



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ  
ΔΙΚΤΥΑ»

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Π. Κορομηλάς

Επιβλέποντες : Γεώργιος Τσούλος  
Επίκουρος Καθηγητής

Τρίπολη, Μάιος 2012

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζονται προτεινόμενες τεχνικές για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Η επιλογή του θέματος έγινε σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή λόγω της σημασίας της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και παράλληλα της επίδρασης στο περιβάλλον του κλάδου των τηλεπικοινωνιών. Η χρησιμότητα των πρωτοβουλιών στο συγκεκριμένο τομέα που αναπτύσσονται σε παγκόσμιο επίπεδο θα συνεισφέρει σημαντικά στη ελάττωση του ενεργειακού κόστους διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα επικοινωνίας των χρηστών. Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να αναδείξει τις εξελίξεις αυτές όχι μόνο σε μεμονωμένα τμήματα του δικτύου αλλά και σε μια ολιστική θεώρηση.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

### Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>Κεφάλαιο 1 - Ασύρματα δίκτυα-Εξέλιξη και κατανάλωση ενέργειας</b>	
1.1 Εισαγωγή .....	8
1.2 Πρωτοβουλίες για πράσινες επικοινωνίες.....	10
<b>Κεφάλαιο 2 - Ορισμός πράσινων επικοινωνιών -Μετρικές</b>	
2.1 Ορισμός πράσινων επικοινωνιών.....	14
2.2 Μετρώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα - Μετρικές.....	14
<b>Κεφάλαιο 3 - Πρόοδοι στην εξοικονόμηση ενέργειας στον κύκλο επικοινωνιών</b>	
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Εξορθολογισμός δικτύου πυρήνα.....	22
3.3 Ενισχυτές .....	22
3.3.α DPD και Doherty Power Amplifiers.....	24
3.3.β Envelope tracking τεχνολογία .....	25
3.4 Τοπολογία δικτύου και λειτουργίες.....	27
3.3.α. Προσομοίωση στα Femtocells(α).....	29
3.3.β. Προσομοίωση στα Femtocells(β).....	30
3.5 Εργαλεία διαχείρισης ενέργειας.....	34
3.6 Εισαγωγή εναλλακτικών μορφών ενέργειας.....	36
<b>Κεφάλαιο 4 - Πράσινοι σταθμοί βάσης</b>	
4.1 Εισαγωγή.....	40
4.2 Αρχιτεκτονική πράσινου σταθμού βάσης.....	41
4.3 Πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας.....	44
<b>Κεφάλαιο 5 - Ολιστική ανάλυση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα</b>	
5.1 Εισαγωγή.....	47
5.2 Βασικές Αρχές αντισταθμισμάτων (trade offs).....	47
5.3 Cross Layer(δια επιπεδική) σχεδίαση για ενεργειακή αποδοτικότητα...58	
5.4 Cognitive Radio για ενεργειακή βελτιστοποίηση .....	61
5.5 Συντονισμένη διαχείριση για βελτίωση αποδοτικότητας .....	62
5.6 Δυναμική της κοινής υποδομής στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.....	65
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	66
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	67

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν μία αυξανόμενη οικονομική και οικολογική επίδραση παγκοσμίως και προσφάτως, πρωτοβουλίες για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και κατά συνέπεια ελάττωσης του περιβαλλοντολογικού αποτυπώματος του κλάδου λαμβάνουν μεγάλη σημασία. Οι προσπάθειες αυτές αναφέρονται σε όλα τα στάδια που διέπουν την ασύρματη επικοινωνία, από εξελιγμένους αλγόριθμους μέχρι εναλλακτικές μορφές ενέργειας στους σταθμούς βάσης. Στην παρούσα εργασία στόχος είναι να παρουσιαστούν αυτές οι τεχνικές βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης καθώς και το οικονομικό και οικολογικό αποτέλεσμα τους.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε μια βιβλιογραφική έρευνα των πρόσφατων εξελίξεων στο χώρο των πράσινων επικοινωνιών. Στην εισαγωγή γίνεται μια αναφορά στην ραγδαία ανάπτυξη του κλάδου που προκαλεί αντίστοιχα αύξηση κατανάλωσης της ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παρουσιάζεται η εξέλιξη τα επόμενα χρόνια και γίνεται έτσι εμφανής η διαρκώς αυξανόμενη σημασία της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας για περιβαλλοντολογικούς αλλά και για οικονομικούς λόγους. Γίνεται έτσι εμφανής η αναγκαιότητα λήψης πρωτοβουλιών ως προς αυτό το σκοπό, και έτσι αναφέρονται συμπράξεις και συνεργασίες σε παγκόσμιο επίπεδο με σκοπό την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στις ασύρματες επικοινωνίες.

Ορίζουμε τι θεωρούμε ότι είναι οι λεγόμενες πράσινες επικοινωνίες και παρουσιάζονται τρόποι μέτρησης (metrics- μετρικές) της ενεργειακής αποδοτικότητας. Οι μετρικές αυτές έχουν σκοπό να αναδείξουν με ποιο τρόπο ένα δίκτυο λειτουργεί με γνώμονα την ποιότητα επικοινωνίας σε συνάρτηση με την προσπάθεια για ελάττωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Στο κύριο τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται οι εξελίξεις σε τμήματα του κύκλου επικοινωνιών όπως στους ενισχυτές, στο δίκτυο πυρήνα, στην τοπολογία δικτύου όπου και παραθέτονται μελέτες ειδικά για τα femtocells , εργαλεία διαχείρισης ενέργειας όπως και η εισαγωγή των εναλλακτικών μορφών ενέργειας .

Συνοψίζεται στη συνέχεια η επίδραση της εισαγωγής των προτάσεων αυτών στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στη συνέχεια εστιάζουμε στον σταθμό βάσης λόγω της προεξέχουσας σημασίας του στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Έχοντας εξετάσει τα μεμονωμένα τμήματα του κύκλου επικοινωνιών γίνεται φανερό η ανάγκη για μια ολιστική θεώρηση έτσι ώστε τα αποτελέσματα της προσπάθειας για ενεργειακή αποδοτικότητα να είναι πιο γενικά.

Παρουσιάζονται λοιπόν προτάσεις όπως Cross Layer (δια επιπεδική) σχεδίαση για ενεργειακή αποδοτικότητα, Cognitive Radio(γνωστικό ραδιοσύστημα) για ενεργειακή βελτιστοποίηση , η συντονισμένη διαχείριση για βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας , τα βασικά αντισταθμίματα (trade offs) καθώς κι η δυναμική της κοινής υποδομής στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται παρουσιάζοντας τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της ενεργειακής βελτιστοποίησης στα ασύρματα δίκτυα.

## **ABSTRACT**

It is well known that wireless communications will have an increasing economic and ecological impact worldwide and recently, initiatives to reduce energy consumption and therefore reducing the environmental footprint of the industry are important. These efforts relate to all stages governing wireless communication, from sophisticated algorithms to alternative energy base stations. In this paper the aim is to present these techniques that improve energy efficiency as well as their economical and ecological outcome.

This work was based on a literature survey of recent developments in the field of green communications. The introduction is a reference to the rapid development of this sector and the corresponding increase in energy consumption as well as greenhouse gas emissions. What is projected is the evolution in the coming years and the growing importance of reducing consumption for environmental and economic reasons. Therefore the necessity of taking initiatives for this purpose and promoting partnerships and collaborations on a global level to reduce energy consumption in wireless communications is more than obvious.

We define what we consider to be the so-called green communications and various ways to measure (metrics) energy efficiency are presented. These metrics aim at underlining how a network may provide quality communication while being energy efficient.

In the main part the work focuses on developments in parts of the communication cycle such as the amplifiers , the network core, the

network topology and listed studies specifically for femtocells, energy management tools and the introduction of alternative energies.

Then we summarize the effect of the introduction of these proposals on energy efficiency and then focus on the base because of its predominant importance of reducing energy consumption.

Having examined the individual segments of the communications becomes evident the need for a holistic approach so that the results of the effort for energy efficiency to be more general. So suggestions are presented such as Cross Layer design for energy efficiency, Cognitive Radio for energy optimization, coordinated management to improving energy efficiency, the basic tradeoffs and also the dynamics of common infrastructure in telecommunication systems.

This paper is concluded by presenting the conclusions and future developments in energy optimization in wireless networks.

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

BS	Base Station
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide
ICT	Information & Communication Technology
RF	Radio Frequency
PAR	Peak to Average Power Ratio
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
LTE	Long Term Evolution
ET	Envelope Tracking
PA	Power Amplifier
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OPEX	Operational Expenditure
CAPEX	Capital Expenditure
QoS	Quality of Service
2G	Second Generation
3G	Third Generation
EARTH	Energy Aware Radio and Network Technologies
kwh	kilowatt hour
3GPP	Third Generation Partnership Project
AWGN	Additive White Gaussian Noise
SNR	Signal to Noise Ratio
ISD	Inter Site Distance
HSPA	High Speed Packet Access
HAT	High-Accuracy Tracking
CR	Cognitive Radio
CA	Carrier Aggregation

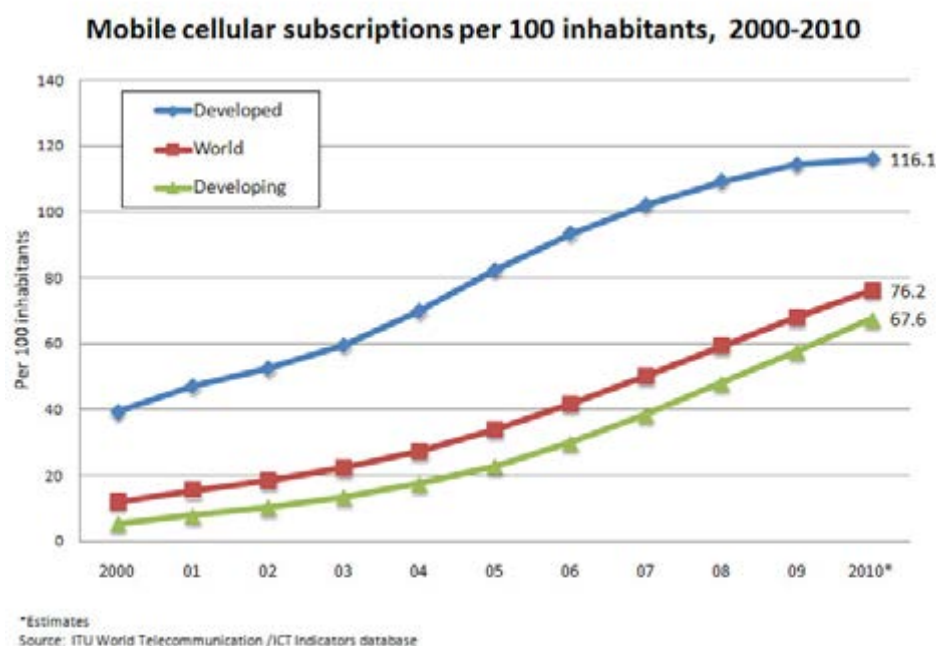
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Ασύρματα δίκτυα-Εξέλιξη και κατανάλωση ενέργειας

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σπάνια τεχνολογικές εξελίξεις έχουν αλλάξει τόσο γρήγορα και δραστικά την καθημερινή ζωή μας όπως η μαζική χρήση των προσωπικών ασύρματων επικοινωνιών. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι ασύρματες επικοινωνίες εξελίχθηκαν από μία μικρή και για λίγους αγορά σε παγκόσμια διαθέσιμο και αναπόσπαστο στοιχείο της καθημερινής ζωής: από το πρώτο GSM τηλέφωνο το 1991 στη Φινλανδία μέχρι τους δύο δισεκατομμύρια GSM χρήστες μετά από 15 χρόνια. Ο συνολικός αριθμός των ασύρματων συνδέσεων ξεπερνά σήμερα τα 5 δισεκατομμύρια, αριθμός πάνω από το 70% του παγκόσμιου πληθυσμού.

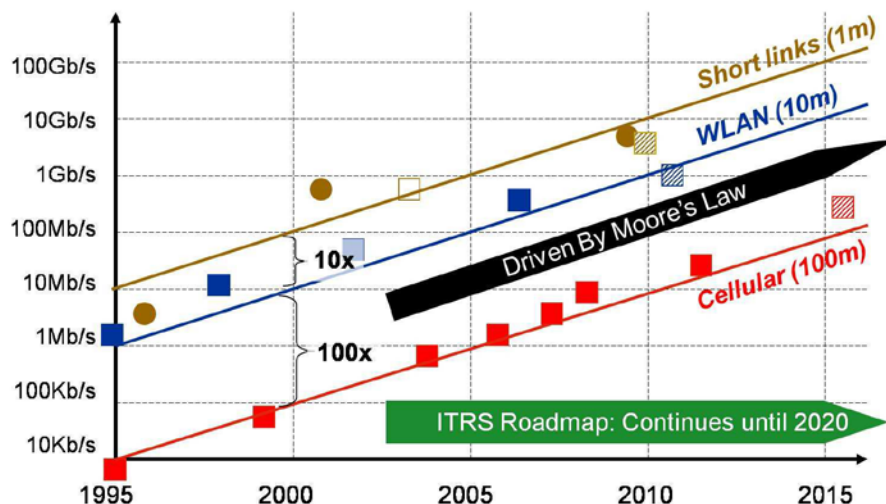
Η χρήση της τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών και πληροφορικής έχει αυξηθεί με ραγδαίο ρυθμό παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια. Κάθε χρόνο, 120000 χιλιάδες νέοι σταθμοί βάσης δημιουργούνται για να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες 400 εκατ. νέων συνδρομητών. Η εικόνα 1 δείχνει την αυξητική τάση για ασύρματες συνδρομές από το 2000 στο 2010. Οι αναπτυσσόμενες χώρες αυξητικά μεταβαίνουν στην ασύρματη επικοινωνία από την ενσύρματη και οι ασύρματες συνδρομές αυξάνονται κατά ένα παράγοντα του δέκα. Από το 2000 έως το 2010 στις αναπτυγμένες χώρες οι ασύρματες συνδρομές αυξήθηκαν κατά 200% ενώ στις αναπτυσσόμενες κατά 1300%, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Συνδρομές ασύρματης επικοινωνίας [1]



Η κινητήριος δύναμη για αυτή την ραγδαία ανάπτυξη είναι η σημασία της συνδεσιμότητας για κοινωνικό-οικονομικούς λόγους. Δεδομένου ότι σύμφωνα με το νόμο του Moore η υπολογιστική ισχύς και η ικανότητα αποθήκευσης των κινητών συσκευών διπλασιάζεται περίπου κάθε 18 μήνες, αυτό έχει ως αποτέλεσμα αντίστοιχη αύξηση στην πληροφορία που διακινείται καθώς και στους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων. Έτσι λοιπόν αυτοί οι ρυθμοί όπως φαίνεται στην εικόνα 2 ακολουθούν ένα ρυθμό αύξησης δεκαπλασιασμού κάθε πέντε έτη.



Εικόνα 2: Η Αύξηση των ασύρματων ρυθμών δεδομένων ακολουθεί προσεγγιστικά το νόμο Moore αυξανόμενη κατά ένα παράγοντα του 10 κάθε πέντε χρόνια [2]

Μέχρι πρόσφατα τα ασύρματα δίκτυα σχεδιάζονταν και εξελίσσονταν με γνώμονα την συνεχή πρόσβαση, την ποιότητα υπηρεσίας και τη διακίνηση μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας. Στις μέρες μας, καθώς η μείωση κατανάλωσης ενέργειας και η προστασία του περιβάλλοντος γίνονται γενικές απαιτήσεις οι έρευνες έχουν προσανατολιστεί σε μεγάλο ποσοστό στην σχεδίαση 'πράσινων' ασύρματων δικτύων. Η ανάγκη για 'πράσινα' δίκτυα επιβάλλεται και για την μείωση του κόστους και για περιβαλλοντολογικούς λόγους. Ο κλάδος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών (ICT) αντιστοιχεί σήμερα στο 2% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG greenhouse gas), ποσοστό που αντιστοιχεί σε 0.9 γιγατόνους ανά χρόνο. Η ανάγκη για αποθήκευση δεδομένων, επικοινωνία και διασκέδαση αυξάνεται ραγδαία και ταυτόχρονα αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας αλλά και οι εκπομπές που έχουν σχέση με αυτήν. Το 2020, οι συνολικές εκπομπές του ICT τομέα αναμένεται να φτάσουν τους 1,43 γιγατόνους, περίπου το 3% των παγκόσμιων εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Παράλληλα, το 2020 περίπου το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού αναμένεται να διαθέτει

προσωπικό υπολογιστή, το 80% να έχει κινητό τηλέφωνο και το ένα στα 20 νοικοκυριά να διαθέτει ευρυζωνική σύνδεση. Η ανάγκη για ενέργεια στον κλάδο αναμένεται να αυξηθεί κατά 70%.

Για τα 'πράσινα' δίκτυα, εκτός του ότι στοχεύουν να ελαχιστοποιήσουν το περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα, υπάρχει και ισχυρό οικονομικό κίνητρο. Η ασύρματη διακίνηση πληροφορίας πρόκειται να αυξηθεί κατακόρυφα τα επόμενα χρόνια με ασύρματη κυκλοφορία video και live streaming. Όταν λαμβάνεται υπόψιν η εκτίναξη της ενεργειακής κατανάλωσης των δικτύων λόγω πολυπλοκότητας των εξελιγμένων τεχνικών εκπομπής και του αυξανόμενου αριθμού των σταθμών βάσης που απαιτείται από τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης από τη μια μεριά, αλλά και η σταθερή αύξηση των τιμών ενέργειας από την άλλη, γίνεται αντιληπτή η επίδραση της ενεργειακής κατανάλωσης στο κόστος λειτουργίας (operational expenditure ,OPEX) για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας.

Με σκοπό τη μείωση του ενεργειακού κόστους, κατασκευαστές και operators στοχεύουν στη βελτίωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου, στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στη βελτίωση της απόδοσης του hardware, και στην ανάπτυξη έξυπνου λογισμικού διαχείρισης ενέργειας που ενεργοποιεί τις υποδομές του δικτύου μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο. Υπάρχουν αρκετά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν για να υπάρξει σημαντική βελτίωση στο χώρο των ενεργειακά αποδοτικών επικοινωνιών. Μέχρι τώρα, οι περισσότερες πρόοδοι εστιάζουν σε ένα περιορισμένο τομέα του κύκλου επικοινωνιών όπως οι ενισχυτές ή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Είναι σημαντικό οι πρωτοβουλίες για πραγματικά ενεργειακά αποδοτικές επικοινωνίες να εστιάσουν σε ένα ολοκληρωμένο συνολικό σύστημα παρά αποκλειστικά σε μεμονωμένα στοιχεία του.

## 1.2 Πρωτοβουλίες για 'πράσινες' επικοινωνίες

Έχουν ξεκινήσει σε ολόκληρο τον κόσμο αρκετές πρωτοβουλίες με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του τηλεπικοινωνιακού τομέα. Μερικές από αυτές είναι:

α) Η **'Green Touch'** είναι μία κοινοπραξία με συντονιστή τα Bell Labs που στόχος της είναι να δημιουργήσει τεχνολογίες που θα καταστήσουν τα δίκτυα επικοινωνιών 50% λιγότερο ενεργοβόρα. Μέλη της κοινοπραξίας είναι : [AT&T, CEA-LETI, China Mobile, Freescale Semiconductor, Imec, The French National Institute for Research in Computer Science and Control (INRIA),The Research Laboratory for Electronics (RLE) at

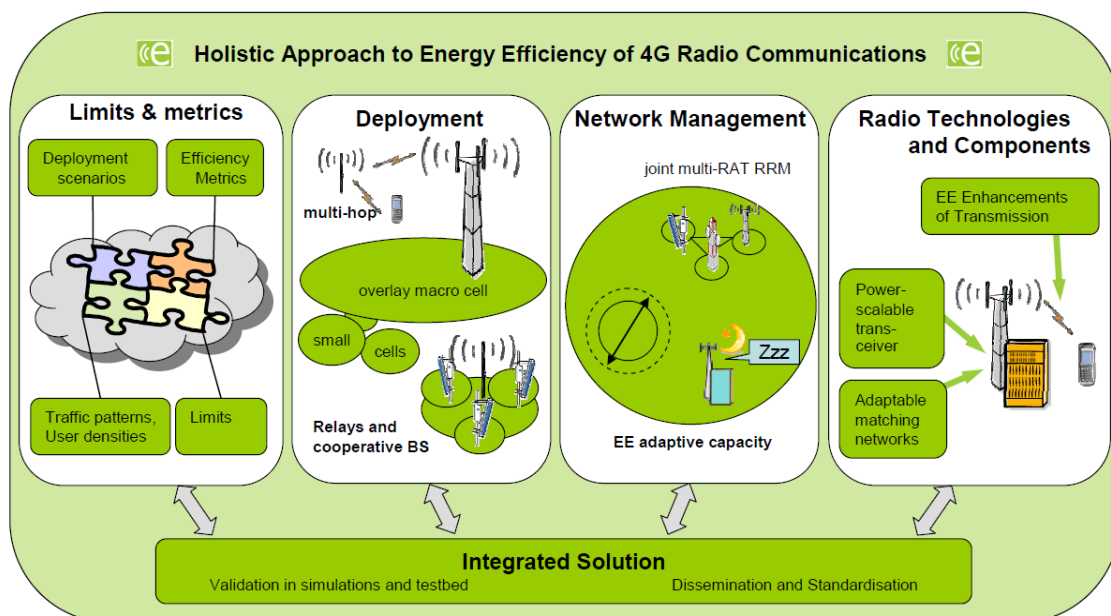
Massachusetts Institute of Technology (MIT), Portugal Telecom ("PT"), Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT), Swisscom, The Wireless Systems Lab (WSL), Stanford University, Telefonica, The Institute for a Broadband-Enabled Society (IBES), University of Melbourne, Alcatel-Lucent Bell Labs ].

β) **GeSI (Global e-Sustainability Initiative)** αριθμεί 30 μέλη, συγκεντρώνει τις κορυφαίες ICT εταιρείες- συμπεριλαμβάνοντας μαζί παρόχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, κατασκευαστές και βιομηχανικές ενώσεις-και μη κυβερνητικές οργανώσεις με σκοπό την αειφορία μέσω της πρωτοποριακής τεχνολογίας .Δημοσίευσε την Smart2020 μελέτη τον Ιούνιο 2008 με βασικό άξονα ότι ο ICT τομέας μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία οικονομίας με περιβαλλοντολογική ευαισθησία.

γ) **Green Grid** είναι μια μη κερδοσκοπική , ανοιχτή κοινοπραξία βιομηχανιών των προμηθευτών τεχνολογίας, αρχιτεκτόνων εγκαταστάσεων, τελικών χρηστών, φορέων χάραξης πολιτικής, και εταιρειών κοινής ωφέλειας με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας πόρων των κέντρων δεδομένων και του περιβαλλοντολογικού αποτυπώματος της πληροφορικής των επιχειρήσεων.

Με 175 μέλη εταιρείες ανά τον κόσμο η κοινοπραξία έχει βάση το Oregon USA και προσπαθεί να ενοποιήσει τις παγκόσμιες προσπάθειες, να αναπτύξει μια κοινή μέθοδο μετρήσεων και να αναπτύξει τεχνολογικά και επιστημονικά εργαλεία για την επίτευξη των στόχων της.

δ) **EARTH (Energy Aware Radio and neTwork technologies )** με 15 εταίρους από 10 ευρωπαϊκές χώρες , με φιλόδοξους στόχους να αναπτύξει μια νέα γενιά από ενεργειακά εξελιγμένο εξοπλισμό, συμπεριλαμβάνοντας εξαρτήματα, ανάπτυξη στρατηγικών και λύσεις διαχείρισης δικτύου. Ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2010 και θα διαρκέσει μέχρι τον Ιούνιο του 2012.



Εικόνα 3: EARTH project για πράσινες επικοινωνίες [3]

Όνομα Project	Διάρκεια	Πλατφόρμα	Εταίροι			‘Πράσινος’ Στόχος έως το 2020
OPERA-NET	2008.10 - 2010.10	CELTIC	Alcatel-Lucent (Bell Labs) France Telecom	Nokia Siemens Thomson Broadcast	Cardiff University	Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κατά 20% έως 2020
Green Radio	2009.1 -2012.1	MVCE CORE 5	Vodafone/ British Telecom/ FT(Orange)	NSN/Huawei/ ALU/Thales	NEC/Fujitsu Toshiba	Εξασφάλιση 100x μείωση στις ενεργειακές απαιτήσεις για μεταφορά υψηλών ρυθμών υπηρεσίες

EARTH	2010.1 -2012.6	FP7 Call 4 IP	Telecom Italia/NTT- Docomo	Ericsson/ALU	Surrey/Oulu BME/IST	Μείωση της χρήσης ενέργειας των ασύρματων δικτύων κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον 2
Green Touch	2010.1 -2015.1		Telefonica/ China Mobile,Swisscom	ALU Bell Lab/Huawei	WSL(Stanford) RLE(MIT)	Στόχος να καταστήσουν τα ασύρματα δίκτυα 50% λιγότερα ενεργόβορα

Πίνακας 1: Παγκόσμιες συμπράξεις για πιο 'πράσινες' επικοινωνίες

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται κάποιες από τις συμπράξεις και πρωτοβουλίες για ενεργειακά αποδοτικότερες ασύρματες επικοινωνίες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Ορισμός πράσινων τηλεπικοινωνιών - Μετρικές

#### 2.1 Ορισμός πράσινων τηλεπικοινωνιών

Ορισμός των πράσινων επικοινωνιών είναι η προσπάθεια να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση (και άρα μείωση εκπομπών  $CO_2$ ) ενώ παράλληλα διατηρείται η ποιότητα υπηρεσίας (Quality of service, QoS) σε όρους αναγκών κάλυψης, χωρητικότητας και αναγκών χρήστη.

Στη σχεδίαση συστημάτων και ταυτόχρονα στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στοιχείων η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου δεν είναι από μόνη της επαρκής για να θεωρηθεί το σύστημα 'πράσινο'. Η ποιότητα υπηρεσίας πρέπει να ληφθεί υπόψιν μαζί με την ενεργειακή αποδοτικότητα οπότε γίνεται αντιληπτό ότι αυτοί οι στόχοι είναι αναγκαίο να μην αλληλοαναιρούνται.

Αρχικά παρουσιάζονται δημοφιλείς μετρικές για κέντρα δεδομένων για να προκύψουν μετρικές ειδικά για μετρήσεις ενεργειακής αποδοτικότητας σε συστήματα τηλεπικοινωνιών.

#### 2.2 Μετρώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα - Μετρικές

Η πρώτη ερώτηση που έρχεται λογικά όταν αναφερόμαστε σε πράσινα δίκτυα είναι τι είναι πραγματικά 'πράσινο'; Πως μετράμε και ορίζουμε το βαθμό του 'πράσινου' στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα; Οι εκπομπές  $CO_2$  θα μπορούσαν να θεωρηθούν μια μέτρηση αυτού του τύπου, αλλά επίσης άλλη μέτρηση για 'πράσινες' ασύρματες τεχνολογίες θα μπορούσε να αναφέρεται σε οικονομικά οφέλη (χαμηλότερα ενεργειακά κόστη) αλλά και καλύτερες πρακτικές εφαρμογές (μεγαλύτερη διάρκεια μπαταρίας στις συσκευές κινητής). Έτσι η έννοια της 'πράσινης' τεχνολογίας στα ασύρματα συστήματα μπορεί να είναι χειροπιαστή με μια εμπειριστατωμένη εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας και της απόδοσης σε ένα πραγματικό σύστημα. Εδώ λοιπόν οι μετρικές της ενεργειακής αποδοτικότητας παίζουν ένα σημαντικό ρόλο. Αυτές οι μετρικές παρέχουν πληροφορία με σκοπό την απευθείας σύγκριση και εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης των διαφορετικών στοιχείων αλλά και του συνολικού δικτύου. Επιπροσθέτως, βοηθούν στο να τεθούν μακροπρόθεσμοι στόχοι έρευνας με σκοπό τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Καθώς οι αυξανόμενες ερευνητικές δραστηριότητες έχουν

οδηγήσει σε καινούργιες διαφορετικές μετρικές ενεργειακής αποδοτικότητας , οργανισμοί προτύπων όπως ο European Technical Standards Institute (ETSI) και ο Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS) προωθούν προσπάθειες ώστε να οριστούν μετρικές ενεργειακής αποδοτικότητας για τα ασύρματα δίκτυα.

Γενικά, οι μετρικές ενεργειακής απόδοσης για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: επίπεδο εγκατάστασης, επίπεδο εξοπλισμού και επίπεδο δικτύου. Οι μετρικές επιπέδου εγκατάστασης σχετίζονται με υψηλού επιπέδου συστήματα όπως κέντρα δεδομένων, ISP δίκτυα κ.α., οι μετρικές επιπέδου εξοπλισμού ορίζονται για να εκτιμήσουν την απόδοση μεμονωμένου εξοπλισμού, και στο επίπεδο δικτύου οι μετρικές εκτιμούν την απόδοση εξοπλισμού λαμβάνοντας υπόψιν στοιχεία σχετικά με την κάλυψη και την χωρητικότητα του δικτύου.

Η Green Grid (TGG) ένωση των IT επαγγελματιών αρχικά πρότεινε μετρικές επιπέδου εξοπλισμού όπως PUE (Power Usage Efficiency) και DCE(Datacenter Center Efficiency) για να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα ενέργειας κέντρων δεδομένων. Η μετρική Power Usage Efficiency (PUE) αποτυπώνει τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση ενός κέντρου δεδομένων διαιρεμένη με την ενέργεια που καταναλώνεται από servers, συστήματα αποθήκευσης και εξοπλισμό δικτύου και ορίζεται ως

$$PUE = (\text{Total facility Power}) / (\text{IT equipment Power}) \quad (1)$$

Είναι μια καλή μετρική για να εκτιμηθεί η απόδοση των κέντρων δεδομένων σε ένα συνολικό επίπεδο, όμως το κύριο μειονέκτημα είναι ότι δεν δείχνει την ενεργειακή αποδοτικότητα του υπολογιστικού εξοπλισμού, που στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα παίζει μεγάλο ρόλο στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Συνεπώς, για να καθορισθεί η απόδοση σε επίπεδο εξοπλισμού, ο λόγος της ενεργειακής κατανάλωσης προς κάποια μέτρηση επίδοσης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος θα ήταν πιο κατάλληλη μετρική.

Ωστόσο, η μέτρηση της επίδοσης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι πιο απαιτητική από ότι φαίνεται αρχικά, γιατί η απόδοση μπορεί να έχει διαφορετικές μορφές (αποδοτικότητα φάσματος, αριθμός κλήσεων που υποστηρίζονται ανά block χρόνου) και έτσι κάθε μέτρηση επίδοσης επηρεάζει την μετρική απόδοσης πολύ διαφορετικά. Κάποιοι από τους προτεινόμενους

δείκτες εμπερικλείουν ενέργεια ανά χρήστη (λόγο της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης με τον αριθμό χρηστών) με μονάδα Watt/χρήστη, βαθμολόγηση ενεργειακής κατανάλωσης (ECR Energy Consumption Rating) που είναι ο λόγος της κανονικοποιημένης ενεργειακής κατανάλωσης με τον αμφίδρομο μέγιστο ρυθμό δεδομένων με μονάδα Watt/Gbps. Καθώς η ενέργεια ανά χρήστη μπορεί να είναι μία χρήσιμη μετρική για ένα πάροχο δικτύου για να εκτιμήσει οικονομικά αντισταθμίσιμα και σχεδιασμό δικτύου, μετρικές όπως ο ECR δίνουν στους κατασκευαστές μια καλύτερη όψη σχετικά με την επίδοση των hardware στοιχείων. Ωστόσο, ακόμα και τα πιο 'φορτωμένα' δίκτυα δεν λειτουργούν πάντα σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, συνεπώς θα ήταν χρήσιμο να συμπληρωθούν μετρικές όπως η ECR και να ενσωματώσει τις δυναμικές συνθήκες δικτύου όπως την ενεργειακή κατανάλωση κάτω από μέγιστο φόρτο, μισό φόρτο και χαμηλό φόρτο. Σχετικά με αυτό, άλλες μετρικές όπως ο ECRW (ECR weighted), ECR VL (variable load cycle), ECR EX (extended idle load cycle), Telecommunications Energy Efficiency Ratio (TEER) από την ATIS, Telecommunications Equipment Energy Efficiency Rating (TEEER) από την Verizons Networks and Building Systems εξετάζουν τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση σαν σταθμισμένο άθροισμα της ενεργειακής κατανάλωσης του εξοπλισμού σε διαφορετικές συνθήκες φόρτου. Σαν παράδειγμα του TEEER, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση  $P_{total}$  υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο

$$P_{total} = 0.35 P_{max} + 0.4 P_{50} + 0.25 P_{sleep} \quad (2)$$

Όπου  $P_{total}$ ,  $P_{50}$ ,  $P_{sleep}$  είναι αντίστοιχα η ενεργειακή κατανάλωση σε πλήρη φόρτο, μισό φόρτο και σε κατάσταση ύπνου (sleep mode), ενώ τα βάρη καθορίζονται στατιστικά. Ωστόσο, αυτοί οι μετρικές όπως οι ECR, TEER, TEEER δεν μπορούν να περικλείουν όλες τις καταστάσεις του συστήματος και έρευνες προσπαθούν να εισάγουν διαφορετικούς τύπους μετρικών. Οι Parker et al. [26] πρόσφατα πρότειναν μία απόλυτη μετρική ενεργειακής αποδοτικότητας (σε dBε, λογαριθμική μονάδα που επιτρέπει τη σύγκριση ανάμεσα σε διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές) που δίνεται από τον τύπο

$$(dB\epsilon) = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{Power/Bit Rate}}{kT \ln 2} \right) \quad (3)$$



όπου  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann και  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του μέσου. Οι συγγραφείς προτείνουν ότι η εισαγωγή της θερμοκρασίας είναι λογική καθώς η κλασική θερμοδυναμική βασίζεται στην απόλυτη θερμοκρασία του αναλυόμενου συστήματος. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά παραδείγματα, οι συγγραφείς υποστηρίζουν πως αυτή η μετρική είναι πολύ ευέλικτη και μπορεί να εφαρμοστεί μεμονωμένα σε οποιοδήποτε ICT σύστημα, υποσύστημα και στοιχείο.

Καθώς οι μετρικές ενεργειακής αποδοτικότητας σε επίπεδο στοιχείων και εξοπλισμού είναι σχετικά απλό να καθοριστούν, είναι πιο απαιτητικό να καθοριστούν μετρικές σε επίπεδο συστήματος ή δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή του δικτύου, μια φυσική επιλογή για μετρική φαίνεται να είναι  $[Watt/Gbps/km^2]$ , μα μια προσεκτική ανάλυση μπορεί να εξηγήσει ότι εργάζεται αντίθετα στον 'πράσινο' σκοπό [20]. Χρησιμοποιώντας ένα απλό παράδειγμα από ένα τυπικό σενάριο δικτύου, αποδεικνύοντας στο [20] ότι λόγω των απωλειών διαδρομής, μια τέτοια μετρική μπορεί να είναι έγκυρη όταν εφαρμοστεί σε δίκτυα με παρόμοιο αριθμό sites για μια δοσμένη περιοχή. Στο [11], ο ETSI προτείνει δύο μετρικές επιπέδου δικτύου για GSM συστήματα που βασίζονται σε καταστάσεις φόρτου κίνησης. Σε αγροτικές περιοχές, που γενικά έχουν χαμηλή κίνηση, ο στόχος είναι να ελαττωθεί η ενεργειακή κατανάλωση στην καλυπτόμενη περιοχή, έτσι η μετρική δίνεται από

$$PI_{rural} = \text{Συνολική καλυπτόμενη περιοχή} / \text{Ενεργειακή κατανάλωση στον τόπο} \quad (4)$$

Όπου  $PI_{rural}$   $[Km^2/Watt]$  δείχνει το δείκτη επίδοσης δικτύου σε αγροτικές περιοχές. Από την άλλη μεριά οι αστικές περιοχές έχουν μεγαλύτερο φόρτο κίνησης, συνεπώς η χωρητικότητα είναι το κριτήριο παρά η περιοχή κάλυψης. Μία συνηθισμένη μετρική σε τέτοιες συνθήκες υψηλού φόρτου κίνησης δίνεται από

$$PI_{urban} = N_{busy\ hour} / \text{Ενεργειακή κατανάλωση στο site} \quad (5)$$

όπου  $N_{\text{busy hour}}$  είναι ο μέσος αριθμός των χρηστών βασισμένος σε μια ώρα υψηλής κίνησης από χρήστες και μέση BS υψηλή φόρτου ώρα κίνησης, και  $PI_{\text{urban}}$  [χρήστες/Watt] είναι ο δείκτης επίδοσης δικτύου για αστικές περιοχές.

Για να συνοψιστεί η παραπάνω ανάλυση , μια λίστα από μετρικές ενέργειας δίνεται στον πίνακα 2. Λόγω της εγγενούς διαφοράς των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και της συνάφειας των μετρικών επίδοσης, είναι αμφίβολο αν μια μετρική αρκεί. Ωστόσο, στο μέλλον, οι 'πράσινες' μετρικές θα συνυπολογίζουν και το κόστος ανάπτυξης όπως κατασκευή site και υποδομών, καθώς και QoS απαιτήσεις όπως καθυστέρηση μετάδοσης μαζί με την απόδοση φάσματος με σκοπό τη γενική εικόνα ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Καθώς έχει επιτευχθεί ομοφωνία με μια μικρή ομάδα προτύπων μετρικών ενέργειας, στο μέλλον θα επιταχυνθούν οι έρευνες στον τομέα των 'πράσινων' επικοινωνιών αλλά και θα προετοιμαστεί ο δρόμος προς την προτυποποίηση.

Metric	Τύπος	Μονάδες	Περιγραφή
PUE (Power Usage Efficiency)	Επιπέδου εγκατάστασης	Λόγος ( $\geq 1$ )	Λόγος της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης εγκατάστασης προς την αντίστοιχη κατανάλωση εξοπλισμού
DCE(Data Center Efficiency)	Επιπέδου εγκατάστασης	Ποσοστό	Αντίστοιχα με τον PUE
Telecommunications Energy Efficiency Ratio(TEER)	Επιπέδου εξοπλισμού	Gbps/Watt	Λόγος του ωφέλιμου έργου προς την ενεργειακή κατανάλωση
Telecommunications Equipment Energy Efficiency Rating (TEEER)	Επιπέδου εξοπλισμού	- $\log(\text{Gbps/Watt})$	- $\log(\frac{P_{total}}{\text{Throughput}})$ Όπου η $P_{total}$ δίνεται από την εξίσωση (2)
ECR Energy Consumption Rating	Επιπέδου εξοπλισμού	Watt/Gbps	Λόγος της ενεργειακής κατανάλωσης προς την χωρητικότητα συστήματος
ECR - weighted (ECRW)	Επιπέδου εξοπλισμού	Watt/Gbps	Ομοίως με ECR μόνο που η ενεργειακή κατανάλωση προσδιορίζεται ως $0.35E_f + 0.4E_h + 0.25E_i$ , όπου κάθε όρος αναφέρεται στην κατανάλωση με πλήρες φόρτο, μισό φόρτο και χαμηλό φόρτο
ECR variable load (ECR-VL)	Επιπέδου εξοπλισμού	Watt/Gbps	Μέση εκτίμηση ενέργειας σε ένα δίκτυο αναφοράς που περιγράφεται από ένα πίνακα βαρών

ECR -extended-idle (ECR-EX)	Επιπέδου εξοπλισμού	Watt/Gbps	Μέση εκτίμηση ενέργειας σε ένα δίκτυο αναφοράς όπου επιπρόσθετες ικανότητες εξοικονόμησης ενέργειας είναι ενεργοποιημένες
Performance Indicator in Rural areas ( $PI_{rural}$ )	Επιπέδου δικτύου	$Km^2/Watt$	Λόγος της συνολικής επιφάνειας κάλυψης προς την ενεργειακή κατανάλωση στον τόπο όπως δίνεται από την εξίσωση (4)
Performance Indicator in Urban areas ( $PI_{urban}$ )	Επιπέδου δικτύου	Χρήστες /Watt	Λόγος του αριθμού των συνδρομητών προς την ενεργειακή κατανάλωση στον τόπο όπως δίνεται από την εξίσωση (5)

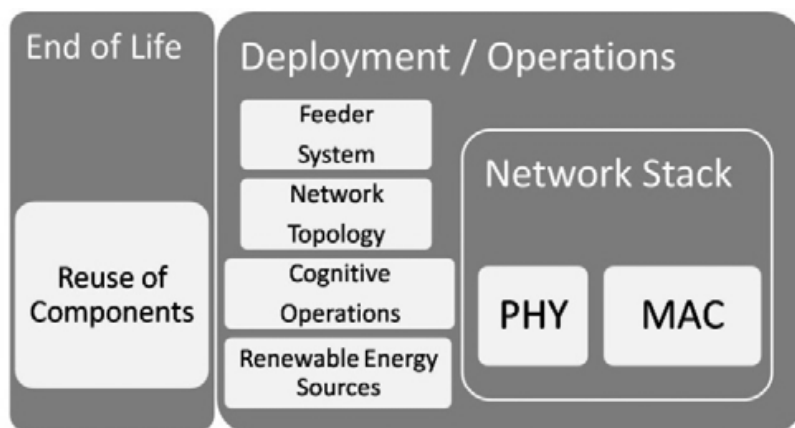
Πίνακας 2 : Μετρικές ενεργειακής αποδοτικότητας [4]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Πρόοδοι στην εξοικονόμηση ενέργειας στον κύκλο επικοινωνιών

#### 3.1 Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει συγκεκριμένες εξελίξεις που εστιάζουν σε μια περιοχή του κύκλου επικοινωνιών, ενώ στην εικόνα 4 παρουσιάζεται ο κύκλος επικοινωνιών με πρωτοβουλίες σε κάθε τομέα για εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων. Αρχικά παρουσιάζεται ο εξορθολογισμός του δικτύου πυρήνα, στην συνέχεια οι ενισχυτές που ευθύνονται για βασικό ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας, όπου αναλύονται τεχνολογίες στους ενισχυτές που υπόσχονται δραστική μείωση στην ενέργεια που απαιτείται. Η τοπολογία δικτύου είναι μια περιοχή που παρουσιάζεται διεξοδικά με δύο προσομοιώσεις πάνω στην επίδραση των femtocells στην εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος, μελετάται η εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών παρουσιάζει ενδιαφέρον για τους παρόχους μιας και υπόσχεται αυτονομία, μείωση του κόστους λειτουργίας και βελτίωση του περιβαλλοντολογικού αποτυπώματος.



Εικόνα 4 : Κύκλος ζωής επικοινωνιών με εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων ανά τομέα. Επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων, νέες τεχνολογίες στην ανάπτυξη και λειτουργία δικτύου, δια επιπεδική σχεδίαση στη στοίβα πρωτοκόλλων.[6]

### 3.2 Εξορθολογισμός δικτύου πυρήνα

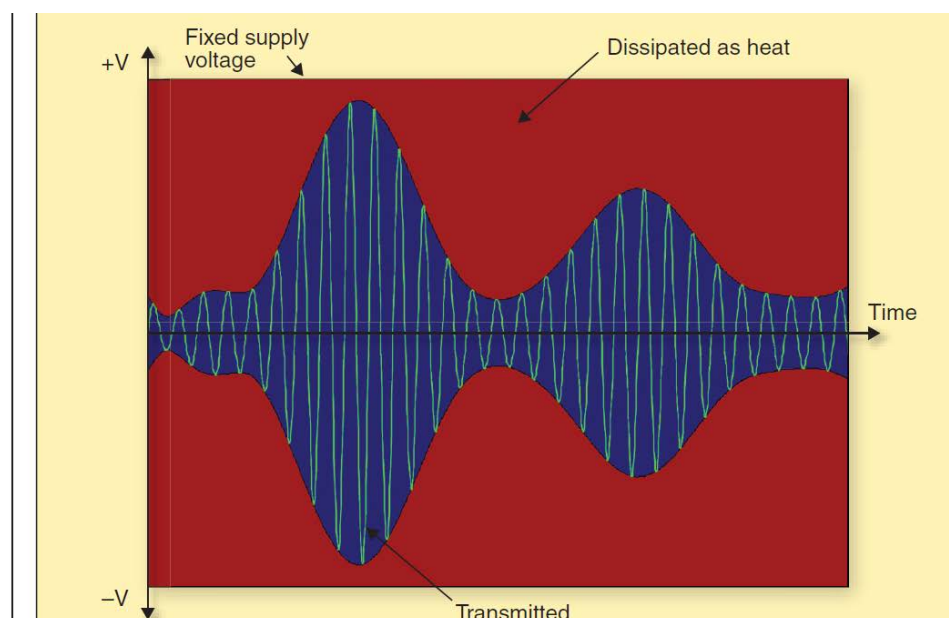
Ένα δίκτυο πυρήνα είναι το κεντρικό τμήμα του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που παρέχει διάφορες υπηρεσίες όπως δρομολόγηση κλήσεων και πιστοποίηση στους πελάτες που είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο πρόσβασης. Μία συνεισφορά στην πράσινη δικτύωση έρχεται από την απλοποίηση του δικτύου πυρήνα, και από την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας των soft switches (μεταγωγείς) μέσω των οποίων η ροή πληροφορίας δρομολογείται και ελέγχεται. Για παράδειγμα, από το 2007, η αυστραλιανή πάροχος Telstra και η Ericsson έχουν αναπτύξει ένα αποδοτικό, συμπαγή, υψηλής ικανότητας mobile soft switch server για απλοποίηση του κινητού δικτύου. Ο νέος soft switch υιοθετεί blade τεχνολογία (χρησιμοποιεί ηλεκτρονικούς πίνακες ή blades) που μπορούν να ελαττώσουν την ενεργειακή κατανάλωση έως και 60% ανά συνδρομητή. Αυτός ο καινοτόμος soft switch είναι συμβατός με GSM και UMTS δίκτυα, και μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 8 εκατομμύρια συνδρομητές με μόνο δύο ράφια εξοπλισμού. Η νέα τεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη λιγότερων soft switches σε ένα ποσοστό 75%, χρησιμοποιεί λιγότερο χώρο και ενέργεια για ψύξη και είναι εύκολο να αναβαθμιστεί. Η Telstra επιδιώκει να αντικαταστήσει ξεκινώντας από το 2010 τους 18 mobile soft switch servers με μια συστάδα soft switch server που χρησιμοποιεί blade τεχνολογία (αναπτυγμένο σε δύο sites για ζητήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας). Αυτός ο εξορθολογισμός μπορεί να ελαττώσει την χρήση χώρου για εξοπλισμό κατά 85%, την ενεργειακή κατανάλωση κατά 75% και άρα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Παρόμοια, η Huawei αναφέρει ότι ο υψηλής δυναμικότητας soft switch server χρησιμοποιεί μια πλατφόρμα, που καλείται ATAE, που εισάγει μια τεχνολογία με παρόμοια αποτελέσματα, και έχει αποφέρει μια μείωση κόστους της τάξεως του 80% για το δίκτυο της Sichuan στην Κίνα.

### 3.3 Ενισχυτές

Ένας σταθμός βάσης (BS) αποτελείται από τρία βασικά μέρη : την μονάδα βασικής ζώνης (baseband) , το ραδιοδίκτυο (radio network) και το δίκτυο σηματοδοσίας (feeder network) . Μεταξύ των τριών στοιχείων, στο ραδιοδίκτυο αντιστοιχεί το 80% των αναγκών ενέργειας του σταθμού βάσης, 50% της οποίας καταναλώνεται από τον ενισχυτή ενέργειας (power amplifier PA).

Για αυτό το λόγο, μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στην αύξηση αποδοτικότητας των ενισχυτών με διατήρηση της γραμμικότητας στο εύρος ζώνης λειτουργίας. Ο PA ενισχύει το εισερχόμενο σήμα σε ένα απαιτούμενο εξωτερικό επίπεδο ισχύος μετατρέποντας DC power σε RF AC power. Αυτή η

μετατροπή έχει απώλειες. Μη σταθερού μεγέθους διαμορφώσεις με καλύτερη αποδοτικότητα φάσματος έχουν αυστηρές απαιτήσεις γραμμικότητας, που ενδεχομένως απαιτήσουν μεγάλη υποχώρηση από το σημείο κορεσμού. Για παράδειγμα, OFDM σήμα έχει χρησιμοποιηθεί στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως WiFi, WiMAX και LTE, για επίτευξη μεγαλύτερου ρυθμού μετάδοσης. Σε ένα OFDM σήμα με  $N$  φέροντα, η εκπεμπόμενη ισχύς κατανέμεται ισομερώς στις φέρουσες, και η μέγιστη τιμή του peak-to-average power ratio (ο λόγος μεταξύ της μέγιστης και της μέσης ισχύος) είναι ίση με  $N$ . Άρα, το μέγιστο πλάτος τάσης στον ενισχυτή είναι  $N^{1/2}$  επί το μέσο πλάτος τάσης, και ο πολλαπλασιασμός του OFDM σήμα χρησιμοποιώντας μια σταθερή τάση εισόδου, θα μετατραπεί σε μια σταθερή απώλεια ισχύος ειδικά όταν το σήμα είναι πολύ χαμηλό (και η μη χρησιμοποιούμενη ισχύς αποβάλλεται ως θερμότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5).



Εικόνα 5 : OFDM(1024 subcarriers) σήμα που ενισχύεται με σταθερή τάση εισόδου - πολύ μεγάλο το ποσό θερμότητας.[7]

Για ενεργειακή αποδοτικότητα, η μέση ισχύς εισόδου στον ενισχυτή πρέπει να διατηρηθεί όσο το δυνατόν κοντά στην ισχύ που χρειάζεται για να μεταδοθεί το σήμα. Δυνατές λύσεις προϋποθέτουν ή παραμόρφωση σήματος ή δυναμική αλλαγή της τάσης εισόδου των ενισχυτών.

### 3.3.a DPD και Doherty Power Amplifiers

Ψηφιακή προ-παραμόρφωση (Digital predistortion ,DPD) και Doherty τεχνικές χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν το σήμα στα χαρακτηριστικά του ενισχυτή και να ενισχύσουν την εκπομπή ισχύος όταν η στάθμη του σήματος είναι πάνω από το καθορισμένο κατώφλι, αποφεύγοντας έτσι την υπερβολική ψαλίδιση σήματος (signal clipping).

Η DPD και τεχνικές γραμμικότητας χρησιμοποιούν pre-distortion (προ παραμόρφωση) του σήματος που θα εκπεφθεί και εφαρμόζουν μια επανόρθωση για μη γραμμικότητες στο τελικό RF εξωτερικό στάδιο του ενισχυτή. Στην επεξεργασία , βελτιώνει επίσης τις παρεμβολές γειτονικών καναλιών και μειώνει τον μέτρο διανύσματος σφάλματος ( βελτιώνει την ακρίβεια διαμόρφωσης) επιτρέποντας μια επανόρθωση για την παραμόρφωση που δημιουργείται από μη γραμμικότητες κοντά στη συμπίεση .Αυτή η τεχνολογία παρέχει το καλύτερο αποτέλεσμα όταν DPD και γραμμικότητα χρησιμοποιούνται σαν μέρος μιας ανατροφοδοτούμενης αρχιτεκτονικής συστήματος ενσωματώνοντας ενεργό δειγματοληψία του εκπεμπόμενου σήματος. Με αυτό τον τρόπο, στην πράξη, το σύστημα επανορθώνει αλλαγές στα χαρακτηριστικά ενισχυτή με χρονικά και θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά σήματος.

Ο Doherty ενισχυτής ισχύος έχει προταθεί από το 1936:χρησιμοποιεί δύο ενισχυτικές συσκευές παράλληλα συνδεδεμένες, με τις εξόδους τους συνδυασμένες(outputs combined). Ένας ενισχυτής φέροντος, λειτουργώντας σε class A/B, παρέχει όλη την εκπεμπόμενη ισχύ μέχρι που η αναγκαία ισχύς δημιουργεί μη γραμμική περιοχή. Ένας reaking ενισχυτής, λειτουργώντας στην class C, παρέχει επιπλέον ισχύ όταν το φέρον μπαίνει στη μη γραμμική περιοχή. Η τυπική αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται είναι 25 με 30%. Doherty ενισχυτές έχουν ένα περιορισμένο εύρος ζώνης λόγω του πολύπλοκου και κατά βάση ειδικού συνδυασμού που απαιτείται ανάμεσα στους δύο εσωτερικούς ενισχυτές.Παρόλα αυτά, το εύρος ζώνης που απαιτείται (λίγα MHz) είναι επαρκές για τα κυψελωτά συστήματα.

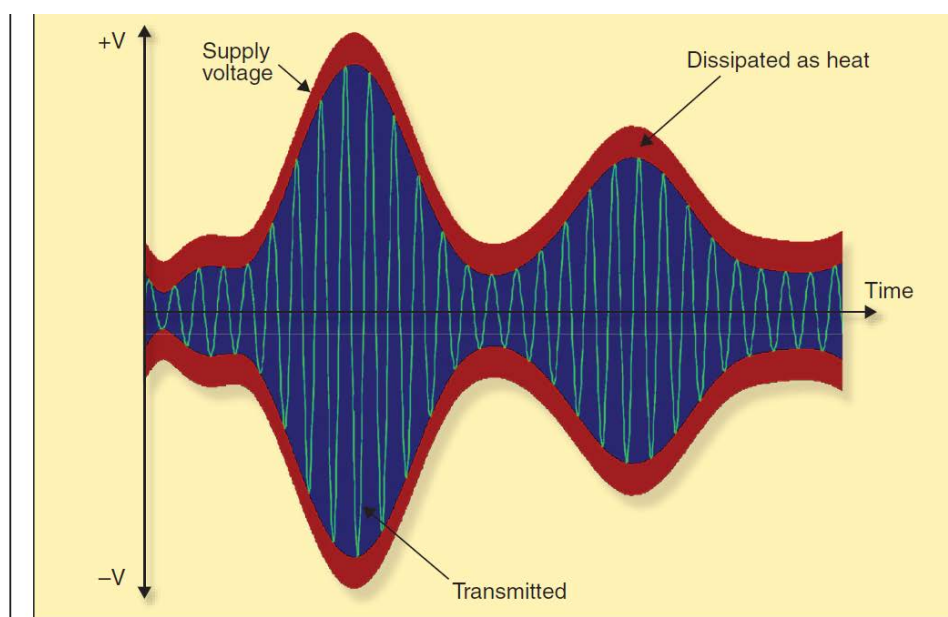
Huawei, ο κινέζικος πάροχος τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού,έχει ξεκινήσει ένα χαμηλής ισχύος σταθμό βάσης υιοθετώντας DPD και Doherty τεχνολογίες. Σε όρους ενέργειας αυτός ο σταθμός βάσης μπορεί να λειτουργήσει με 500 W, άρα βοηθά τους παρόχους να εξοικονομήσουν 5700 kWh /χρόνο, ή ισοδύναμα, ελάττωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που θα



εξέπεμπε η καύση 1,7 τόνους γαιάνθρακα το χρόνο. Ένας τέτοιος χαμηλών απαιτήσεων ισχύος σταθμός μπορεί εύκολα να βασιστεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η λύση της Huawei έχει εφαρμοστεί σε πάνω από 100000 GSM σταθμούς βάσης από το 2007, άρα έχει βοηθήσει να εξοικονομηθούν περίπου 570 GWh/χρόνο, αντιπροσωπεύοντας μια μείωση CO<sub>2</sub> εκπομπών ισοδύναμη με καύση 170000 τόνων γαιάνθρακα.

### 3.3.β Envelope Tracking Technology

Envelope tracking έχει προταθεί από ερευνητές των Bell Labs το 1937, αλλά έχει γίνει δυνατόν να εφαρμοστεί μόνο πρόσφατα αφού έγιναν διαθέσιμα πολύ γρήγορα, χαμηλού θορύβου power transistors. Η βασική ιδέα του envelope tracking είναι η ακόλουθη: αντί της αλλαγής του σήματος για να ταιριάζει στα χαρακτηριστικά του ενισχυτή, δυναμικά να προσαρμοστεί η τάση του ενισχυτή ώστε να ταιριάζει στο σήμα που θα ενισχυθεί. Στην εικόνα 5 φαίνεται ότι χωρίς envelope tracking η διαφορά ανάμεσα στη σταθερή τάση του ενισχυτή και της κυματομορφής του σήματος αποβάλλεται ως θερμότητα. Με envelope tracking, όπως φαίνεται στην εικόνα 6, η παρεχόμενη τάση ελέγχει τη μορφή του σήματος, ώστε η παρεχόμενη ενέργεια να ταιριάζει στην RF out put ενέργεια. Αυτό αποφέρει μία δραματική μείωση της αποβαλλόμενης θερμότητας. Για το envelope tracking χρειάζεται κόστος CPU που αντιστοιχεί σε μερικά Watts, που είναι αμελητέα σε σχέση με τα εκατοντάδες Watts που εξοικονομούνται.



Εικόνα 6: Η τάση εισόδου του ενισχυτή μπορεί να είναι μεταβλητή όταν χρησιμοποιείται envelope tracking, και έτσι μικρό ποσοστό ενέργειας χάνεται σε θερμότητα.[7]

Η πρώτη πρακτικά εμπορική εφαρμογή του envelope tracking είναι πολύ πρόσφατη (Nujira ,2008) και μπορεί να δημιουργήσει μια σημαντική συνεισφορά στην ενεργειακή απόδοση των ενισχυτών, αυξάνοντας από το 15% των Class A/B ενισχυτών σε 45%. Ο πίνακας 3 συγκρίνει Class A/B, Doherty και HAT ενισχυτές βάσει αποδοτικότητας και κόστους.

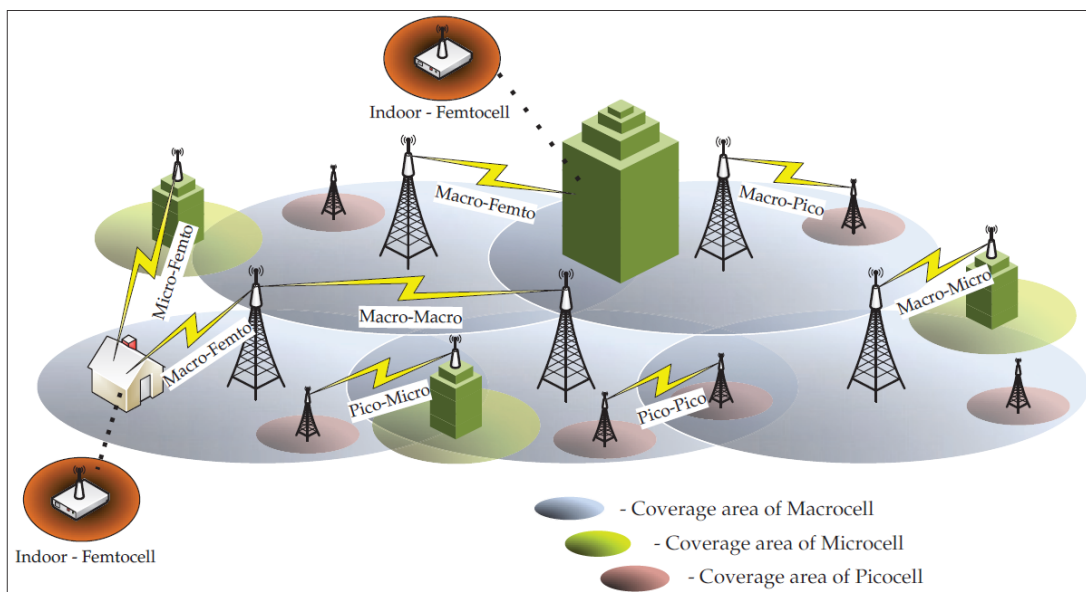
	<b>Παραδοσιακή τεχνολογία</b>	<b>Doherty Τεχνολογία</b>	<b>Envelope tracking (HAT) τεχνολογία</b>
Αποδοτικότητα ενισχυτή ισχύος	15%	25%	45%
Κατανάλωση ενέργειας	51,7 MW	27,2 MW	16,1 MW
Κόστος ενέργειας	\$ 54,3 Μ	\$ 28,6 Μ	\$ 17,0 Μ
CO <sub>2</sub> εκπομπές	194600 τόνους	102400 τόνους	60800 τόνους

Πίνακας 3: Αποδοτικότητα, κόστος και επίδραση στο περιβάλλον ενός δικτύου 20000 σταθμών βάσης με διαφορετικές τεχνολογίες ενισχυτών[7]

### 3.4 Τοπολογία δικτύου και λειτουργίες

#### Σχεδιασμός Δικτύου - Ετερογενής ανάπτυξη δικτύου

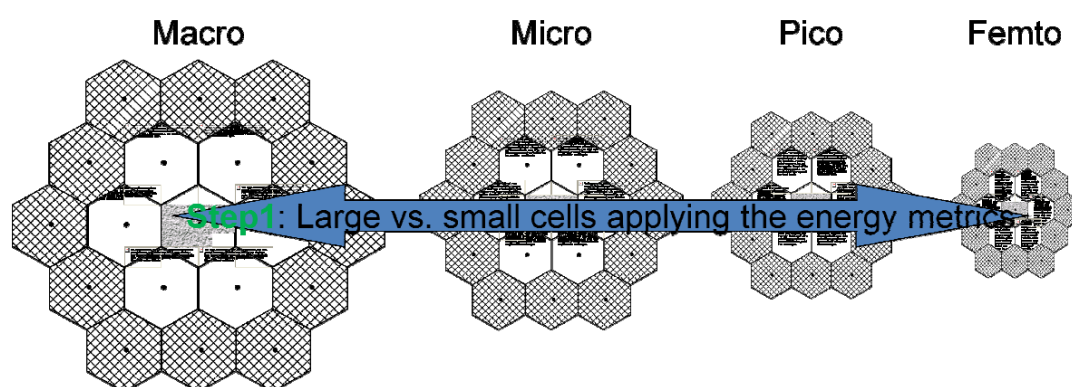
Η εκθετική αύξηση στην απαίτηση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και άλλες υπηρεσίες στα ασύρματα δίκτυα απαιτεί μία πιο πυκνή ανάπτυξη των σταθμών βάσης μέσα στις κυψέλες δικτύου. Οι μακροκυψέλες είναι γενικά σχεδιασμένες για να παρέχουν μεγάλη κάλυψη και δεν είναι αποδοτικές για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Ένας προφανής τρόπος να γίνουν τα κυψελωτά δίκτυα περισσότερο αποδοτικά αναφορικά με την ενέργεια που καταναλώνουν με ταυτόχρονη διατήρηση των υψηλών ρυθμών μετάδοσης είναι η μείωση της απόστασης των κόμβων που ισοδυναμεί με ελάττωση της εκπνεόμενης ισχύος. Συνεπώς, η ανάπτυξη κυψελωτών δικτύων που βασίζεται σε μικρότερες κυψέλες όπως *micro*, *pico* και *femto* είναι πολλά υποσχόμενη για το μέλλον. Μια τυπική ετερογενής ανάπτυξη δικτύου φαίνεται στην εικόνα 7. Μία *micro/pico* κυψέλη είναι κυψέλη που σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας εξυπηρετείται από ένα χαμηλής ισχύος σταθμό βάσης που καλύπτει μια μικρή περιοχή με πυκνή κίνηση όπως ένα εμπορικό κέντρο, ένα ξενοδοχείο ή ένα σταθμό τρένων. Καθώς η τυπική ακτίνα μιας *micro/pico* κυψέλης είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα, *femto* κυψέλες είναι σχεδιασμένες να εξυπηρετούν μικρότερες περιοχές όπως ιδιωτικές οικίες ή εσωτερικές περιοχές. Η ακτίνα των *femto* κυψελών είναι συνήθως μερικά μέτρα και γενικά είναι συνδεδεμένα με ιδιωτική ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση ή γραμμή DSL. Οι μικρότερες κυψέλες λόγω μεγέθους είναι ενεργειακά πιο αποδοτικές στο να παρέχουν ευρυζωνική κάλυψη. Σαν παράδειγμα, μία τυπική *femto* κυψέλη μπορεί να έχει μόνο 100 mW PA (ενισχυτή), και καταναλώνει 5 W συνολικά σε σχέση με τα 5 kW που χρειάζονται για τη *macro* κυψέλη.



Εικόνα 7 : Μια τυπική ετερογενής ανάπτυξη δικτύου[4]

Προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι η συνδυασμένη ανάπτυξη των macro σταθμών βάσης με δημόσιες προσιτές τοπικές pico κυψέλες μπορούν να ελαττώσουν την ενεργειακή κατανάλωση κατά 60%. Η αρχική έρευνα έχει προβλέψει 102 εκατομμύρια χρήστες παγκόσμια που χρησιμοποιούν πάνω από 32 εκατομμύρια Femto κυψέλες μέχρι το 2011, όμως η μαζική εξάπλωση έχει τουλάχιστον ένα χρόνο καθυστερήσει εξαιτίας της παρούσης οικονομικής κρίσης. Καθώς οι Femto κυψέλες δημιουργούν ένα δρόμο για υψηλή χωρητικότητα συνδυασμένη με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας υπάρχουν πολλά ερευνητικά θέματα που ανακύπτουν , όπως για παράδειγμα η κατανομημένη διαχείριση συχνότητας , οι Femtocells/macrocell παρεμβολές, η διαπομπή, τα αυτό-βελτιστοποιούμενα δίκτυα και η ασφάλεια δικτύων.

Διακυμάνσεις στη χρήση κυψελών συχνά συσχετίζονται χωρικά και χρονικά με τον τόπο και την ώρα της ημέρας. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της βραδινής ώρας εξόδου η χρήση είναι υψηλή και ελαττώνεται αργότερα τη νύχτα όπως επίσης μειώνεται γύρω από περιοχές επιχειρήσεων τη νύχτα και τα σαββατοκύριακα. Ο εξοπλισμός του σταθμού βάσης μπορεί να μάθει από αυτά τα πρότυπα και να κλείνει εντελώς ή να ελαττώνει τον αριθμό των κεραιών που εκπέμπουν. Αυτή η επιπέδου site προσέγγιση κλεισίματος για τη διαχείριση ενέργειας έχει αξιοσημείωτη δυναμική στη μείωση κατανάλωσης παρόλα αυτά απαιτεί συντονισμένη διαχείριση των σταθμών βάσης με σκοπό να διατηρηθεί η επιθυμητή χωρητικότητα και το QoS του πελάτη.



Source: [www.mobilevce.com](http://www.mobilevce.com)

Εικόνα 8: Από μακροκυψέλες σε φεμτοκυψέλες [9]

### 3.4.a Προσομοίωση στα Femtocells (α)

Η Mobile VCE έχει αναπτύξει προσομοιώσεις για την καλύτερη κατανόηση των ενεργειακών αναγκών των διαφορετικών τοπολογιών δικτύων. Αρχικά όταν αναφέρεται συνολική ενέργεια που καταναλώνεται, αυτή αναφέρεται στη διάρκεια ζωής ενός δικτύου- από τη κατασκευή ,την ενέργεια για τη λειτουργία, την ενέργεια που καταναλώνεται από το προσωπικό που διαχειρίζεται το δίκτυο. Αυτή η συνολική ενεργειακή κατανάλωση διαιρείται με το συνολικό όγκο δεδομένων που μεταδίδεται.

Σε όρους τοπολογίας, μοντελοποιήθηκε ένα συγκεκριμένου μεγέθους δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN ,Radio Access Network) 10 Km X 10 Km , που καλύπτει ένα πληθυσμό 200000 ανθρώπων και 65000 σπιτιών. Υποθέτουμε ότι το 95% είναι συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας και ότι χρησιμοποιούν τη συσκευή τους κατά μέσο όρο 30min την ημέρα. Υποθέτουμε επίσης ότι η μέγιστος ρυθμός μετάδοσης σταθμού βάσης είναι 5 Mbps και ότι ο πάροχος έχει 40% μερίδιο αγοράς. Η κάλυψη μικρής κυψέλης θα μπορούσε να είναι 100 m x 100 m , περίπου το μέγεθος μιας μετροκυψέλης.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα εξαρτάται από την πυκνότητα πληθυσμού και συνδρομητών. Στα περισσότερα σενάρια , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1, η εισαγωγή των femtocells μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση ανά χρήστη. Για παράδειγμα, αν μία macrocell υποστηρίζει μόνο 30 χρήστες (αγροτική περιοχή) , η μέση ενεργειακή κατανάλωση ανά χρήστη είναι 4.4 Watts. Αν συμπληρωθεί αυτή η macro με femtocells , η ενεργειακή κατανάλωση πέφτει.

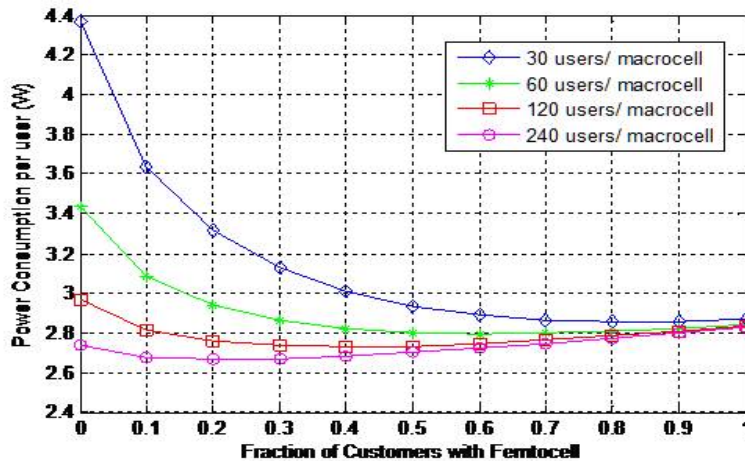
Αν 10% των πελατών μέσα στην macrocell περιοχή είχε ένα femtocell, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση πέφτει στα 3.6 W ανά χρήστη.

Αν 70% ή παραπάνω είχαν femtocells τότε η ενεργειακή κατανάλωση πέφτει στα 2.8 W.

Αυτή η μοντελοποίηση δεν υποθέτει ότι τα femtocells έχουν μία διαφορετική χωροθέτηση από τα macrocells. Για την ακρίβεια, όσο περισσότερα femtocells προστίθενται, το macrocell πρέπει να παραμείνει ενεργό, για να εξυπηρετήσει χρήστες που δεν μπορούν να συνδεθούν σε femtocell ( για παράδειγμα αυτούς που οδηγούν).

Μια παρόμοια καμπύλη, λιγότερο απότομη, παρουσιάζεται για ένα macrocell 60 χρηστών ( 3.4 Watts ανά χρήστη όταν εξυπηρετείται μόνο από macro). Γίνεται πιο ενεργειακά αποδοτική ( 2.8 Watts) όταν πάνω του 40% των χρηστών με femtocells.

Σε πραγματικά πυκνοκατοικημένες περιοχές (240 χρήστες ) η χρήση των femtocells πάνω από ένα ποσοστό μπορεί να αυξήσει λίγο την ενεργειακή κατανάλωση.



Διάγραμμα 1 : Ενεργειακή κατανάλωση ανά χρήστη σε σχέση με το ποσοστό χρηστών με femtocell [10]

### 3.4.β Προσομοίωση στα femtocells (β)

Τα femtocells είναι δυνατόν να ελαττώσουν την ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου αλλά κυρίως σε περιπτώσεις που τα femtocells απενεργοποιούνται όταν δεν υπάρχει εισερχόμενη κίνηση. Συνεπώς, τα femtocells θα πρέπει να είναι ικανά να ανιχνεύουν την κίνηση και να προσαρμόζουν την κατάστασή τους (ενεργή ή απενεργή) ακολουθώντας τις συνθήκες κίνησης. Σύμφωνα με αυτό το χαρακτηριστικό η femto κυψέλη μπορεί να εισέρχεται σε κατάσταση απενεργοποίησης (sleep mode) όταν δεν υπάρχει εισερχόμενη κίνηση. Η σπουδαιότητα αυτού του χαρακτηριστικού είναι εμφανής καθώς καθορίζει την ενεργειακή κατανάλωση των femtocells όταν δεν υπάρχει εισερχόμενη κίνηση.

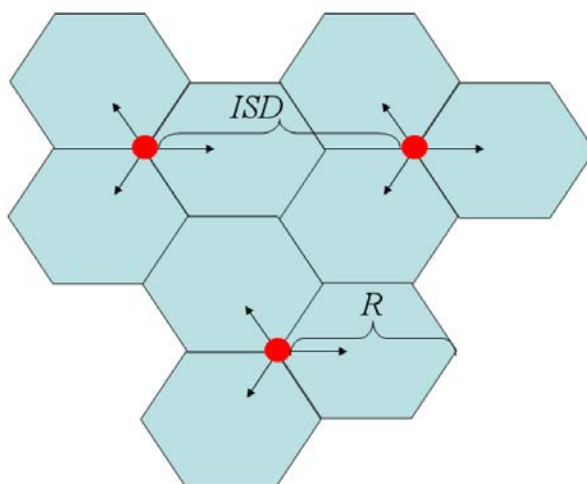
Το παρακάτω μοντέλο περιγράφει την ενεργειακή κατανάλωση ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο στο δίκτυο

$$(E/A)_{Ntw} = \frac{N_{Site}^{New} N_{Cell} (P_{Oper} + \lambda^{New} P_{Tx})}{N_{Site} A_{Site}} 24 h + \frac{N_{Cell} N_F P_F}{A_{Site}} 24 h \quad (6)$$

Όπου  $\lambda$ : φόρτος κυψέλης,  $P_{Tx}$ : ισχύς για την απαραίτητη ισχύ εκπομπής στην έξοδο της κεραίας,  $P_{oper}$ : ισχύς (ανεξάρτητης φόρτου) που απαιτείται για να λειτουργήσει ο σταθμός βάσης,  $N_{cell}$ : αριθμός κυψελών στο site,

$N_{site}$  : αριθμός των BS sites, και επίσης ο αριθμός των sites στην νέα ανάπτυξη δικτύου ( $N_{site}^{New}$ ) και αντίστοιχα ο φόρτος  $\lambda^{New}$  αναφέρονται στις νέες τιμές παραμέτρων στο τροποποιημένο δίκτυο, σε σχέση με τις παλιές τιμές παραμέτρων του δικτύου αναφοράς,  $N_F$ : αριθμός Femto σταθμών βάσης ανά μακροκυψέλη.

Η μονάδα είναι  $KWh/Km^2$ . Η καλυπτόμενη επιφάνεια με ένα τριών τομέων site δίνεται από  $A_{site}=9/4 R^2=ISD^2$ . Θεωρούμε για UMTS σταθμό βάσης τις τιμές  $P_{oper}=137 W$  και  $P_{Tx}=57 W$ , και για femto BS input ισχύ  $P_F$  δύο τιμές ,  $2 W$  και  $5 W$ .

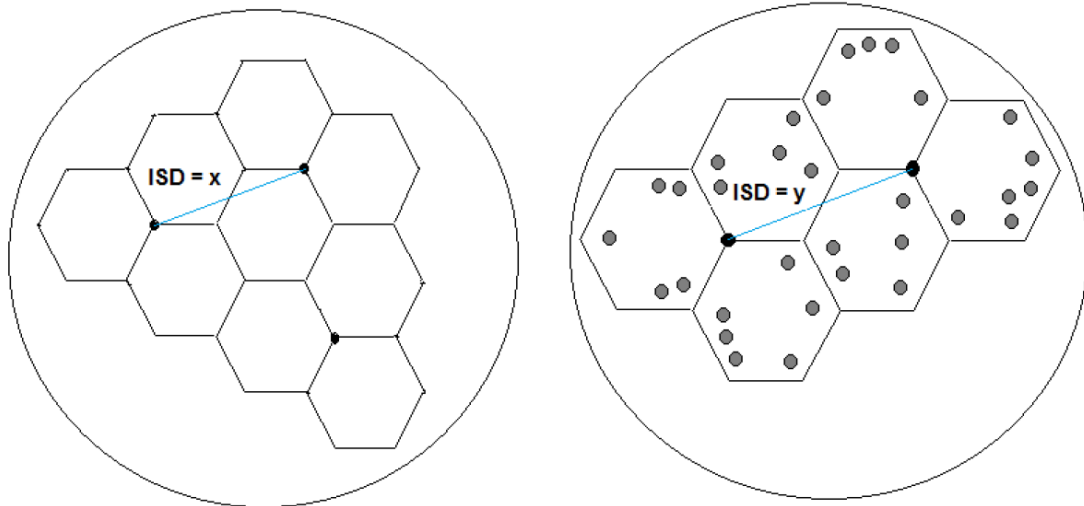


Εικόνα 9: Διάταξη μακροκυψελών - ακτίνα κυψέλης και ISD( inter site distance)[11]

Σενάριο σύγκρισης : Υποθέτουμε ότι η macrocell ISD δεν είναι δεδομένη, αλλά αντίθετα εμείς θέτουμε το στόχο φόρτου σε macrocells. Αφού και τα femtocells παίρνουν μέρος κίνησης, ο απαιτούμενος αριθμός των macrocell BS μειώνεται λόγω cell breathing (εικόνα ) και ο τύπος (6) γίνεται:

$$(E/A)_{Ntw} = \frac{N_{Site}^{New} N_{Cell} (P_{Oper} + \lambda P_{Tx})}{N_{Site} A_{Site}} 24 h + \frac{N_{Cell} N_F P_F}{A_{Site}} 24 h \quad (7)$$

Η ελάττωση στους BS μακροκυψελών μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση.



**Network1**

**Network 2**

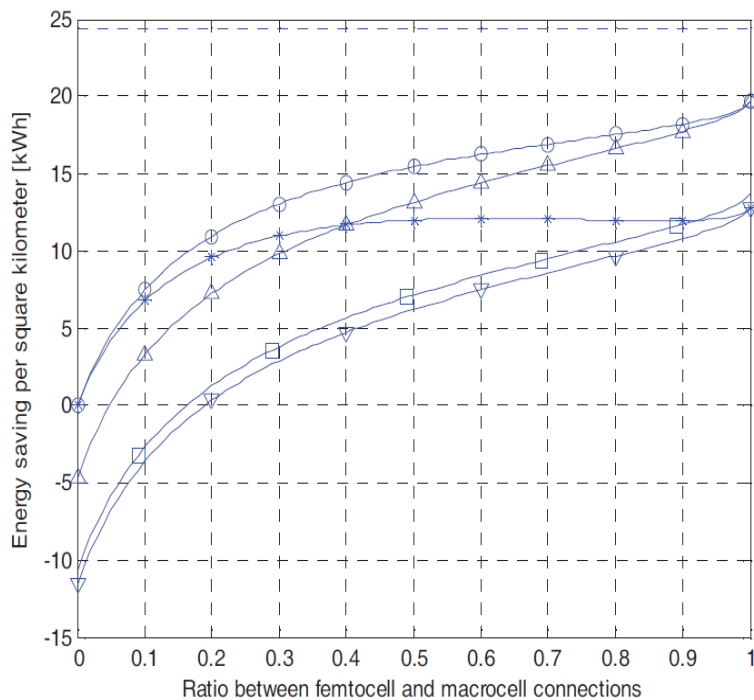
Εικόνα 10: Διάταξη δικτύου για το σενάριο σύγκρισης [11]

### Αριθμητική σύγκριση

Αρχικά υπολογίζεται η ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο χωρίς femtocells. Όταν  $N_F$  femtocells προστίθενται στο δίκτυο, παίρνουν ένα ποσοστό των χρηστών  $(R_F * 100)\%$  των χρηστών (όπου  $R_F$  είναι ο λόγος ανάμεσα σε femtocell και macrocell συνδέσεις). Στη συνέχεια ο αριθμός των macrocell sites ελαττώνεται, άρα μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση στο δίκτυο. Θεωρήθηκε 64 Kbps service και αρχικό φορτίο συστήματος 0.9. Με την εξίσωση 2, τα αποτελέσματα σχετικά με το σενάριο σύγκρισης φαίνονται στην εικόνα, και για τους δύο τύπους femtocells (με ή χωρίς power save feature) έχοντας ισχύ εισόδου 2 W και 5 W. Είναι φανερό ότι τα femtocells με τη λειτουργία power save έχουν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα διαφορετικά σύμβολα έχουν χρησιμοποιηθεί για τις ακόλουθες περιπτώσεις:



όταν $N_F=N_{users}$ κύκλος για femtocells 2 W με power save	○
όταν $N_F=N_{users}$ τρίγωνο(πάνω) για femtocells 2W χωρίς power save	△
όταν $N_F=N_{users}$ τρίγωνο (κάτω) για femtocells χωρίς power save.	▽
όταν $N_F=N_{users}$ αστερίσκος για femtocells 5 W με power save	*
όταν $N_F=2.3 \times N_{users}$ τετράγωνο για femtocells 2 W με power save.	□



Διάγραμμα 2 : Ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας ανά τετρ. χιλιόμετρο σε σχέση με το λόγο femtocell και macrocell συνδέσεων.[11]

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι και για κάθε ισχύ εισόδου όσο ο λόγος femtocells προς macrocells μεγαλώνει τότε το ίδιο περίπου ποσοστό ενέργειας εξοικονομείται και για τους δύο τύπους femtocells, συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η power save λειτουργία είναι κρίσιμη σε μικρά φορτία.

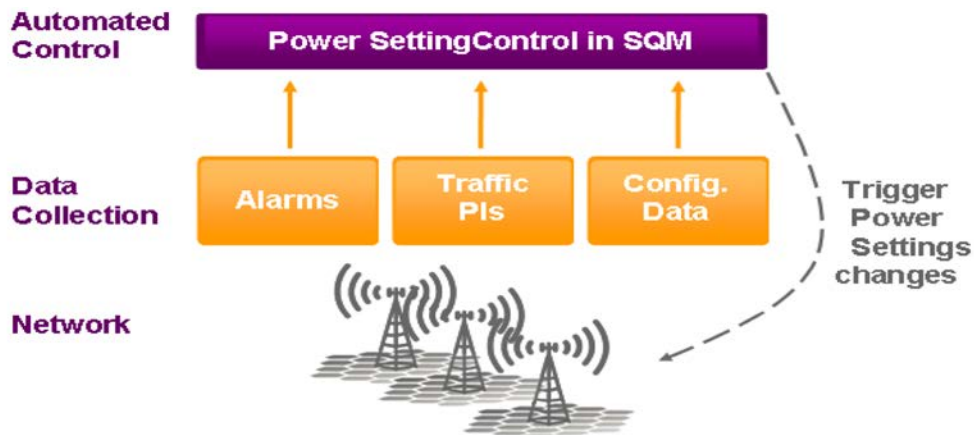
Χωρίς την power save λειτουργία βλέπουμε ότι στην περίπτωση των 2 W όταν ο λόγος γίνει 0.05 αρχίζει η εξοικονόμηση ενέργειας ενώ στα 5W όταν γίνει 0.2. Άρα στην περίπτωση των 5 W η λειτουργία αυτή κρίνεται απαραίτητη.

Αν μεγαλώσει ο αριθμός των femtocells 2W και  $N_F = 2.3 \times N_{users}$  τότε η εξοικονόμηση ενέργειας μειώνεται. Αποδεικνύεται με περαιτέρω ανάλυση ότι τα μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη προκύπτουν για  $N_F = N_{users}$ .

### 3.5 Εργαλεία διαχείρισης ενέργειας

Ενεργειακά αποδοτικές λύσεις πρέπει να είναι ικανές να συσχετίζουν την κατανάλωση ενέργειας με τον φόρτο κίνησης. Σαν ένα πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, οι πάροχοι ασύρματης επικοινωνίας έχουν προτείνει την υιοθέτηση έξυπνου λογισμικού για οικονομία ενέργειας σε σταθμούς βάσης. Εδώ παρουσιάζουμε μερικά παραδείγματα από ανάλογο λογισμικό.

NectAct SQM [23]- Εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαχείρισης χωρητικότητας λόγω φόρτου κίνησης στους σταθμούς βάσης. Nokia Siemens Networks' NetAct Service Quality Manager (SQM) είναι μία λύση λογισμικού για διαχείριση διαθέσιμης χωρητικότητας (capacity) όταν ο φόρτος κίνησης είναι χαμηλός. NetAct ελέγχει την κατανάλωση ενέργειας του σταθμού βάσης αυτόματα βασισμένο σε προδιαμορφωμένες 'ρυθμίσεις'. Για παράδειγμα, NetAct's λειτουργία διαχείρισης ενέργειας αφήνει τους φορείς παροχής υπηρεσιών (service providers) να διαχειρίζονται την κατανάλωση ενέργειας σε ώρες υψηλής και χαμηλής κίνησης. Πρότυπα κίνησης μπορούν να διαχειριστούν από το δίκτυο σε επίπεδο μεμονωμένου σταθμού βάσης. Αυτό το λογισμικό δουλεύει και στα 2G και 3G συστήματα, και επιτρέπει να εξοικονομείται ενέργεια με συντονισμό των ρυθμίσεων του κάθε σταθμού βάσης αυτόματα. Για παράδειγμα, η ικανότητα συντονισμού συστήματος είναι προγραμματισμένη κάθε μερικές δεκάδες λεπτά, και η πραγματική χωρητικότητα επιλέγεται σαν μια συνάρτηση του παρόντος φόρτου κίνησης και της εκτίμησης για τον φόρτο κίνησης κατά την επόμενη ώρα. Η ικανότητα προσαρμογής αποτελείται από αλλαγές, π.χ., τους αριθμούς των ενεργών συχνοτήτων για GSM δίκτυα πρόσβασης, που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το κλείσιμο του ραδιοσυστήματος αν η κίνηση την επόμενη ώρα αναμένεται να πέσει κάτω από ένα ελάχιστο κατώφλι.



Εικόνα 11 : Λειτουργία SQM[23]

Συγκεκριμένα, το εμπορικό λογισμικό σταθμού βάσης NetAct SQM έχει μία στρατηγική που ονομάζεται *εξοικονόμηση ενέργειας σταθμού βάσης τη νύχτα*, που επιτρέπει στο διαχειριστή να θέσει ένα χρονικό παράθυρο κατά τη διάρκεια του οποίου η χωρητικότητα του σταθμού βάσης μπορεί να μειωθεί. Η πραγματική απόφαση χωρητικότητας παίρνεται σε συμφωνία με ένα προφίλ κίνησης που υπολογίζεται για τις ώρες της εβδομάδας, και μόνο μετά από μια σειρά προϋποθέσεις που πληρούνται:

- Η παρούσα κίνηση είναι κάτω από ένα ρυθμιζόμενο κατώφλι.
- Η παρούσα κίνηση είναι μέσα στο αναμενόμενο προφίλ (έτσι η κίνηση που προβλέπεται να μην υπερβεί σημαντικά την αναμενόμενη τιμή)
- Η αναμενόμενη κίνηση την επόμενη ώρα να είναι κάτω από το κατώφλι
- Δεν είναι προγραμματισμένα για την επόμενη ώρα γεγονότα ή σχετικές ειδοποιήσεις.

*Dynamic Power Save*: [24] Alcatel - Lucent παρουσίασε ένα καινούργιο προϊόν που υπόσχεται μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 30% μέσω της ικανότητας να κλείνει ενισχυτές σε GSM εκπομπούς σύμφωνα με το φόρτο κίνησης που καταγράφεται από το σταθμό βάσης. Αυτό το νέο χαρακτηριστικό, που ονομάζεται Dynamic Power Save (DPS), δεν επηρεάζει την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται στους συνδρομητές και βοηθά στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης και σε ώρες χαμηλής και υψηλής κίνησης. Επειδή αυτό είναι μια αναβάθμιση του λογισμικού, αυτό το εξάρτημα μπορεί να εγκατασταθεί σε όλες τους Alcatel-Lucent πολλαπλών προτύπων σταθμούς βάσης που έχουν αναπτυχθεί από το 1999, περίπου 500.000 σταθμούς.

Το Dynamic Power επίσης περιλαμβάνει την απενεργοποίηση του ενισχυτή ισχύος σε πομποδέκτες δικτύων GSM. Επιτρέπει στο σταθμό βάσης να

παρακολουθεί τη δραστηριότητα της κυκλοφορίας στο δίκτυο και όταν δεν υπάρχει καμία πληροφορία για μετάδοση, ακόμη και για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, ο ενισχυτής απενεργοποιείται. Η διαδικασία αυτή προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση κόστους σε νύχτα, όταν η κίνηση είναι φυσικό να είναι χαμηλότερη, αλλά επίσης, λόγω της ευαισθησίας των τεχνικών παρακολούθησης, σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται και κατά τη διάρκεια αιχμής.

Επίσης λογισμικό διαχείρισης ενέργειας με παρόμοια χαρακτηριστικά είναι τα Smart Power Management ( Nortel)[25].

### **3.6 Εισαγωγή εναλλακτικών μορφών ενέργειας**

Πολλοί πάροχοι ασύρματης επικοινωνίας πειραματίζονται με τη χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας όπως κυψέλες καυσίμου, αιολική και ηλιακή ενέργεια για την λειτουργία σταθμών βάσης. Αυτές οι πηγές ενέργειας μπορούν να δώσουν μια ενεργειακή αποδοτικότητα απέναντι στις πιο ρυπογόνες και ακριβές μορφές ενέργειας όπως το ντίζελ και οδηγούν προς την ενεργειακή ανεξαρτησία. Επιπροσθέτως του κόστους του καυσίμου αυτού καθαυτού, ενέργεια μπορεί να εξοικονομηθεί από την ελαχιστοποίηση της μεταφοράς και του κόστους του καυσίμου, αφού για παράδειγμα, κάποια απομονωμένα sites χρειάζονται μεταφορά ντίζελ με ελικόπτερο λόγω έλλειψης δρόμων.

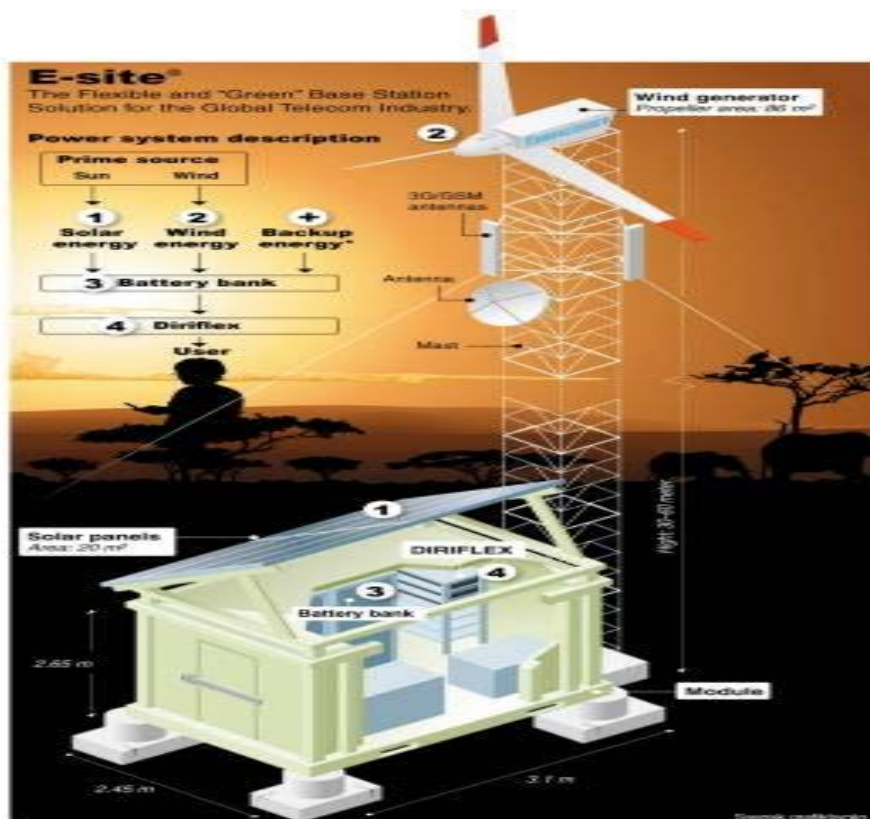
Είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψη τις υψηλές σχεδιαστικές απαιτήσεις συστημάτων που βασίζονται σε πιθανά ασταθείς ενεργειακές πηγές. Όταν η παραδοσιακή σχεδίαση ραδιοσυστημάτων βασίζεται στην συνεχή διαθεσιμότητα της παροχής ενέργειας, τα 'πράσινα' ραδιοσυστήματα πρέπει να διατηρούν την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) ακόμα και όταν η παροχή ενέργειας μεταβάλλεται σε τόπο και χρόνο. Συνεπώς καλούνται να αντιμετωπίζουν διακοπές όχι μόνο στο κανάλι, αλλά διακοπές στο ίδιο το σύστημα. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις επίσης διαφέρουν στο ότι εστιάζουν στη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας του συστήματος παράλληλα με την επέκταση του χρόνου ζωής του συστήματος. Επιπροσθέτως, η συνολική σχεδίαση δικτύου πρέπει να λάβει υπόψη της τον πλεονασμό στην περιοχή κάλυψης. Γειτονικοί σταθμοί βάσης μπορεί να χρειαστεί να αντισταθμίσουν τις ενεργειακές ανάγκες για κόμβους που παρουσιάζουν έλλειμμα ισχύος.

Η MTC (Mobile TeleCommunications Limited) της Ναμίμπια, το GSMA Development Fund και η Motorola ξεκίνησαν μια προσπάθεια 90 ημερών για να εκτιμήσουν τη χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας σαν μια εφικτή αποδοτική ενεργειακή πηγή για ένα σταθμό βάσης. Το εγχείρημα αυτό χρησιμοποιεί μία 6 kW αεροτουρμπίνα και 28 kW ηλιακά πάνελς συνδυαζόμενα με μπαταρία ικανή να παρέχει 60 ώρες λειτουργίας και ελέγχου εξοπλισμού. Το σύστημα παρείχε ένα μέσο όρο 198 kW ισχύς ανά εβδομάδα που ήταν κατά 10 kWh παραπάνω για τις απαραίτητες λειτουργίες. MTC υπολόγισε απόσβεση επένδυσης σε τρία χρόνια .

Με ανάθεση της Ericsson έχει αναπτυχθεί ένας σταθμός βάσης για κινητά δίκτυα που χρησιμοποιεί αιολική και ηλιακή ενέργεια. Επί του παρόντος, πάνω από 40000 σταθμοί βάσης λειτουργούν στην Αφρική που οι περισσότεροι λειτουργούν με ντίζελ καταναλώνοντας περίπου 20000 lt κάθε χρόνο ανά σταθμό βάσης. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, Flexenclosure, το κόστος ενός σταθμού βάσης που λειτουργεί με ντίζελ υπερβαίνει τα 30000 \$ ανά έτος. Ο σταθμός βάσης που δημιούργησε η εταιρεία καλείται E-site, έχει μια αιολική τουρμπίνα και ηλιακά πάνελς. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φορτίζουν μια μπαταρία που παρέχει ενέργεια στο σταθμό κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σαν συμπλήρωμα, έχει μια μικρή γεννήτρια ντίζελ. Ο σταθμός βάσης τρέχει ένα έξυπνο λειτουργικό σύστημα, που μαθαίνει και προσαρμόζεται στις τοπικές συνθήκες. Έτσι, E-site θα χρησιμοποιήσει την καλύτερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή. Ένας παραδοσιακός σταθμός βάσης κοστίζει 120000\$ στην κατασκευή. Ένας E-site είναι ελαφρά πιο ακριβός, αλλά για το επιπλέον κόστος γίνεται απόσβεση σε 15 με 18 μήνες. Οι εταιρείες θα μπορούσαν να εξοικονομήσουν 120000\$ με 150000\$ σε μειωμένα λειτουργικά έξοδα σε μια περίοδο πέντε ετών χρησιμοποιώντας εναλλακτικές μορφές ενέργειας.



Εικόνα 12: Ανεμογεννήτρια και ηλιακά πάνελς στο σταθμό βάσης E-site[12]



Εικόνα 13: Λειτουργία σταθμού βάσης E-site [12]

Το 2008 , η GSM Assosiation (GSMA) , που περιλαμβάνει περίπου 800 παρόχους κινητής παγκοσμίως , εκπόνησε ένα πλάνο για εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε 118000 νέους και υπάρχοντες σταθμούς βάσης σε αναπτυσσόμενες χώρες μέχρι το 2012. Το αναμενόμενο *πράσινο κέρδος* είναι να εξοικονομηθούν 2,5 δισεκατομμύρια Ιt ντίτζελ και μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 6,3 εκατ. τόνους ανά έτος.

Στοιχείο	Λύση για εξοικονόμηση ενέργειας	CAPEX εξοικονόμηση	OPEX εξοικονόμηση	Λιγότερο CO <sub>2</sub>
Δίκτυο πυρήνα	Soft switches (μεταγωγείς)	75%	90%	80-90%
Σταθμοί βάσης	Ραδιοεξοπλισμός δίπλα στην κεραία	≥50%	40-70%	30%
Ενισχυτές ισχύος	Envelope tracking	---	≥50%	≥50%
Λογισμικό	<u>NectAct SQM</u>	---	≥40%	≥50%
Πρακτικές χαμηλών εκπομπών	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	---	≥40%	≥50%
	<b>Συνολική επίπτωση</b>	70%	≥50%	≥50%

Πίνακας 4: Επίδραση των τεχνολογιών στο CAPEX, στο OPEX και στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. [7]

Ο παραπάνω πίνακας εμπειρικλείει την επίδραση των τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν ως τώρα στις δαπάνες κεφαλαίου ( CAPEX), δαπάνες λειτουργίας (OPEX) και στο περιβάλλον.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

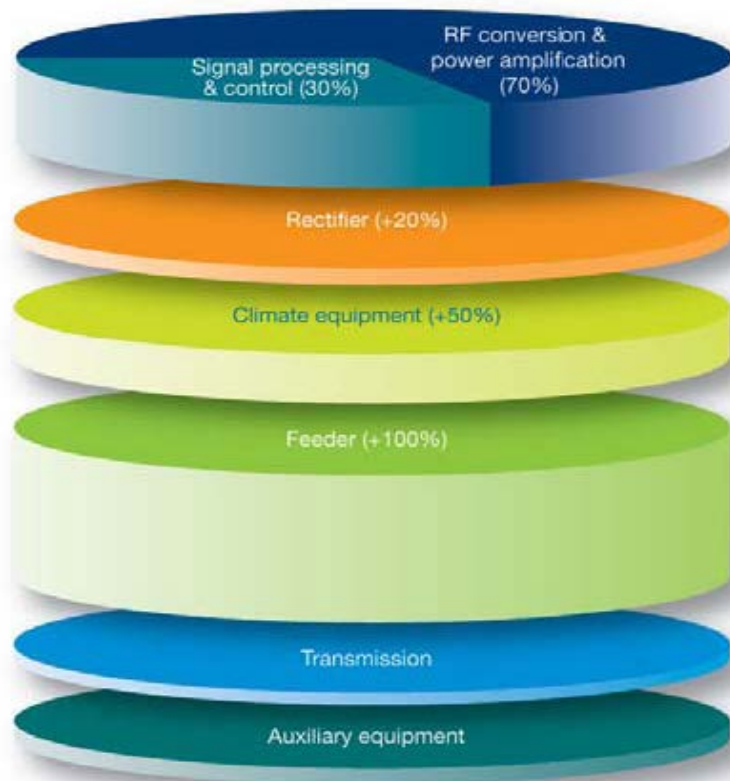
### Πράσινοι σταθμοί βάσης

#### 4.1 Εισαγωγή

Οι σταθμοί βάσης είναι υπεύθυνοι για περισσότερο από το 80% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του παρόχου, πράγμα που δείχνει ότι η σχεδίαση των σταθμών βάσης αποτελεί στοιχείο κλειδί για τον καθορισμό του περιβαλλοντολογικού αντίκτυπου και του κόστους λειτουργίας. Κάθε κεραία σταθμού βάσης και ο υποστηρικτικός εξοπλισμός της καταναλώνει μία μέση ισχύ του μεγαλύτερη 1 kW, σύνολο 8800 KWh το χρόνο, που είναι αντίστοιχη με την ενέργεια για να λειτουργήσουν δύο μέσες ευρωπαϊκές οικίες. Ένα μετρίου μεγέθους δίκτυο αποτελούμενο από 12-1500 cell sites, καθένα εξοπλισμένο με δύο τεχνολογίες (2G και 3G) και περίπου 3 κεραίες ανά τεχνολογία καταναλώνει περίπου 736000 MWh που είναι αντίστοιχη με την ενέργεια 168000 ευρωπαϊκών νοικοκυριών. Σε κάποιες τηλεπικοινωνιακές αγορές, το ενεργειακό κόστος είναι παραπάνω από το μισό του OPEX.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο, παράλληλα με το σταθμό βάσης και τον εξοπλισμό μετάδοσης, το τυπικό radio site περιλαμβάνει εφεδρικές μονάδες μπαταρίας, κλιματιστικό εξοπλισμό για τη διασφάλιση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, και γεννήτριες ντίζελ για τη φόρτιση των μπαταριών σε περίπτωση παρατεταμένων διακοπών ρεύματος ή όπου η άμεση σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι αδύνατη. Η εικόνα 14 δείχνει τη σχετική ενεργειακή κατανάλωση των διαφόρων στοιχείων και λειτουργικών τομέων ενός site σταθμού βάσης. Στην εικόνα 14, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση των μονάδων επεξεργασίας σήματος και ελέγχου (30%) και RF μετατροπής & ενίσχυσης (70%) χρησιμοποιείται σαν κανονικοποιημένη βάση. Από την εικόνα είναι φανερό ότι τα τρία πρώτα σε ενεργειακή κατανάλωση στοιχεία είναι το δίκτυο σηματοδότησης, RF μετατροπή και ενίσχυση, και εξοπλισμός κλιματισμού (air conditioning).





Εικόνα 14. Ενεργειακή κατανάλωση ενός τυπικού site σταθμού βάσης (BS) μακροκυψέλης (κανονικοποιημένη) [27]

#### 4.2 Αρχιτεκτονική ενός πράσινου σταθμού βάσης

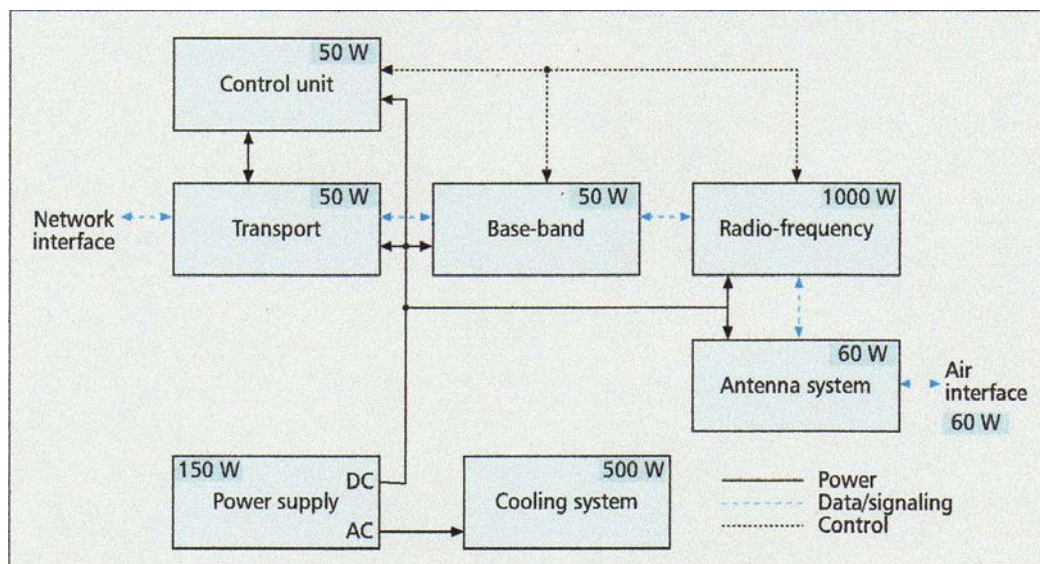
Η ανάλυση του κόστους σε ένα 3G network site δείχνει ότι η υποδομή ενός σταθμού βάσης αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό 30% επί του συνόλου. Οι πάροχοι με σκοπό να μειώσουν κόστη και κατανάλωση ενέργειας ζητούν πιο ευέλικτους, μικρότερου μεγέθους σταθμούς βάσης, ευκολότερα αναβαθμίσιμους και να υποστηρίζουν πολλαπλές τεχνολογίες.

Από τη σκοπιά του παρόχου, το να τρέχει πολλαπλές ραδιο τεχνολογίες ένας σταθμός βάσης (multimode base station) σημαίνει μοιραζόμενο CAPEX για το site και μειωμένα έξοδα διαχείρισης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ένας σταθμός βάσης αποτελείται από μία baseband (βασικής ζώνης) μονάδα, την RF μονάδα, την μονάδα μεταφοράς και την μονάδα ελέγχου.

Με σκοπό να γίνει η εγκατάσταση απλούστερη, πιο ευέλικτη και πολύτροπη, η Huawei, η Alcatel-Lucent και άλλοι κατασκευαστές έχουν προτείνει να τοποθετηθούν μόνο οι RF μονάδες on site, και να χρησιμοποιηθούν οι

ανοικτές δημόσιες ραδιοεπαφές ( common public radio interfaces ,CPRI) για επικοινωνία με την μονάδα βασικής ζώνης και άλλες μονάδες όπως αυτή του ελέγχου και μεταφοράς. Η μονάδα βασικής ζώνης μπορεί να έχει μικρό μέγεθος και να μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε υπάρχοντες χώρους όπως της παροχής ενέργειας ή του εξοπλισμού μετάδοσης. Η μονάδα ραδιοσυχνότητας (RF,radio-frequency) μπορεί να γίνει αρκετά ελαφριά ώστε να τοποθετηθεί σε πύργο, κοντάρι ή ακόμη και πάνω σε τοίχο. Συνεπώς, αφού η εγκατάσταση της μονάδας ραδιοσυχνότητας γίνεται εύκολη, η συμβατική γραμμή τροφοδοσίας δε χρησιμοποιείται πια και έτσι αποφεύγονται τα 3 dB απώλειες λόγω απόστασης από την κεραία. Ένας τέτοιος σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για 2G και για 3G δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα , η μονάδα έλεγχου μπορεί να μοιραστεί ανάμεσα σε 2G και 3G μονάδες ραδιοσυχνότητας απλά φορτώνοντας το κατάλληλο λογισμικό. Μια πολύτροπη (multimode) λύση έχει προταθεί πρόσφατα από τον κινεζικό πάροχο ZTE , του οποίου η ενοποιημένη πλατφόρμα υλικού (Unified Hardware Platform) υποστηρίζει GSM, CDMA,UMTS, time division synchronous CDMA (TD-CDMA) και LTE.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύνθεση από διαφορετικές μονάδες ενός σταθμού βάσης για να γίνει φανερή η κατανάλωση ενέργειας κάθε μονάδας και πως με τις τεχνολογικές εξελίξεις που παρουσιάστηκαν μπορεί να μειωθεί η ενεργειακή του κατανάλωση.



Εικόνα 15. Σύνθεση ενός σταθμού βάσης. Ένα μικρό ποσοστό ( 60 W της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των 2kW) εκπέμπεται στον αέρα.[7]

Ένας σταθμός βάσης αποτελεί την σπονδυλωτή σύνθεση πολλών ξεχωριστών μονάδων. Καταρχήν το σύστημα κεραιών που αποτελείται από μία ή περισσότερες κεραιές για αντίστοιχες RF bands που χρησιμοποιούνται. Η (baseband) μονάδα βασικής ζώνης έχει το ρόλο της επεξεργασίας της πληροφορίας και της φωνής με ψηφιακή επεξεργασία σήματος , και παράγει σήματα ελέγχου. Η RF μονάδα ραδιοσυχνότητας συνδέει τη μονάδα βασικής ζώνης με το σύστημα κεραιών, και περιλαμβάνει ψηφιακή επεξεργασία και τους ενισχυτές που είναι απαραίτητοι για την εκπομπή. Η μονάδα ελέγχου παρέχει εργαλεία διάρθρωσης (configuration) και διαχείρισης , και χειρίζεται τους συναγερμούς (alarms) και τις προειδοποιήσεις (logs). Η μονάδα μεταφοράς παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς για τα δεδομένα που ανταλλάσσονται ανάμεσα στο σταθμό βάσης και στο δίκτυο πυρήνα ( μαζί με μηνύματα ελέγχου όπως για παράδειγμα διαπομπής). Το σύστημα ψύξης διατηρεί την απαραίτητη θερμοκρασία για τη σωστή λειτουργία των συσκευών. Η μονάδα παροχής ενέργειας παρέχει στο σταθμό βάσης συνεχή και σταθερή ηλεκτρική ισχύ , και μπορεί να περιλαμβάνει γεννήτριες ( ηλιακά πάνελς και ντίζελ) και ένα μετατροπέα τάσης AC/DC.

Πρέπει να επισημανθεί επίσης ότι ένας σταθμός βάσης μπορεί να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες RF μονάδες για διαφορετικές ζώνες, για διαφορετικές 2G/3G τεχνολογίες, ή για πολλαπλή κάλυψη τομέων. Επίσης, base band μονάδες μπορεί να μοιράζονται ανάμεσα σε σταθμούς βάσης, άρα είναι δυνατόν να αναπτυχθούν απλοί σταθμοί βάσης που αποτελούνται από την RF μονάδα, σύστημα κεραιάς και παροχή ενέργειας.

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα η επεξεργασία σήματος, η μεταφορά και οι λειτουργίες ελέγχου καταναλώνουν ένα πολύ μικρό ποσό ενέργεια σε σχέση με τους ενισχυτές στην RF μονάδα και τη μονάδα ψύξης. Στον πίνακα 5 συνοψίζονται το κόστος κάθε μονάδας ενός σταθμού βάσης αλλά και η βελτίωση που θα υπάρξει με την υιοθέτηση των τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν. Φυσικά ανάλογα με τη μονάδα το ποσοστό είναι διαφορετικό και συνολικά η εξοικονόμηση μπορεί να φτάσει σε ποσοστό από 50 έως 68%.

	Ποσοστό κόστους σε παραδοσιακούς σταθμούς βάσης	Σχετική εξοικονόμηση με τις τεχνολογικές εξελίξεις	Απόλυτη εξοικονόμηση με τις τεχνολογικές εξελίξεις
Έλεγχος και μετάδοση	≤5%	≤60%	≤3%
Ψηφιακή επεξεργασία	≤10%	≤50%	≤5%
Ενισχυτές (RF)	30-60%	~40%	~15%
Σύστημα κεραιών	15-20%	~50%	~10%
Air conditioning	10-25%	100%	10-25%
AC/DC	~10%	100%	~10%
Σύνολο	100%	N/A	50-68%

Πίνακας 5 : Λειτουργικό κόστος συγκριτικά με ένα σταθμό βάσης που υιοθετεί τις πράσινες τεχνολογικές εξελίξεις.[7]

#### 4.3 Πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας

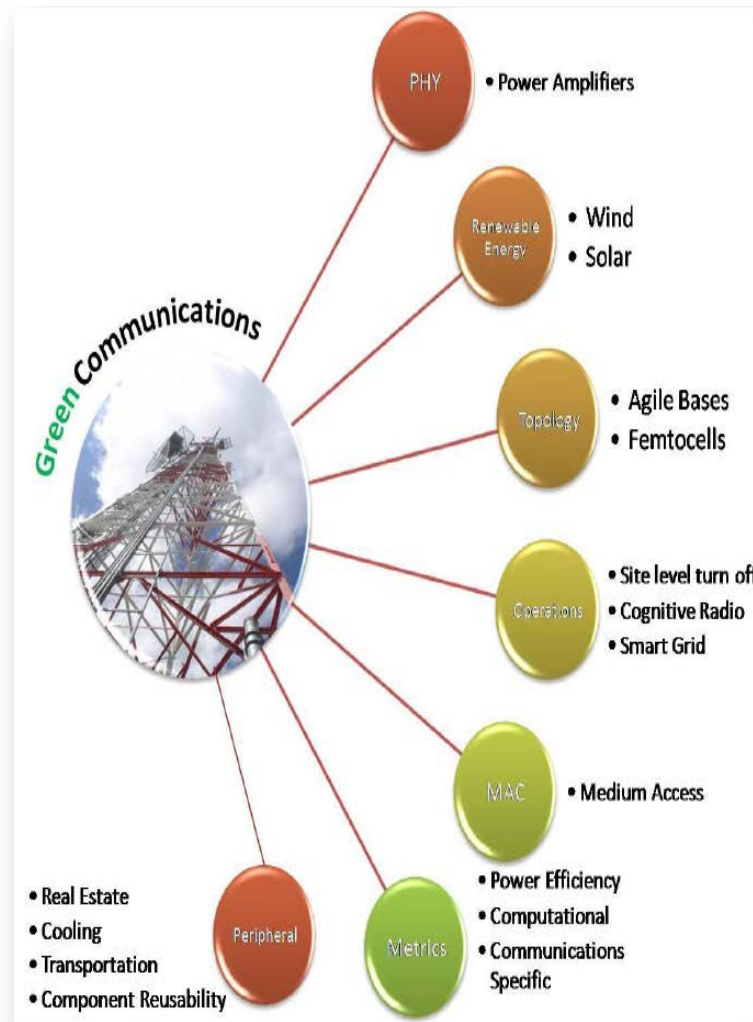
Στην παρούσα κυβελωτή αρχιτεκτονική δικτύου που βασίζεται στο WCDMA/HSPA , οι σταθμοί βάσης και τα κινητά τερματικά είναι υποχρεωμένα να εκπέμπουν συνεχώς πιλοτικά σήματα. Τα πιο πρόσφατα πρότυπα όπως LTE, LTE- advanced και WiMAX έχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις διακίνησης δεδομένων. Λόγω αυτών των απαιτήσεων, παρόλο που οι σταθμοί βάσης και οι κινητές μονάδες (MU) έχουν νέο hardware, όπως για παράδειγμα MIMO ( multiple into multiple output) κεραιές, αυξημένη αποδοτικότητα φάσματος που επιτρέπει να εκπέμπονται περισσότερα δεδομένα με την ίδια ενέργεια, η κατανάλωση ενέργειας είναι ένα σημαντικό θέμα για τα μελλοντικά υψηλής ταχύτητας δεδομένων δίκτυα και απαιτούνται εξελίξεις στην εξοικονόμηση ενέργειας μαζί με το υλικό κυκλωμάτων και τα πρωτόκολλα.

Ένας τρόπος να εξοικονομηθεί ενέργεια είναι να κλείνουν οι πομποί όταν δεν χρειάζεται αποστολή ή λήψη. Το LTE πρότυπο εισάγει αυτό τον τρόπο με πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας όπως μη συνεχής λήψη (discontinuous reception DRX) και μη συνεχής εκπομπή (discontinuous transmission DTX) modes για το κινητό hand set. Οι DTX και DRX είναι μέθοδοι που απενεργοποιούν τις συσκευές για εξοικονόμηση ενέργειας μένοντας παράλληλα συνδεδεμένες στο δίκτυο με μειωμένο ρυθμό μετάδοσης. Η συνεχής εκπομπή και λήψη στο WCDMA/HSPA καταναλώνει σημαντικό ποσό ενέργειας ακόμη και αν η ισχύς εκπομπού είναι πολύ κάτω από τα μέγιστα επίπεδα, συνεπώς τα παραπάνω πρωτόκολλα είναι μια ελκυστική προσθήκη. Το Mobile WiMAX έχει παρόμοιες διατάξεις για μηχανισμούς sleep mode σε κινητούς σταθμούς. Η συσκευή διαπραγματεύεται με τον BS και ο BS δεν προγραμματίζει τον χρήστη για εκπομπή ή λήψη όταν το ραδιοσύστημα είναι εκτός λειτουργίας. Υπάρχουν στο πρότυπο του WiMAX τρεις κλάσεις με διαφορετικούς on/off κύκλους.

Δυστυχώς, αυτά τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας για τους σταθμούς βάσης δεν έχουν συμπεριληφθεί στα τωρινά ασύρματα πρότυπα. Η κίνηση ανά ώρα σε μια κυψέλη μεταβάλλεται με το χρόνο και ο σταθμός βάσης βρίσκεται συχνά σε συνθήκες χαμηλού φόρτου, ειδικά κατά τις νυχτερινές ώρες. Στα μελλοντικά ασύρματα πρότυπα, η δυναμική εξοικονόμησης ενέργειας των σταθμών βάσης πρέπει να αξιοποιηθεί σχεδιάζοντας πρωτόκολλα για sleep mode σε σταθμούς βάσης. Θέτοντας εκτός λειτουργίας το ανενεργό hardware των σταθμών βάσης μπορεί να εξοικονομηθεί μεγάλο ποσό ενέργειας, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλού φόρτου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Ολιστική Ανάλυση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα



Εικόνα 16 : Πράσινες επικοινωνίες σε όλο το φάσμα του κύκλου Επικοινωνιών [13]

## 5.1 Εισαγωγή

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκαν οι νέες τεχνολογίες για ενεργειακή αποδοτικότητα σε μεμονωμένα επίπεδα μέσα στη στοίβα πρωτοκόλλων καθώς και στην αρχιτεκτονική συστήματος, στη διαχείριση λειτουργίας (operational management) και στα στοιχεία όπως οι ενισχυτές. Παρότι σημαντικές, αυτές οι πρόοδοι συχνά απομονώνονται μέσα σε μια στενή θεώρηση στον κύκλο λειτουργίας των τηλεπικοινωνιών. Μία ολιστική θεώρηση που περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση μεταξύ επιπέδων, καθώς και τις συσχετίσεις των μεμονωμένων εξελίξεων, θα επιφέρει τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα. Ο διαχωρισμός που υπάρχει στο κάθετο δίκτυο δημιουργεί εμπόδια για πραγματικά ρηξικέλευθες ενεργειακές βελτιώσεις. Για παράδειγμα, PHY επιπέδου μηχανικοί σπάνια συνεργάζονται με MAC επιπέδου προγραμματιστές. Έτσι, μειώνοντας τη χρήση των σταθμών βάσης κατά 15% έχουμε μείωση 39 εκατ. τόνων CO<sub>2</sub>, όμως οι μειώσεις αυτές πρέπει να συσχετιστούν με QoS απαιτήσεις και ανάγκες χρηστών.

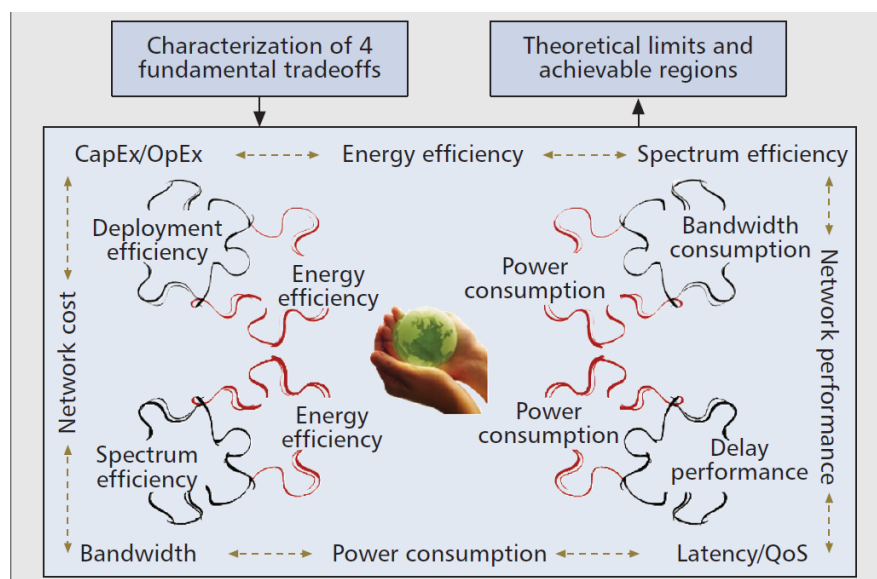
Η μελέτη των πράσινων επικοινωνιών χρειάζεται έρευνα σε πολλά πεδία όπως ενεργειακά αποδοτικό RF hardware, αποδοτικά MAC πρωτόκολλα, δικτύωση, εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στρατηγικές ανάπτυξης επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, και διαχείριση φάσματος. Η συσχέτιση ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα θα δημιουργήσει τις πραγματικά μετασχηματιστικές ανακαλύψεις στη μείωση ενεργειακής κατανάλωσης. Μία λοιπόν ολιστική θεώρηση και ανάλυση θα προσεγγιστεί στη συνέχεια αυτής της ενότητας.

## 5.2 Βασικές Αρχές αντισταθμισμάτων (trade offs)

Είναι βασικό να ενταχθούν οι ποικίλες τεχνικές για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα ασύρματα δίκτυα κάτω από ένα γενικό πλαίσιο. Για αυτό το σκοπό προτείνονται τέσσερα βασικά αντισταθμίματα, όπως απεικονίζονται στην εικόνα 17 :

- Αποδοτική Ανάπτυξη (Deployment Efficiency DE) - Ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Efficiency EE) αντιστάθμισμα : ώστε να εξισορροπηθεί το κόστος ανάπτυξης, μέγιστου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, και της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου ως σύνολο
- Αποδοτικότητα φάσματος (Spectrum Efficiency SE) - EE αντιστάθμισμα: για δεδομένο διαθέσιμο εύρος ζώνης, να εξισορροπηθεί ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης με την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος.
- Εύρος ζώνης (Bandwidth BW)- ισχύς (Power PW) αντιστάθμισμα: για ένα επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης, να εξισορροπηθεί το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται και η ισχύς που απαιτείται για τη μετάδοση.
- Καθυστέρηση (Delay DL) - PW αντιστάθμισμα : να εξισορροπηθεί η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση με τη μέση ισχύ που απαιτείται στη μετάδοση.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί το βασικό πλαίσιο με το οποίο τα τέσσερα αντισταθμίσιμα ενώνουν τις τεχνολογίες για πιο 'πράσινα' δίκτυα διαφορετικών πεδίων έρευνας , όπως σχεδιασμός δικτύου, διαχείριση πόρων, και σχεδιασμός συστήματος μετάδοσης φυσικού επιπέδου.



Εικόνα 17 : Τα 4 βασικά αντισταθμίσιμα [14]



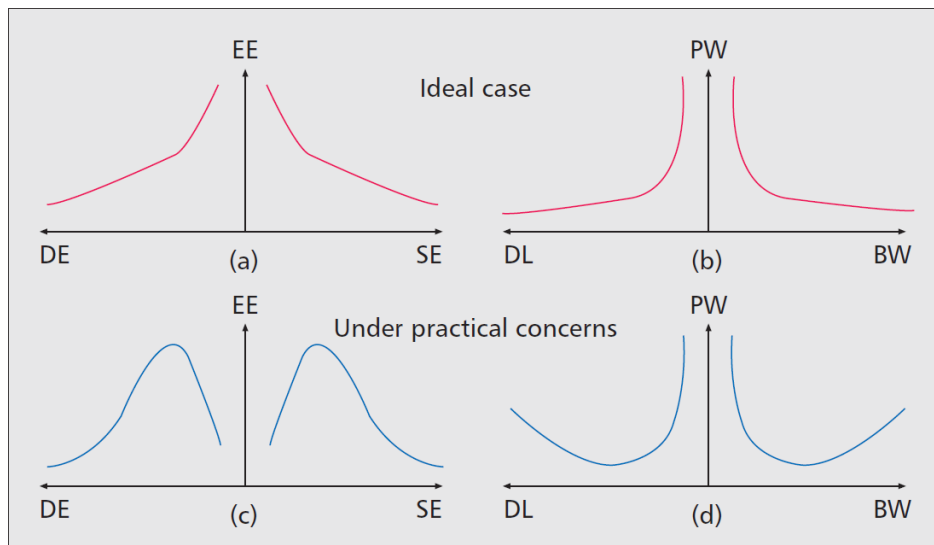
## DE-EE αντιστάθμισμα

DE, μια μέτρηση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης του συστήματος ανά μονάδα κόστους ανάπτυξης, αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη επίδοσης του δικτύου για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Το κόστος ανάπτυξης εμπεριέχει δαπάνες κεφαλαίου (capital expenditure CapEx) και λειτουργικές δαπάνες (operational expenditure OpEx) .Για τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης CapEx συνήθως περιέχει το κόστος υποδομής, όπως εξοπλισμό σταθμών βάσης, εγκατάσταση site, εξοπλισμός μετάδοσης,ελέγχου και διαχείρισης. Τα καίρια στοιχεία του OpEx είναι το κόστος ενέργειας, αδειοδότησης και κόστη διαχείρισης και συντήρησης. Συνήθως, γίνεται εκτίμηση των CapEx και OpEx κατά τη σχεδίαση του δικτύου. Αντίθετα συνήθως, ο EE υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου.

Οι δύο διαφορετικές μετρικές συχνά οδηγούν σε αντίθετα κριτήρια στο σχεδιασμό δικτύου. Για παράδειγμα, με στόχο να μειωθεί το κόστος στην ενοικίαση τόπου, στον εξοπλισμό σταθμού βάσης,και στη συντήρηση, οι μηχανικοί σχεδίασης δικτύου προσπαθούν να απλώσουν την κάλυψη κυψέλης όσο το δυνατόν περισσότερο. Ωστόσο, η απώλεια διαδρομής μεταξύ του σταθμού βάσης και κινητών χρηστών θα υποβαθμιστεί κατά 12 dB όταν η ακτίνα της κυψέλης διπλασιαστεί αν ο εκθέτης της απώλειας διαδρομής είναι τέσσερα, γεγονός που προκαλεί μια 12 dB αύξηση στην εκπεμπόμενη ισχύ ώστε να διατηρηθεί η ίδια ένταση σήματος στους χρήστες στα άκρα της κυψέλης. Στο άλλο άκρο, για παροχή κάλυψης σε μια δοσμένη περιοχή, η αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσεων θα ελαττώσει τη συνολική ισχύ κατά τον ίδιο παράγοντα. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την [15], συρρικνώνοντας την ακτίνα κυψέλης από 1000 m στα 250 m, η μέγιστη EE για ένα υψηλής ταχύτητας πακέτων δεδομένων high-speed data packet access (HSDPA) δίκτυο θα αυξηθεί από 0.11 Mb/J σε 1.92 Mb/J , που αντιστοιχεί σε 17.5 φορές αύξηση. Συνεπώς , για να ελαττωθεί η ενεργειακή κατανάλωση, οι μηχανικοί διαχείρισης ραδιοπόρων επιλέγουν ανάπτυξη με μικρού μεγέθους κυψέλες. Τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι πρέπει να υπάρξει ένα αντιστάθμισμα μεταξύ DE και EE, όπως φαίνεται στην διάγραμμα 3<sup>α</sup>, όπου κάθε σημείο αντιστοιχεί σε ένα μέγεθος κυψέλης, και πρέπει να επιλεχθεί ώστε να ισορροπεί ανάμεσα στις DE και EE απαιτήσεις. Ωστόσο, η μορφή της καμπύλης είναι σωστή όταν εξετάζεται μόνο η ισχύς εκπομπής, και όταν το κόστος ανάπτυξης αυξάνεται συνεχώς και αναλογικά με την ακτίνα κυψέλης. Στην πραγματικότητα:

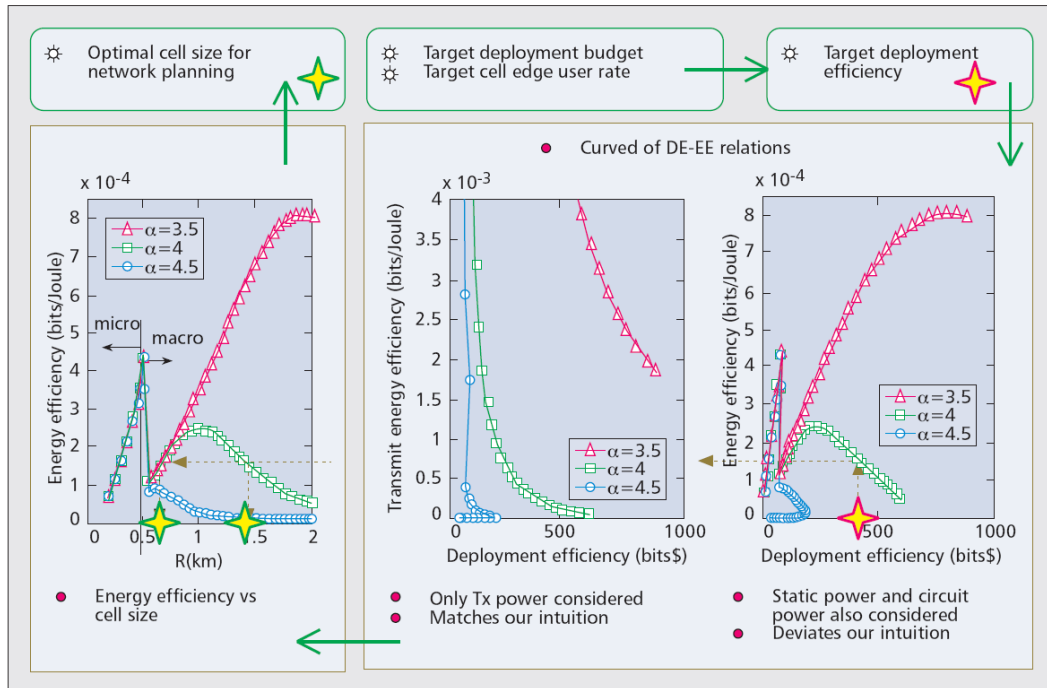
- Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι σταθμών βάσης , και το κόστος εξοπλισμού δεν μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος κυψέλης.

- Η συνολική ενέργεια δικτύου εμπειρικλείει και την εξαρτώμενη από μετάδοση ενέργεια (π.χ. ενός ενισχυτή) αλλά και την μη εξαρτώμενη από μετάδοση ενέργεια(π.χ. ενέργεια για ψύξη).



Διάγραμμα 3 : Σχέσεις των 4 αντισταθμισμάτων θεωρητικά και στην πράξη. [14]

Συνεπώς, η σχέση μεταξύ των DE και EE μπορεί να αποκλίνει από την απλή αντισταθμιστική καμπύλη και γίνεται πιο περίπλοκη όταν εξεταστούν πρακτικά ζητήματα [16]. Το διάγραμμα 4 συνοψίζει τα συνολικά αποτελέσματα της [16]. Από το δεξιότερο διάγραμμα είναι φανερό ότι δεν μπορεί πάντα να υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ DE και EE, και η μορφή της DE/EE καμπύλης εξαρτάται από συγκεκριμένα σενάρια ανάπτυξης. Για το προαστιακό σενάριο, όπου ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι μικρός (περίπου 3.5), η EE δικτύου σχεδόν αυξάνεται με την DE. Για το πυκνό αστικό σενάριο, όπου ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι μεγάλος(περίπου 4.5), δύο διαφορετικές EE τιμές μπορεί να προκύψουν για μια τιμή DE, αντίστοιχα σε πολύ μικρή και πολύ μεγάλη ακτίνα κυψέλης. Αυτό προκύπτει λόγω της μεγάλης αύξησης του CapEx αυξάνοντας τον αριθμό των sites λόγω μικρής ακτίνας, ενώ για μεγάλη ακτίνα λόγω του απότομα αυξημένου λογαριασμού ηλεκτρικού στο OpEx.



Διάγραμμα 4 : Αποτελέσματα της σχέσης DE-EE για διαφορετικούς εκθέτες απώλειας διαδρομής  $\alpha$ . [16]

Χαρακτηρίζοντας τις καμπύλες DE/EE με πρακτικούς όρους είναι χρήσιμο στο πραγματικό σχεδιασμό δικτύου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4, για κάθε επιθυμητό μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δικτύου και δεδομένο προϋπολογισμό ανάπτυξης, μπορούμε αρχικά να υπολογίσουμε την αντίστοιχη αποδοτικότητα ανάπτυξης, από την οποία μπορούμε να αποφασίσουμε την μέγιστη εφικτή αποδοτικότητα ενέργειας κοιτώντας την DE τιμή στην DE/EE καμπύλη, μετά από την καμπύλη της EE με ακτίνα κυψέλης, παίρνουμε το αντίστοιχο μέγεθος κυψέλης.

Μελλοντικά, οι έρευνες μπορούν να εστιάσουν στα εξής θέματα

- Βελτίωση των DE/EE ορίων με προηγμένες αρχιτεκτονικές δικτύου.
- κοινή αρχιτεκτονική σχεδίαση με προηγμένα σενάρια μετάδοσης και αλγόριθμους για να βελτιωθεί η DE/EE αντισταθμιστική σχέση του δικτύου

### SE/EE αντιστάθμισμα

SE ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης του συστήματος ανά μονάδα εύρους ζώνης, είναι ένα ευρέως αποδεκτό κριτήριο για βελτιστοποίηση ασύρματου δικτύου. Η μέγιστη τιμή του SE είναι πάντα ανάμεσα στους

βασικούς δείκτες απόδοσης της 3GPP επανάστασης. Για παράδειγμα, ο στόχος κάτω ζεύξης του SE στο 3GPP αυξάνεται από 0.05 b/s/Hz σε 5 b/s/Hz αν το σύστημα εξελιχθεί από GSM σε LTE. Αντίθετα, η ΕΕ προσφάτως αγνοήθηκε από τις περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες και δεν θεωρήθηκε από τη 3GPP σαν ένας σημαντικός δείκτης επίδοσης μέχρι προσφάτως. Καθώς η 'πράσινη' επανάσταση γίνεται μια γενική τάση, η ενεργειακά αποδοτική εκπομπή γίνεται όλο και πιο σημαντική. Δυστυχώς, SE και ΕΕ δεν είναι πάντα διακριτές και κάποιες φορές συγκρούονται μεταξύ τους. Συνεπώς, το πως θα ισορροπήσουν οι δύο μετρικές στα μελλοντικά συστήματα απαιτεί προσεκτική μελέτη. Για να χαρακτηρίσουμε το SE/ΕΕ αντιστάθμισμα στην από άκρο σε άκρο μετάδοση σε κανάλια με προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN), ο τύπος χωρητικότητας του Shannon παίζει ένα ρόλο κλειδί. Από τον τύπο του Shannon υπολογίζεται ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης R, με μια δοσμένη ισχύ εκπομπής P, και το εύρος ζώνης συστήματος W,

$$R = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{W N_0} \right) \quad (8)$$

Όπου  $N_0$  είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του AWGN.

Σύμφωνα με τους ορισμούς, SE και ΕΕ μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$n_{SE} = \log_2 \left( 1 + \frac{P}{W N_0} \right) \quad (9)$$

$$\text{και } n_{EE} = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{W N_0} \right) / (P), \quad (10)$$

αντίστοιχα. Συνεπώς η σχέση μεταξύ τους μπορούν να εκφραστεί ως εξής:

$$n_{EE} = \frac{n_{SE}}{(2^{n_{SE}} - 1) N_0} \quad (11)$$

που είναι σχεδιασμένη στο διάγραμμα 3α.

Από την παραπάνω έκφραση, το ΕΕ τείνει σε μια σταθερά,  $1/(N_0 \ln 2)$  όταν το SE τείνει στο μηδέν. Απεναντίας, το ΕΕ τείνει στο μηδέν όταν το SE τείνει

στο άπειρο. Σε πραγματικά συστήματα, ωστόσο, η σχέση SE-EE δεν είναι τόσο απλή όσο στην παραπάνω εξίσωση. Συγκεκριμένα, η ενέργεια κυκλωμάτων θα σπάσει τη μονοτονική σχέση ανάμεσα σε SE και EE. Με μεγαλύτερη ακρίβεια, αν η ενέργεια κυκλωμάτων ληφθεί υπόψιν, τότε η καμπύλη SE-EE αποκτά ένα σχήμα καμπάνας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3γ. Από την [17], οι συνθήκες μετάδοσης και στρατηγικές, όπως η απόσταση εκπομπής, διαμόρφωση, κωδικοποίηση, αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων έχουν μια σημαντική επίδραση στο αντιστάθμισμα SE και EE.

Παρ' όλα αυτά, η σχέση SE-EE από την εξίσωση 11 περισσότερο αντιστοιχεί σε μια από άκρου σε άκρο εκπομπή παρά σε ένα δίκτυο. Περαιτέρω ανάλυση στις ενεργειακά αποδοτικές πολιτικές εκπομπής προβλέπεται να επιφέρει περισσότερα κέρδη και είναι σημαντική και για το περιβάλλον αλλά και στη σταθερή ανάπτυξη των μελλοντικών κυψελωτών συστημάτων. Παραδείγματα των μελλοντικών θεμάτων έρευνας μπορούν να περιλαμβάνουν τις ακόλουθες πτυχές:

- Χαρακτηρίζοντας το SE-EE αντιστάθμισμα με πρακτικούς περιορισμούς υλικού
- Μελετώντας το SE-EE αντιστάθμισμα δικτύου σε περιβάλλοντα πολλαπλών χρηστών / πολλαπλών κυψελών.
- Κοινός σχεδιασμός των συστημάτων εκπομπής φυσικού επιπέδου και στρατηγικών διαχείρισης πόρων που θα βελτιώσει το αντιστάθμισμα SE-EE δικτύου.

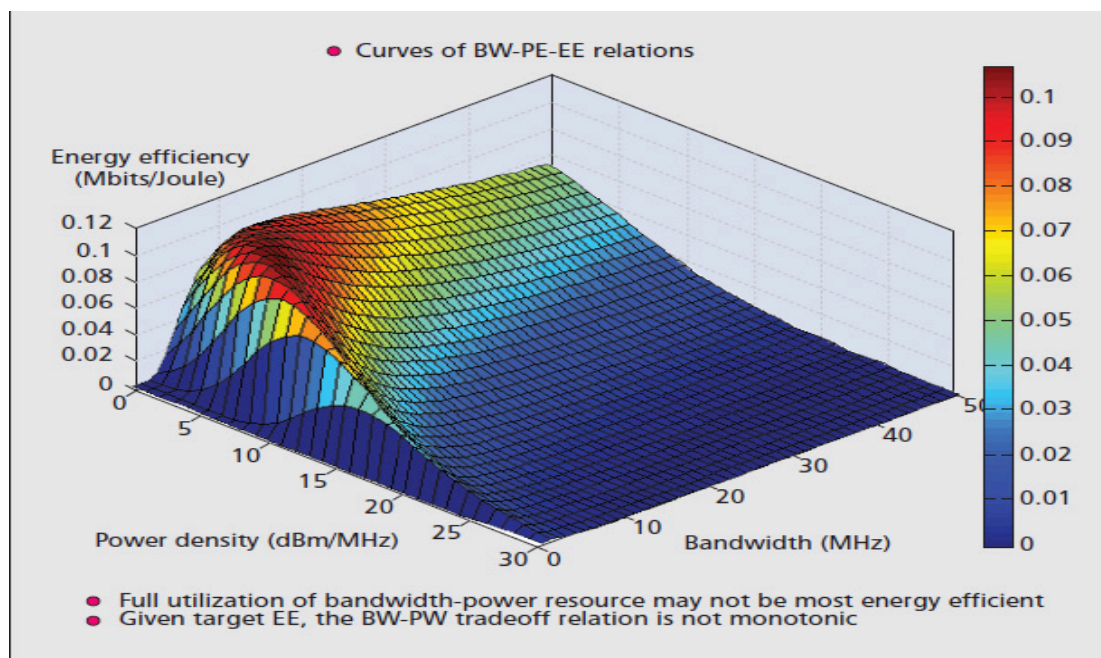
### **BW/PW αντιστάθμισμα**

Εύρος ζώνης και PW είναι οι πιο σημαντικοί μα περιορισμένοι πόροι στις ασύρματες επικοινωνίες. Από τον τύπο χωρητικότητας του Shannon, η σχέση μεταξύ της εκπεμπόμενης ισχύος και εύρος ζώνης σήματος για ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης, R, μπορεί να εκφραστεί ως

$$P = W N_0 \left(2^{\frac{R}{W}} - 1\right) \quad (12)$$

Η παραπάνω έκφραση δείχνει μια μονοτονική σχέση μεταξύ  $PW$  και  $BW$  όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3b. Μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας είναι  $N_0 R \ln 2$  όταν δεν υπάρχει όριο στο εύρος ζώνης. Η σχέση  $BW$ - $PW$  δείχνει ότι για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, η επέκταση του εύρους ζώνης σήματος προτιμάται με σκοπό να μειωθεί η εκπεμπόμενη ισχύς και άρα να επιτευχθεί καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα. Για τη ακρίβεια, η επανάσταση στα ασύρματα συστήματα συνεχίζει την ίδια τάση για απαίτηση εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, στα GSM συστήματα, το εύρος ζώνης ανά φέρον είναι 200 kHz όταν είναι 5 MHz στα UMTS συστήματα. Στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα, όπως LTE ή LTE advanced, το εύρος ζώνης συστήματος είναι 20 MHz και μπορεί να φτάσει τα 100 MHz σε κάποιες τεχνικές.

Η  $BW$ - $PW$  σχέση είναι επίσης βασική στη διαχείριση ραδιοπόρων. Στην [18], έχει αξιοποιηθεί ο καθορισμός της 'πράσινης' στρατηγικής εκπομπής, που αρχικά ανιχνεύει και αθροίζει το αχρησιμοποίητο φάσμα με στρατηγικές γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας (CR) και στη συνέχεια προσαρμόζει το ρυθμό διαμόρφωσης ανάλογα με το διαθέσιμο  $BW$  κάθε φορά. Παρόλα αυτά, σε πρακτικά συστήματα, η ενεργειακή κατανάλωση κυκλωμάτων, όπως απώλειες φίλτρων, στην πραγματικότητα κλιμακώνεται με την  $BW$  συστήματος, που συσχετίζει την σχέση  $BW$  και  $PW$  όπως φαίνεται στην εικόνα 2d. Επιπροσθέτως, το διάγραμμα 5 παρουσιάζει ένα οπτικό παράδειγμα της τρισδιάστατης σχέσης μεταξύ  $PW$ ,  $BW$  και  $EE$ .



Διάγραμμα 5 : Αποτελέσματα της σχέσης  $BW$ - $PW$ - $EE$  για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης[18]

Από την εικόνα προκύπτουν οι εξής δύο παρατηρήσεις

- Αν η  $PW$  κυκλώματος μεταβάλλεται με το  $BW$  εκπομπής (για καθορισμένη πυκνότητα φάσματος ισχύος), η πλήρης αξιοποίηση των πόρων ισχύος φάσματος μπορεί να μην είναι ο πιο ενεργειακά αποδοτικός τρόπος για παροχή ασύρματης μετάδοσης κάτω από δεδομένο ρυθμό διάδοσης.
- Με δεδομένο στόχο  $EE$ , η σχέση  $BW-PW$  δεν είναι μονοτονική.

Παρόλο που το  $BW-PW$  αντιστάθμισμα επισημάνθηκε δεκαετίες πριν, υπάρχουν αρκετά ανοικτά θέματα που χρήζουν μελλοντικής διερεύνησης. Κάποια από αυτά είναι

- Εξελιγμένες τεχνικές για αντιστάθμισμα  $BW-PW$  με πρακτικές εφαρμογές
- Νέες αρχιτεκτονικές δικτύου και αλγόριθμους για βελτίωση του αντισταθμίσιμου  $BW-PW$ .

Όπως είναι γνωστό, τα δεύτερης γενιάς (2G) και 3G ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως το GSM και UMTS, χρησιμοποιούν δεδομένο  $BW$  εκπομπής, άρα σε αυτά τα συστήματα δεν είναι δυνατή η δυναμική  $BW$  προσαρμογή. Με την εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών, η μελλοντική ανάπτυξη των συστημάτων LTE ή LTE-Advanced παρέχουν μεγαλύτερη ελαστικότητα χρήσης φάσματος έτσι ώστε το  $BW$  εκπομπής να μπορεί να ρυθμιστεί για διαφορετικές εφαρμογές. Ταυτόχρονα, τεχνολογίες όπως ανανέωση (refarming) φάσματος, συνάθροιση φέροντος (carrier aggregation, CA), και software defined radio (SDR) έχουν ωριμάσει για να υποστηρίξουν την ευέλικτη χρήση του  $BW$ . Παρόλα αυτά, η εκτέλεση και ολοκλήρωση αυτών των τεχνολογιών θα δημιουργήσει επιπλέον επίβαρο (overhead) στην πρακτική εφαρμογή στα συστήματα. Για παράδειγμα, CA απαιτεί αλυσίδες πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων (RF) και CR χρειάζεται επιπλέον ενέργεια για ανίχνευση (sensing). Συνεπώς, πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή στο πως αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να ολοκληρωθούν αποδοτικά.

Από την άλλη, η ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής προηγμένων δικτύων μπορεί επίσης να αλλάξει τη μορφή του συνόρου του  $BW-PW$  αντισταθμίσιμου. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των CoopNet και HetNet εισάγει επιπλέον κόμβους υποδομής μέσα στο δίκτυο.

Συνεπώς, η σχεδίαση για  $BW$  και  $PW$  θα είναι διαφορετική απότι σε συμβατικές αρχιτεκτονικές δικτύων. Συνεπώς, το  $BW-PW$  αντιστάθμισμα

με εξελιγμένους αλγόριθμους διαχείρισης πόρων σε νέες αρχιτεκτονικές δικτύων χρειάζεται να ερευνηθεί στο μέλλον. Επιπροσθέτως, με το συνδυασμό των CA και CR τεχνικών, διαεπιπεδικές προσεγγίσεις που συνθετικά λαμβάνουν υπόψιν δυναμική BW λειτουργία και BW-PW αντιστάθμισμα θα παίξουν σημαντικό ρόλο στη μελλοντική σχεδίαση.

### **DL-PW αντιστάθμισμα**

Στα αντισταθμίσιμα που περιγράφονται παραπάνω, οι μετρικές όπως DE, SE και BW, αφορούν είτε αποδοτικότητα συστήματος είτε πόρων, που αναφέρονται περισσότερο στο φυσικό επίπεδο. Διαφέροντας από αυτές τις μετρικές, DL (καθυστέρηση), γνωστός και σαν service latency, είναι μια μέτρηση του QoS και της εμπειρίας χρήστη και είναι πιο κοντά στα ανώτερα επίπεδα (τύπους κίνησης και στατιστικών). Σαν αποτέλεσμα, η σχεδίαση των συστημάτων πρέπει να ανταπεξέλθει στις αβεβαιότητες και της κίνησης και του καναλιού, που κάνει τον χαρακτηρισμό του DL-PW αντισταθμίσιματος πιο πολύπλοκο.

Στα πρώτα συστήματα κινητής επικοινωνίας, όπως το GSM, οι τύποι υπηρεσίας ήταν πολύ περιορισμένοι και εστιάζονταν κυρίως στις επικοινωνίες ομιλίας. Η κίνηση που παράγεται στις υπηρεσίες ομιλίας είναι συνεχής και σταθερή, έτσι οι ρυθμοί κωδικοποίησης και τα συστήματα διαμόρφωσης είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Σε αυτή την περίπτωση, το DL μεταξύ του πομπού και του δέκτη κυρίως αποτελείται από χρόνο επεξεργασίας σήματος και καθυστέρηση διάδοσης. Συνεπώς, δεν υπάρχουν πολλά που χρειάζονται να γίνουν. Ωστόσο, οι τύποι των ασύρματων υπηρεσιών γίνονται διαφορετικοί καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται και η ικανότητα των κινητών τερματικών ενισχύει την δημοτικότητα της κινητής http υπηρεσίας, υπηρεσίες μηνυμάτων πολυμέσων και υπηρεσίες πολυμέσων video. Τα μελλοντικά δίκτυα έχουν να διαχειριστούν ποικίλες εφαρμογές και ετερογενείς απαιτήσεις DL. Ως εκ τούτου, με σκοπό τη δημιουργία 'πράσινου' δικτύου, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πότε και πώς να συναλλασόμαστε ανεκτό DL για χαμηλή ισχύ.

Για να γίνει κατανοητό το DL-PW αντιστάθμισμα, αρχικά παίρνουμε την πιο απλή περίπτωση, εξαιρώντας την επίδραση και του καναλιού και της δυναμικής κίνησης. Για από άκρου σε άκρο εκπομπή σε AWGN κανάλια, από τον τύπο του Shannon



$$R = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{WN_0} \right) \quad (13)$$

Bits πληροφορίας μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο, άρα, χρειάζεται χρόνος  $t_b = 1/R$  s για να μεταδοθεί ένα bit. Ως εκ τούτου, η μέση ισχύς ανά bit μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_b = WN_0 t_b \left( 2^{\frac{1}{t_b W}} - 1 \right). \quad (14)$$

Η παραπάνω έκφραση δείχνει μια σχέση μονοτονικής μείωσης μεταξύ της ανά bit  $PW$  και  $DL$  όπως φαίνεται στην εικόνα 2b. Επίσης σημειώνουμε ότι

$$\frac{1}{t_b W} = \frac{R}{W} \quad (15)$$

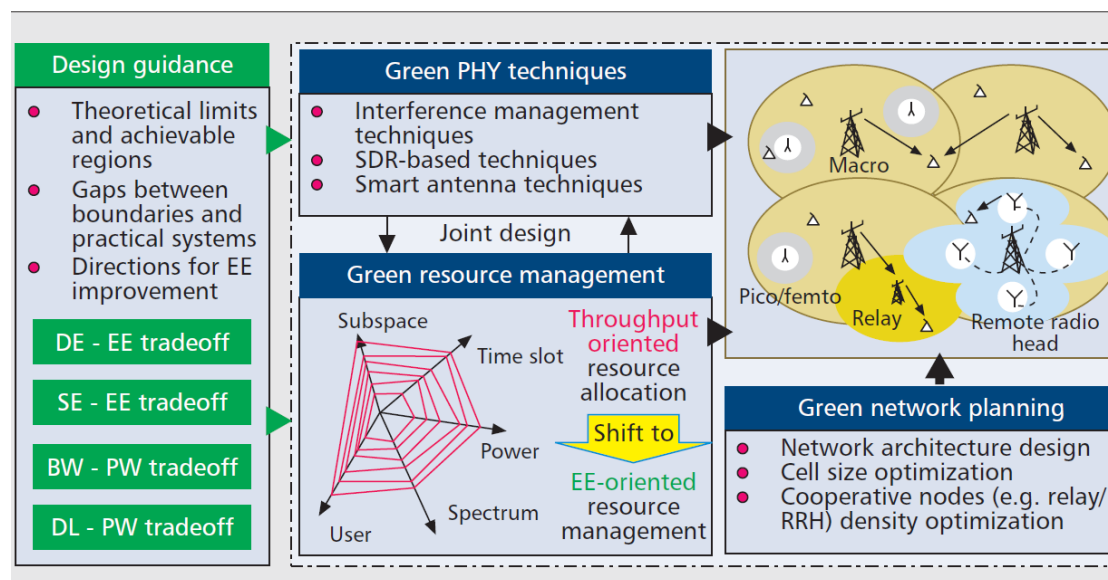
μπορεί να θεωρηθεί σαν το επίπεδο διαμόρφωσης για ένα μη κωδικοποιημένο τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Η εκπεμπόμενη ισχύς ανά bit ελαττώνεται καθώς το επίπεδο διαμόρφωσης μειώνεται. Ωστόσο, όπως και στις άλλες τρεις σχέσεις των αντισταθμισμάτων, όταν ληφθούν υπόψιν πρακτικά θέματα, όπως ισχύς κυκλωμάτων, η σχέση αντισταθμίματος παύει να είναι μονοτονική και μοιάζει περισσότερο με σχήμα κούπας όπως στο διάγραμμα 3d.

Η  $DL/PW$  σχέση με δυναμική κίνησης είναι πιο περίπλοκη. Σε αυτή την περίπτωση, η υπηρεσία  $DL$  πρέπει να εμπεριέχει μαζί την αναμονή χρόνου στην ουρά κίνησης και στο χρόνο για μετάδοση. -το άθροισμα και των δύο είναι επίσης γνωστό σαν queuing  $DL$ . Επιπροσθέτως, όταν η ροή κίνησης λαμβάνεται υπόψιν, το μέσο  $DL$  ανά πακέτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του μέσου  $DL$  ανά bit.

Τα αποτελέσματα αφορούν μόνο την από άκρου σε άκρο μετάδοση και περισσότερα ανοικτά θέματα χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση, όπως:

- $DL-PW$  αντιστάθμισμα για ετερογενή  $DL$  απαιτήσεις σε σενάρια πολλαπλών χρηστών/πολλαπλών κυψελών

- Κοινή σχεδίαση για εκπομπή φυσικού επιπέδου και διαχείρισης πόρων για βελτίωση του αντισταθμίματος DL-PW με εξέταση σε πρακτικά θέματα
- Απλοποιημένα και διορατικά αλλά παράλληλα προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα για σχέση DL-PW



Εικόνα 18 : Μία σύνοψη που δείχνει πως το βασικό πλαίσιο οδηγεί σε συγκεκριμένη σχεδίαση συστήματος [14]

### 5.3 Cross Layer (δια επιπεδική) σχεδίαση για ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών έχουν ακολουθήσει παραδοσιακά μία αρχιτεκτονική επιπέδων όπου συγκεκριμένες λειτουργίες είναι εντελώς διαχωριστές. Αυτή η αρχιτεκτονική απλοποιεί τη συνολική σχεδίαση και ανάπτυξη, από την άλλη όμως μια δια επιπεδική σχεδίαση θα μπορούσε να δημιουργήσει κέρδη επιδόσεων σχεδιάζοντας πρωτόκολλα με αλληλεπίδραση ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα. Ενεργειακή αποδοτικότητα και ασφάλεια είναι δύο τομείς που θα κερδίσουν από μια τέτοια σχεδιαστική στρατηγική που συνδέει το PHY επίπεδο με το MAC επίπεδο ή άλλες δικτυακές λειτουργίες.

Η δια επιπεδική σχεδίαση για κατανομή πόρων έχει εφαρμοστεί στα 3G δίκτυα με την προοπτική της βελτιστοποίησης radio πόρων μέσα στους BER (bit error rate) περιορισμούς. Σε αυτή τη μελέτη, η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα επίπεδα πρωτοκόλλων παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις ιδιαίτερα σε ετερογενή δεδομένα και video υπηρεσίες. Η δια επιπεδική ανάλυση μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που οδηγείται από μία ενεργειακά αποδοτική οπτική. QoS και χωρητικότητα είναι

τυπικές μετρήσεις που καθοδηγούν τις καθημερινές λειτουργίες κυψελωτών συστημάτων. Αυτές οι μετρήσεις αξιολογούνται έξω από τη συνολική στοίβα πρωτοκόλλων, όταν η ενεργειακή αποδοτικότητα συνήθως μετράται στο χαμηλότερο ΡΗΥ επίπεδο. QoS περιορισμοί ερευνώνται με συγκεκριμένο στόχο την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας.

Συνήθως QoS παράμετροι όπως για παράδειγμα η μέση αναμενόμενη καθυστέρηση συσχετίζονται με κέρδος καναλιού. Αν η καθυστέρηση περιοριστεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο σε όλα τα κέρδη καναλιών τότε η μέση ενέργεια μπορεί να ελαχιστοποιηθεί απέναντι σε ένα δεδομένο περιορισμό καθυστέρησης. Επιβάλλοντας αυτόν τον πιο σφικτό περιορισμό καθυστέρησης, η μείωση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μέσω δια επιπεδικού σχεδιασμού και κωδικοποίησης πηγής-καναλιού σε αντίθεση με την τυπική μεθοδολογία ελέγχου ισχύος.

Τα κυψελωτά ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν διαφορετικά είδη εφαρμογών, φωνή και δεδομένα. Κάθε εφαρμογή έχει ένα διαφορετικό ενεργειακό όριο, απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, BER (bit error rate), περιορισμούς καθυστέρησης, πιθανότητα διακοπής κ.α. Παραδοσιακά, αυτές οι απαιτήσεις προσπαθούν να επιτευχθούν μέσα σε μια διαεπιπεδική δομή, που καλείται στρώμα πρωτοκόλλων. Στην πραγματικότητα, έχει γίνει ένας σημαντικός αριθμός ερευνών που ασχολείται με αυτά τα προβλήματα σε κάθε επίπεδο, υποθέτωντας ότι κάθε επίπεδο λειτουργεί ανεξάρτητα από τα άλλα. Παραδείγματα αυτών των προσπαθειών στο φυσικό επίπεδο είναι οι MIMO (Multiple Input Multiple Output) τεχνικές, η κωδικοποίηση καναλιού, ο έλεγχος ισχύος και οι τεχνικές προσαρμοστικής κατανομής πόρων. Στο MAC επίπεδο, μπορούν να αναφερθούν ο διαφορετικός καταμερισμός σε κανάλια ή τυχαία συστήματα πρόσβασης, μαζί με χρονοπρογραμματισμό (scheduling) και ο έλεγχος ισχύος. Επιπλέον, σχετικά με το επίπεδο δικτύου, μεγάλη βιβλιογραφία μπορεί να βρεθεί σε σχέση με τη δρομολόγηση με περιορισμούς - ενέργειας και με περιορισμούς - καθυστέρησης. Τελικά, προσαρμόζοντας τις QoS απαιτήσεις των χρηστών είναι το ζητούμενο στο επίπεδο εφαρμογής.

Η λογική πίσω από τη χρησιμοποίηση της στοίβας πρωτοκόλλων είναι ότι βοηθά το σχεδιαστή να σπάσει το πρόβλημα σχεδίασης σε μικρότερα απλούστερα προβλήματα, που καλούνται στρώματα δομοστοιχείων (layer modules). Αυτή η λογική επίσης κάνει την εκτίμηση των προτεινόμενων αλγόριθμων ευκολότερη. Παρόλα αυτά, ο περιορισμός το κάθε στρώμα να είναι ανεξάρτητο από τα άλλα και η υπο-βελτιστοποίηση των δομοστοιχείων

οδηγεί σε μία φτωχή επίδοση, ειδικά όταν οι πόροι όπως η ενέργεια είναι σπάνιοι[19]. Συνεπώς, η διαστρωματική σχεδίαση μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε όλη τη στοίβα πρωτοκόλλων. Στην διαστρωματική σχεδίαση η προσπάθεια έγκειται στο να ξεφύγουμε από την παραδοσιακή θεώρηση της στοίβας πρωτοκόλλων. Ο σκοπός είναι όχι μόνο να εξεταστούν οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων, αλλά και να τις εκμεταλλευτούμε. Πιο συγκεκριμένα, για σκοπούς ενεργειακής εξοικονόμησης, είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας στα κυψελωτά δίκτυα. Λόγω της κινητικότητας των χρηστών, και επίσης λόγω χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού μαζί με τη φύση των νέων εφαρμογών, το περιβάλλον διάδοσης και οι απαιτήσεις των εφαρμογών είναι χρονικά μεταβλητές. Συνεπώς, πιο ολιστικοί αλγόριθμοι ελέγχου με διαστρωματική σκοπιά πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να προσαρμόζονται στη δυναμική του συστήματος στον τρέχοντα χρόνο. Πηγαίνοντας προς αυτήν την κατεύθυνση είναι εφικτό να σχεδιασθούν πιο 'πράσινα' κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών από τα σημερινά[20]. Ωστόσο, αν δεν δοθεί προσοχή η διαστρωματική σχεδίαση μπορεί να οδηγήσει η ίδια σε αυξημένη πολυπλοκότητα και ενεργειακή κατανάλωση. Έτσι, θα έπρεπε να ερευνηθούν εναλλακτικές προτάσεις που να αφορούν ένα μεμονωμένο στρώμα (PHY, MAC..) και να αναλυθούν τα σημαντικά αντισταθμίσιμα ανάμεσα σε ενεργειακή κατανάλωση και επίδοση συστήματος. Οι πολλαπλοί αναμεταδότες στη συνεργατική επικοινωνία και μηχανισμοί ανίχνευσης φάσματος σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας εισάγουν νέες προκλήσεις στη διαστρωματική σχεδίαση αυτών των δικτύων.

Ένας από τους στόχους που πρέπει να επιτύχουν τα συστήματα διαστρωματικότητας είναι να επιτρέψουν κοινή βελτιστοποίηση μερικών ή όλων των παρακάτω παραμέτρων : ανάθεση φερόντων, ρυθμών, και ισχύος (χαρακτηριστικά φυσικού επιπέδου) , μηχανισμοί πρόσβασης καναλιού ( χαρακτηριστικά MAC επιπέδου), δρομολόγησης (χαρακτηριστικό επιπέδου δικτύου) και ρυθμών(χαρακτηριστικό επιπέδου μεταφοράς) συνυπολογίζοντας συσχετισμένα λάθη συστήματος (π.χ ανίχνευση σφαλμάτων στην γνωσιακή ραδιοεπικοινωνία) και άλλα σφάλματα που συμβάλλουν σε θέματα διαστρωματικότητας. Περαιτέρω, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα ad-hoc ασύρματο δίκτυο,περισσότερα πακέτα θα πρέπει να μεταδίδονται όταν η ποιότητα καναλιού είναι καλή και παράλληλα οι απώλειες σύγκρουσης χρόνου λόγω της συμφόρησης του δικτύου πρέπει να μειωθούν ώστε τα πακέτα να μη χρειαστεί να επαναμεταδοθούν.Με αυτό το στόχο πρέπει να ερευνηθούν νέοι μηχανισμοί για γνωσιακή ραδιοεπικοινωνία και συνεργαζόμενα ad-hoc δίκτυα με τους οποίους η κίνηση καναλιού μπορεί να μετρηθεί με overhead σηματοδότησης μονού -bit ή πολλαπλού-bit ή με

απώλειες ή με καθυστέρηση στο δίκτυο. Ενεργειακά αποδοτικά συστήματα διαστρωματικότητας που βελτιστοποιούν πόρους σε διάφορα στρώματα συνυπολογίζοντας την ποιότητα καναλιού όπως και την κίνηση δικτύου πρέπει να εξεταστούν.

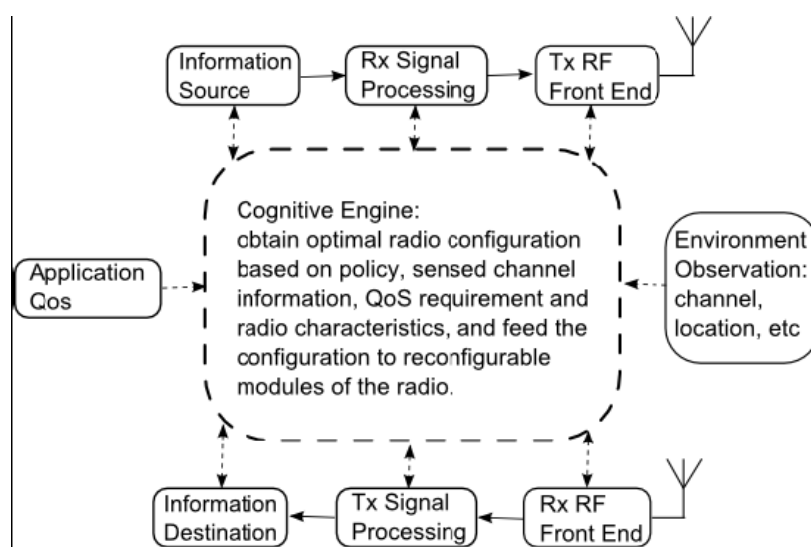
Ένα παράδειγμα όπου η διαστρωματική σχεδίαση είναι μεγάλης σημασίας , είναι στη χρήση της συνεργατικής αναμετάδοσης για βελτίωση του διαφορισμού φάσματος σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας[21]. Μεγάλα κέρδη σε αποδοτικότητα και δικαιοσύνη του μοιράσματος πόρων μπορεί να επιτευχθεί με συνεργασία ανάμεσα στους κόμβους γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Συγκεκριμένα, κάποιιοι χρήστες γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας με χαμηλές ανάγκες κίνησης μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα φάσματος λειτουργώντας σαν αναμεταδότες για τους χρήστες που έχουν υψηλές ανάγκες κίνησης αλλά χαμηλό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Για ένα τέτοιο δίκτυο, η διαστρωματική σχεδίαση είναι σημαντική καθώς στην λειτουργία κατανομής πόρων(αναμετάδοση, ισχύς..) η απαίτηση εκπομπής από κάθε χρήστη γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας πρέπει να υπολογιστεί.

#### **5.4 Cognitive Radio(γνωσιακή ραδιοεπικοινωνία) για ενεργειακή βελτιστοποίηση**

Cognitive Radio είναι ένα σχετικά καινούργιο παράδειγμα για τις τηλεπικοινωνίες που ενσωματώνει περιβαλλοντολογικές παρατηρήσεις με λήψη αποφάσεων και μάθηση ώστε να εξελιχθούν τα συστήματα επικοινωνίας. Η προοπτική των γνωστικών συστημάτων υπόσχεται πολλά στις πράσινες επικοινωνίες. Αξιοποιώντας τις εξελίξεις στις θεμελιώδεις αρχιτεκτονικές με περιβαλλοντολογική σκοπιά, αλγόριθμοι πραγματοποιήσιμης μάθησης και λήψης αποφάσεων μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα κυψελωτό σύστημα. Οι παρατηρήσεις μπορούν να περιλαμβάνουν RF μετρήσεις όπως SNR , πληρότητα καναλιών παράλληλα με QoS και ανάγκες χρήστη. Επιπροσθέτως, η παρατήρηση της χρήσης ενέργειας των σταθμών βάσης και η ανάλυση της αλληλεπίδρασης με το υποκείμενο ηλεκτρικό σύστημα έχει σημαντική δυναμική στη συμβολή για ένα έξυπνο δίκτυο ικανό για πιο ισορροπημένη κατανομή ενέργειας.

Αξιοποιώντας τις εξελίξεις στην αναπτυσσόμενη CR τεχνολογία, μία πρόταση για ένα ενεργειακά βελτιστοποιημένο πλαίσιο με χρήση CR φαίνεται στην εικόνα 19, με δυναμική εφαρμογή ευνοϊκών trade - offs για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για δεδομένη εφαρμογή και ράδιο περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, οι συνεχείς γραμμές με τόξα και τα blocks

στα σταθερά όρια είναι υπάρχοντα στοιχεία στις συμβατικές συσκευές ασύρματης επικοινωνίας. Οι διακεκομμένες γραμμές με τόξα και η γνωστική μηχανή (CE) block είναι καινούργια στοιχεία επιτρέποντας την CR ικανότητα να χρησιμοποιηθεί στα συμβατικά συστήματα. Οι διακεκομμένες γραμμές μεταξύ στον CE και στα διάφορα blocks είναι αμφίδρομες. Ο CE μαθαίνει τα χαρακτηριστικά και τις ικανότητες των building blocks και ελέγχει/ρυθμίζει τα blocks. Δύο επίπεδα λειτουργίας , προσαρμοστική εκπομπή με PA γνώση, και προσαρμοστική εκπομπή με προσαρμογή στοιχείων που έχουν προσομοιωθεί, έχουν δείξει ενεργειακές μειώσεις της τάξεως του 75% σε σχέση με τη συμβατική προσαρμοστική εκπομπή.



Εικόνα 19 : CR πλαίσιο για ενεργειακή βελτιστοποίηση [6]

## 5.5 Συντονισμένη διαχείριση για βελτίωση αποδοτικότητας

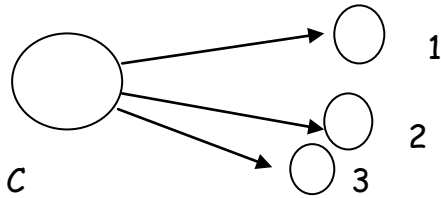
Η παραδοσιακή οπτική για το ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι ως ένα απομονωμένο δίκτυο χρηστών και σημεία πρόσβασης που ελέγχονται από διαφορετικούς παρόχους και από ιδιόκτητα συστήματα μεταγωγής. Καθώς κάθε κόμβος μπορεί να έχει ένα στόχο για βελτιωμένη συμπεριφορά στην χωρητικότητα, QoS και ενέργεια , οι ανάγκες του ολοκληρωμένου συστήματος πρέπει να εξισορροπηθούν με τους στόχους κάθε κόμβου. Επιπροσθέτως , κάθε σταθμός βάσης είναι μια ενεργειακά απαιτητική μονάδα του συνολικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η συντονισμένη διαχείριση και εξισορρόπηση φορτίου των σταθμών βάσης κάτω από ένα συνολικό έξυπνο δίκτυο έχει δυναμική θετική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας χωρίς απαραίτητως να επηρεάζει το QoS και τη χωρητικότητα. Πρόσφατες εξελίξεις στην ενσύρματη κατανομημένη υπολογιστική θεωρία δίνουν αρχικά

μοντέλα για αυτή την εφαρμογή σε ασύρματα δίκτυα και την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης και μεταξύ του συνολικού τηλεπικοινωνιακού δικτύου και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Η δυνατότητα εφαρμογής παρόμοιων σχεδίων σε ένα ασύρματο περιβάλλον έχει αρκετούς περιορισμούς, όπως οι διαφορετικές συνθήκες καναλιού, το διαμοιραζόμενο μέσο, και τα διαφορετικά κόστη επικοινωνίας. Συνεπώς, νέες μεθοδολογίες πρέπει να εφαρμοστούν σε ένα Wireless Network Distributed Computing (WNDC) αφού η απόδοση σε όρους εμβέλειας, ενεργειακή αποδοτικότητα και επεκτασιμότητα επηρεάζεται έντονα από το ραδιοπεριβάλλον. Ως εκ τούτου, WNDC σχεδίαση συστήματος περιλαμβάνει δια συστημική αλληλεπίδραση μεταξύ του υπολογιστικού υποσυστήματος ( επίπεδο που η υπολογιστική διαδικασία εκτελείται) και στο επικοινωνιακό υποσύστημα ( δικτύωση, ράδιοπρόσβαση και φυσικό επίπεδο). Μια τέτοια σύνθετη αλληλεπίδραση δημιουργεί πρόκληση να αναπτυχθούν WNDC πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές υπηρεσιών, κατανομή πόρων και υπολογιστικός φόρτος μαζί με εξοικονόμηση ενέργειας.

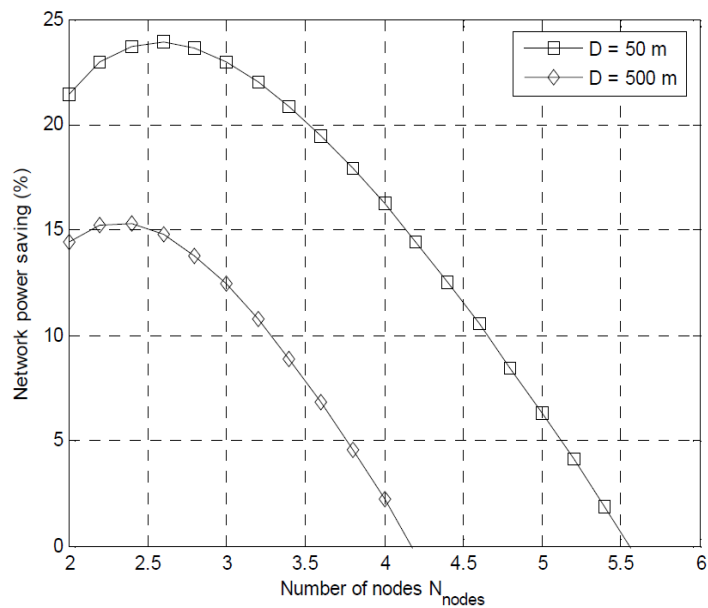
Ένα WNDC απαιτεί αντισταθμίσιμα (tradeoffs) μεταξύ του κατώτατου ραδιοδικτύου όπως και ανάμεσα στο επίπεδο δικτύου και εφαρμογών. Ένα σύνολο ραδιοσυστημάτων που συνεργάζονται για δικτυακά διανεμημένους υπολογισμούς\_προσφέρει σοβαρά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα μόνο ραδιοσύστημα, όπως: (1) χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση ανά κόμβο όπως και για το συνολικό δίκτυο, (2) συνεργασία για απαίτηση-προσφορά ενέργειας ,(3) υψηλής απόδοσης computing συνδυάζοντας τους υπολογιστικούς πόρους μέσα στο δίκτυο και (4) απλοποιημένο μικρού βαθμού κόμβο σχεδίασης με χαμηλότερο computing και ενεργειακούς πόρους ανά κόμβο. Κάθε κόμβος πρωτίστως περιλαμβάνει ενεργειακή παροχή, επικοινωνιακά και υπολογιστικά υποσυστήματα.

Το επικοινωνιακό υποσύστημα συνδέει τα υπολογιστικά υποσυστήματα σε ποικίλους κόμβους μέσω ασύρματων ζεύξεων και παρέχει την κατανεμημένη υπολογιστική διαδικασία στη διάδοση του υπολογιστικού φόρτου εργασίας και διαδεργασική μετάδοση μηνυμάτων. Ένα παράδειγμα σεναρίου είναι αυτό ενός δικτύου εκπομπής (Node C) όπου ο κεντρικός κόμβος μοιράζει το υπολογιστικό φόρτο σε άλλους υποτελείς κόμβους όπως στην εικόνα 20. Οι υποτελείς κόμβοι εκτελούν το δικό τους κομμάτι από το συνολικό φόρτο εργασίας και επιστρέφουν τα αποτελέσματα στον κεντρικό κόμβο.



Εικόνα 20 : Σενάριο δικτύου εκπομπής

Η εξοικονόμηση στην ενεργειακή κατανάλωση που επιτυγχάνεται λόγω της κατανομής του υπολογιστικού φόρτου σε ένα δίκτυο από συνεργαζόμενους κόμβους αντί η ίδια υπολογιστική εργασία να γίνει με ένα κόμβο, υπόκειται σε περιορισμό ως προς τον αριθμό των κόμβων αφού μετά από ένα αριθμό το κέρδος αναιρείται από την ενεργειακή κατανάλωση για επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους. Η ενεργειακή κατανάλωση ανάμεσα στους συνεργαζόμενους κόμβους είναι ανάλογη (proportional) της απόστασης μεταξύ τους  $D$ . Συνεπώς, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6 υπάρχει ένα κομβικό σημείο (ανάμεσα σε 2 και 3 κόμβους) που το σύστημα δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό συγκρινόμενο με την κεντρική επεξεργασία.



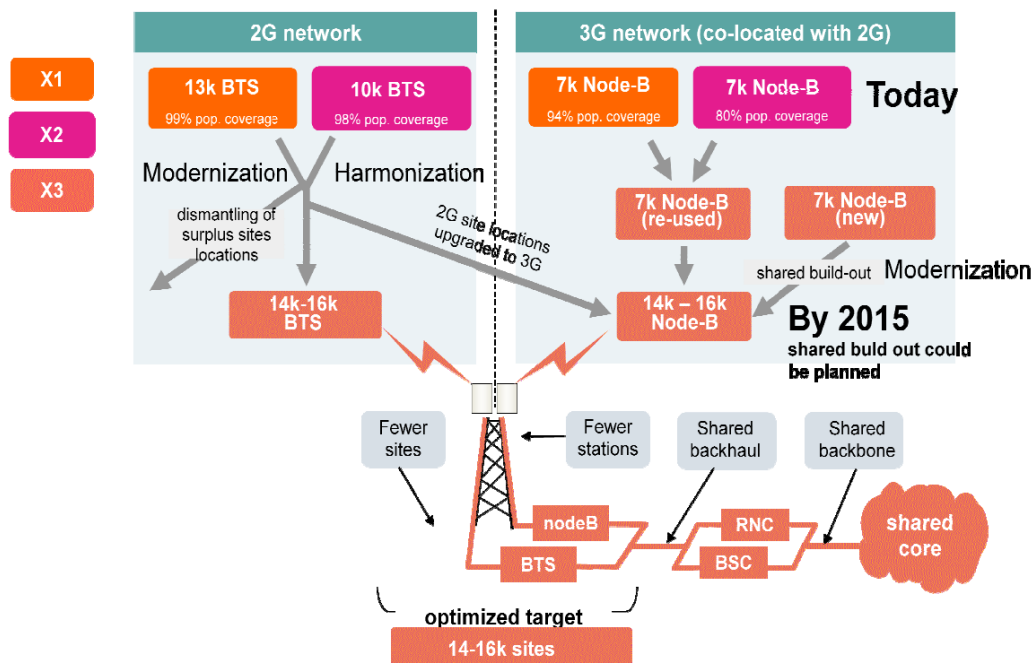
Διάγραμμα 6 : Ενεργειακή εξοικονόμηση για διάφορους αριθμούς κόμβων και αποστάσεις [6]



## 5.6 Δυναμική της κοινής υποδομής στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης

Επί του παρόντος, κοινή τηλεπικοινωνιακή υποδομή συμβαίνει σε μία ad-hoc βάση, καθώς γίνεται μόνο εθελοντικά. Μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις που η εγκατάσταση των cell sites από μεμονωμένους παρόχους είναι δύσκολη π.χ. για λόγους ασφάλειας ή για αισθητικούς λόγους. Πολλοί αναλυτές εξηγούν τη δυναμική της κοινής υποδομής και δηλώνουν ότι θα υπάρχει μία μείωση κατανάλωσης ενέργειας τάξεως 40%. Πέρα από αυτό το πλεονέκτημα, ένα τέτοιο δίκτυο θα έχει 25% λιγότερους ραδιοκόμβους και 40% λιγότερες site θέσεις από το αυτόνομο σενάριο. Αυτό οδηγεί σε συνέργειες στο δίκτυο και IT που ελαττώνουν κόστη παράλληλα με ενεργειακή κατανάλωση. Η παθητική χρήση δικτύων ραδιοπρόσβασης μεταξύ των παρόχων θα μπορούσε να μοιραστεί σε 2G και 3G εγκαταστάσεις μαζί με backhaul. Η κίνηση μπορεί ωστόσο να διαχειρίζεται ξεχωριστά από τον καθένα. Με αυτή τη διευθέτηση οι πελάτες προβλέπεται να κερδίσουν αυξημένη κάλυψη, ειδικά για ασύρματη ευρυζωνική επικοινωνία (HSPA και LTE).

Μία τυπική infra-sharing ανάμεσα σε τρεις παρόχους X1, X2, X3 παρουσιάζεται παρακάτω και θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα πιο βελτιστοποιημένο δίκτυο.



Εικόνα 21 : Μία μορφή τριών παρόχων που μοιράζονται την ίδια υποδομή [22]

## Επίλογος - Συμπεράσματα

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ο συνδυασμός του αυξανόμενου κόστους ενέργειας και η εκρηκτική αύξηση στη διακίνηση δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα οδηγούν σε μεγάλη αύξηση της επίδρασης στο περιβάλλον όπως και στο κόστος λειτουργίας. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάστηκαν οι εξελίξεις στην εξοικονόμηση ενέργειας και μεμονωμένα σε κάποια επίπεδα αλλά και μία ολιστική θεώρηση για την προσέγγιση των 'πράσινων τηλεπικοινωνιών'. Με υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών είναι δυνατή μια εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 50% που θα έχει σημαντική βελτίωση στο περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα του κλάδου, στο λειτουργικό κόστος αλλά και θα διατηρήσει την ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών.

Είναι απολύτως σίγουρο ότι οι μελέτες για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την εισαγωγή των εναλλακτικών μορφών ενέργειας θα συνεχιστούν με διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό λόγω της σημασίας αυτών των πρωτοβουλιών στο περιβάλλον, στην κοινωνία αλλά και στην ανάπτυξη του κλάδου των ασύρματων επικοινωνιών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ITU World Communications/ ICT Indicators database  
[http://www.itu.int/ITUUD/ict/statistics/material/excel/2011/Mobile\\_cellular\\_01-11.xls](http://www.itu.int/ITUUD/ict/statistics/material/excel/2011/Mobile_cellular_01-11.xls)
- [2] EARTH WP2 D2.1: 'Economic and Ecological Impact of ICT', April 30, 2011 Author(s): Gergely Biczók, Jens Malmudin, Albrecht Fehske  
[https://bscw.ictearth.eu/pub/bscw.cgi/d38532/EARTH\\_WP2\\_D2.1\\_v2.pdf](https://bscw.ictearth.eu/pub/bscw.cgi/d38532/EARTH_WP2_D2.1_v2.pdf)
- [3] EARTH project Summary leaflet  
[https://www.ict-earth.eu/downloads/earth\\_project\\_summary.pdf](https://www.ict-earth.eu/downloads/earth_project_summary.pdf)
- [4] 'Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges'  
Ziaul Hasan, *Student Member, IEEE*, Hamidreza Boostanimehr, *Student Member, IEEE*, and Vijay K. Bhargava, *Fellow, IEEE*,  
IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 13, NO. 4, FOURTH QUARTER 2011
- [5] Asif D. Gandhi, and Mark E. Newbury, "Evaluation of the energy efficiency metrics for wireless networks", *Bell Labs Technical Journal*, vol. 16, issue 1, pages 207-215, June 2011.
- [6] 'Green Communications: A Call for Power Efficient Wireless Systems'  
An He, Ashwin Amanna, Thomas Tsou, Xuetao Chen, Dinesh Datla, Joseph Gaeddert, Timothy R. Newman,  
S.M. Shajedul Hasan, Haris I. Volos, Jeffery H. Reed, and Tamal Bose  
Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA Email: [ahe@vt.edu](mailto:ahe@vt.edu) JOURNAL OF COMMUNICATIONS, VOL. 6, NO. 4, JULY 2011
- [7] 'Reducing costs and pollutions in cellular networks'  
Vincenzo Mancuso and Sara Alouf, INRIA Sophia Antipolis Mediterranee, *IEEE Communications Magazine* 01/2011; 49:63-71.

[8] 'The global footprint of mobile communications-The ecological and economic perspective', Albrecht Fehske , Jens Malmodin ,Gergely Biczók *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 8. (August 2011), pp. 55-62

[9] <http://www.mobilevce.com/green-radio>

[10] 'A Simulation Framework for the Evaluation of Power Consumption and QoS in Heterogeneous Network': A report for the Mobile VCE by Ying Hou, Dr Dave Laurenson, Dr John Thompson (November 2009)

[11] Maliha Urooj Jada  
'Energy Efficiency Techniques & Challenges for Mobile Access Networks'  
Master's Thesis submitted in partial fulfillment of the degree of Master of Science in Technology  
Espoo, 6th May 2011  
Supervisor: Prof. Jyri Hämäläinen, Aalto University

[12] <http://www.flexenclosure.com/en/e-site>

[13]'Green Communications'  
*Annotated Literature Review and Research Vision*  
Ashwin Amanna  
Submitted by Wireless@Virginia Tech , March 2009

[14] Y. Chen *et al.*, "Fundamental Tradeoffs on Green Wireless Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, June 2011, pp. 30-37.

[15] B. Badic *et al.*, "Energy Efficiency Radio Access Architectures for Green Radio: Large Versus Small Cell Size Deployment," *Proc. IEEE VTC '09-Fall*, Anchorage, AK, Sept. 2009

[16] Y. Chen, S. Zhang, and S. Xu, "Characterizing Energy Efficiency and Deployment Efficiency Relations for Green Architecture Design," *Proc. IEEE ICC '10*, Cape Town, South Africa, May 2010.

- [17] G. Miao *et al.*, "Cross-Layer Optimization for Energy-Efficient Wireless Communications: A Survey," *Wiley J. Wireless Commun. and Mobile Computing*, vol. 9, Apr. 2009, pp. 529-42.
- [18] D. Grace *et al.*, "Using Cognitive Radio to Deliver Green Communications," *Proc. 4th Int'l. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Commun.*, June 2009.
- [19] A. J. Goldsmith, and S. B. Wicker, "Design challenges for energyconstrained ad hoc wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, vol.9, no.4, pp. 8-27, Aug. 2002.
- [20] A. Dejonghe, et. al., "Green Reconfigurable Radio Systems," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol.24, no.3, pp.90-101, May 2007.
- [21] Q. Zhang, J. Jia, and J. Zhang, "Cooperative Relay to Improve Diversity in Cognitive Radio Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, pp. 111-117, Feb. 2009.
- [22] Telecom Regulatory Authority of India  
'Recommendations on Approach towards Green Telecommunications'  
April 12, 2011
- [23] [http://w3.nokiasiemensnetworks.com/NR/rdonlyres/2E866999-466E-4F3C-8A1E-6DD0A90026A9/0/NetAct\\_SQM\\_Power\\_Saving\\_Solution.pdf](http://w3.nokiasiemensnetworks.com/NR/rdonlyres/2E866999-466E-4F3C-8A1E-6DD0A90026A9/0/NetAct_SQM_Power_Saving_Solution.pdf)
- [24] [http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/NewsReleases/Detail?LMSG\\_CABINET=Docs\\_and\\_Resource\\_Ctr&LMSG\\_CONTENT\\_FILE=News\\_Releases\\_2009/News\\_Article\\_001448.xml](http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/NewsReleases/Detail?LMSG_CABINET=Docs_and_Resource_Ctr&LMSG_CONTENT_FILE=News_Releases_2009/News_Article_001448.xml)
- [25] [http://www2.nortel.com/go/news\\_detail.jsp?cat\\_id=-8055&oid=100254431](http://www2.nortel.com/go/news_detail.jsp?cat_id=-8055&oid=100254431)

[26] M. Parker, S. Nagraj, and S. Walker, "Absolute energy efficiency metric for carbon footprint resource management and network optimisation," in *The 2009 International Conference On Clean Electrical Power*, pp. 111-116, Jun 2009.

[27] Ericsson 'Sustainable energy use in mobile communications'  
August 2007 White Paper