωτερικού χώρου. Ο αριθμός των κυψελών αυτών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περιοχής. Έτσι, ο αριθμός τους αναμένεται να είναι από 2 έως 10 σε περιοχές χαμηλής κίνησης ενώ μπορεί να φτάσει τις 100 σε περιοχές με αυξημένη κίνηση δεδομένων.

Συνεπώς δεκάδες ή και μερικές εκατοντάδες μικρές κυψέλες θα βρίσκονται εντός μίας μακροκυψέλης. Αυτό φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα, όπου ένα macrolayer μπορεί να αποτελείται και από μικρότερα κελία όπως το pico-cell.



Εικόνα 23: Πύκνωση δικτύου.
Πηγή: http://trends-in-telecoms.blogspot.gr/2011/06/lte-network-densification-with.html

Η πύκνωση των δικτύων συμβάλει στην μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης μέσω της κατάτμησης του χώρου σε μικρότερες κυψέλες. Η κυψέλη δεν θα έχει την παραδοσιακή της σημασία και κάθε χρήστης μαζί με τον εξοπλισμό του θα έχει πρόσβαση σε ξεχωριστό κόμβο του δικτύου(Access Node - AN). Επιπλέον, θα μειωθούν οιαπώλειεςμετάδοσης καθώς ο κόμβος πρόσβασης θα είναι σε μικρότερη απόσταση από τον χρήστη. [9, 11]

- SoftwareDefinedNetworking (SDN)

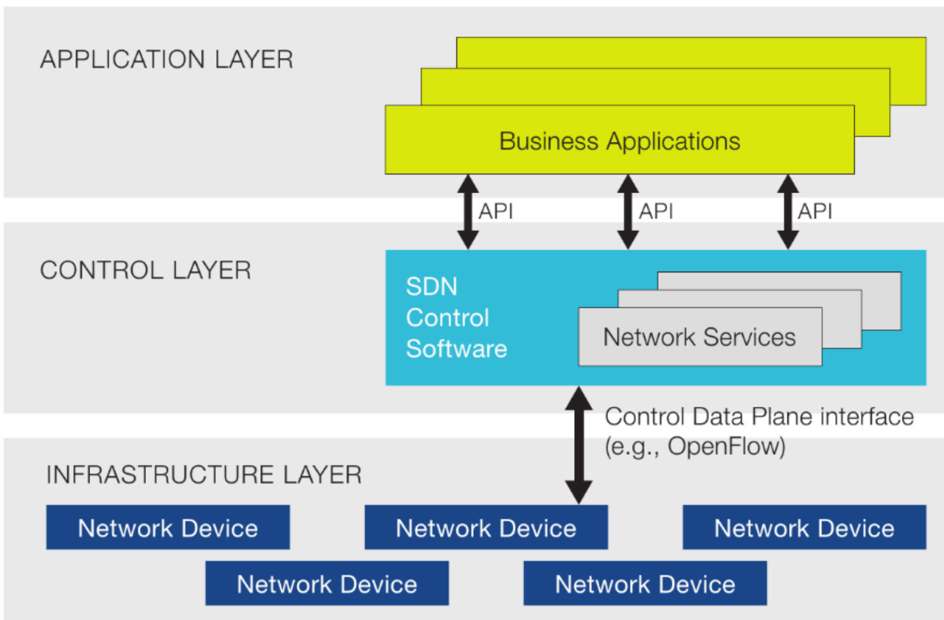
ToSoftwareDefinedNetworking (SDN) είναι μία δικτυακή αρχιτεκτονική κατά την οποία η διαχείριση των αποφάσεων για την δρομολόγηση των πακέτων λαμβάνεται από ένα κεντρικό σημείο διαχείρισης, τον controller. Πρόκειται για μία προσέγγιση που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα και η οποία επιτρέπει στους διαχειριστές (controller) να διαχειρίζονται τους εξυπηρετητές δικτύου διαμέσου οδηγιών από το χαμηλότερο επίπεδο λειτουργικότητας. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο softwarization εννοείται ο εμπλουτισμός του δικτύου με εργαλεία λογισμικού με σκοπό την αποτελεσματικότερη διαχείρισή του.

Η SDN αποσκοπεί στην αύξηση της ικανότητας του δικτύου να προσαρμόζεται δυναμικά στις ανάγκες των εφαρμογών και υπηρεσιών που εξυπηρετεί.Γιανα είναι δυνατή η λειτουργία του απαιτείται δυναμική αρχιτεκτονική δικτύου, η οποία δεν είναι συμβατή με την κλασσική παραδοσιακή στατική αρχιτεκτονική, ενώ ο υπολογισμός και η αποθήκευση των πακέτων γίνεται σε κέντρα δεδομένων (datacenters).

Τα μελλοντικά δίκτυα και οι υπηρεσίες αναμένεται να ορίζονται δυναμικά τόσο μέσω software αλλά και να να προγραμματίζονται σε πραγματικό χρόνο. Με αυτό τον τρόπο, οι διάφοροιπάροχοιθα μπορούν να ανατεθούν δυναμικά πόρους, και να τα διαχειρίζονται τα δίκτυα με βάση τις τρέχουσες ανάγκες του. Όλα αυτά παρέχονται μέσω της τεχνολογίας SDN, με την οποία οι σταθμοί βάσης κάθε δικτύου μπορούν να είναι άμεσα προγραμματιζόμενοι και να ελέγχονται από έναν κεντρικοποιημένο ελεγκτή.

Το SDN βασίζεται στον διαχωρισμό των λειτουργιών από το στρώμα ελέγχου. Η δικτυακή αυτή ευφυΐα, είναι εντατικοποιημένη στους SDN controllers, οι οποίοι βασίζονται στο λογισμικό και μπορούν να έχουν μια συνολική εικόνα του δικτύου. Το SDN δίνει το πλεονέκτημα στους παρόχους τηλεπικοινωνιών να έχουν όλο τον έλεγχο του δικτύου μέσω ενός μοναδικού λογικού σημείου. Έτσι ο σχεδιασμός και η λειτουργία του δικτύου γίνεται πολύ πιο απλούστερη. Επιπλέον, απλουστεύει ο τρόπος λειτουργίας των δικτυακών συσκευών, αφού δεν χρειάζεται να κατανοούν και να επεξεργάζονται πρωτόκολλα αλλά απλά να δέχονται εντολές από τους SDN controllers. Τέλος, το SDN μειώνει τα έξοδα από CAPEX και OPEX καθώς το κόστος των δικτυακών συσκευών μεταφέρεται στον controller. Επιπλέον, μειώνεται και το κόστος του ανθρώπινου δυναμικού καθώς μειώνεται ο αριθμός συσκευών που θα πρέπει να ρυθμιστούν.

Η βασική αρχιτεκτονική του SDN περιλαμβάνει 3 στρώματα, το στρώμα υποδομών, το στρώμα ελέγχου και το στρώμα εφαρμογών. Τα στρώματα ενώνονται μεταξύ τους μέσω διεπαφών. Το στρώμα υποδομών περιλαμβάνει τις συσκευές και τον εξοπλισμό του δικτύου, το στρώμα ελέγχου το λογισμικό που είναι απαραίτητο για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων από τις εφαρμογές, και το στρώμα εφαρμογών συνδέεται με εξωτερικέςεφαρμογές ή συστήματα. Η αρχιτεκτονική του SDN φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 24: Αρχιτεκτονική SDN
Πηγή: https://www.sdxcentral.com/sdn/definitions/inside-sdn-architecture/

Η επικοινωνία μεταξύ controller και εξοπλισμού γίνεται με τη χρήση ενός πρωτοκόλλου, όπως για παράδειγμα τοOpenflow, το οποίο μεταφέρει μηνύματα ανεξάρτητα από το λογισμικό και τον κατασκευαστή του.

Το βασικό πλεονέκτημα του SDN είναι ότι αυξάνεται η αξιοπιστία του δικτύου, καθώς μειώνεται η ανθρώπινη παρέμβαση και αυξάνεται η αυτοματοποίηση των διαδικασιών. Επιπλέον το SDN παρέχει υψηλή διαθεσιμότητα. Η δυνατότητα επίβλεψης και της ρύθμισης της τοπολογίας από ένα μοναδικό κεντρικό σημείο οδηγεί στην βελτίωση της πρόβλεψης σφαλμάτων, κάνοντας το δίκτυο πιο ανεκτικό. Τέλος, οδηγεί στην εικονοποίηση των δικτύων.

Με τη μείωση της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού γίνεται ευκολότερη η μετάβαση σε εικονοποιημένο εξοπλισμό χωρίς μεγάλες δυνατότητες και απαιτήσεις. [9, 11]

- NetworkFunctionVirtualization

Η τεχνολογία NetworkFunctionVirtualization (NFV) αποτελεί μία συμπληρωματική τεχνολογία του SDN και έχει στόχο την εικονοποιηση των λειτουργιών ενός δικτύου. Για να είναι αυτό εφικτό, χρησιμοποιούνται softwarepackages τα οποίαέχουν την δυνατότητα παροχής όλων των υπηρεσιών που προσφέρουν τα προγενέστερα δίκτυα. Το NFV αποτελεί μία εξέλιξη του severvirtualization και μπορεί να εγκαταστήσει πολλαπλές εικονικές μηχανές με σκοπό τον προγραμματισμό διάφορων λειτουργικών συστημάτων, software και processes. Πιο συγκεκριμένα, το NFV αποσκοπεί στη μεταφορά δικτυακών ή τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, οι οποίες λειτουργούν σε εξειδικευμένες πλατφόρμες, σε εικονικές υποδομές.

Στα παραδοσιακά δίκτυα, η χρήση του δικτυακού εξοπλισμού γίνεται με πλεονασμό ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν σε κάθε περίσταση. Αυτό έχει αύξημένα έξοδα CAPEX και απαιτεί περισσότερο προσωπικό (αυξημένο OPEX). Το NFV βοηθάει στη δημιουργία μιας end-to-end αρχιτεκτονικής που είναι ικανή για την συνένωση ετερογενών εξοπλισμών δικτύου με τη μετακίνηση των λειτουργιών δικτύου από το hardware στις γενικού σκοπού πλατφόρμες αποθήκευσης όπως είναι οι servers. Οι λειτουργίες δικτύου εφαρμόζονται στα softwarepackages τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εικονική αρχιτεκτονική (virtualizedinfrastructure) και αυτές θα επιτρέπουν την ευελιξία της λειτουργίας και της διαχείρισης των δικτύων.

Το NFV σε συνδυασμό με το cloudcomputing, αυξάνει την αντοχή των δικτύων.Στα datacenters, η μεταφορά των δεδομένων μπορεί να γίνεται είτε μεταξύ πραγματικών είτε εικονικών μηχανών. Έτσι, το NFV παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία καθώς επιτρέπει την διαχείριση των πόρων και του scaling, λύνοντας το πρόβλημα του over-provisioning.

Τα SDN και NFV είναι δύο τεχνολογίες που αποσκοπούν στην διαχείριση του δικτύου. Ωστόσο, βασίζονται σε διαφορετικές αρχές. Αρχικά, το SDN διαχωρίζει το controlμε το dataplaneπροσφέροντας μία κεντρικοποιημένη άποψη του δικτύου. Αντίθετα, το NFV στηρίζεται στην βελτιστοποίηση των παρεχόμενων υπηρεσιών μέσω της εικονοποίησης τους. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι οι τεχνολογίες αυτές σε συνδυασμό μπορούν να μειώσουν τα λειτουργικά κόστηCAPEX καθώς και να προσφέρουν μια φθηνότερη και απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου η οποία θα είναι εύκολο να αναβαθμιστεί. Από την άλλη, το OPEX επίσης μειώνεται μέσω της εξοικονόμησης ισχύος καθώς η χωρητικότητα του δικτύου προσαρμόζεταιόπως και όταν χρειάζεται. [9, 11]

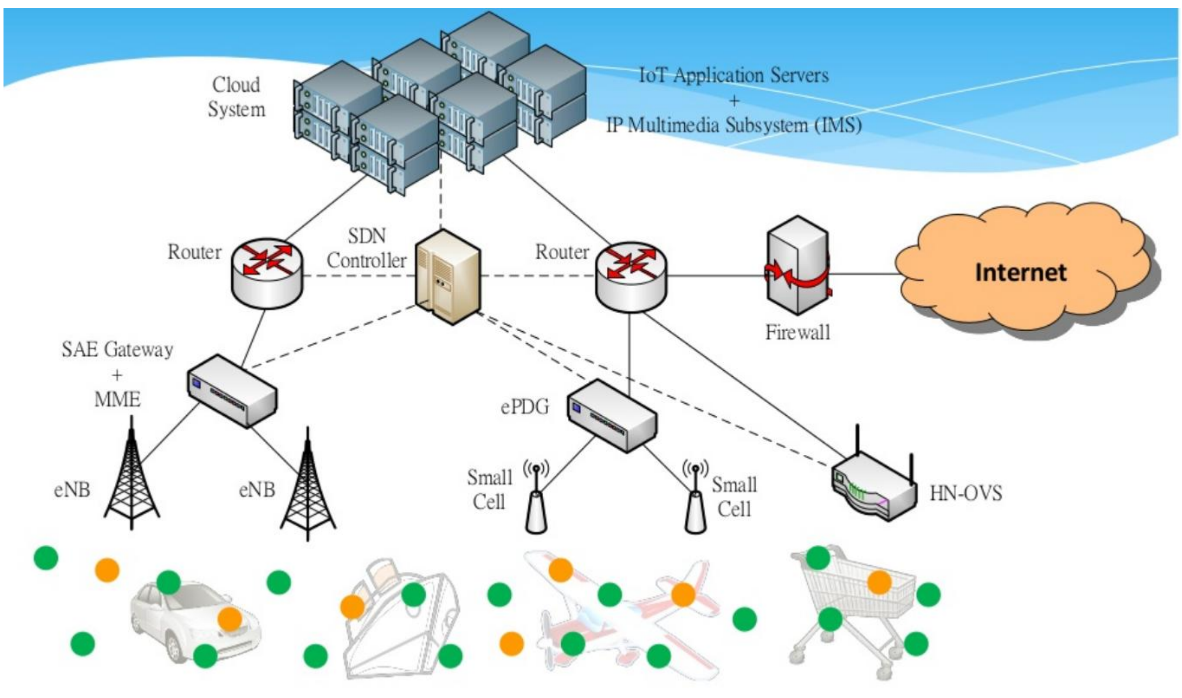
2.5 Αρχιτεκτονική δικτύων 5ης γενιάς

Η αρχιτεκτονική που έχει αναπτυχθεί για τα δίκτυα 5G βασίζεται στον διαχωρισμό του software και του hardware με τη βοήθεια των τεχνολογιών SDN και NFV. Καθώς το 5G αναμένεται να υποστηρίξει πολλές διαφορετικές υπάρχουσες τεχνολογίες και για να είναι ικανό να τις υποστηρίξει, η αρχιτεκτονική του αποτελείται από πολλαπλές διεπαφές προγραμματιζόμενων εφαρμογών (ApplicationProgrammingInterfaces-APIs). Το 5G αποσκοπεί στην διασύνδεση όλων των οντοτήτων του ψηφιακού κόσμου, ο οποίος περιλαμβάνει επικοινωνίαman-to-man, man-to-machine και machine-to-machine.

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου 5G, χωρίζεται σε τρίαείδη κόμβων, τα οποία είναι:

- Access node: Πρόκειται για το σημείο εκκίνησης της σύνδεσης ενός χρήστη. Ο κόμβος αυτός περιλαμβάνει το σύνολο του ενεργού εξοπλισμού μετάδοσης. Σε αυτό το σημείο γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου καθώς όπως έχουμε αναφέρει γίνεται διασύνδεση διαφορετικών δικτύων. Ενώ εδώ γίνεται επίσης η διαχείριση της έναρξης και του τερματισμού της σύνδεσης.
- Networkingnode: Οι κόμβοι αυτοί είναι υπεύθυνοι για τη σύνδεση των accessnodes με τους cloudnodes αλλά και με το εξωτερικό δίκτυο. Σε αυτό το σημείο γίνεται η διαχείριση της ασφάλειας του δικτύου και η διασφάλιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών
- Cloudnode: Οι κόμβοι αυτοί λειτουργούν ως αποθηκευτικό μέσο στο οποίο μπορεί να υπάρχει μεγάλος όγκος πληροφορίας.

Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται το μοντέλο που προτείνεται για το σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής δικτύου 5G. Όπως βλέπουμε, το μοντέλο αυτό αποτελείται αρχικά από το τερματικό του χρήστη (userterminal), το οποίο αποτελεί την συσκευή που έχει ο χρήστης για να διασυνδεθεί στο δίκτυο. Παραδείγματα τερματικών χρήστη μπορεί να είναι από ένα smartphone μέχρι και μία σύγχρονη καφετέρια. Τα τερματικά των χρηστών συνδέονται στο δίκτυο με τη χρήση διάφορων ανεξάρτητων και αυτόνομων radioaccess τεχνολογιών (RATs), όπως κεραίες (eNB), smallcell, κ.α. Αυτά με τη σειρά τους, συνδέονται με διάφορους servers στο ευρύτερο διαδίκτυο. Η μέχρι στιγμής αρχιτεκτονική είναι διάφανη ως προς στο χρήστη, ο οποίος μπορεί να προσπελάσει όλες αυτές τις τεχνολογίες, μέσω μίας IP σύνδεσης στο εξωτερικό δίκτυο (Internet).

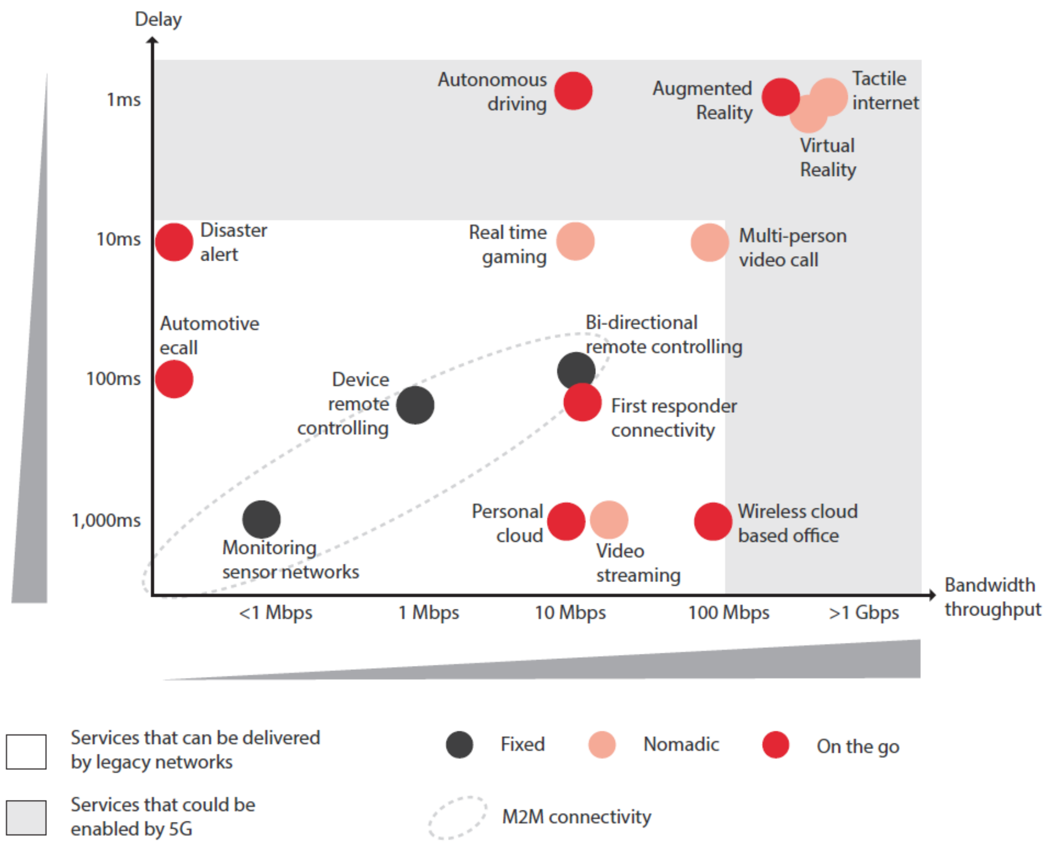


Εικόνα 25: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G.
Πηγή: https://www.slideshare.net/whaien/the-way-to-5g-52037421

Έτσι κάθε φορά που ένας χρήστης θέλει να επικοινωνήσει με έναν server, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ αυτών. Η διαδικασία γίνεται ακόμα πιο περίπλοκη για ένα κινητό χρήστη, ο οποίος αλλάζει συνέχειαRATs, και χρειάζεται συνέχεια να δημιουργείμία καινούργια σύνδεση. Για να είναι αυτό εφικτό στα δίκτυα 5G, χρησιμοποιείται το networklevel, το οποίο μπορεί και διαχειρίζεται tonetworkaccesspoints από τα διαφορετικά RATs και θα τα μεταφέρει σε ανώτερα layers. Σε αυτή συμμετέχει η μονάδα ελέγχου, που βρίσκεται μεταξύ χρήστη και διαδικτύου και η οποία σε συνεργασία με το τερματικό, διαχειρίζεται τις διεργασίες και δρομολογεί τα πακέτα βάσει συγκεκριμένων κανόνων (policies). Αυτό το networklevel χρησιμοποιεί IP tunnel. Έτσι, σε κάθε σύνδεση του χρήστη δημιουργούνται tunnelsπου αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση των πακέτων κάτω από συγκεκριμένες πολιτικές, που ορίζει το πρωτόκολλο. Ο χρήστης, το μόνο που έχει να κάνει είναι να θέτει μία IP address και θα δημιουργούνται τόσα tunnels, όσες είναι και οι RATs που συνδέεται. Έπειτα θα αναλαμβάνει το πρωτόκολλο.[9, 11]

2.6 Περιπτώσεις χρήσης δικτύων 5ης γενιάς

Η εμφάνιση και η υιοθέτηση του 5G αναμένεται να φέρει νέες δυνατότητες χρήσης από τους παρόχους τηλεπικοινωνιών. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη, εξέτασης αυτών των δυνατοτήτων με σκοπό την αύξηση των κερδών τους. Για να πάνε προς αυτή την κατεύθυνση, οι φορείς εκμετάλλευσης θα πρέπει να απαντήσουν σε βασικά ερωτήματα όπως το τι θα μπορούσε να κάνεις ένα χρήστης σε ένα δίκτυο 5G σε σχέση με τα σημερινά δίκτυα και πως αυτό θα μπορούσε να αποφέρει επιπλέον κέρδη. Στην ακόλουθη εικόνα, φαίνονται οι απαιτήσεις σε καθυστέρησης και εύρος ζώνης/ταχύτητα δεδομένων για διάφορες περιπτώσεις χρήσης του δικτύου 5G.



Εικόνα 26: Απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και λανθάνουσας κατάστασης πιθανών περιπτώσεων χρήσης του 5G. Πηγή: GSMA Intelligence

Η ακόλουθη εικόνα μας βοηθάει να καταλάβουμε τις περιπτώσεις χρήσης του 5G, μέσα από παραδείγματα της καθημερινής ζωής.

Εικόνα 27: Παραδείγματα χρήσης 5G στην καθημερινή ζωή.

Στη συνέχεια θα δούμε ορισμένα παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης του 5G. Όπως θα δούμε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να λειτουργήσουν και με τις υφιστάμενες τεχνολογίες δικτύου. Ωστόσο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μία περίπτωση απαιτεί την τεχνολογία 5G για να λειτουργήσει, εφόσον είναι απαραίτητο ένα τουλάχιστον από τα βασικα κριτήρια αυτής του 5G.

- Εικονική Πραγματικότητα (VirtualReality) / Επαυξημένη Πραγματικότητα (AugmentedReality) / Immersive ή Tactile Διαδίκτυο

Αυτές οι τεχνολογίες έχουν πολλές πιθανές περιπτώσεις χρήσης τόσο στηνψυχαγωγία, όπως για παράδειγμα σε παιχνίδια (gaming) όπως επίσης και σε πιο πρακτικά σενάρια όπως η βιομηχανία και η ιατρική. Ενώ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και από τεχνολογίες τις οποίες μπορεί να τις έχει ο χρήστης πάνω του (wearabletechnologies). Μία τέτοια περίπτωση, είναι η χρήση ενός ρομπότ ελεγχόμενο απομακρυσμένα από έναν χειρούργο. Μία τέτοια εφαρμογής απαιτεί υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση, τα οποία δεν παρέχονται από τη σημερινή τεχνολογία του LTE.

Από την άλλη η εικονική και η αυξημένη πραγματικότητα είναι ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο και η εξέλιξή τους θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την πρόοδο άλλων τεχνολογιών, όπως οι αισθητήρες κίνησης και των οθόνων headsupdisplay(HUD).

- Αυτονομία οδήγησης / Συνδεδεμένα αυτοκίνητα

Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και με τον έξω κόσμο, μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη οδήγησης. Για παράδειγμα, ένα όλα τα οχήματα που κινούνται σε ένα δρόμο είχαν την δυνατότητα σύνδεσης σε ένα σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω του δικτύου, θα μπορούσαν να ταξιδεύουν σε υψηλότερες ταχύτητες διατηρώντας τη σωστή απόσταση μεταξύ τους χωρίς τον κίνδυνο ατυχήματος. Πιο συγκεκριμένα, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να μειώσει τις πιθανότητες ανθρώπινου λάθους.

Ένα τέτοιοσύστημα δεν απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης, ωστόσο τα δεδομένα είναι πολύ σημαντικό να μεταδίδονται σε πολύ μικρό χρόνο, ο οποίος θα πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν. Αυτό είναι απαραίτητο για την ασφαλή λειτουργία τους. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι σε αυτή την περίπτωση απαιτείτε το κριτήριο για χρόνο καθυστέρησης 1 χιλιοστά του δευτερολέπτου που παρέχεται από το 5G. Τέλος, ένα αυτοκίνητο χωρίς οδηγό θα πρέπεινα μπορεί να είναι αυτόνομο σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές και αυτό απαιτεί την πλήρη κάλυψη με δίκτυο όλου του οδικού δικτύου με 100% αξιοπιστία για να αποτελεί αυτό μία βιώσιμη πρόταση.

- Ασύρματα γραφείο βασισμένο στο cloud / Πολύ-επίπεδη τηλεδιάσκεψη

Τα δίκτυα δεδομένων μεγάλου εύρους ζώνης έχουν τη δυνατότητα να κάνουν πραγματικότητα τα ασύρματου δικτύουγραφεία cloud. Πρόκειται για μία τεχνολογία που προσφέρει τεράστιο αποθηκευτικό χώρο δεδομένων καθιστώντας αυτά τα δίκτυα προσπελάσιμα από παντού. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να καλυφθεί από τα υφιστάμενα δίκτυα 4G, καθώς δεν απαιτεί μικρές καθυστερήσεις. Από την άλλη, οι τηλεδιασκέψεις (τηλεφωνικές κλήσεις πολλαπλών προσώπων), απαιτούν μικρή καθυστέρηση, αλλά αυτό είναι δυνατό με την υπάρχουσα τεχνολογία 4G.

- Σύνδεση χρηστών από οποιοδήποτε σημείο

Με το 5G,οι χρήστες θα μπορούν να είναι συνεχώς συνδεδεμένοι. Θα είναι δυνατή η προβολή βίντεο HD και η τηλεργασία, ανεξάρτητα από το που βρίσκεται ο χρήστης. Για παράδειγμα είτε ο χρήστης βρίσκεται σε πυκνά συνδεδεμένη περιοχή όπως ένα στάδιο ή το κέντρο της πόλης ή σε μία αραία συνδεδεμένη περιοχή όπως ένα χωριό ή ένα τρένο υψηλής ταχύτητας θα μπορεί να είναι συνεχόμενα συνδεδεμένος. Όπως έχουμε αναφέρει, τα συστήματα 5G θα παρέχουν πρόσβαση σε χρήστες οπουδήποτε, ενώ θα υπάρχει διαφάνεια ως προς την πρόσβαση κάθε χρήστη στο δίκτυο, σε σχέση με τις παλίοτερες τεχνολογίες. Η επιλογή της καλύτερης απόδοσης πρόσβασης δεν θα βασίζεται μόνο στη διακίνηση, αλλά στις πιο σχετικές μετρήσεις, ανάλογα με τη φύση της υπηρεσίας. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση μπορεί να είναι πιο σημαντική από την απόδοση για ένα online παιχνίδι.

- Σύνδεση μηχανής με μηχανή (M2M)

Οι συνδέσεις M2M χρησιμοποιείται ήδη σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ωστόσο, οι δυνατότητες χρήσης τους είναι τόσες πολλές που αναμένεται ότι ο αριθμός τέτοιων συνδέσεων θα αυξηθεί σε 1 έως 2 δισεκατομμύρια μέχρι το 2020 παγκοσμίως. Παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών είναι τα συστήματα συνδεδεμένου σπιτιού (connectedhome), όπωστα έξυπνοι μετρητές,έξυπνοι θερμοστάτες, ανιχνευτές καπνού κτλ, τα τηλεμετρικά συστήματα οχημάτων καθώς και ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης για την παρακολούθηση της υγειονομικής περίθαλψης. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα μεταδίδουν μικρό όγκο δεδομένων που δεν είναι κρίσιμα και δεν απαιτείται να μεταδοθούν σε συγκεκριμένο χρόνο. Τέλος, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι πολλά τέτοια συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν με δίκτυα 2G.

- Internet of Things (IoT)

Το 5G αποτελέσει βασικό συστατικό για το InternetofThings. Μέσω αυτού, θα παρέχεται μία πλατφόρμα δια-σύνδεση ενός τεράστιου αριθμού αντικειμένων στο Internet. Οι αισθητήρες αναμένεται να εξαπλωθούν παντού, καθώς απαιτούν πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και να εξοικονομήσουν χρόνο ζωής όσον αφορά την μπαταρία. Τα αντικείμενα, που θα συνδέονται στο δίκτυο, είτε φοριούνται στο σώμα ενός ατόμου είτε χρησιμοποιούνται στο νοικοκυριό, θα παράγωγουνκαι θα καταναλώνουν δεδομένα. Επιπλέον, τα μελλοντικά έξυπνα τηλέφωνα, drones, ρομπότ, φορητές συσκευές και άλλα έξυπνα αντικείμενα θα δημιουργήσουν τοπικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας μια πληθώρα διαφορετικών μεθόδων πρόσβασης. Το 5G θα επιτρέπει σε όλα αυτά τα αντικείμενα να συνδεθούν ανεξάρτητα μεταξύ τουςσε μια συγκεκριμένη διαθέσιμη υποδομή δικτύου.

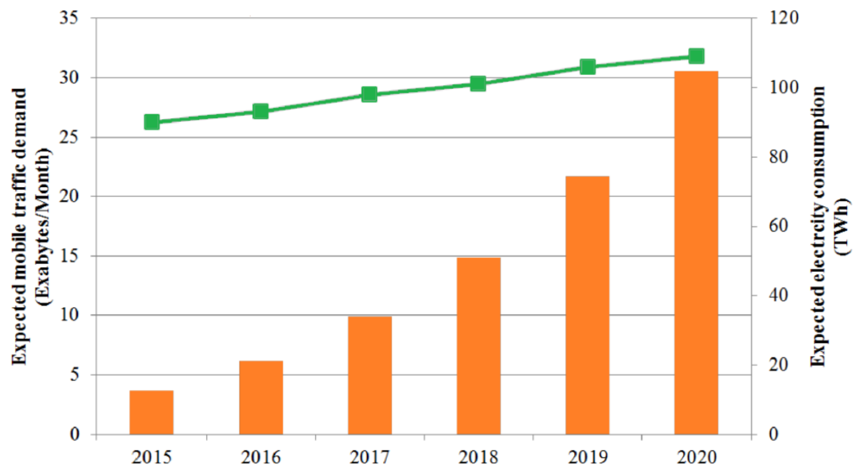
Πολλές από τις περιπτώσεις χρήσης, που αναφέραμε παραπάνω, δεν απαιτούν αυστηρά την τεχνολογία 5G για να λειτουργήσουν. Ωστόσο ένα 5G δίκτυο, τιςβελτιώνει σε επίπεδο εμπειρίας χρήστη.Επιπλέον αυτό μπορεί να αποφέρει έξτρα κέρδη στην αγορά. [5]

Κεφάλαιο 3: ΠράσιναΔικτύα 5ης γενίας

3.1 Εισαγωγή

Το 2020, τα δίκτυα κινητής πρόσβασης θα βιώσουν σημαντικές προκλήσεις σε σχέση με την σημερινή κατάσταση. Μία από τις απαιτήσειςτων δικτύων πέμπτης γενιάςείναι ηαύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων έως και 1000 φορές και η μείωση της λανθάνουσας κατάστασης σεένα χιλιοστό του δευτερολέπτου σε σύγκριση με τα υπάρχοντα δίκτυα. Αναμένεται τα δίκτυα πέμπτης γενιάς να χρησιμοποιηθούν από τουλάχιστον 100 δισεκατομμύρια συσκευέςπαγκοσμίως με περίπου 7,6 δισεκατομμύρια συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας. Αυτό υπόσχεται μια πλήρως δικτυωμένη κοινωνία με απεριόριστη πρόσβαση σε πληροφορίες και ανταλλαγή δεδομένων, τα οποία θα είναι διαθέσιμα από οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή. Τα τεράστια αυτά μεγέθη οφείλονται στην δημοτικότητα των smartphones, των tablets, των αισθητήρων κλπ.. Τέλος, όπως έχουμε ήδη αναφέρει το 5G, υπόσχεται έως και 10 Gb/s ανά μεμονωμένο χρήστη.

Από την άλλη, η αύξηση στη διάδοση των συσκευών και η ασύρματη τεχνολογία 5G, δίνει τη δυνατότητα επικοινωνίας ανθρώπου με μηχανή και μηχανής με μηχανή. Έτσι, αναμένεται αισθητήρες, εξαρτήματα και εργαλεία να γίνουν φορείς ασύρματης επικοινωνίας που ανταλλάσσουν πληροφορίες, δημιουργώντας το ήδη γνωστό«Internet ofThings» (IoT). Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η κατανάλωση ισχύος σε σχέση με την αύξηση στην κίνηση των δεδομένων.



Εικόνα 28: Κατανάλωση ισχύος σε σχέση με την αύξηση στην κίνηση των δεδομένων.
Πηγή: http://www.5gsummit.org/greece/slides/Session2_04_Elias%20Yaacoub.pdf

Όλα τα παραπάνω, έχουν άμεση επίδραση στην τεράστια κατανάλωση ενέργειας, το οποίο αποτελεί ένα από τις μεγαλύτερες προσκλήσεις για τον σχεδιασμό των δικτύων πέμπτης γενιάς. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι το κλειδί για την επίτευξη αυτού του στόχου.Ωστόσο για να γίνουν τα δίκτυα 5Gβιώσιμα, έχουν προταθεί νέες τεχνολογίες για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσή τους.Ήδη σήμερα, ο λογαριασμός ενέργειας του φορέα παροχής κινητής τηλεφωνίας αποτελεί ένα μεγάλο μέρος του OPEX. Λαμβάνοντας υπόψητις μελλοντικές απαιτήσεις και προσδοκίες υπάρχει ένα ο κίνδυνος, αυτό να αυξηθεί ακόμη περισσότερο.

Οιεναλλακτικές πηγές ενέργειας έχουν προταθεί για τη μείωση της χρήσης των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων. Άλλες λύσεις προτείνουν διαχωρισμό στην αρχιτεκτονική του συστήματος μεταξύ των δεδομένων και των επιπέδων ελέγχου. Επιπλέον η ανάπτυξη του δικτύου με χρήση ετερογενών εξαιρετικά πυκνών διατάξεων θα έχουν θετική επίδραση. Ακόμα και η ραδιοφωνική μετάδοση και η εισαγωγή της μαζικής κεραίας φαίνεται να συμβάλουν θετικά προς αυτή την κατεύθυνση.Σκοπός όλων των τεχνικών αυτών είναι η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας χωρίς αντίστοιχη μειώση στηνποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

3.2 Τεχνικές μείωσης ενέργειας

Για να αναπτυχθούν οι τεχνικές που αναφέραμε προηγουμένως, πραγματοποιείται έρευνα πραγματοποιείται τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στον βιομηχανικό χώρο. Η έρευνα αυτή αποσκοπεί στην αξιοποίησηςτης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες ανανεώσιμες πηγές(ηλιακή, αιολική, κ.λπ.) και από σήματα ραδιοσυχνότηταςτου περιβάλλοντος (σήματα τηλεόρασης, σήματα παρεμβολών κ.λπ.). Στη συνέχεια θα αναλύσουμε όλες τις τεχνικές και την εφαρμογή τους στην τεχνολογία 5G, έτσι ώστε το 5G να αποτελεί μία πράσινη τεχνολογία.Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τις ακόλουθες τρεις τεχνικές:

- Μείωση της απόστασης πομπού-δέκτη (Tx-Rx) και βελτίωση της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας: εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (Ultra-DenseNetworks,UDN) και επικοινωνία συσκευής με συσκευή (device-to-device,D2D).
- Αξιοποίηση αχρησιμοποίητων και μη επιτρεπόμενων ραδιοσυχνοτήτων, όπως για παράδειγμα επικοινωνία με millimeter κύματα (MillimeterWave,mmWave) και χρήση του LTE σε μη εξουσιοδοτημένο φάσμα (LTE-U).
- Βελτίωση της φασματικής απόδοσης (SpectralEfficiency - SE) με την ανάπτυξη μιας τεράστιας ποσότητας κεραιών: πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εισόδων (MassiveMultiple-InputMultiple-Output,M-MIMO).

Όλες οι παραπάνω τεχνικές αυξάνουν το throughput του συστήματος από τρεις διαφορετικές απόψεις. Ωστόσο,σε κάθε περίπτωση θα πρέπει αυτό να συνυπολογιστεί με τα κέρδη που αναμένεται να προσφέρει η κάθε μία από αυτές. Για παράδειγμα, η τελευταία τεχνική χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό κεραιώνγια πολυπλεξία και ποικιλομορφία, ωστόσο αυτό αναμένεται να αυξήσει την κατανάλούμενηισχύς των κυκλωμάτων, που κλιμακώνονται γραμμικά με τον αριθμό των κεραιών. Όσον αφορά την τεχνική χρήσης των mmWave, απαιτούνται πομποδέκτες που καταναλώνουν μεγάλο ποσό ενέργειας και απαιτούν πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας σήματος γιααξιόπιστη επικοινωνία καθώς λειτουργούν σε εξαιρετικά υψηλές συχνότητες.

Μη χρησιμοποιώντας, λοιπόν, κάποια από τις παραπάνω τεχνικές, η κατανάλωση ενέργειας είναι τόση που το δίκτυο δεν είναι πλέον βιώσιμο και ο σχεδιασμός ενεργειακά αποδοτικών δικτύων 5G καθίσταται αναγκαίος.Στην πραγματικότητα, τα τελευταία χρόνια, η κατανάλωση ενέργειας έχει καταστεί πρωταρχικό μέλημα στον σχεδιασμό και τη λειτουργία συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός είναι η μείωση του λειτουργικού κόστουςτων σταθμών βάσης (BaseStation, BS) και η παράτασητης διάρκειας ζωής των τερματικών χρήστη (UserTerminals, UT) με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος.

Η ενεργειακή απόδοσηέχει γίνει το νέο σημείο αναφοράς για τον πράσινο σχεδιασμό των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας και μετριέται σε bits / Joule.Ωστόσο, τόσο η ενεργειακή απόδοση όσο και η κατανάλωση ισχύος ενός κυκλώματος, δεν μπορεί να βελτιωθεί άπειρα εφαρμόζοντας μόνοφασματικά αποδοτικές τεχνολογίες επικοινωνιών, λόγω του περιορισμού που επιβάλλει η ικανότητα Shannon. Έτσι, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μπορεί μόνο να δώσει λύσηστο πρόβλημα της κατανάλωσης ενέργειας μόνο σε κάποιο βαθμό.

Έτσι οι τεχνικές συγκομιδής ενέργειας, τόσο από τους σταθμούς βάσης όσο και από τα τερματικά χρήστη από ανανεώσιμες πηγές και ακόμη και σήματα RF, έχουν λάβει ιδιαίτερη προσοχή. Αυτές οι τεχνικές δίνουν την δυνατότητα τροφοδοσίας διαφόρων στοιχείων ασύρματης επικοινωνίας. Για αυτό το λόγο θεωρούνται αναγκαίες. [9, 10, 12, 23]

3.3 Μεγενθυση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων

Λόγω της έλλειψης του διαθέσιμου φάσματος αχρησιμοποίητες και μη επιτρεπόμενες συχνότητες, όπως για παράδειγμα συχνότητες mmWave (30 έως 300 GHz) και LTE-U (5 GHz) στοχεύουν στην ενίσχυση του throughput, επεκτείνοντας το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.

- **mmWave**

Η επικοινωνία, στο επίπεδο τωνmmWave αναμένεται να αυξήσει την ταχύτητα δεδομένων, στα ασύρματα κινητά δίκτυα 5G, σε gigabits ανά δευτερόλεπτο.Ωστόσο, η μετάδοση δεδομένων στις εξαιρετικά υψηλές συχνότητες του mmWave, έχει μειονεκτήματα όπως η υψηλή εξασθένηση και απορρόφηση σήματος λόγω τουατμοσφαιρικού αέρα και της βροχής. Σαν αποτέλεσμα, μειώνεται η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS). Από την άλλη, ταμικρά μήκη κύματος των mmWave, δίνουν την δυνατότητα ενσωμάτωσης ένος μεγάλου αριθμόυκεραιών τόσο στους σταθμούς βάσης όσο και στα τερματικά χρήστη.

Για τις συχνότητες mmWave, οι συμβατικέςψηφιακές αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούνται στις συχνότητες μικροκυμάτων, όπου κάθε κεραία συνδέεταισε μια αποκλειστική αλυσίδα RF, δεν είναι αποδοτικές. Αυτό συμβαίνει γιατί η μαζική επεξεργασία παράλληλων gigasamples ανά δευτερόλεπτο,συνεπάγεται υπερβολική κατανάλωση ενέργειας, οδηγώντας σε ένα μη ενεργειακά αποδοτικόκαι δαπανηρό σύστημα. Για τη μείωση της κατανάλούμενηςενέργειας, μια λύση θα ήταν η υιοθέτηση της αναλογικής μορφοποίησης δέσμης. Πιο συγκεκριμένα, μια αλυσίδα RF μπορεί να συνδέεται με πολλαπλέςκεραίες και το φάσμα σήματος κάθε κεραίας να ελέγχεται από ένα δίκτυο αναλογικών μετατοπιστών φάσης(PhaseShifters, PS). Ωστόσο, η αναλογική μορφοποίηση δέσμη μπορεί να υποστηρίξει ένα μεμονωμένηχρήστη και τη μετάδοση λίγων δεδομένων. Με άλλα λόγια, δεν εκμεταλλεύεται πλήρως την πολυπλεξίαπου παρέχεται από τις πολλαπλές κεραίες που θα χρησιμοποιούνται. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, έχουν προταθεί υβριδικές αρχιτεκτονικές, που είναι ενεργειακά αποδοτικές,για την χρήση των mmWave.Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται αναλογική μορφοποίηση δέσμης με σύνθετους συντελεστές για τον χειρισμό των σημάτων ραδιοσυχνοτήτων μέσω των μετατοπιστών φάσης ελέγχου και / ή ενισχυτές μεταβλητού κέρδους.Έτσι, βελτιώνονται οι απώλειεςλόγω της mmWave ζώνης και η χωρητικότητα του δικτύου με τη χρήση διαφόρων τεχνικών MIMO. Χρησιμοποιούνται δύο υβριδικές δομές:

- Πλήρως συνδεδεμένη αρχιτεκτονική: κάθε αλυσίδα RF συνδέεται με όλες τις κεραίες.
- Μερικώς συνδεδεμένη αρχιτεκτονική: κάθε αλυσίδα RF συνδέεται μόνο με ένα υποσύνολο των κεραιών

Από την πλευρά του υλικού, η πλήρως συνδεδεμένη αρχιτεκτονική απαιτεί πολλαπλούς μετατοπιστές φάσης εισάγοντας επιπλέον κατανάλωση ενέργειας.Αντίθετα, στην μερικώς συνδεδεμένη αρχιτεκτονική, ο αριθμός των απαιτούμενωνμετατοπιστών φάσηςκαι είναι ανάλογος με τον αριθμό των αλυσίδων.Έτσι, μειώνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος και η καταναλωμένη ισχύς σε βάρος της μικρότερης ευελιξίας του κυκλώματος. Παρόλα αυτά, στις αρχιτεκτονικές αυτές, μπορούν να παραμετροποιηθούντα υβριδικά πρότυπα κωδικοποίησης, ο αριθμός των αλυσίδων RF, οι κεραίες και η ισχύς εκπομπής τους, προσαρμόζοντας το σύστημαστις απαιτούμενες ανάγκες.

Εκτός από τις υβριδικές δομές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετατροπείς σήματοςαπό αναλογικό σε ψηφιακό (analog-to-digitalconverters, ADC), χαμηλής ανάλυσηςαπό τη μεριά του δέκτη. Οι μετατροπείς αυτοί έχουν επιλεγεί καθώς η απορρόφηση ισχύος τους κλιμακώνεται γραμμικά μετο ρυθμό δειγματοληψίας και εκθετικά με τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων ανά δείγμα. Επιπλέον, τα κυκλώματα διασύνδεσης των ψηφιακών εξαρτημάτων με τους ADC καταναλώνουν ισχύς που εξαρτάται στην διαθέσιμη ανάλυση.Παρόλα αυτά, η κατανάλωση ενέργειας και η απόδοση του συστήματοςόταν χρησιμοποιούνται υψηλές ταχύτητές και υψηλήανάλυση, σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό κεραιών και το μεγάλο εύρος ζώνης, σε mmWave συστήματα,μπορεί να είναι απαγορευτική. Έτσι, οι μετατροπείς AD, χρησιμοποιούνται μόνο σε φορητές συσκευές, με περιορισμένη μπαταρία. Όσον αφορά τη χωρητικότητας του καναλιού, σε συνδυασμό με την χρήση τέτοιων μετατροπέων είναι αντικείμενο έρευνας. Τέλος, η δημιουργία ενός μετατροπέας που συνδυάζει υψηλής και χαμηλής ανάλυσης, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση προς την κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας.

- **LTE-U**

Οι LTE-U συχνότητες αυξάνουν την χωρητικότητα του LTE επιτρέποντας στο LTEairinterface, να λειτουργεί σε μη επιτρεπτόφάσμα συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος ζώνης ≥400MHz, παρέχει στο LTE-U πρόσθετους πόρους φάσματος. Αυτό έχει προταθεί ήδη στο 3GPP Rel-13.

Σε αυτή την περίπτωση, η βασική πρόκληση είναι η αρμονική συνύπαρξη του LTE και τα υφιστάμενα μη αδειοδοτούνενα συστήματα όπως το WiFi.Από τη μία, το LTE πραγματοποιεί διαμοιρασμό πόρων σε πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα, παραχωρώνταςδιαφορετικά σύνολα πόρων στον καθένα.Από την άλλη, το WiFi, δίνει πρόσβαση στους χρήστες σε κάποιο συγκεκριμένο κανάλι που χαρακτηρίζεται ως αδρανές. Κάθε χρήστης εκχωρείται σε ένα κανάλι ύστερα από διαμάχη μεταξύ τους, που βασίζεται σε ένα τυχαίο back-offμηχανισμό. Η ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών χρηστών βασισμένη σε ένα κεντρικό προγραμματισμό δίνει την δυνατότητα στο LTE να κάνει καλύτερη χρήσητων μη εξουσιοδοτημένων συχνοτήτων ενώ ταυτόχρονα να πετυχαίνει καλύτερηενεργειακή απόδοση. Από την άλλη, το WiFi, οδηγείται σε σπατάλη πηγών ραδιοφάσματος λόγω της παρατήρησης του καναλιού και του χρόνου backoff.Ένα ακόμα μειονέκτημα, είναι ότι η μετάδοση σε LTE-Uμπορεί να προκαλέσει συνεχή παρεμβολή με τα συστήματα WiFi, και το κανάλι να ανιχνεύεται συνεχώς απασχολημένο. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, ένα αδιάκοπο χρόνο backoff για τις συνδέσεις WiFi, μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλή ενεργειακή απόδοση για τους χρήστες WiFi. Σαν αποτέλεσμα, θα πρέπει να γίνουν ορισμένες αλλαγές στη διαχείριση πόρων στη μη εξουσιοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων για την αρμονική συνύπαρξη των προαναφερθέντων τεχνολογιών.

Μέχρι στιγμής, στο 3GPP, έχουν προταθεί, δύο διαφορετικοί μέθοδοι συνύπαρξης:

- Listenbeforetalk (LBT): Οι LTE-U συσκευές, πρέπει να επαληθεύουν αν το κανάλικαταλαμβάνεται από τα συστήματα WiFi πριν αρχίσουν ναμεταδίδουν.
- Dutycycling: Το σήμα LTE ενεργοποιείται και απενεργοποιείται περιοδικά, καταλαμβάνοντας και απελευθερώνοντας το κανάλι, χωρίς να θεωρεί την κατοχή του καναλιού δεδομένη πριν από κάθε μετάδοση.

ΤαWiFi συστήματα βασίζονται στο πρωτόκολλο LBT, για να πετύχουν μία δίκαιη συνύπαρξη μεταξύ χρηστών. Ωστόσο, ένας αυξανόμενος αριθμός ανταγωνιστικών συσκευών μπορεί να οδηγήσει με μεγάλη πιθανότητα σε σύγκρουση μεταξύ τους, περιορίζοντας την απόδοση του συστήματος. Τοπρωτόκολλο dutycycling, φαίνεται να επιτρέπει την αποτελεσματικότερη χρήση των μη αδειοδοτημένωνζώνη. Παρότι, ακόμα δεν υπάρχει μία κοινά αποδεκτή λύση, το LTE-Uπρόκειται να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην συνύπαρξη του με το Wi-Fi.[9, 10, 12, 23]

3.4 Μείωση της απόστασης πομπού-δέκτη

Τόσο τα πυκνά δίκτυα όσο και η επικοινωνία μεταξύ συσκευών αυξάνουν την φασματική απόδοση μέσω της μείωσης των αποστάσεωνπομπού-δέκτη.Η επικοινωνία εντός μικρής εμβέλειας μπορεί να παρέχει υψηλής ποιότητας συνδέσεις καιυψηλό συντελεστή χωρικής επαναχρησιμοποίησης σε σύγκριση με τα τρέχοντα ασύρματα δίκτυα.

- **Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα**

Τα πυκνά δίκτυα μπορεί να είναι αποτέλεσμα της εκτεταμένης ανάπτυξηςπολλαπλών σταθμών βάσης διάφορων τύπων, σε διάφορα σημείαhot-spot. Με άλλα λόγια, θα μπορούσε να προσομοιαστεί με την ταυτόχρονηανάπτυξη ετερογενών δικτύων. Από την μία τα πυκνά δίκτυα, μπορούν να βελτιώσουν την ενργειακή απόδοσή τους με την μείωση του μεγέθους του κυττάρου. Όμως, από την άλλη, η αυξηση στην πυκνότητα των σταθμών βάσης συμβάλλει αρνητικά στην καταναλούμενη ισχύς του κυκλώματος. Για να δημιουργηθπύν ενεργειακά αποδοτικά πυκνά δίκτυα έχουν μελετηθεί τρείς διαφορετικές πτυχές.

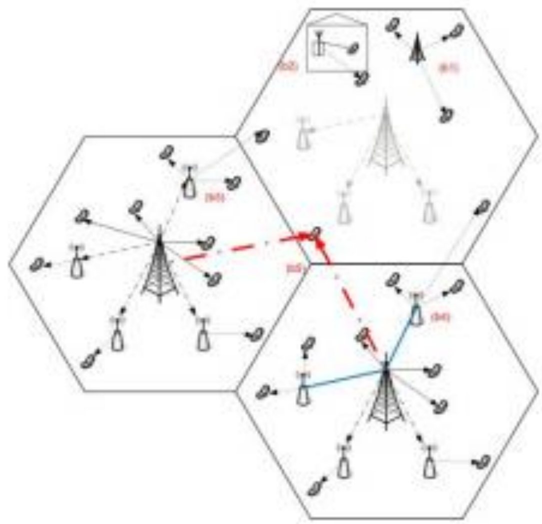
1. Σχεδιασμός με γνώμονα τον χρήστη

Ο σχεδιασμός των πράσινων πυκνών δικτύων 5G γίνεται με γνώμονα τον τελικό χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, η σηματοδοσία, η αποστολή και λήξηδεδομένων διαχωρίζονται. Για να είναι αυτό εφικτό, χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονικήhyper-cellularstrucyure, όπου οιmacrocells σταθμοί βάσης προσφέρουν αξιόπιστη κάλυψη και τα microcells καλύπτουν τις απαιτήσεις για υψηλή χωρητικότητα χρησιμοποιώντας για παράδειγμα σήματα mmWave. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των επιπλέον εξόδων που οφείλονται στην περιαγωγή μικρών συσκευών αλλά και στην καταναλούμενη ενέργεια από τους πομπό και δέκτη. Επιπλέον, οι σταθμοί βάσης μπορούν να αντικατασταθούν από άλλους περισσότερο ενεργειακά αποδοτικούς.

Από την άλλη, οδιαχωρισμός της σηματοδοσίας και της αποστολής και λήψης δεδομένων διευκολύνει επίσης την ενσωμάτωση άλλων ασύρματων τεχνολογιών, όπως το WiFi και τα μελλοντικά mmWave. Αυτό μπορεί να συμβάλει σε περαιτέρω ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, ο διαχωρισμός της αποστολής και λήψης δεδομένων καθιστά πιο ευέλικτη τη σύνδεση των χρηστών στο σύστημα και μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας τόσο για το σταθμό βάσης όσο και τα τερματικά του τελικού χρήστη. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε δύο γειτονικούς σταθμούς βάσης BS1 και BS2 που είναι και οι δύο υπέρ-φορτωμένοι με μεγάλο αριθμό συνδέσεων, ένα τερματικό χρήστη θα μπορούσε δυναμικά να συνδεθεί με τον BS1 για αποστολή και με τον BS2 για λήψη. Έτσι η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στις εφαρμογές 5G που απαιτούν εξαιρετικά υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

2. Ενεργοποίηση / Απενεργοποίηση Σταθμών Βάσης

Ο διαχωρισμός σηματοδοσίας και της αποστολής και λήψης δεδομένων, επιτρέπει την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της δυναμικής εκμετάλλευσης της ασύρματης επικοινωνίας με βάση το χρόνο και τον τόπο. Έρευνες έχουν δείξει ότι το 80% των σταθμών βάσης, είναι κατά το ελαφρώς φορτωμένοι για το 80% του χρόνου τους. Παρόλα αυτά, καταναλώνεται ίση ενέργεια όση και στην ώρα αιχμή τους, από τα κυκλώματα ψύξης και ενίσχυσης ισχύος. Έτσι, η περιοδική απενεργοποίηση των σταθμών βάσης θεωρείται ένας αποτελεσματικός μηχανισμός για την εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά σε πυκνά δίκτυα με πολλούς σταθμούς βάσης. Πιο συγκεκριμένα, κάποιοι βαθμοί βάσης μπορούν να ενεργοποιούνται ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσειςχωρητικότητας κατά τους μέγιστους χρόνους κυκλοφορίας και οι υπόλοιποι να απενεργοποιούνται ή να τίθενταισε μία αδρανής κατάσταση όταν δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται ο σχεδιασμός τριών σταθμών βάσης και η αρχιτεκτονική ενεργοποίησης / απενεργοποίησης.



Εικόνα 29: Ενεργοποίηση / Απενεργοποίηση Σταθμών Βάσης.
Πηγή: http://www.5gsummit.org/greece/slides/Session2_04_Elias%20Yaacoub.pdf

3. Διαχείριση παρεμβολών

Σε γενικές γραμμές, τα κυψελοειδή δίκτυα εκτίθενται σε δύο διαφορετικού είδους παρεμβολές, τη παρεμβολή εντός κυψελών και τη παρεμβολής μεταξύ κυψελών. Το πρώτο είδους παρεμβολή, δεν αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στα σημερινά κυψελοειδή δίκτυα λόγω της πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας(OrthogonalFrequency-DivisionMultipleAccess, OFDMA)και του ελεγχόμενου προγραμματισμού στους σταθμούς βάσης. Ωστόσο, στα πυκνά δίκτυα, λόγω της επαναχρησιμοποίηση υψηλών συχνοτήτων και των ετερογενήδικτύων, δεν είναι δυνατός ο προγραμματισμός. Για παράδειγμα, λόγω παρεμβολών, οι δυνατότητεςμετάδοσης δύογειτονικών σταθμών βάσης αλληλοαναιρούνται, χωρίς να βελτιώνουν το σήμα του δικτύου και οδηγώντας σε μη αποδοτική ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, οι σταθμοί βάσηςfemtocell, μπορούν να δημιουργήσουν «νεκρές ζώνες», ειδικά σε χρήστες με κυψέλες που συνδέονται με άλλους σταθμούς βάσης. Έτσι, η αποτελεσματικήδιαχείριση παρεμβολών είναι απαραίτητη για την επιτυχή ανάπτυξηενεργειακά αποδοτικών πυκνών δικτύων.

- **Επικοινωνία μεταξύ συσκευών**

Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών επιτρέπουν την πυκνή τοπική επαναχρησιμοποίηση του φάσματος και μπορούν να θεωρηθούν ωςμια ειδική περίπτωση πολύ πυκνών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο συσκευές μπορούν να θεωρηθούν σαν το μικρότερο κελί που αποτελείται από τοπομπό και τον δέκτη. Έτσι, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε πολύ πυκνά δίκτυα, μπορούν αν χρησιμοποιηθούν και στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών. Οι επικοινωνία μεταξύ συσκευών με τις αποδοτικότερες τεχνικές ενέργειες περιλαμβάνουν τις ακόλουθες πτυχές.

- **Επιλογή λειτουργίας και έλεγχος ισχύος**

Στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι επικοινωνίας: η κυψελοειδής και η επικοινωνία των συσκευών. Στην κυψελοειδή επικοινωνία, τα τερματικά χρήστη συμπεριφέρονται σαν κυψελοειδείς συσκευές και επικοινωνούν μέσω του σταθμού βάσης. Αντίθετα, κατά την επικοινωνία των συσκευών, τα τερματικά επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς να διέρχονται από το σταθμό βάσης. Για να το πετύχουν αυτό, επαναχρησιμοποιούν το φάσμα που τους έχει ανατεθεί (underlaycommunication) ή ένα φάσμα που δεν έχει ανατεθεί σε κανένα χρήστη (overlaycommunication). Hunderlay επικοινωνίαδημιουργεί μία διακαναλική παρεμβολή που μπορεί να μετατραπεί σε overlay επικοινωνία, όταν οι παρεμβολές γίνουν πολύ ισχυρές. Η underlayεπικοινωνία προτιμάται για εφαρμογές που απαιτείται ενεργειακή απόδοση, ενώ η overlayεπικοινωνίας είναι πιο αποτελεσματική σε εφαρμογές που χρειάζεται φασματική αποδοτική.

- **Συνεργασία ενεργού χρήστη**

Η δυνατότητα συνεργασίας ενεργού χρήστη, δεδομένης της αύξησηςτου αριθμού των κινητών συσκευών και της κίνηση δεδομένων, μπορεί ναεξοικονομήσει ενέργεια στα δίκτυα 5G. Πιο συγκεκριμένα, επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών χειρός. Τα κύρια πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι:

- Λειτουργεί σαν κινητός ρελές για την υποβοήθηση των κυψελοειδών μεταδόσεων ή των μεταδόσεων μεταξύ συσκευών.Για παράδειγμα, κατά την αποστολή δεδομένων στις ώρες αιχμής, οι συνθήκες του καναλιού μπορεί να είναιαρκετά υποβαθμισμένες και να επηρεάζεται αρνητικά η εμπειρία του χρήστη. Η χρήση των συσκευών αυτών ως ρελέ, μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας και μπορεί την πολλαπλή και αμφίδρομη αναμετάδοση.

- Ενεργούν ως συστάδες για multicastμεταδόσεις, όπως για παράδειγμα, είναι η σύγχρονη ροή ενός βίντεο. Στις multicastμεταδόσεις, ο ρυθμός δεδομένων καθορίζεται από το χειρότερο κανάλι. Οπότε, με την επικοινωνία των συσκευών, είναι δυνατόν αν επιλεγεί οποιοδήποτε μέλος. Πιο συγκεκριμένα, σε ανάλογη περίπτωση επιλέγεται το μέλος μετο καλύτερο κανάλι, σαν επικεφαλής και στη συνέχεια, γίνονται μεταδόσειςσε άλλα μέλη, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη χωρική ποικιλομορφία. Εναλλακτικά, το περιεχόμενομπορεί να χωριστεί σε πολλαπλά κομμάτια και κάθε υποσύνολο από αυτά μπορεί να μοιράζει τα δεδομένα του με άλλους.
- Ενεργούν ως τοπικές συσκευές προσωρινής αποθήκευσης για ανταλλαγή περιεχομένου, όπως για παράδειγμα την ασύγχρονη ροή βίντεο.Η ασύρματη αποθήκευση στις συσκευές μπορεί να χρησιμοποιηθεί γιαασύρματη αποθήκευση. Παρέχει έναν τρόπο επαναχρησιμοποίησης του περιεχομένου, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό των δικτύων 5G. Η αντιγραφή του περιεχομένου γίνεται με ασύγχρονο τρόπο σε σχέση με την απαίτηση του χρήστη. Αυτού του είδους η αποθήκευση είναι ίσως η φθηνότερη και ταχύτερα αναπτυσσόμενη, που μέχρι στιγμής παραμείνει ανεκμετάλλευτη για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Δεδομένης της δημοτικότητας του περιεχομένου, το περιεχόμενο που αποθηκεύεται στην κρυφή μνήμη μπορεί να μειώνει τις αιτήσεις προς το backhaul και να έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση στην καταναλωμένη ενέργεια.

Αν και η συνεργασία ενεργών χρηστών διευκολύνει την αποτελεσματική χρήση του φάσματος, μένει να εξεταστεί πώς οι συσκευές μπορούν να ενεργοποιηθούν, να αναμεταδώσουν και να αποθηκεύουν δεδομένα εις βάρος της δικής τους περιορισμένης ενέργειας. Κάποια επιβράβευση και τιμολογιακά σχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να την αποτελεσματική ανάπτυξη τέτοιων αποδοτικών πρωτόκολλων και μηχανισμών συνεργασίας μεταξύ των συσκευών. [9, 10, 12, 23]

3.5 Ενίσχυση χώρου ελευθερίας μέσω των M-MIMO

Η χρήση του M-MIMO αναμένεται να προσφέρει τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους βελτίωση στη πολυπλεξία και στη συστοιχία ενός μεγάλου αριθμού κεραιών στους σταθμούς βάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση ενός μεγάλουαριθμού χρηστών με την ίδια χρονική συχνότητα. Ένα ενεργειακά αποδοτικό M-MIMO περιλαμβάνει τις ακόλουθες πτυχές.

1. Αρχικά θα πρέπει να μελετήσουμε πόσες κεραίες χρειάζονται σε ένα σύστημα M-MIMO ώστε αυτό να είναι πράσινο. Έστω ένα σύστημα M-MIMO, με σταθμό βάσης που διαθέτει M κεραίες και αποτελείται από K χρήστες μονής κεραίας. Κάθεχρήστης μπορεί να μειώσει την ισχύς εκπομπής ανερχόμενης ζεύξης κατ' αναλογία με το M και $\sqrt{M}$ σε τέλεια και ατελής κατάστασης πληροφοριών του καναλιού (CSI) αντίστοιχα, επιτυγχάνοντας την ίδια απόδοση με αυτήν με ένα σύστημα μόνης εισόδου μονής εξόδου (Single-InputSingle-Output, SISO). Ωστόσο, μειώνοντας μόνο την ισχύς εκπομπής, στον τελικό χρήστη, δεν είναι αρκετό για την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, καθώς η συνολική κατανάλωση ρεύματος περιλαμβάνει επίσης την κατανάλωση ισχύος στα κυκλώματα, το οποίο αυξάνει γραμμικά μετον αριθμό των εξαρτημάτων του υλικού.Μία γενική κατευθυντήρια γραμμή για τον καθορισμό τουαριθμού των απαιτούμενων κεραιών για την επίτευξη πράσινου M-MIMO συστήματος είναι: όταν η ισχύς μετάδοσης αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ισχύος, η προσθήκη περισσότερων κεραιών συνεπάγεται υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Ενώ, αντίθετα όταν η ισχύς του κυκλώματος αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, η προσθήκη επιπλέον κεραίαςδεν είναι ενεργειακά αποδοτική.Αυτό οφείλεται, στο γεγονός ότι παρότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερο throughput στο σύστημα, καταναλώνεται έξτρα ισχύς λόγω των κυκλωμάτων που υπάρχουν από την προσθήκη των περισσότερων κεραιών. Έρευνές έχουν δείξει ότι η ανάπτυξη 100-200 κεραιών για την εξυπηρέτηση ενός σχετικά μεγάλου αριθμού τερματικών είναιη βέλτιστη λύση για τα σημερινά κυκλώματα.

2. Για την πιο αποδοτική επεξεργασία σήματος και την εφαρμογή πράσινου υλικού, είναι απαραίτητη η κεντρική επεξεργασία του ψηφιακού σήματος, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη εξοικονόμηση τόσο στο υλικό όσο και στην κατανάλωση ρεύματος. Η διάδοση δεδομένων

με την χρήση μαζικών κεραιών απλοποιείται σημαντικά με τη χρήση αλγορίθμων ανίχνευσης στους σταθμούς βάσης. Η χρήση τεχνικών επεξεργασίας γραμμικού σήματος, όπως για παράδειγμα, η maximum-ratiocombining(MRC) και η maximum-ratiotransmission(MRT), μπορούν να επιτύχουν ένα σχεδόν βέλτιστο σύστημα ως προς το throughput. Σε αντίθεση, με τις υπάρχουσες μεθόδουςεπεξεργασίας σήματος όπως η dirty-paper-coding(DPC) και διαδοχική ακύρωση παρεμβολών, η χρήση των M-MIMO μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για τους υπολογισμούς.Από την άλλη, έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα M-MIMOαπαιτούν μια σημαντικά χαμηλότερηισχύς εκπομπής, όπως για παράδειγμα στην περιοχή των milliwatt, το οποίο μειώνει την ενέργεια που απαιτείται από τον ενισχυτή ισχύος. Τέλος, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα τερματικά χρήστη, θα συνεχίσουν να επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος λόγω των απαιτήσεων ως προς την κατανάλωση ενέργειας και το περιορισμένο φυσικό μέγεθος τους.

3. Ο πιλοτικός σχεδιασμός και λειτουργία των συστημάτων M-MIMO, είναι μεγάλης ζωτικής σημασίας, καθώς θα διαπιστωθεί η ακρίβεια των εκτιμήσεων και κατά πόσο τελικά επηρεάζεται η επιτευχθείσα απόδοση. Οι απαιτούμενοι πιλοτικοί πόροι, για την επίτευξη συγκεκριμένης κατάσταση καναλιού, είναι ανάλογοι του αριθμού των κεραιών μετάδοσης, γεγονός που καθιστά την αμφίδρομη σύνδεση (FrequencyDivisionDuplex, FDD) μηπρακτική για εφαρμογή σε συστήματα M-MIMO. Έτσι νέες τεχνικές, όπως διαμόρφωση δέσμης και ημι-ορθογώνια σχεδίαση, πρέπει να μελετηθούν. Προς το παρόν, οι τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time-DivisionDuplexing, TDD), όπου οι χρήστεςστέλνουν πρώτα αίτημα ανερχόμενης ζεύξης και στη συνέχεια οι σταθμοί βάσης εκτιμούν την απαιτούμενη κατάσταση πληροφορίας του καναλιού για τη μετάδοση των δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης. Τα σενάρια πολλαπλών κυττάρων και η επαναχρησιμοποίηση πιλοτικών πόρων σε παρακείμενες κυψέλες επηρεάζουν σημαντικά την ενεργειακή και φασματική απόδοση.Έτσι, η εξισορρόπηση της χρήσης χρονικής συχνότητας και η μετάδοση δεδομένωντόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη καθώς και ο σχεδιασμός πιλοτικών προγραμμάτων χαμηλής πολυπλοκότητας αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης στα συστήματα M-MIMO. [9, 10, 12, 23]

3.6 Βιώσιμα 5Gδίκτυα επικοινωνιών

Εκτός από τις τεχνικές, που αναλύθηκαν παραπάνω, για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενέργεια τόσο από ανανεώσιμες πηγές και σήματα ραδιοσυχνοτήτων. Και οι δύο αυτοί τρόποι, επιτρέπουν την αειφόρο πράσινη ανάπτυξη των 5Gασύρματων δικτύων.

- Κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές

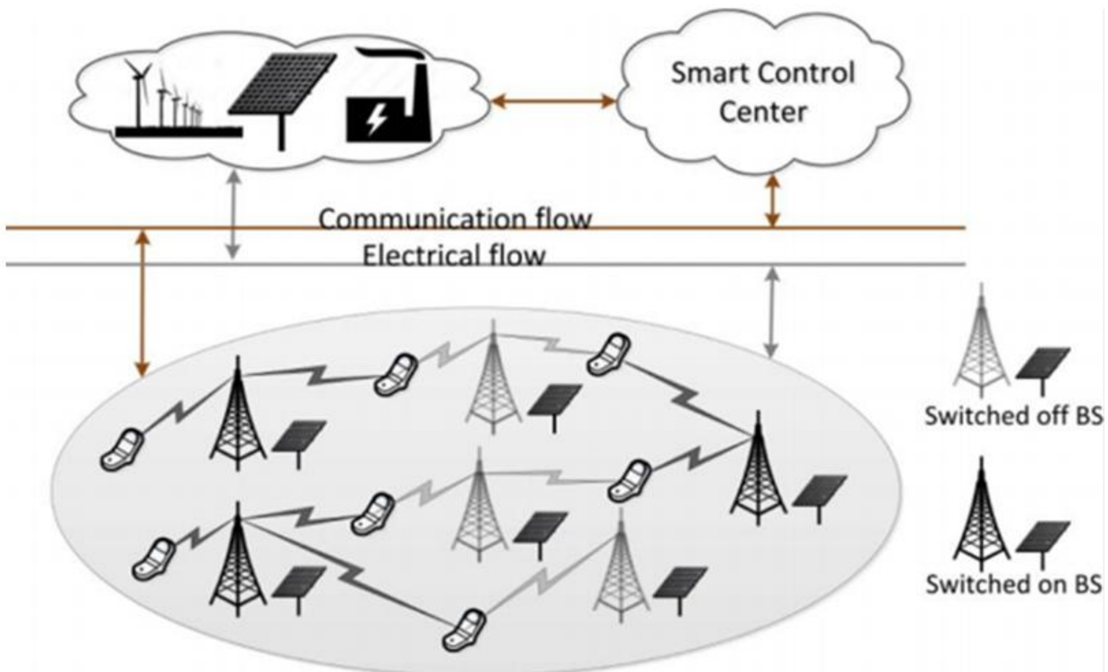
Με τον όροχρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, αναφερόμαστε στην μετατροπή των φυσικών πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, κλπ. σε ηλεκτρική. Αυτού του είδους η μετατροπή αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη πράσινη τεχνολογία που αναμένεται να μειώσει το ενεργειακό κόστος. Στη συνέχεια, αναλύονται οι κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό ενός συστήματος επικοινωνιών με βάση την ανανεώσιμη ενέργεια.

1. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των συστημάτων επικοινωνίας, είναι ότι έχουν συγκεκριμένη χωρητικότητα όσον αφορά το ποσό ενέργειας τους. Αυτός ο περιορισμός, θέτει όρια στη διαθέσιμη ενέργεια και περιορίζει τη χρήση της. Με άλλα λόγια, η ενέργεια δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πριν από την συλλογή της, το οποίο σε ένα βαθμό αποδίδεται στην έλλειψη διαθέσιμων ανανεώσιμων πόρων. Άλλος σχετικός περιορισμός είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, η οποία εξαρτάται άμεσα από την κυκλοφορία των δεδομένων. αυτό συμβαίνει καθώς, τα δεδομέναδεν μπορούν να παραδοθούν πριν την άφιξη τους στον πομπό. Από την άλλη, η περιορισμένη χωρητικότητα της μπαταρίας διαμορφώνει την ποσότητας της ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί. Έτσι, οι έρευνες που πραγματοποιούνται υποθέτουν άπειραπροσωρινά αποθέματα δεδομένων και απεριόριστες αποθήκες ενέργειας, που μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές περιπτώσεις των παραπάνω περιορισμών. Ωστόσο, οι υποθέσεις αυτές, δεν έχουν ισχύς στα δίκτυα 5Gλόγω των διαφορετικών τύπων κίνησης και συσκευών. Παράλληλα, θα πρέπει να ερευνηθεί και η παρεχόμενη ποιότητα των υπηρεσιών σε συστήματα 5G.

2. Δεδομένων της ύπαρξης κάποιων προβλέψεων σχετικά με την ενέργεια που απαιτείται για την άφιξη των δεδομένα, την κατάσταση πληροφοριών του καναλιού κ.α., είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι κατανομής πόρων για συστήματα επικοινωνίας που κατηγοριοποιούνται σε πολιτική offline και onlineσύνδεσης. Συγκεκριμένα, όταν δεν είναι γνωστές τέτοιες πληροφορίες, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι offline σύνδεσης, σε συνδυασμό με εργαλεία βελτιστοποίησης. Παρόλο που η προσέγγιση αυτή δεν είναι πρακτική λόγω της δυναμικής φύσης των δικτύων 5G, μπορεί να παρέχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους αλγορίθμους online σύνδεσης. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι online σύνδεσης, χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά προγράμματα και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία υποθέτει ότι είναι διαθέσιμες στατιστικές πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση του δυναμικού προγραμματισμού. Ακόμα και έτσι, αυτή η λύση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλης κλίμακας συστήματα. Η δεύτερη κατηγορία αλγορίθμου βασίζεται σε παρατηρήσεις που προκύπτουν από τους offline αλγορίθμους. Ωστόσο, σε ορισμένες εφαρμογές 5G, τα στατιστικά χαρακτηριστικά μπορεί να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ή και να μην είναι διαθέσιμα πριν την ανάπτυξη του δικτύου. Οι βέλτιστες λύσεις σε αυτή την περίπτωση βασίζονται στη θεωρία μάθησης, όπου ο πομπός μαθαίνει τη βέλτιστη πολιτική μετάδοσης με τον χρόνο, εκτελώντας επαναλαμβανόμενες ενέργειες και παρατηρώντας τα άμεσα αποτελέσματά τους.

3. Λόγω των δυναμικών αλλαγών στις περιβαλλοντικές συνθήκες, η συλλεγμένη ενέργεια μπορεί να μην είναι συνεχόμενη. Αυτό αποτελεί μία νέα πρόκλησηγια τα συστήματα 5G που απαιτούν σταθερότητα και συγκεκριμένο επίπεδο παρεχόμενων υπηρεσιών. Μια ρεαλιστική προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος συλλογής ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιεί διαφορετικές πηγές ενέργειας, όπως για παράδειγμα ηλιακή, αιολική, γεννήτριες ντίζελ, ή ακόμα και το ηλεκτρικό δίκτυο, με ένα συμπληρωματικότρόπο με σκοπό την αδιάλειπτη εξυπηρέτηση του δικτύου. Για παράδειγμα, σε δίκτυα 5Gμε μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης, η συλλογή ενέργειας μπορεί να γίνει σε πολλαπλά σημεία, αντισταθμίζοντας την πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας κυκλώματος λόγω των πολλών σταθμών βάσης και την κατανάλωση ισχύος του δικτύου. Επιπλέον, τα πυκνά δίκτυα σταθμών βάσης, που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ενέργειας δίνουν την δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ διάφορων σταθμών βάσης, επιτρέποντας υλοποίηση πράσινων δικτύων

5G. Για παράδειγμα, οι σταθμοί βάσης που βρίσκονται σε «καλές» θέσεις μπορούν να συλλέγουν περισσότερη ενέργεια και να εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες ή ακόμα και να μεταφέρουν την περιττή ενέργεια τους μέσω ηλεκτρικών γραμμών σε άλλους σταθμούς βάσης, με λιγότερη ενέργεια, διευκολύνοντας έτσι την ενεργειακής συνεργασίας μεταξύ τους.



Εικόνα 30: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας σε δίκτυα 5G.
Πηγή: http://www.5gsummit.org/greece/slides/Session2_04_Elias%20Yaacoub.pdf

- Συγκομιδή ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων

Η συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες είναι γνωστή και ως ασύρματη μεταφορά ισχύος (WirelessPowerTransfer, WPT) και επιτρέπει τη συλλογή ενέργειας από τα λαμβανόμενα σήματα ραδιοσυχνοτήτων. Συγκρινόμενη με την συλλογή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ασύρματη μεταφορά ισχύος μπορεί να ελεγχθεί πλήρως μέσω της τεχνολογίας ασύρματης επικοινωνίας. Η λύση αυτή είναι αρκετά υποσχόμενη λύση για την τροφοδοσία μεγάλου αριθμού μικρών τερματικών χρήστη, όπως είναι το IoT στο 5G. Οι διαφορετικές έρευνες προς αυτή την κατεύθυνση είναι οι ακόλουθες:

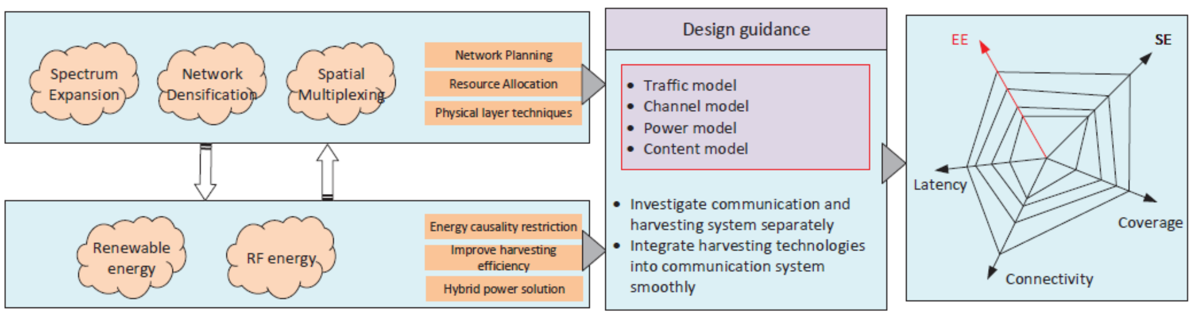
1. Η πρώτη κατηγορία έρευνας εξετάζει τις τυπικές αρχιτεκτονικές και τασυστήματα και πως αυτά μπορούν να επεκταθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Για να το πετύχει αυτό, η μία τεχνική εξετάζει την αναλογία του επιτεύξιμου ρυθμού και της συλλογής της ενέργειας με τη διπλή χρήση του ίδιου σήματος. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή σαν WirelessInformationand PowerTransfer(SWIPT). Για το πετύχουν αυτό, οι ασύρματες συσκευές χωρίζουν το σήμα που λαμβάνουν από ένα σταθμό βάσης σε δύο μέρη. Το ένα μέρος, το χρησιμοποιούν για την αποκωδικοποίηση πληροφοριών και το άλλο για τη συλλογή ενέργειας. Έτσι, σκοπός είναι η βελτιστοποίηση του λόγου της ισχύος που απαιτείται για την διάσπαση στον δέκτη με την επιτεύξιμη απόδοση και την παραγόμενη ενέργεια. Από την άλλη, η δεύτερη τεχνική διαχωρίζει τη συλλογή ενέργειας και τη μετάδοση πληροφοριών στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά συλλέγεται ενέργεια και στη συνέχεια γίνεται η μετάδοση. Έτσι δημιουργούνται ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών ισχύος (WirelessPoweredCommunicationNetworks, WPCNs). Για παράδειγμα, οι ασύρματες συσκευές αρχικά συλλέγουν ενέργεια από τα σήματα που αποστέλλονται από το σταθμό παραγωγής ενέργειας και στη συνέχεια μεταδίδουν ασύρματες πληροφορίες (WirelessInformationTransmission, WIT) προς το σταθμό βάσης / δέκτη χρησιμοποιώντας τη συλλεγόμενη ενέργεια. Έτσι, η διάρκεια των WPT και WITπρέπει να μελετηθεί προσεκτικά, δεδομένου ότι περισσότερος χρόνος για το WPT οδηγεί σε περισσότερη συγκομιδή ενέργειαςκαι αφήνει λιγότερο χρόνο για WIT. Η ανάπτυξη αυτών των αρχιτεκτονικών μπορούν να χρησιμεύουν σαν θεμέλιο για ασύρματα πυκνά δίκτυα, τα M-MIMO και τα mmWave δίκτυα, καθώς τα δίκτυα αυτά βασίζονται στην ροή ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων του δικτύου 5G.

2. Παρά τα πλεονεκτήματα του WPT, η απόδοση του συστήματος μειώνεται αρκετά λόγω της χαμηλής απόδοσης στην μετατροπής της ενέργειας και την απώλεια αυτής κατά την διάρκεια της διαδρομής. Γενικά, οι τεχνικές του δικτύου 5G που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του, βελτιώνοντας επίσης και την αποτελεσματικότητα του WPT. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν narrowακτίνες με τη χρήση πολλαπλών κεραιών στην πλευρά του πομπού, εφόσον αυτές διαθέτουν βελτιστοποιημένους φορείς σχηματισμού δέσμης, ο οποίος είναι γνωστός ωςenergybeamforming. Αυτή η τεχνική μπορεί να βρει εφαρμογή τόσο σε εφαρμογές M-MIMO όσο και σεmmWave.Επιπλέον, η επικοινωνία 5G μικρής εμβέλειας

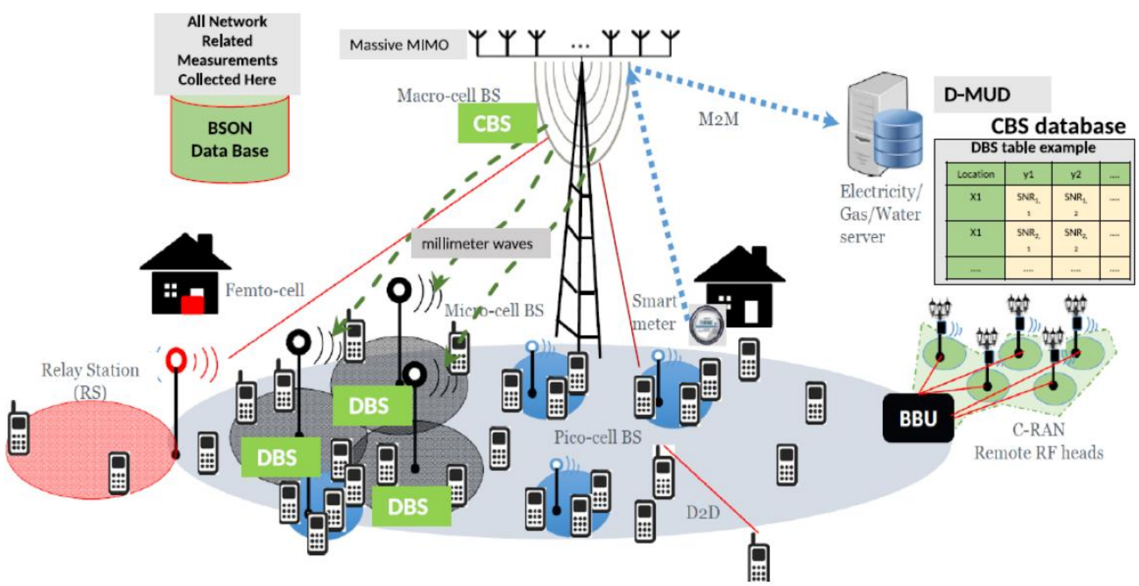
που βασίζονται σε τεχνικές επικοινωνίας μεταξύ μηχανών D2D και πυκνών δικτύων, μπορείνα βελτιώσει την αποδοτικότητατου WPT μειώνοντας την απόσταση μεταφοράς ενέργειας. Εκτός από τη βελτίωση στην ποσότητας της ενέργειας που συλλέγεται, η ισχύς του κυκλώματος που καταναλώνεται με την αποκωδικοποίηση πληροφοριών είναι επίσης ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα, καθώς μπορεί να μειώσει την καθαρή ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στη μπαταρία για μελλοντική χρήση.

3. Τέλος θα πρέπει να μελετηθούν οι παρεμβολές των ασύρματων δικτύων σε συνδυασμό με το WPT. Ένα βασικό πλεονέκτημα του WPT είναι ότι μπορεί να αξιοποιήσει όχι μόνο σήματα αποκλειστικά για αυτό το σκοπό αλλά επίσης και σήματα παρεμβολής. Έτσι, η παρεμβολή στο κανάλι, μπορεί να μετατραπεί σε μία πιθανή πηγή ενέργειας. Από την άποψη αυτή, τόσο στα πυκνά δίκτυα όσο και στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών, το ραδιοφάσμα επαναχρησιμοποιείται σε όλο το δίκτυο, παρέχοντας πολλές ευκαιρίες στο WPT να χρησιμοποιήσει τις υπάρχουσες παρεμβολές μεταξύ καναλιών. Στην πραγματικότητα, οι συσκευές με δυνατότητα WPT μπορούν να συλλέγουν ενέργεια όταν η παρεμβολή από το κανάλι είναι ισχυρή και η αποκωδικοποίηση των πληροφορίες σχετικά αδύναμη. Η σκόπιμη χρήση τεχνητών παρεμβολών σε συστήματα επικοινωνίας, μπορεί να είναι επωφελής στη συνολική απόδοση του συστήματος, ειδικά όταν οι δέκτες χρειάζονταιενέργεια για να υποστηρίξουν τις κανονικές λειτουργίες.

Σύμφωνα με όσα έχουμε αναλύσει παραπάνω, η συλλογή ενέργειας μετατρέπει τα δίκτυα 5G σε πράσινα, ενώ υπόσχεται φασματική απόδοση.Οι τεχνολογίες 5G, με τη σειρά τους, μπορούν να προσαρμοστούν για τη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών ασύρματων δικτύων. Τα διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας, η κίνηση των χρηστών, το χρησιμοποιούμενο κανάλι, η κατανάλωση ενέργειας και τα μοντέλα δημοτικότητας του περιεχομένου πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των 5G συστημάτων. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι οι ποικίλες εφαρμογές και οι ετερογενείς απαιτήσεις των χρηστών, δεν μπορούν να κάνουν το 5G, αν δεν ικανοποιηθούν με τη συγκεκριμένη τεχνολογία ραδιοεπικοινωνίας.Αντίθετα, απαιτείται ένα οικοσύστημα διαλειτουργικών τεχνολογιών, ώστε τα αντίστοιχα τεχνολογικά πλεονεκτήματα των διαφόρων συνιστωσών να μπορούν να αξιοποιηθούν από κοινού, ωθώντας το δίκτυο στα τελικά όρια απόδοσης του. Αυτό, ωστόσο, δημιουργεί και νέες προκλήσεις για τους σχεδιαστές συστημάτων.Οι ακόλουθες εικόνες αποτελούν μια συλλογή όλων των τεχνικών που αναλύθηκαν προηγουμένως και ένα παράδειγμα χρήσης στην πραγματική ζωή, αντίστοιχα. [9, 10, 12, 23]



Εικόνα 31: Μια επισκόπηση των συνιστωσών βιώσιμων πράσινων δικτύων 5G.
Πηγή: https://arxiv.org/abs/1609.09773



Εικόνα 32: Παράδειγμα πράσινου δικτύου 5G.
Πηγή: http://www.5gsummit.org/greece/slides/Session2_04_Elias%20Yaacoub.pdf

Βιβλιογραφία

1. Βιβλία - Περιοδικά

[1]ArunaPremBianzino, Claude Chaudet, Dario Rossi and Jean-Louis Rougier, 2010.A Survey of Green Networking Research.IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14 (1), 3-20. Διαθέσιμο από:https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/1213/R02/papers/green-survey.pdf

[2] N.M.Thenuwara, A.Y.Samarakoon, J.Annalingam, E.Sharooban and DhishanDhammearatchi, 2016. Green Networking: Strategies to save network for Next-Generation. International Journal of Scientific and Research Publications, 6 (4), 259-264. Διαθέσιμοαπό: http://www.ijsrp.org/ algorithmsresearch-paper-0416/ijsrp-p5240.pdf

[3] Jaime Lloret, KayhanZrarGhafoor, Danda B. Rawat, 2015. Green network protocols and. Journal of Network and Computer Applications, 58, 192-193.Διαθέσιμο από:https://www.researchgate.net/publication/286413047_Green_network_protocols_and_algorithms

[4] Xiaofei Wang, Athanasios V. Vasilakos, Min Chen, Yunhao Liu, Ted Taekyoung Kwon, 2015. A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges, 17 (1), 4-20. Διαθέσιμοαπό: https://www.academia.edu/2891962/A_Survey_of_Green_Mobile_Networks_Opportunities_and_Challenges_ACM

[5] Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, 2014. Διαθέσιμο από: https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download

[6] 5G: A Technology Vision. Διαθέσιμοαπό: http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_314849

[7] 5G Vision. The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services.Διαθέσιμο από: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf

[8] Qingqing Wu, Geoffrey Ye Li, Wen Chen, Derrick Wing Kwan Ng, Robert Schober, 2016. An Overview of Sustainable Green 5G Networks.Διαθέσιμοαπό: https://arxiv.org/abs/1609.09773

[9] 5GRadioAccess (2016).Διαθέσιμοαπό: https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g.pdf

[10] 5G Issues & Challenges (2017).Διαθέσιμοαπό: https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/Report-5G-issues-challenges-march2017.pdf

[11] 5Gradio network architecture.Διαθέσιμοαπό: https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj9orjAhPPWAhUoKsAKHbPiByEQFggxMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.ict-ras.eu%2Findex.php%3Foption%3Dcom_content%26view%3Darticle%26id%3D4%26Itemid%3D106%26jsmallfib%3D1%26dir%3DJSROOT%255CDocuments%2FRAS%2BWhite%2BPapers%26download_file%3DJSROOT%255CDocuments%2FRAS%2BWhite%2BPapers%2FWhite%2BPaper%2Bon%2B5G%2BRadio%2BNetwork%2BArchitecture.pdf&usg=AOvVaw3KXcSNdu-k7Pqhdsa8aUfI

[12] M. Olsson, C. Cavdar, P. Frenger, S. Tombaz, D. Sabella, R. Jantti, 2013.5GrEEn: Towards Green 5G Mobile Networks. Διαθέσιμοαπό: http://ieeexplore.ieee.org/document/6673363/

2. Πηγέςαπότοδιαδίκτυο

[13] WhatisNetworkVirtualization?.Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://blogs.vmware.com/services-education-insights/2017/03/what-is-network-virtualization.html

[14] Activeantenna. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://en.wikipedia.org/wiki/Active_antenna

[15] How to Tell the Difference Between Passive and Active Antennas. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

http://blog.rfvenue.com/2014/12/15/active-v-passive-anntennas

[16] Green Networks: Opportunities and Challenges. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

http://www.ieeelcn.org/prior/LCN34/2009_Keynote_Christensen.pdf

[17] Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

http://ec.europa.eu/environment/basics/global-challenges/consequences/index_el.htm

[18] Green Networking: Lessons learned and challenges. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjr9Pueo6XWAhXIVhQKHY6VAmsQFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Finformation_society%2Fnewsroom%2Fcf%2Fdae%2Fdocument.cfm%3Fdoc_id%3D7254&usg=AFQjCNES5J7F4Ktg7AJl9Fzo4ZiD6j_wLA

[19] 5G. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://en.wikipedia.org/wiki/5G

[20] What is 5G? Everything You Need to Know – A Definition. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/what-is-5g/

[21] Internetofthings. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things

[22] Thewayto 5G. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://www.slideshare.net/whaien/the-way-to-5g-52037421

[23] Green Virtualization for Multiple Collaborative Cellular Operators: Benefits and 5G Challenges. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

http://www.5gsummit.org/greece/slides/Session2_04_Elias%20Yaacoub.pdf

[24] Green Network Technologies for MTV in 5G. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

https://wireless.kth.se/wp-content/uploads/sites/19/2014/08/M2M_TUTORIAL_5GREEN_2014_FINAL_Jesus.pdf