

Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών και Κατανάλωση Ενέργειας  
Telecommunications Networks and Energy Consumption  
Γιάντσιου Κάθου  
15/11

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
ΔΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα  
Δίκτυα Υπολογιστών  
Καθηγητής: Α.Α. Οικονομίδης

University of Macedonia  
Master Information Systems  
Computer Networks  
Professor: A.A. Economides

10/02/2012

## Περίληψη

Η εργασία πραγματεύεται την κατανάλωση ενέργειας στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Ξεκινάει με μια επιγραμματική ανάλυση της αρχιτεκτονικής των δικτύων (ενσύρματα, ασύρματα, δίκτυα κορμού). Έπειτα, γίνεται μία εκτενής αναφορά στην ενέργεια που καταναλώνεται στα δίκτυα, αναφέροντας τις κατάλληλες μετρικές για κάθε τύπο δικτύου, αλλά και στα στοιχεία των δικτύων που καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, προτείνονται κάποιες στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα. Σε όλη την έκταση της εργασίας τονίζονται και οι λόγοι για τους οποίους αποτελεί σημαντικό στόχο η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, που είναι κυρίως περιβαλλοντικοί και οικονομικοί. Τέλος, παραθέτονται τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## Abstract

This essay is a study of the energy consumption in telecommunications networks. It begins with a succinct analysis of network architecture (wired, wireless, core networks). In the second part, there is a comprehensive reference to the energy consumption in telecommunication networks, indicating the appropriate metrics for each network type, and to the components of networks that consume the most energy. In the latter part of the essay, some strategies are proposed to reduce energy consumption in networks. Throughout the paper, are also highlighted the reasons, why reducing energy consumption in telecommunications networks is an important goal, which are primarily environmental and economic. Finally, the conclusions of this study are analyzed and proposals are made for future research.

## Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών και Κατανάλωση Ενέργειας

Η στροφή της κοινωνίας την τελευταία δεκαετία σε λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον, εξαιτίας των έντονων συζητήσεων σχετικά με την κλιματική αλλαγή, είναι εμφανής σε παγκόσμιο επίπεδο. Γίνεται ιδιαίτερος λόγος για τις πράσινες τεχνολογίες, που σημαίνει ότι κάθε νέα τεχνολογία αξιολογείται με βάση το αποτύπωμά της σε άνθρακα (Lange, Kosiankowski, Hülsermann, Weidmann, & Gladisch, 2010). Όσον αφορά στις Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών – ΤΠΕ (Information and Communication Technologies-ICT) είναι υπεύθυνες για το 2-4% περίπου των εκπομπών άνθρακα παγκοσμίως. Το 40-60% των εκπομπών άνθρακα των ΤΠΕ οφείλεται στην ενεργειακή κατανάλωση της χρήσης του εξοπλισμού τους. Οι εκπομπές αυτές αναμένεται να διπλασιαστούν μέσα στην επόμενη δεκαετία αν δεν ληφθούν πρωτοβουλίες για τη μείωση του αποτυπώματος. Ένα σημαντικό μέρος αυτών των εκπομπών, περίπου το ένα έκτο, αποδίδεται στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών (Vereecken et al., 2011). Στην Εικόνα 1 μπορούμε να παρατηρήσουμε την μελλοντική πορεία της ενεργειακής κατανάλωσης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων στο χρόνο, βάσει των δεδομένων που ισχύουν σήμερα.

### Αρχιτεκτονικές Δικτύων

Για την καλύτερη κατανόηση του θέματος, παραθέτονται παρακάτω κάποιες πληροφορίες για τα διάφορα είδη της Αρχιτεκτονικής των Δικτύων. Η Εικόνα 2 που αποτελεί μια επισκόπηση δικτύου λειτουργεί επικουρικά στην κατανόηση των παρακάτω εννοιών.

#### Δίκτυα πρόσβασης

**Ενσύρματα δίκτυα (Fixed line networks).** Ο χρήστης συνδέεται μέσω ενός φυσικού καλωδίου. Εδώ χρησιμοποιούνται τρεις βασικοί τύποι τεχνολογίας:

**Ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital subscriber line-DSL)** που χρησιμοποιεί το συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων χαλκού από τις παλιές τηλεφωνικές γραμμές. Ανάλογα με το ρυθμό της ταχύτητας των δεδομένων (bit) και το μέγιστο εύρος ζώνης συχνοτήτων υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες, οι πιο γνωστές ADSL (Asymmetric DSL) και VDSL (Very high bit rate DSL).

**Τεχνολογία ομοαξονικού καλωδίου (Coax cable technology)** για μεγαλύτερη ταχύτητα δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για μετάδοση τηλεοπτικού δικτύου.

**Τεχνολογίες οπτικών ινών (Optical fiber technologies)** χρησιμοποιούνται ήδη όπου χρειάζονται υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων. (Διακονικολάου, Αγιακάτσικα, Μπούρας, 2004). Βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης και έχουν αρχίσει να εμφανίζονται στην πλευρά του τελικού χρήστη του δικτύου είτε με μια ειδική σύνδεση με το χρήστη (Point-To-Point), είτε με ένα ενδιάμεσο ενεργό διαχωριστή (Active Star), ή με παθητικό ενδιάμεσο διαχωριστή (Passive Optical Network- PON).

Σε διάφορες περιπτώσεις, ανάλογα με την προσφερόμενη ταχύτητα δεδομένων και την κυκλοφοριακή συμφόρηση (traffic), οι παραπάνω τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί σε ένα δίκτυο πρόσβασης. Παραδείγματα συνδυασμού: hybrid fiber coax-HFC, fiber to the building-FTTB, fiber to the home – FTTH.

Ως μετρική κατά την αξιολόγηση κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα πρόσβασης, θεωρούμε την κατανάλωση ενέργειας ανά συνδρομητή (w/sub), εφόσον η ενέργεια που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται είναι σε μεγάλο βαθμό σταθερή στο χρόνο και ανεξάρτητη φορτίου, παρόλο που η κυκλοφορία είναι εξαιρετικά μεταβλητή (Vereecken et al, 2011).

**Ασύρματα δίκτυα.** Η σύνδεση των χρηστών παρέχεται μέσω μιας ασύρματης σύνδεσης. Οι συσκευές των χρηστών χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για να συνδεθούν σε ένα σταθμό βάσης, ο οποίος στη συνέχεια συνδέεται με τα κεντρικά γραφεία μέσω ενός δικτύου backhaul.

Διαφορετικές τεχνολογίες είναι διαθέσιμες και ποικίλουν ανάλογα με την ισχύ της μετάδοσης, τη συχνότητα μετάδοσης, το σύστημα διαμόρφωσης και την τεχνική πολυπλεξίας, παρέχοντας έτσι διαφορετικούς ρυθμούς πρόσβασης στα δεδομένα (bit) στους χρήστες. Οι τρεις κύριες αναδυόμενες ασύρματες τεχνολογίες:

***Mobile worldwide interoperability for microwave access (WiMAX).*** Το WiMAX έχει αναπτυχθεί για ασύρματες εφαρμογές σε κινητά και επιτρέπει στους ανθρώπους να επικοινωνούν, ενώ βρίσκονται εν κινήσει.

***High-speed packet access (HSPA)*** είναι ο διάδοχος του ευρέως καθιερωμένου παγκόσμιου συστήματος κινητών τηλεπικοινωνιών, γνωστό και ως τεχνολογία τρίτης γενιάς (3G). Προσφέρει αυξημένη απόδοση με τη χρήση βελτιωμένων συστημάτων διαμόρφωσης και την εκλέπτυνση των πρωτόκολλων, με τα οποία τηλέφωνα και βάσεις σταθμών επικοινωνούν.

***Long term evolution (LTE)*** είναι η νεότερη ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία. Διατίθεται στην αγορά ως η τέταρτη γενιά (4G) των ραδιο-τεχνολογιών (Vereecken et al, 2011).

### **Εξοπλισμός Συνδρομητή (Customer premises equipment)**

Στα *ενσύρματα δίκτυα* μπορεί να είναι μια πύλη στο σπίτι (home gateway), η οποία στη

συνέχεια συνδέεται περαιτέρω με άλλες συσκευές. Η home gateway είναι και ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας όσον αφορά τα ενσύρματα δίκτυα.

Στα ασύρματα δίκτυα ο εξοπλισμός αυτός έχει μεγαλύτερη ποικιλία. Μπορεί να είναι ένα κινητό τηλέφωνο, μια ασύρματη κάρτα δικτύου σε έναν υπολογιστή, ή μια πύλη στο σπίτι (home gateway). Για τις ασύρματες τεχνολογίες χρησιμοποιούμε ως εκ τούτου τον γενικότερο όρο σταθμός κινητών (mobile station), ο οποίος καταναλώνει και την περισσότερη ενέργεια.

### **Δίκτυα Κορμού (Core / Backbone Networks)**

Τα δίκτυα πρόσβασης συγκεντρώνουν τους χρήστες σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Για τη διασύνδεση αυτών των περιοχών χρησιμοποιούνται δίκτυα κορμού. Για τα δίκτυα επιχειρήσεων που εξυπηρετούν έναν οργανισμό, ο όρος backbone χρησιμοποιείται περισσότερο, ενώ για τους παρόχους υπηρεσιών συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο όρος core (core network, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)). Ένα δίκτυο κορμού αποτελείται από έναν αριθμό κεντρικών κόμβων (core nodes) που είναι διασυνδεδεμένοι, μέσω πολυπλεγμένων κατά μήκος κύματος (WDM) οπτικών ινών, συνήθως σε ένα πλέγμα ή σε τοπολογία δακτυλίου. Τα τρέχοντα δίκτυα κορμού είναι συνήθως ένα μείγμα από διάφορα στρώματα τεχνολογιών το ένα επάνω στο άλλο, όπως IP-over-ATM-over-SDH (Internet Πρωτόκολλο, ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς, σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία). Ωστόσο, υπάρχει η τάση να στρέφονται προς πιο ομοιογενείς αρχιτεκτονικές, όπου το IP δρομολογείται άμεσα με WDM συνδέσμους.

Σε γενικές γραμμές, ένας κόμβος αποτελείται από ένα αριθμό WDM μεταδιδόμενων και λαμβανόμενων καρτών, που αναφέρονται και ως αναμεταδότες ή πομποδέκτες, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε ένα IP router. Ο IP δρομολογητής με τη σειρά του μπορεί να συνδέεται με μια σειρά δρομολογητών πρόσβασης (Vereecken et al, 2011).

## Ποσοτικοποίηση της Κατανάλωσης Ενέργειας

Σε αυτή την ενότητα ποσοτικοποιείται η ενέργεια που καταναλώνεται από τους τύπους Αρχιτεκτονικής των Δικτύων που περιγράψαμε επιγραμματικά παραπάνω. Οι ποσοτικοποιήσεις βασίζονται σε δεδομένα, σε μετρήσεις ερευνητών και σε βιβλιογραφικές πηγές.

### Ενσύρματα Δίκτυα

Κάθε συνδρομητής (Subs) έχει μια ειδική σύνδεση. Έτσι, η ισχύς ανά συνδρομητή είναι μια σταθερή μετρική. Στις DSL τεχνολογίες ο τελευταίος κόμβος πριν από το συνδρομητή είναι ο DSL πολυπλέκτης πρόσβασης (DSLAM). Ο ADSL εξοπλισμός καταναλώνει 1-2 W/Subs, ο VDSL εξοπλισμός καταναλώνει περίπου 3-5W/Subs. Η κατανάλωση ενέργειας στο VDSL εξοπλισμό είναι ελαφρώς υψηλότερη, αν και οι τάσεις δείχνουν να βελτιστοποιείται αυτή η τεχνολογία. Ο εξοπλισμός του οπτικού δικτύου καταναλώνει σήμερα 10-20 W/port. Ωστόσο, με τη χρήση GPON τεχνολογίας, μπορεί να διανεμηθεί ακόμη περισσότερο. Ο OLT (optical line terminal) καταναλώνει 0,2 - 0,8 W/Subs. Κατά την αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης αυτών των συσκευών, πρέπει κανείς να σκεφτεί, ότι οι χώροι όπου βρίσκονται, συχνά χρειάζεται να ψύχονται. Επίσης, λαμβάνονται μέτρα πρόληψης σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Αυτή η επιβάρυνση εκφράζεται σε αποτελεσματικότητα χρήσης ενέργειας (Power Usage Effectiveness-PUE), που δηλώνει τον συντελεστή με τον οποίο ο εξοπλισμός κατανάλωσης ενέργειας πρέπει να πολλαπλασιάζεται ώστε να γνωρίζουμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας (δηλαδή, εξοπλισμός + επιβάρυνση). Η PUE είναι συνήθως ο συντελεστής 2. Αυτό σημαίνει στην πραγματικότητα ότι οι παραπάνω αριθμοί πρέπει να διπλασιαστούν για την εκτίμηση της πλήρους κατανάλωσης ενέργειας (Vereecken et al, 2011). Η συνολική κατανάλωση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της PUE και των ταχυτήτων των παραδιδόμενων δεδομένων, συνοψίζονται για τις διάφορες τεχνολογίες στον πίνακα 1 και την εικόνα 2.

## Ασύρματα Δίκτυα

Σε ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας έχει ο σταθμός βάσης (base station). Ειδικότερα, το σύστημα ψύξης τους και οι ενισχυτές ρεύματος έχουν τις υψηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια (Kouritas & Demestichas, 2010). Η ενέργεια ανά συνδρομητή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του συνδρομητή στην περιοχή που καλύπτεται από το σταθμό βάσης. Έτσι, πρώτα υπολογίζουμε την ενέργεια/σταθμό βάσης και στη συνέχεια τη μεταφράζουμε σε κατανάλωση ενέργειας ανά χρήστη. Ένας σταθμός βάσης, εδώ, ορίζεται ως ο εξοπλισμός που απαιτείται για την επικοινωνία με τους κινητούς σταθμούς και το δίκτυο backhaul. Για τον σταθμό βάσης υποθέτουμε εξωτερική τοποθέτηση σε προαστιακό περιβάλλον, σε ύψος 30m, που καλύπτουν τρεις τομείς, καθώς και έναν κινητό σταθμό σε ύψος 1,5m. Για να γίνει δίκαιη σύγκριση μεταξύ των υπό εξέταση τεχνολογιών, ορίζουμε ένα ποσοστό bit ανά ενεργό χρήστη περίπου 3Mb/s. Εξετάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας του σταθμού βάσης, που περιλαμβάνει την επιβάρυνση PUE.

Το WiMAX έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από περίπου 2,9kW/σταθμό βάσης, και ακτίνα 340 m. Το LTE έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση, 3,7kW/σταθμού βάσης, και τη μεγαλύτερη ακτίνα περίπου 470μ. Το HSPA έχει την μικρότερη ακτίνα, 240τ.μ., όλων των υπό εξέταση τεχνολογιών και κατανάλωση ενέργειας 3,7kW/σταθμό βάσης, η οποία είναι συγκρίσιμη με την κατανάλωση ενέργειας του LTE.

Στις αστικές και προαστιακές περιοχές είναι δίκαιο να εξεταστεί η πυκνότητα συνδρομητών, μεταξύ 100 και 300 users/km<sup>2</sup>. Όταν υποθέτουμε μια πυκνότητα των 300 users/km<sup>2</sup> και συγκρίνουμε την κατανάλωση ρεύματος ανά χρήστη, βλέπουμε ότι το LTE καταναλώνει την λιγότερη ενέργεια 18W/Subs, ακολουθούμενη από το Mobile WiMAX με κατανάλωση 27W/Subs. Η κατανάλωση ανά χρήστη είναι μικρότερη για LTE, λόγω του μεγαλύτερου εύρους του HSPA έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ανά χρήστη, 68W/Subs,



που προκαλείται από την μικρότερη ακτίνα. Αν όμως υπολογίσουμε τη μισή πυκνότητα συνδρομητών, τότε η κατανάλωση ενέργειας ανά συνδρομητή διπλασιάζεται (Vereecken et al, 2011).

### **Εγκαταστάσεις Εξοπλισμού Συνδρομητή**

Η κατανάλωση ενέργειας του εξοπλισμού του πελάτη είναι σημαντική επίσης. Προς το παρόν, για τεχνολογίες σταθερών γραμμών, η πύλη του σπιτιού (π.χ., ένα μόντεμ DSL) καταναλώνει 5-10W, που είναι υψηλότερη από την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο πρόσβασης. Οι πύλες σπιτιού για οπτικά δίκτυα, επίσης, τείνουν να έχουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τους ομολόγους του DSL. Αυτό είναι ένα πρόβλημα, δεδομένου ότι μπορεί να εξολεθρευτεί το δυνητικό όφελος μείωσης ενέργειας υιοθετώντας μια GPON τεχνολογία. Σε ασύρματα δίκτυα η κατανάλωση ενέργειας των κινητών σταθμών είναι πολύ χαμηλότερη εφόσον έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές σε κινητά, τα οποία απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για μεγάλο χρόνο αυτονομίας.

### **Δίκτυα Κορμού**

Το μεγαλύτερο μερίδιο, περίπου 90%, της κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων κορμού συγκεντρώνεται στους κόμβους. Οι WDM συνδέσεις αποτελούν μόνο το 10% ή και λιγότερο της κατανάλωσης ενέργειας. Ο σκοπός των δικτύων αυτών είναι η μεταφορά των ροών κυκλοφορίας μεταξύ των διαφόρων τοποθεσιών. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας σε δίκτυο κορμού εκφράζεται συνήθως σε watt/bit. Οι high-end routers είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί από τους low-end routers: ενώ καταναλώνουν περισσότερο σε απόλυτες τιμές, η ισχύς που απαιτείται για να μεταφερθεί ένα bit μειώνεται με την αύξηση της χωρητικότητας των δρομολογητών. Οι τρέχοντες δρομολογητές καταναλώνουν μεταξύ 0,1 και 0,01W/Mb/s. Κατά μέσο όρο, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός, ότι κοντά στην άκρη του πυρήνα υπάρχουν πιο πολλοί low-end routers, οι core routers καταναλώνουν περίπου το 0,05 W/Mb/s. Αυτές οι τιμές περιλαμβάνουν ήδη επιβάρυνση PUE. Άλλη προτεινόμενη μέθοδος υπολογισμού είναι

η κατανάλωση ενέργειας ανά συνδρομητή στο Διαδίκτυο. Με βάση αυτή τη μέθοδο, εκτιμούμε ότι με ADSL ρυθμούς πρόσβασης bit (8Mb/s) ο πυρήνας καταναλώνει περίπου 0,24W/Subs. Αν αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης bit σε 100Mb/s, η κατανάλωση θα αυξηθεί σε περίπου 3W/Subs. Αναφέρονται αυτές οι τιμές διαγραμματικά στην εικόνα 3. Προς το παρόν, η κατανάλωση ενέργειας σε κεντρικά δίκτυα είναι σημαντικά χαμηλότερη από ότι σε δίκτυα πρόσβασης. Με την αύξηση της ταχύτητας bit λόγω υιοθέτησης των PON τεχνολογιών, η απόλυτη κατανάλωση ενέργειας κεντρικών δικτύων θα αυξηθεί. Ωστόσο, υπολογίζοντας την κατανάλωση ενέργειας σε Watts/bit, οι τεχνολογίες των δρομολογητών αναμένεται να γίνουν πιο αποδοτικές (Vereecken et al, 2011).

### **Βελτιστοποίηση Κατανάλωσης Ενέργειας**

Το να λειτουργήσει ένα δίκτυο με έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο δεν είναι μόνο θέμα προστασίας του περιβάλλοντος, αλλά και ένας κρίσιμος παράγοντας για την ανάπτυξη μελλοντικών δικτύων σε περιοχές εκτός δικτύου, που βασίζονται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ή προσωπικών δικτύων και δικτύων αισθητήρων που βασίζονται στην τροφοδοσία μπαταρίας. Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας έχει επίσης μεγάλη επίδραση στο κόστος λειτουργίας του δικτύου, γεγονός που το κάνει πιο προσιτό στον χρήστη.

Η βελτιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας στις τηλεπικοινωνίες, δηλαδή η όσο το δυνατό χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με ταυτόχρονη μη-μείωση της αποδοτικότητας των τηλεπικοινωνιών, είναι περίπλοκο ζήτημα επειδή δεν υπάρχει σαφής λύση για το πρόβλημα. Γενικά, η συνολική βελτιστοποίηση του δικτύου είναι καλύτερη από το σύνολο των βελτιστοποιήσεων των επιμέρους στοιχείων του δικτύου (Kouritas & Demestichas, 2010). Στην εικόνα 4 αναφέρονται οι βασικοί παράγοντες για ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα.

Παρόλα αυτά, είναι δυνατό να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως είναι η βελτιστοποίηση ολόκληρων δικτύων, το σβήσιμο εξαρτημάτων, η μείωση των φορτίων αλλά και η μείωση κατανάλωσης ενέργειας των στοιχείων ξεχωριστά που καθιστούν ένα

ολοκληρωμένο δίκτυο τηλεπικοινωνίας και αναλύονται παρακάτω. Επιπρόσθετα, στην εικόνα 5 αναφέρονται επιγραμματικά πολλές άλλες ενεργειακά αποδοτικές λύσεις μέσα σε ένα δίκτυο.

### **Βελτιστοποίηση Δικτύων και Σβήσιμο Εξαρτημάτων**

Με τα σημερινά δεδομένα τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να αντεπεξέρχονται σε φορτία αιχμής – δηλαδή σε περιόδους μεγάλης ζήτησης και χρήσης – ενώ δίνεται μικρή σημασία για το σχεδιασμό του δικτύου σε περιόδους χαμηλής ή μέσης ζήτησης φορτίου. Σχεδιάζοντας, όμως, δίκτυα προσαρμοσμένα στη ζήτηση, που μπορούν να απενεργοποιούν στοιχεία όταν η ζήτηση είναι χαμηλή ή να χρησιμοποιούν στοιχεία που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, μπορούμε να πετύχουμε βελτιστοποίηση.

Στα δίκτυα κορμού μπορεί να επιτευχθεί δυναμική βελτιστοποίηση. Δυναμική είναι μια προσέγγιση για την κατανόηση της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων που παρατηρούνται στην πάροδο του χρόνου. Ασχολείται με επαναλήψεις και χρονικές καθυστερήσεις που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος (dynamic systems, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)). Συγκεκριμένα, με τη δυναμική βελτιστοποίηση τοπολογίας, έχοντας πολλαπλές πιθανές τοπολογίες που ικανοποιούν τις απαιτήσεις της κυκλοφοριακής συμφόρησης (traffic), θα προτιμάται αυτή που έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η δυναμική βελτιστοποίηση εκμεταλλεύεται συνήθως τις μεταβολές που υφίστανται στην κίνηση του φορτίου (traffic load) καθημερινά ή εβδομαδιαία, όπου η ένταση κατά τις ώρες μη-αιχμής αποτελεί το 50% της έντασης κατά τις ώρες αιχμής (Lange et al., 2011). Αυξάνοντας, έτσι, τον αριθμό των ανενεργών καρτών γραμμής (line cards), οι οποίες μπορούν προσωρινά να απενεργοποιηθούν, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή, μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια (βλέπε Εικόνα 6).

Στα ενσύρματα δίκτυα χρησιμοποιείται μια παρόμοια στρατηγική με τη χρήση Δυναμικής Κατανομής Εύρους Ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation-DBA) σε Παθητικά

Οπτικά Δίκτυα (PONs). Η DBA χρησιμοποιείται επί του παρόντος ως ένας τρόπος, που επιτρέπει σε χρήστες να έχουν αυξημένο ρυθμό μετάδοσης bit, ενώ παράλληλα άλλοι χρήστες στο ίδιο μέσο απαιτούν χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης bit.

Στα ασύρματα δίκτυα επικεντρωνόμαστε στη βελτιστοποίηση του σταθμού βάσης (base station), αφού καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια. Σύμφωνα με την στρατηγική της υβριδικής ιεραρχικής ανάπτυξης του σταθμού βάσης (hybrid hierarchical base station deployment), χρησιμοποιώντας σταθμούς βάσης με διαφοροποιημένο μέγεθος κελιού (cell) και ασύρματες τεχνολογίες δικτύου, μπορεί να δημιουργηθεί ένα βασικό δίκτυο με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης bit αλλά με μεγάλη κάλυψη περιοχής. Στην ιεράρχηση των διαφόρων επιπέδων, οι σταθμοί με μικρότερα μεγέθη κελιών αλλά με υψηλό ρυθμό μετάδοσης bit μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παροχή συνδέσεων υψηλότερου εύρους ζώνης, όταν αυτό χρειάζεται. Το πλεονέκτημα της ιεράρχησης είναι ότι τα υψηλότερα επίπεδα χρησιμοποιούνται μόνο όταν υπάρχει υψηλή ζήτηση και είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία.

Ακόμα, είναι αρκετά σημαντικό να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας της πύλης του σπιτιού (home gateway). Πρόκειται για μεμονωμένες συσκευές, που είναι απαραίτητο να είναι ενεργές, μόνο κατά την περίοδο που χρησιμοποιούνται από το χρήστη. Σε όλες τις άλλες στιγμές, μπορούν να απενεργοποιούνται. Αν και στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει σπάνια, μπορεί να επιφέρει αρκετά μεγάλη βελτιστοποίηση, χωρίς να χρειάζεται ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών (Vereecken et al, 2011).

### **Μείωση Φορτίου**

Αφού τα στοιχεία του δικτύου είναι σε κατάσταση αδράνειας, το επόμενο βήμα είναι η μείωση του φορτίου στα υπόλοιπα στοιχεία. Η στρατηγική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στα δίκτυα πρόσβασης, καθώς είναι πολύ δύσκολη η απενεργοποίηση στοιχείων και ταυτόχρονα η λειτουργία του δικτύου χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα.

Μια στρατηγική είναι αυτή που μπορεί να υποστηρίξει και να αντικαταστήσει πολλές συνδέσεις μαζί (link rates). Όσο λιγότερες συνδέσεις χρησιμοποιούνται, τόσο περισσότερη ενέργεια εξοικονομείται. Αυτό στον καταναλωτή συμβαίνει με τη μείωση της κατανάλωσης της πύλης του σπιτιού. Οι συνδέσεις με μεγαλύτερο ρυθμό ζεύξης, μεταξύ 1-10Gbps, έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σχετικά με αυτές με χαμηλότερο ρυθμό ζεύξης.

Σε δίκτυα κορμού, μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι μέσω οπτικού μονοπατιού (optical bypass), η οποία ήδη χρησιμοποιείται για τη μείωση του κόστους και για την ικανότητα αποσυμφόρησης του δρομολογητή (router). Η συμφόρηση (traffic), που δεν προορίζεται για ενδιάμεσους κόμβους, παραμένει στο οπτικό πεδίο και δεν υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία από τον κεντρικό δρομολογητή. Το οπτικό μονοπάτι είναι ενεργοποιημένο, από μια εισερχόμενη απευθείας στην κατάλληλη εξερχόμενη σύνδεση οπτικών ινών με αποτέλεσμα να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας. Ανάλογα με την αξιοποίηση του οπτικού μονοπατιού και το μέγεθος του δικτύου, η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να φτάσει έως και το 45% (Vereecken et al, 2011).

### **Μείωση Κατανάλωσης Ενέργειας σε Υπόλοιπα Στοιχεία**

Αφού τα δίκτυα βελτιστοποιηθούν και το φορτίο ελαχιστοποιηθεί, απομένει να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας των υπόλοιπων στοιχείων.

Στα νέας-γενιάς PONs (NG-PONs), το εύρος του σήματος θα αυξηθεί υποστηρίζοντας έως 60 με 100km. Από μόνη της αυτή η αύξηση θα οδηγήσει σε μείωση κατανάλωσης για κάθε OLT και μπορεί να απαιτεί κινητούς κόμβους (nodes) οι οποίοι προσθέτουν επιπλέον ζήτηση ενέργειας. Παρόλα αυτά, σε πιο πολύπλοκα δίκτυα υπάρχουν συνεχιζόμενες τάσεις ενοποίησης κόμβων, μειώνοντας τον αριθμό των κεντρικών γραφείων και οδηγώντας σε μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Αυτή η ενοποίηση στο δίκτυο μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας.

Η αποδοτικότητα ενέργειας στα *ασύρματα δίκτυα* μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση του εύρους των σταθμών βάσης. Έτσι, μεγαλύτερες περιοχές μπορούν να καλυφθούν από έναν και μόνο σταθμό βάσης και λιγότεροι σταθμοί βάσης θα είναι πια απαραίτητοι. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών κεραιών αποστολής και λήψης. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή σαν πολλαπλή είσοδος και πολλαπλή έξοδος (MIMO). Όταν χρησιμοποιούνται για παράδειγμα δύο κεραιές αποστολής και δύο κεραιές λήψης, το εύρος αυξάνεται κατά 66%, ενώ η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται κατά 2-4%, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται. Σε τεχνολογίες νέας γενιάς όπως LTE Advanced και WiMax 802.16, πάνω από 8 κεραιές διαβίβασης και λήψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Για μεγάλα δίκτυα κορμού, αυξάνοντας το μέγιστο μήκος της οπτικής διαδρομής (δηλ. μη απαιτώντας την αναγέννηση του οπτικού σήματος) μπορεί να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Για ένα πανευρωπαϊκό δίκτυο, η εξοικονόμηση θα μπορούσε να είναι μέχρι 10%.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στην πρόσφατη βιβλιογραφία συναντούμε τους όρους energy-aware systems, energy-aware network architecture, energy-aware network planning, energy-aware load-adaptive network operation (energy-aware = 'έξυπνα') που ουσιαστικά εμπεριέχουν τις στρατηγικές αύξησης ενεργειακής απόδοσης των δικτύων που περιγράφηκαν παραπάνω ( Lange et al., 2011). Στην Εικόνα 7 περιγράφονται σχηματικά οι συγκεκριμένοι όροι.

### **Συμπεράσματα**

Ο αριθμός των χρηστών του internet αυξάνεται γρήγορα και αυτοί οι χρήστες έχουν συνεχώς απαιτήσεις για αύξηση του bit rate. Εν τω μεταξύ, η διοχέτευση άνθρακα στην ατμόσφαιρα λόγω των συστημάτων τηλεπικοινωνιών πρέπει να μειωθεί. Η μείωση κατανάλωσης ενέργειας στις τηλεπικοινωνίες είναι μια σημαντική πρόκληση. Νέες

τεχνολογίες μπορούν να οδηγήσουν στη μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Προτείνεται, επομένως, στροφή στις πράσινες τεχνολογίες. Αυτό σημαίνει, ότι με την απενεργοποίηση κάποιων στοιχείων, μπορεί να μειωθεί το φορτίο στα δίκτυα και αυτό με τη σειρά του να επιφέρει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των στοιχείων του δικτύου. Αυτή τη στιγμή, η πιο μεγάλη άμεση μείωση κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να προέλθει από τον απλό καταναλωτή.

Στα ενσύρματα δίκτυα η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται από την πύλη του σπιτιού (home gateway) με εύκολες και απλές προσεγγίσεις. Στα ασύρματα δίκτυα η μεγαλύτερη κατανάλωση προέρχεται από το σταθμό βάσης.

Στα ενσύρματα δίκτυα η επιτυχία της βελτιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας επικεντρώνεται στη μεταστροφή σε τεχνολογίες οπτικών δικτύων. Ειδικότερα, τα PONs προσφέρουν μικρή κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνονται συνεχώς. Στα ασύρματα δίκτυα πολλές βελτιστοποιήσεις μπορούν ακόμα να επιτευχθούν ειδικά στους σταθμούς βάσης (base station), καθώς οι ενισχυτές ισχύος καταναλώνουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας. Ένας ενεργειακά αποδοτικός πομποδέκτης θα αναπτυχθεί, που προσαρμόζεται στις αλλαγές της συμφόρησης του φορτίου για μια ενεργειακά πιο αποδοτική λειτουργία στα κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνίας (Gruber, 2009). Στην παρούσα κατάσταση, στα δίκτυα κορμού η κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά χαμηλή. Παρόλα αυτά, με την αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης, μια περαιτέρω βελτιστοποίηση στην κατανάλωση ενέργειας είναι θεμιτή.

### **Μελλοντική Έρευνα**

Οι βελτιστοποιήσεις στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών συνεχίζονται με γρήγορους ρυθμούς. Βάσει ερευνών γίνεται λόγος για τα ευφυή συστήματα και για τα νέας-γενιάς PONs (New-Generation PONs), στα οποία αναφερθήκαμε και παραπάνω, τα οποία θα συμβάλλουν ιδιαίτερα στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

## Βιβλιογραφία

- Vereecken, W., Heddeghem, W. V., Deruyck, M., Puype, B., Lannoo, B., Joseph, W., ...  
Demeester, P. (2011). Power consumption in telecommunication networks: overview and reduction strategies. *IEEE, Communications Magazine*. doi: 10.1109/MCOM.2011.5783986
- Koutitas, G., & Demestichas, P. (2010). A review of energy efficiency in telecommunication networks. *Telfor Journal*. Ανακτήθηκε από: [http://journal.telfor.rs/Published/No3/No03\\_P01\\_fin.pdf](http://journal.telfor.rs/Published/No3/No03_P01_fin.pdf)
- Διακονικολάου, Γ., Αγιακάτσικα Α., & Μπούρας Η. (2004). *Επιχειρησιακή διαδικτύωση*. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Lange, C., Kosiankowski, D., Hülsermann, R., Weidmann, R., & Gladisch, A. (2010). *Energy footprint of telecommunication networks*. doi: 10.1109/ECOC.2010.5621088
- Gruber, M., Blume, O., Ferling, D., Zeller, D., Imran, M. A., & Strinati, C. E. (2009). EARTH – Energy aware radio and network technologies. doi: 10.1109/PIMRC.2009.5449938
- Lange, C., Kosiankowski, D., Gerlach, C., Westphal, F., & Gladisch, A. (2009). *Energy consumption of telecommunication networks*. Ανακτήθηκε από: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=5287118](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5287118)
- Chilamkurti, N., Zeadally, S., & Mentiplay, F. (2009). Green networking for major components of information communication technology systems. *EURASIP journal on Wireless Communications and Networking*. doi:10.1155/2009/656785
- Lange, C., Kosiankowski, D., Weidmann, R., & Gladisch, A. (2011). Energy consumption of telecommunication networks and related improvement options. *IEEE, journal of*



*selected topics in quantum electronics*, 17, 285-295. doi:

10.1109/JSTQE.2010.2053522

Deruyck, M, Vereecken, W, Tanghe, E, Joseph, W, Pickavet, M, Martens, & L, Demeester,

P. (2010). Power consumption in wireless access network. doi:

10.1109/EW.2010.5483506

Core networks. Ανακτήθηκε από: [http://en.wikipedia.org/wiki/Core\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Core_network)

Baliga, J. & Ayre, R. (2011). Energy Consumption in Wired and Wireless Access Networks.

*IEEE Communications Magazine*. Doi: 10.1109/MCOM.2011.5783987

Webb M. et all. (2008). *Smart 2020: enabling the low carbon economy in the information*

*age*. Ανακτήθηκε από:

[http://www.smart2020.org/\\_assets/files/02\\_Smart2020Report.pdf](http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020Report.pdf)

Christensen K. & Nordman B. (2005). Reducing the energy consumption of networked

devices. Tutorial presented at the University of South Florida, San Francisco.

Ανακτήθηκε από: [http://iee802.org/802\\_tutorials/05-](http://iee802.org/802_tutorials/05-)

[July/Tutorial%20July%20Nordman.pdf](http://iee802.org/802_tutorials/05-July/Tutorial%20July%20Nordman.pdf)

Pickavet, M., Vereecken, W., Demeyer, S., Audenaert, P., Vermeulen B., Davelder, C., ...

Demeester, P. (2008). Worldwide energy needs for ICT: the rise of power-aware

networking. doi: 10.1109/ANTS.2008.4937762

Zuckerman, D. (2009). Green communications – management included. Workshop on

green communications. Dresden, Germany. Ανακτήθηκε από: [http://www.green-](http://www.green-communications.net/icc09/docs/GreenComm-ICC09-Keynote1-Zuckerman.pdf)

[communications.net/icc09/docs/GreenComm-ICC09-Keynote1-Zuckerman.pdf](http://www.green-communications.net/icc09/docs/GreenComm-ICC09-Keynote1-Zuckerman.pdf)

Valcarenghi, L. (2011). Reducing energy consumption in optical access networks.

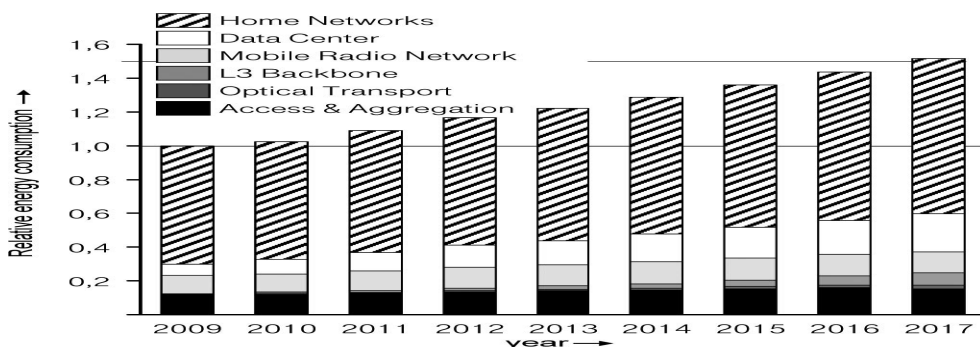
Presentation at ITU-T Green standards week. Rome, Italy. Ανακτήθηκε από:

<http://www.itu.int/ITU-T/>

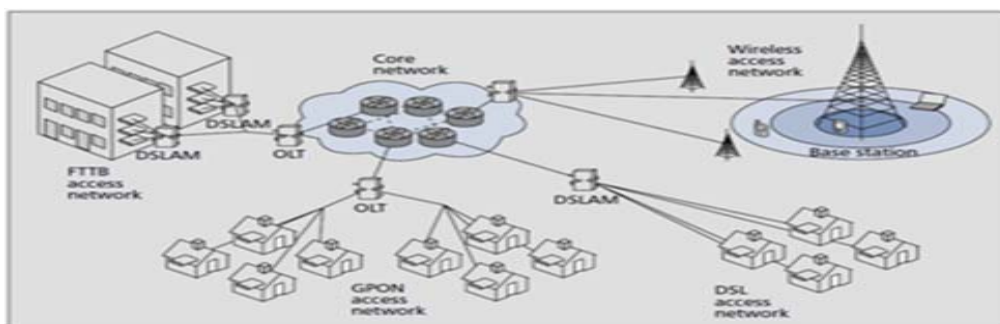
System Dynamics. Ανακτήθηκε από: [http://en.wikipedia.org/wiki/System\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/System_dynamics)

- Coiro, A., Listanti, M., Valenti, A., & Matera, F. (2011). Reducing Power Consumption in Wavelength Routed Networks by Selective Switch Off of Optical Links. *IEEE, journal of selected topics in quantum electronics*, 17, 428-436. doi: 10.1109/JSTQE.2010.2052791
- Yi Zhang Chowdhury, P., Tornatore, M., & Mukherjee, B. (2010). Energy Efficiency in Telecom Optical Networks. *IEEE, Communications Surveys & Tutorials*, 12, 441-458 . doi: 10.1109/SURV.2011.062410.00034
- Kilper, D.C., Atkinson, G., Korotky, S.K., Goyal, S., Vetter, P., Suvakovic, D., Blume, O. (2011). Power Trends in Communication Networks. *IEEE, journal of selected topics in quantum electronics*, 17, 275-284. doi: 10.1109/JSTQE.2010.2074187

Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών και Κατανάλωση Ενέργειας



Εικόνα 1: Πρόβλεψη για την κατανάλωση ενέργειας των τηλεπικοινωνιακών δικτύων (Deruyck et al., 2010).



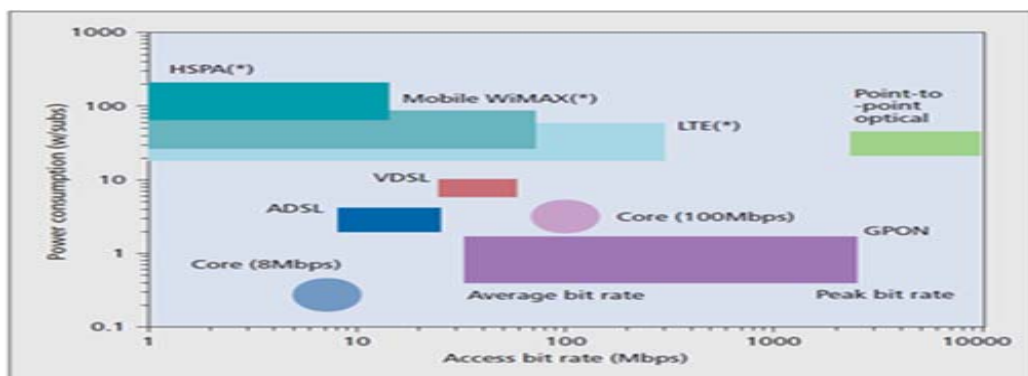
Εικόνα 2: Επισκόπηση δικτύου (Vereecken et al, 2011).

Πίνακας 1.

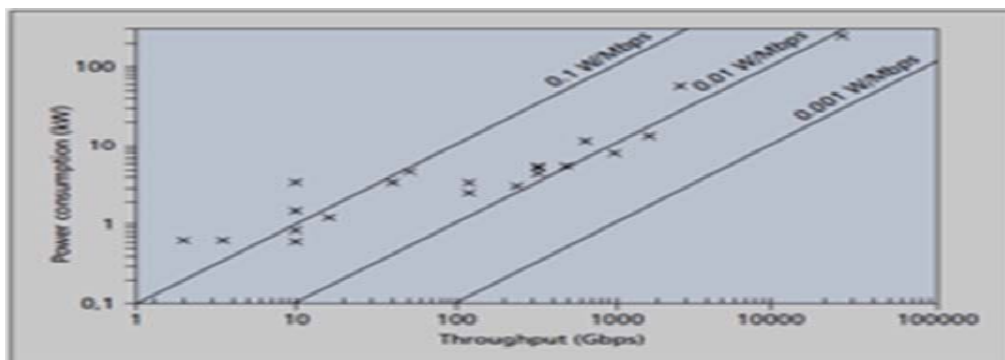
Ιδιότητες από διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης δικτύου (Vereecken et al, 2011).

Technology	Range (km)	Bit rate (Mb/s)	Users/node	Minimal user density (subs/km <sup>2</sup> )	Power/subs (with PUE) (W/subs)
ADSL ADSL2+	5.5 1.5	8 <sup>1</sup> 24 <sup>1</sup>	384-768	4-8 50-100	2-4
VDSL VDSL2+	1.0 0.3 0.3	26 <sup>1</sup> 55 <sup>1</sup> 100	16-192	5-60 50-700 50-700	6-10
GPON (32) GPON (64)	20 10	2488/32 2488/64	(4-72) * 32 (4-72) * 64	0.1-2 0.8-14	0.4-1.6
Mobile WiMAX	0.340 (3 Mb/s)	1-70	272 <sup>2</sup>	N/A	27 <sup>3</sup>
HSPA	0.240 (3 Mb/s)	1-14	225 <sup>2</sup>	N/A	68 <sup>3</sup>
LTE	0.470 (3 Mb/s)	1-300	180 <sup>2</sup>	N/A	18 <sup>3</sup>

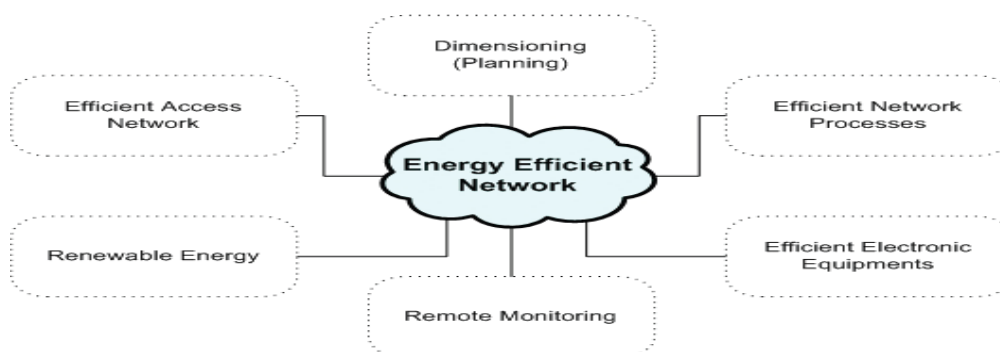
<sup>1</sup> Downstream <sup>2</sup> Simultaneous Active Users <sup>3</sup> Modelled for 300 subscribers per km<sup>2</sup>



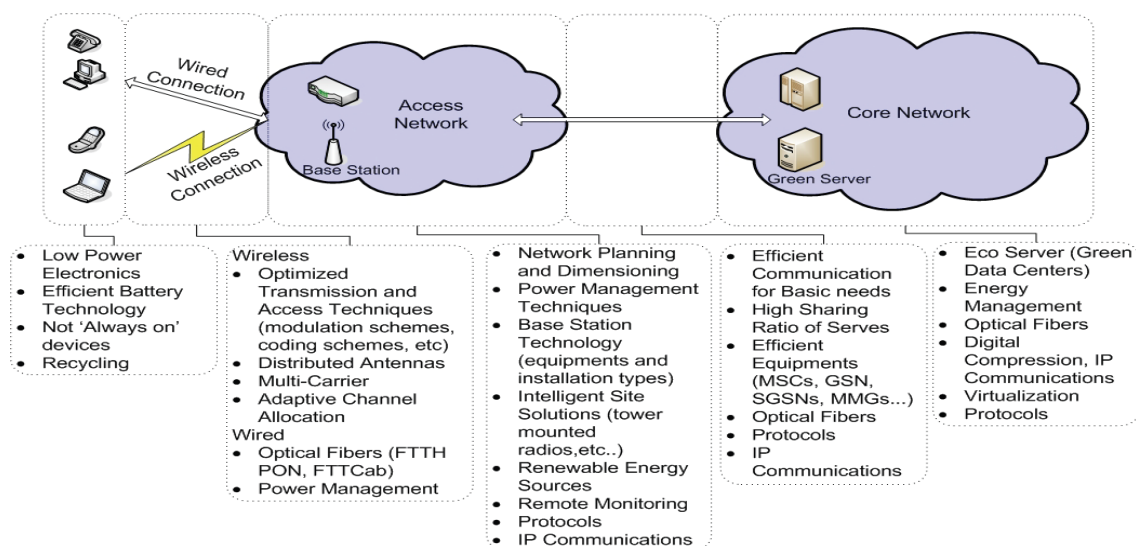
Εικόνα 3: Κατανάλωση ενέργειας ανά συνδρομητή σε διαφορετικές τεχνολογίες δικτύων (Vereecken et al, 2011).



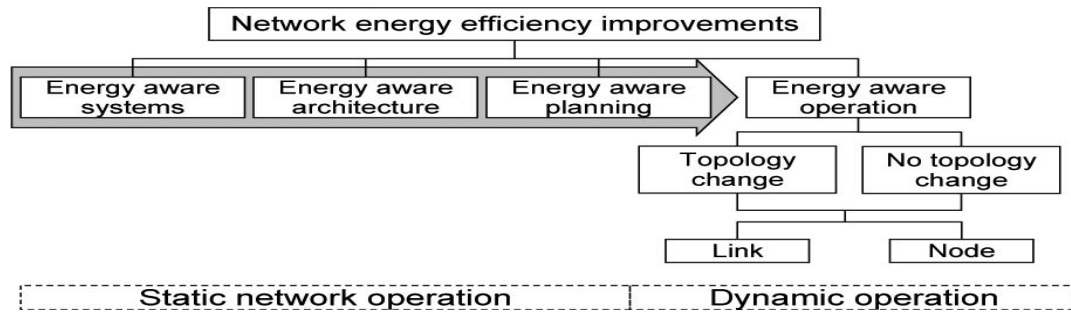
Εικόνα 4: Κατανάλωση ενέργειας των low-end routers και των high-end routers (Vereecken et al, 2011).



Εικόνα 5: Βασικοί παράγοντες για ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα (Kouritas & Demestichas, 2010).



Εικόνα 6: Ενεργειακά αποδοτικές λύσεις για τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών (Kouritas & Demestichas, 2010).



Εικόνα 7: Ταξινόμηση των επιλογών με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδο δικτύου ( Lange et al., 2011).