



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνικές Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κυψελωτών Δικτύων

Αναστασία – Ουρανία Ι. Μπέτσου

Επιβλέπουσα: Αθανασία Αλωνιστιώτη, Λέκτορας

ΑΘΗΝΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνικές Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κυψελωτών Δικτύων

Αναστασία – Ουρανία Ι. Μπέτσου
Α.Μ.: M1034

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Αθανασία Αλωνιστιώτη, Λέκτορας

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Αθανασία Αλωνιστιώτη, Λέκτορας
Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μια περίοδο που γίνεται όλο και συχνότερα λόγος για την επίδραση του κλάδου των Επικοινωνιών στο περιβάλλον, τη στιγμή δε που οι χρήστες κινητών επικοινωνιών αυξάνονται καθημερινά, η ενεργειακή αποδοτικότητα τείνει να αποτελέσει βασικό ζήτημα κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση των κυψελωτών κινητών δικτύων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή και κατηγοριοποίηση ενός αριθμού τεχνικών ενεργειακής αποδοτικότητας στα κινητά δίκτυα. Οι τεχνικές που περιγράφονται αφορούν κυρίως το πιο ενεργοβόρο κομμάτι του κινητού δικτύου που είναι το δίκτυο πρόσβασης.

Η περιγραφή των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας συνοδεύεται από ένα απλό μοντέλο της ισχύος λειτουργίας του κινητού δικτύου. Το μοντέλο αυτό χρησιμεύει στον υπολογισμό της κατανάλωσης ισχύος σε κάθε ένα από τα διαφορετικά σενάρια υλοποίησης του δικτύου πρόσβασης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων κατανάλωσης ισχύος οδηγεί σε συμπεράσματα χρήσιμα για το σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών δικτύων πρόσβασης.

Τα σενάρια υλοποίησης του δικτύου πρόσβασης, σύμφωνα με τις τεχνικές ενεργειακής αποδοτικότητας που περιγράφονται στην παρούσα εργασία, βασίζονται στην:

- 1) απενεργοποίηση ενός αριθμού σταθμών βάσης, των οποίων το φορτίο κίνησης είναι χαμηλό.
- 2) βαθμιαία εξασθένιση ενός αριθμού σταθμών βάσης, των οποίων το φορτίο κίνησης είναι χαμηλό.
- 3) χρήση μικροσταθμών βάσης και femtocells σε ομογενή δίκτυα μακροσταθμών.
- 4) συνεργατική διαχείριση των δικτύων πρόσβασης που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους.

Τέλος, εκτός από τα παραπάνω σενάρια υλοποίησης του δικτύου πρόσβασης, περιγράφεται επίσης και ο μηχανισμός ασυνεχούς λήψης (DRX), στα δίκτυα LTE και UMTS, ο οποίος παρέχει βελτίωση στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της κινητής συσκευής του χρήστη και αυξάνει τη χωρητικότητα του συνολικού συστήματος.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ενεργειακή Απόδοση Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Τεχνικές Ενεργειακής Αποδοτικότητας, Δίκτυο Πρόσβασης, Femtocells, DRX, Dimming Base Stations.

ABSTRACT

Recently, the environmental consequences of the Communication Industry, has been receiving an emerging attention from both industrial and fundamental researchers. As the users of mobile communications increase day by day, the migration to an energy efficient mobile infrastructure is of high importance.

Thesis work has investigated a number of different means and techniques that improve the energy efficiency of evolved mobile networks. The techniques described in this thesis are mainly about the access network, which is the most energy consuming sector of the mobile cellular network.

The description of the energy efficient techniques is followed by a simple radio network power usage model. Based on the model, examples are given where different deployment scenarios have been compared and we have come to useful conclusions from energy consumption perspective.

The deployment scenarios, that enclose the energy efficient techniques mentioned in the present thesis, are based in:

- 1) turning off certain cells when the network traffic is low.
- 2) reducing the capacity, services and energy consumption of certain cells, without turning off the cells, when the network traffic is low.
- 3) using micro base stations and femtocells in homogeneous networks of macro base stations.
- 4) the energy-aware cooperative management of the cellular access networks of two operators offering service over the same area.

Finally, apart from the above deployment scenarios of the access network, the DRX mechanism in LTE and UMTS networks, is also described in the present thesis. The DRX mechanism, is exercised between network and mobile station (MS) in order to save the power of the MS and to increase the capacity of the whole system.

SUBJECT AREA: Energy Efficiency of Mobile Communication Networks.

KEY WORDS: Energy Efficient Techniques, Access Network, Femtocells, DRX, Dimming Base stations

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Επιβλέπουσα Καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας, κα Αθανασία Αλωνιστιώτη, για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε στην ολοκλήρωση της συγγραφής της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος, καθώς επίσης και στους συμφοιτητές μου για την άριστη και διασκεδαστική συνεργασία μας.

Τέλος, χρωστώ μεγάλη ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, που μου μετέδωσαν τη διαρκή δίψα για γνώση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΚΙΝΗΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	15
2.1. Εισαγωγή.....	15
2.2. Υποδομή και αρχιτεκτονικές κυψελωτών δικτύων.....	15
2.3. Κατανάλωση Ισχύος στο Δίκτυο Κορμού.....	18
2.4. Κατανάλωση Ισχύος στο Σταθμό Βάσης	19
2.5. Μοντέλο κατανάλωσης ισχύος του LTE.....	20
3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ DRX	23
3.1. Εισαγωγή.....	23
3.2. Μηχανισμός DRX στο UMTS	23
3.3. Μηχανισμός DRX στο LTE	25
4. ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ.....	28
4.1. Εισαγωγή.....	28
4.2. Ντετερμινιστική μεταβολή της κίνησης του δικτύου.....	28
4.3. Δυναμική κατανομή της κίνησης του δικτύου	30
4.4. Μεγέθυνση/Σμίκρυνση της κυψέλης (Cell Zooming)	32
4.5. Cell Breathing και εξοικονόμηση ενέργειας.....	34
4.5.1 Εισαγωγή	34
4.5.2 Cell breathing και tilt optimization.....	35
4.5.3 Cell breathing και μέθοδος αρχιτεκτονικής δύο επιπέδων.....	38
5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ «ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ» (DIMMING) ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ.....	43
5.1. Εισαγωγή.....	43
5.2. Τεχνικές «εξασθένησης» του σταθμού βάσης	43
5.3. Μοντέλα των τεχνικών «εξασθένησης».....	44
5.4. Αριθμητικά αποτελέσματα.....	45
6. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	48
6.1. Εισαγωγή.....	48
6.2. Είδη Κυψελών κινητών δικτύων.....	48
6.3. Ενεργειακή αποδοτικότητα των κινητών δικτύων με τη χρήση μικροσταθμών	49
6.4. Βελτιώσεις στην αποδοτικότητα των ετερογενών κινητών δικτύων με τη χρήση μικροσταθμών	52
6.5. Ενεργειακή αποδοτικότητα του κινητού δικτύου με τη χρήση φεμοκυψελών	56
7. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ.....	60
7.1. Εισαγωγή.....	60
7.2. Περιγραφή της προσέγγισης	60
7.3. Μοντελοποίηση της προσέγγισης	61

7.4.	Σχήματα απενεργοποίησης των δικτύων πρόσβασης	62
7.5.	Αριθμητικά αποτελέσματα	64
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	70
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	71
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	72
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	74

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) του τομέα κινητών επικοινωνιών το 2020 [2]
13

Σχήμα 2-1: Αρχιτεκτονική Δικτύου GSM 16

Σχήμα 2-2: Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS 17

Σχήμα 2-3: Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE 17

Σχήμα 2-4: Διάγραμμα κατανάλωσης ενέργειας στα κυψελωτά κινητά δίκτυα [18] 19

Σχήμα 2-5: Κατανάλωση ενέργειας σε έναν τυπικό κυψελωτό σταθμό βάσης 19

Σχήμα 2-6: Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα ενός πομποδέκτη σταθμού βάσης 20

Σχήμα 2-7: Ταξινόμηση της κατανάλωσης ενέργειας του σταθμού βάσης για διαφορετικά σενάρια σχεδιασμού του κινητού δικτύου 22

Σχήμα 3-1: Διάγραμμα χρόνου για το μηχανισμό DRX στο UMTS 24

Σχήμα 3-2: Διάγραμμα χρόνου για το μηχανισμό DRX στο UMTS 25

Σχήμα 4-1: Παράδειγμα σχεδίου καθημερινής κίνησης στο δίκτυο και την ενέργειας που εξοικονομείται με το «σβήσιμο» κυψελών 29

Σχήμα 4-2: Τραπεζοειδές σχήμα κίνησης 30

Σχήμα 4-3: Απόδοση των ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων 31

Σχήμα 4-4: Λειτουργία Cell zooming στα κυψελωτά δίκτυα 32

Σχήμα 4-5: Τεχνικές υλοποίησης του cell zooming: a) Zoom in και zoom out με φυσικές ρυθμίσεις της κεραίας b) Cell zoom out μέσω συνεργατικής λειτουργίας των BS και μέσω relaying 33

Σχήμα 4-6: Απόδοση των cell zooming αλγορίθμων 34

Σχήμα 4-7: Cell breathing και κενά κάλυψης στο δίκτυο 35

Σχήμα 4-8: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας sleep mode 36

Σχήμα 4-9: Κανονικοποιημένα αποτελέσματα προσομοιώσεων 37

Σχήμα 4-10: (a) Διάταξη κυψελών για υψηλή κίνηση, (b) Η κυψέλη D καλύπτει την περιοχή των δευτερευόντων κυψελών (c) Κάποιοι από τους γείτονες της D αναλαμβάνουν την κάλυψη (d) Όλοι οι γείτονες της D αναλαμβάνουν την κάλυψη 39

Σχήμα 4-11: Μεθοδολογία υπολογισμού ισχύος ενός σταθμού βάσης για μία συγκεκριμένη υπηρεσία του χρήστη 41

Σχήμα 5-1: Δείγμα 50 κόμβων ενός κυψελωτού δικτύου 46

Σχήμα 6-1: Τοποθέτηση μικροσταθμών σε ένα πλέγμα μακροσταθμών.....	51
Σχήμα 6-2: Κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή συναρτήσει της απόστασης D.....	52
Σχήμα 6-3: Κατανάλωση ισχύος ανά περιοχή συναρτήσει της απόστασης D, για διαφορετικές υλοποιήσεις	55
Σχήμα 6-4: Ρυθμαπόδοση ανά υποφέρον για περιοχή 10-ποσοστημορίου, συναρτήσει της απόστασης D, για διαφορετικές υλοποιήσεις.....	55
Σχήμα 6-5: Σχέδιο μακροκυψέλης: Ακτίνα κυψέλης και ISD	57
Σχήμα 6-6: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά km ² δικτύου.	58
Σχήμα 7-1:Τυπικό προφίλ κίνησης για το δίκτυα A & πιθανές περίοδοι απενεργοποίησης για τα δίκτυα A και B	62
Σχήμα 7-2: Ημιτονοειδές προφίλ κίνησης	65
Σχήμα 7-3: Εξοικονόμηση ενέργειας για διάφορα μοντέλα κόστους και σχήματα απενεργοποίησης (παράμετρος b=1).....	66
Σχήμα 7-4: Εξοικονόμηση ενέργειας για διάφορα μοντέλα κόστους και σχήματα απενεργοποίησης (παράμετρος b=3).....	66
Σχήμα 7-5: Πραγματικό κανονικοποιημένο προφίλ κίνησης και	67
Σχήμα 7-6: Ρεαλιστική κίνηση δικτύου-Συνολική ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας & μέση ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε πάροχο στα διαφορετικά σχήματα απενεργοποίησης	68
Σχήμα 7-7: Ρεαλιστική κίνηση δικτύου-Ποσοστιαία εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το συνολικό ενεργειακό κόστος λειτουργίας των δύο δικτύων (A & B).....	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1: Παράμετροι μοντελοποίησης αστικού δικτύου.....	41
Πίνακας 4-2: Μοντέλο προσομοίωση κίνησης	42
Πίνακας 5-1: Μέγιστο φορτίο σαν ποσοστό της χωρητικότητας κυψέλης.....	46
Πίνακας 5-2: Μέση εξοικονόμηση ενέργειας, ανά τύπο σταθμού βάσης, από την «εξασθένηση» συχνότητας	47
Πίνακας 5-3: Μέση εξοικονόμηση ενέργειας ανά τύπο σταθμού βάσης από τη συνδυασμένη «εξασθένηση» υπηρεσιών και συχνότητας	47
Πίνακας 6-1: Ισολογισμός σχύος	51
Πίνακας 6-2: Χαρακτηριστικά κυψελωτού δικτύου	54
Πίνακας 6-3: Ισολογισμός Ισχύος.....	54
Πίνακας 6-4: Παράμετροι WCDMA δικτύου	58

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών, στην κατεύθυνση «Νέες Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών».

Σκοπός της εργασίας είναι η κατηγοριοποίηση και περιγραφή ενός αριθμού από τις πιο σημαντικές τεχνικές ενεργειακής αποδοτικότητας στα κυψελωτά κινητά δίκτυα. Για τη συγκέντρωση του υλικού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της βιβλιογραφικής έρευνας. Μελετήθηκαν κυρίως εργασίες (papers), άρθρα και πηγές από το διαδίκτυο, καθώς το αντικείμενο μελέτης είναι σχετικά πρόσφατο και δεν είναι εύκολη η ανεύρεση διαθέσιμης βιβλιογραφίας στο εμπόριο.

Η παρούσα εργασία απευθύνεται κυρίως σε φοιτητές θετικών επιστημών, ωστόσο, έγινε προσπάθεια να είναι κατανοητή και προσιτή σε οποιονδήποτε ενδιαφέρεται για τον τομέα των «Πράσινων Τηλεπικοινωνιών».

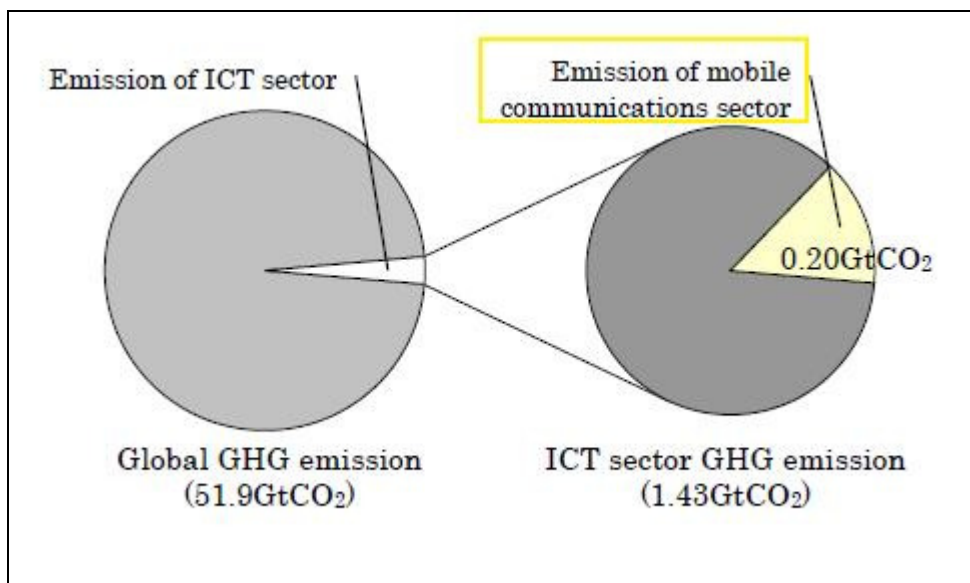
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, ένας από τους προβληματισμούς που απασχολούν την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα και την κοινή γνώμη γενικότερα, είναι η ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας μαζί με τις οικονομικές και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτή προκαλεί. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει συνάψει μία συμφωνία που αφορά στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% μέχρι το 2020, καθώς και στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20% [1]. Μία από τις βιομηχανίες που παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες, είναι αυτή των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ).

Η βιομηχανία των ΤΠΕ έχει συμβάλει στη μείωση της ενέργειας που δαπανάται από αρκετές ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως οι ανθρώπινες μετακινήσεις και η οικιακή κατανάλωση ενέργειας. Η χρήση της τηλε-εργασίας ή της βιντεο-διάσκεψης, που είναι υπηρεσίες των σύγχρονων ΤΠΕ, έχει συμβάλει ούτως ώστε να μειωθούν παγκοσμίως οι ανθρώπινες μετακινήσεις. Επίσης η χρήση τεχνολογιών, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έχει συντελέσει στην βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων. Παρόλα αυτά, η βιομηχανία των ΤΠΕ θεωρείται υπεύθυνη για ένα υπολογίσιμο ποσοστό της παγκόσμιας αύξησης κατανάλωσης ενέργειας.

Σύμφωνα με την έρευνα SMART 2020 [2], η βιομηχανία των ΤΠΕ ευθύνεται για την παραγωγή 530 Μεγατόνων CO₂ το έτος 2002 και 830 Μεγατόνων το 2007. Αυτό σημαίνει ότι η πιο πάνω βιομηχανία συμβάλει με περίπου ένα ποσοστό 2% επί της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως [3], [4]. Επιπλέον, τείνει να αναδειχτεί σε έναν από τους βασικούς μολυσματικούς παράγοντες για το περιβάλλον, υποσκελίζοντας έναν αρκετά ρυπογόνο κλάδο, όπως αυτόν των αεροπορικών μεταφορών. Για παράδειγμα, η Telecom Italia κατανάλωσε περισσότερες από 2 TWh το 2007, δηλαδή το 1% των συνολικών αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια του Ιταλικού κράτους [5] και στην Κίνα λειτούργησαν γύρω στους 600.000 σταθμούς βάσης το 2007, καταναλώνοντας περί τις 20 δισεκατομμύρια KWh [6]!

Ο τομέας των κινητών επικοινωνιών, που είναι παρακλάδι της βιομηχανίας των ΤΠΕ, ευθύνεται για ένα ποσοστό της τάξης του 0.2 % επί των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, ποσοστό που αποτελεί ένα σχετικά μικρό μερίδιο στο συνολικό αποτύπωμα CO₂ της βιομηχανίας των ΤΠΕ [7],[8]. Παρόλα αυτά, με την ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση των υπηρεσιών επικοινωνίας στις αναπτυσσόμενες χώρες, αναμένονται στο μέλλον σοβαρές προκλήσεις σχετικά με τις ενεργειακές ανάγκες των κινητών δικτύων επικοινωνιών. Όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 1-1, το ποσό του εκπεμπόμενου CO₂ κατά το έτος 2002 ήταν παγκοσμίως 64 Μεγατόνοι, ενώ αναμένεται να ανέλθει στους 201 Μεγατόνους το 2020 [2] .



Σχήμα 1-1: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) του τομέα κινητών επικοινωνιών το 2020 [2]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο άμεσο μέλλον, θα υπάρξει μία αξιοσημείωτη αύξηση της κίνησης στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον αυξανόμενο αριθμό των χρηστών αλλά και στην εισαγωγή νέων υπηρεσιών δεδομένων υψηλότερου ρυθμού. Η μεγάλη δημοτικότητα των κινητών κυβελωτών δικτύων επικοινωνιών, που στο εξής θα καλούμε κινητά δίκτυα, συμβάλλει στην ολοένα μεγαλύτερη αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται σε αυτά τα δίκτυα. Το γεγονός αυτό έχει αρχίσει πλέον να απασχολεί σοβαρά τόσο τους οργανισμούς τυποποίησης όσο και τους παρόχους υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Η ενεργειακή αποδοτικότητα αναμένεται να αποτελέσει, στο άμεσο μέλλον, ένα αναπόφευκτο μέλημα για το σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων.

Τα κινητά δίκτυα αποτελούνται από τρία κυρίως μέρη: Το δίκτυο πυρήνα, που ασχολείται, σε γενικές γραμμές, με τη μεταγωγή, τη χρέωση και τη διεπαφή με το σταθερό δίκτυο. Τους σταθμούς βάσης που αποτελούν τη διεπαφή ραδιοσυχνότητας ανάμεσα στο δίκτυο και τους τερματικούς χρήστες. Τέλος, από τους τερματικούς κινητούς σταθμούς που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες για τη διεκπεραίωση τηλεφωνικών κλήσεων ή τη μετάδοση δεδομένων σε άλλους χρήστες.

Η ενέργεια των κινητών δικτύων, καταναλώνεται, κατά κύριο λόγο, στους σταθμούς βάσης, παρά στο δίκτυο πυρήνα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αριθμός των σταθμών βάσης είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερος από τα συστατικά του δικτύου πυρήνα. Επίσης η κατανάλωση ενέργειας στα συστατικά του πυρήνα είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με την κατανάλωση που συντελείται στους σταθμούς βάσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του δικτύου UMTS, ένας Node-B καταναλώνει γύρω στα 1500 W (ο αριθμός αυτός μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα στα 800 και 3000 W), αλλά όλες μαζί αυτές οι συσκευές συνεισφέρουν με ένα ποσοστό 60% έως 80% στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου [9], [10].

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η περιγραφή και κατηγοριοποίηση των τεχνικών και προσεγγίσεων που έχουν σκοπό την ενεργειακή αποδοτικότητα των κινητών δικτύων. Οι τεχνικές που περιγράφονται, αναφέρονται κατά κύριο λόγο στην ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του δικτύου πρόσβασης, που είναι το πιο ενεργοβόρο κομμάτι του κινητού δικτύου.

Στο κεφάλαιο 2 δίνεται μία περιγραφή της υποδομής και των αρχιτεκτονικών των σημερινών κινητών δικτύων. Επίσης παρουσιάζεται η κατανάλωση ισχύος στα διάφορα τμήματα του δικτύου, όπου αναλύεται διεξοδικότερα η κατανάλωση ισχύος που συντελείται στο σταθμό βάσης.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η χρήση του μηχανισμού ασυνεχούς λήψης (Discontinuous Reception Mode, DRX) στα δίκτυα UMTS και LTE και αξιολογείται η απόδοσή του σε κάθε μία από τις πιο πάνω αρχιτεκτονικές.

Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει την περιγραφή και αξιολόγηση της απόδοσης βασικών προσεγγίσεων εξοικονόμησης ενέργειας στο κινητό δίκτυο, οι οποίες έχουν σαν κεντρική ιδέα την απενεργοποίηση ενεργών σταθμών βάσης όταν το φορτίο κίνησης στο δίκτυο είναι χαμηλό. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ένα προκαθορισμένο και ένα δυναμικό σχήμα απενεργοποίησης ενός αριθμού σταθμών βάσης, και τα σχήματα που χρησιμοποιούν το φαινόμενο του cell zooming και cell breathing.

Στο κεφάλαιο 5 δίνεται η περιγραφή και αξιολόγηση της προσέγγισης εξοικονόμησης ενέργειας η οποία εφαρμόζει τις τεχνικές βαθμιαίας εξασθένισης των σταθμών βάσης (dimming base stations), όταν το φορτίο κίνησης στο δίκτυο είναι χαμηλό.

Το κεφάλαιο 6 περιγράφει βασικές τεχνικές σχεδιασμού κινητών δικτύων οι οποίες στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του δικτύου. Κύριο χαρακτηριστικό των παραπάνω τεχνικών, είναι η χρήση μικρο-σταθμών βάσης ή femtocells σε ομογενή δίκτυα που αποτελούνται από συμβατικούς μακρο-σταθμούς.

Το κεφάλαιο 7 είναι αφιερωμένο στην περιγραφή και ανάλυση της εξοικονόμησης ενέργειας στα κινητά δίκτυα, η οποία μπορεί να προκύψει από τη συνεργατική διαχείριση των κυψελωτών δικτύων πρόσβασης που ανήκουν σε δύο διαφορετικούς παρόχους

Ακολουθεί ο επίλογος - συμπεράσματα και η βιβλιογραφία της εργασίας.

2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΚΙΝΗΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

2.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό δίνει αρχικά μία συνοπτική περιγραφή της υποδομής των κινητών δικτύων. Γίνεται επίσης μία αναφορά στην εξέλιξη των αρχιτεκτονικών των κινητών δικτύων και δίνεται μία γενική περιγραφή των αρχιτεκτονικών αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανάλωση ισχύος στα διάφορα τμήματα του δικτύου. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση και αναλύεται διεξοδικότερα η κατανάλωση ισχύος στο Σταθμό Βάσης, που είναι και το συστατικό που έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ενέργεια στο κινητό δίκτυο. Για το λόγο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας αυτής εστιάζεται σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας που αφορούν τη λειτουργία των σταθμών βάσης στο κινητό δίκτυο.

2.2. Υποδομή και αρχιτεκτονικές κυψελωτών δικτύων

Τα κυψελωτά δίκτυα αποτελούνται από δύο κυρίως τμήματα: Το δίκτυο πρόσβασης AN (Access Network) και το δίκτυο κορμού CN (Core Network), τα οποία συνδέονται με ενδιάμεσους συνδέσμους (Backhaul Connections).

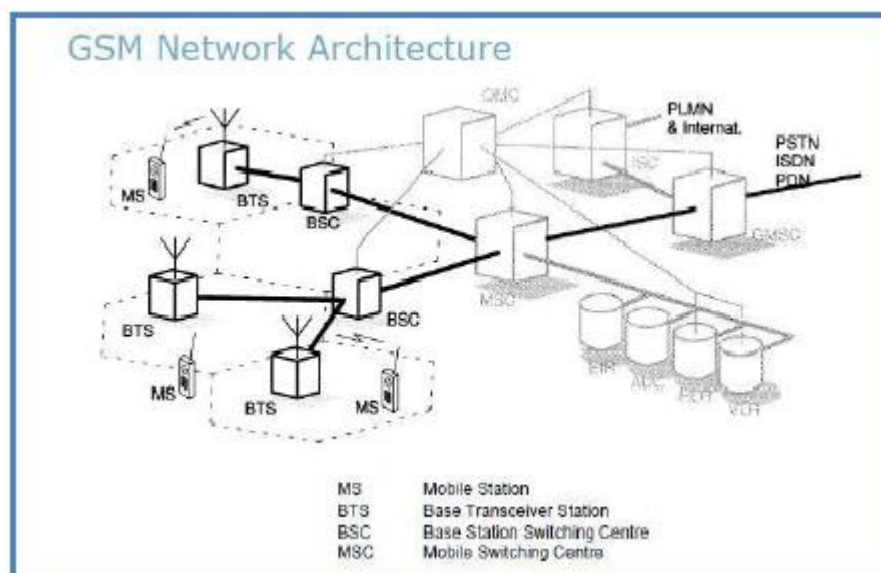
Το δίκτυο πρόσβασης AN, είναι το κομμάτι του δικτύου που επιτρέπει στο χρήστη μέσω των ραδιοδιαύλων, να αποκτήσει πρόσβαση στις υπηρεσίες Κινητών Επικοινωνιών. Είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της κίνησης δεδομένων και της σηματοδότησης ανάμεσα στο χρήστη και στο δίκτυο κορμού CN. Αποτελείται από ένα δίκτυο Σταθμών Πομποδεκτών Βάσης (Base Transceiver Stations BTSs - στα δίκτυα 3G και LTE καλούνται NodeBs), οι οποίοι ομαδοποιούνται κάτω από έναν αριθμό Ελεγκτών Σταθμού Βάσης (Base Station Controllers BSCs ή Radio Station Controllers στα δίκτυα 3G και LTE). Οι BSCs/RNCs συνδέονται με το CN.

Ένας BSC/RNC μπορεί να ελέγχει δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες BTSs. Κύριος ρόλος του είναι η διαχείριση των διαθέσιμων συχνοτήτων στη ραδιοεπαφή, ο έλεγχος των BTSs και η διαχείριση των μεταπομπών (handovers), μέσω εντολών προς τους σταθμούς βάσης και τις κινητές τερματικές συσκευές. Ο BSC/RNC είναι επιπλέον υπεύθυνος για την αποδέσμευση μιας ζεύξης όταν τερματιστεί η κλήση. Επιπρόσθετα ελέγχει την ισχύ τόσο των κινητών μονάδων όσο και των BTSs, με σκοπό τη μείωση των παρεμβολών σε άλλους χρήστες του κινητού δικτύου και τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των κινητών μονάδων.

Το δίκτυο κορμού CN εκτελεί όλες τις λειτουργίες εγκατάστασης και διαχείρισης συνδέσεων, καθώς και τη διαχείριση του ίδιου του δικτύου κινητών επικοινωνιών. Είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση και προώθηση των δεδομένων του χρήστη, τη μεταπομπή ανάμεσα σε διαφορετικές τεχνολογίες, τη διαχείριση των βάσεων δεδομένων που περιέχουν πληροφορίες των χρηστών και των τερματικών, καθώς επίσης επιμελείται και θέματα ασφάλειας του δικτύου.

Το CN στα κυψελωτά δίκτυα έχει υποστεί αρκετές αλλαγές τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Για παράδειγμα στα δίκτυα GSM δεύτερης γενιάς (2G), προστέθηκε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου για να υποστηρίξει την είσοδο της τεχνολογίας GPRS (2.5G), η οποία περιείχε πύλες σε εξωτερικά δίκτυα IP. Αργότερα, με την τρίτη γενιά (3G) κινητών

δικτύων, όπως το UMTS και τις διάφορες εκδόσεις κυκλοφορίας του (releases), το CN επεκτάθηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει soft switching (release 4) και υπηρεσίες πολυμέσων υψηλών ρυθμών (release 5). Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των δικτύων νέας γενιάς, το CN εξελίσσεται σε ένα all-IP δίκτυο. Τα σχήματα 2-1, 2-2 και 2-3 δείχνουν την εξέλιξη των κινητών δικτύων μέσω των αρχιτεκτονικών GSM, UMTS και LTE.

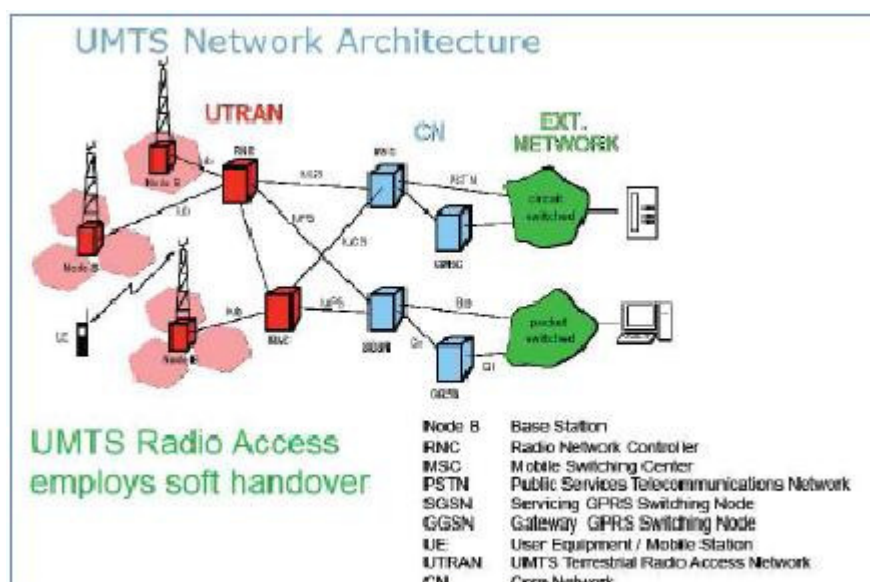


Σχήμα 2-1: Αρχιτεκτονική Δικτύου GSM

Το CN του GSM, είναι από τα πιο απλά CNs των διαφορετικών αρχιτεκτονικών στα κινητά δίκτυα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-1, το CN του GSM αποτελείται από ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, του οποίου οι βασικοί κόμβοι είναι ο MSC/VLR και ο GMSC. Ο MSC συνδέεται με το AN και ο GMSC είναι η διεπαφή με άλλα δίκτυα και μαζί οι δύο αυτοί κόμβοι αλληλεπιδρούν με την HLR. Η αρχιτεκτονική δικτύου GSM, είναι αποδοτική μόνο για υποστήριξη υπηρεσιών φωνής. Οι επόμενες τεχνολογικές εφαρμογές (γενιά 2G και 3G) έχουν μεγαλύτερο ρυθμό και εύρος ζώνης δεδομένων και προσφέρουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για την αποστολή δεδομένων μέσω κινητών δικτύων.

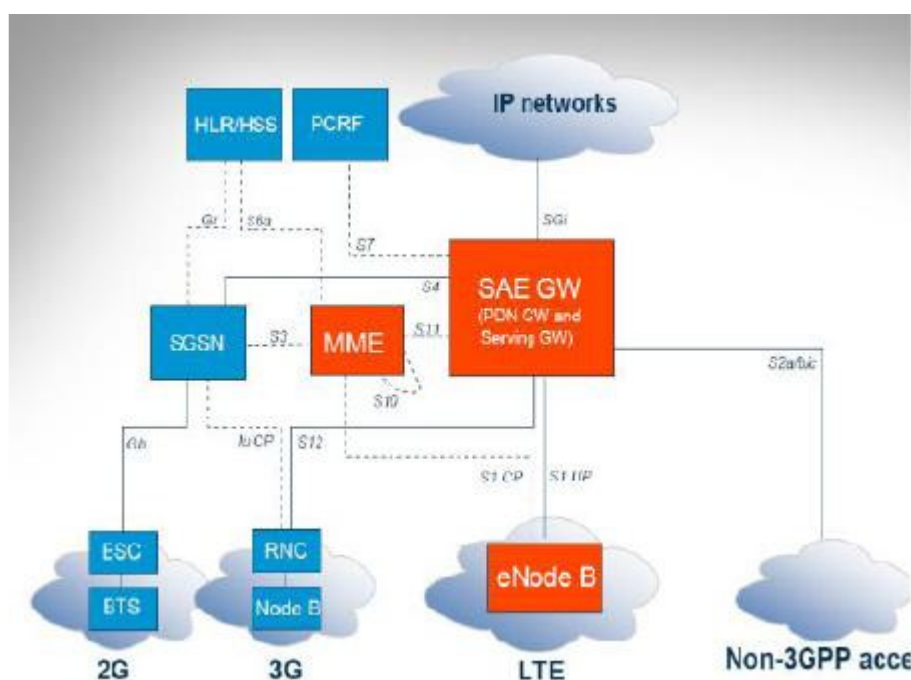
Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 2-2, στο δίκτυο UMTS, προστίθεται στον ήδη υπάρχοντα πυρήνα του GSM CN, ένα καινούριο τμήμα δικτύου που βασίζεται στη μεταγωγή πακέτου. Το πιο πάνω κομμάτι αντιπροσωπεύεται από το τμήμα του GPRS (κόμβοι GGSN και SGSN).

Στην αρχιτεκτονική LTE/SAE (σχήμα 2-3), δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ των τμημάτων μεταγωγής κυκλώματος και μεταγωγής πακέτου. Η επικοινωνία φωνής και δεδομένων γίνεται μέσω του ίδιου δικτύου, που καλείται EPS.



Σχήμα 2-2: Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS

Το LTE/SAE δίκτυο περιλαμβάνει αρκετά καινούρια δικτυακά στοιχεία, όπως το MME και το SAE GW. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-3, υπάρχουν δύο είδη SAEs, το Serving SAE GW, που είναι το σημείο επικοινωνίας για τους συνδρομητές του δικτύου, και το Public Data Network (PDN) SAE, που είναι το σημείο αναφοράς για τα εξωτερικά δίκτυα. Η οντότητα MME είναι ο κόμβος ελέγχου για το LTE δίκτυο πρόσβασης.



Σχήμα 2-3: Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE

Μέσω ενός συνδυασμού πολύ υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης, πιο εύκαμπτη, αποδοτική χρήση του φάσματος και μειωμένη καθυστέρηση ανά πακέτο, το LTE αποσκοπεί στο να επιταχύνει την πρόσβαση στις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, προσθέτοντας τη διέγερση νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας.

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι η αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων, εξελίσσεται σε μια επίπεδη αρχιτεκτονική που διαθέτει all-IP πυρήνα. Ο στόχος είναι η επίτευξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, η πρόσβαση σε αλληλεπιδρούσες υπηρεσίες πολυμέσων, οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου από οποιοδήποτε σημείο με τη χρήση κινητής συσκευής, η διασυνεργατικότητα με άλλα δίκτυα και η ενεργειακή αποδοτικότητα του κινητού δικτύου.

2.3. Κατανάλωση Ισχύος στο Δίκτυο Κορμού

Η κατανάλωση ισχύος στο CN ενός κινητού δικτύου, πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο στο σύστημα ψύξης, στους δρομολογητές, στους διακομιστές και στις διάφορες συσκευές που απαρτίζουν τον κάθε ένα από τους κόμβους του CN. Ένα σημαντικό ποσό ισχύος, καταναλώνεται επίσης στις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του CN. (ασύρματες ζεύξεις, απώλειες ομοαξονικών καλωδίων ή οπτικών ινών, ενισχυτές, αναγεννητές κ.α).

Το ποσοστό της ενέργειας που δαπανάται σήμερα εξαιτίας της λειτουργίας του CN, ανέρχεται στο 10-20% επί του συνολικού ποσού ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία των κινητών δικτύων [11].

Το πιο πάνω ποσοστό ενέργειας είναι αρκετά πιο χαμηλό σε σχέση με αυτό παλαιότερων δεκαετιών [8]. Η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κόμβων του CN οφείλεται στα νέα χαρακτηριστικά που έχουν εισαχθεί, κατά την τελευταία δεκαετία, μέσω των καινούριων αρχιτεκτονικών κινητών δικτύων (UMTS, LTE) και βασίζεται κατά κύριο λόγο στην IP δρομολόγηση και τη χρήση καινοτόμων ψηφιακών επεξεργασίας της πληροφορίας. Για παράδειγμα, η μετάδοση της φωνής με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών συμπίεσης, έχει προσφέρει μία μείωση της τάξης του 60-70% στις απαιτήσεις χωρητικότητας μετάδοσης.

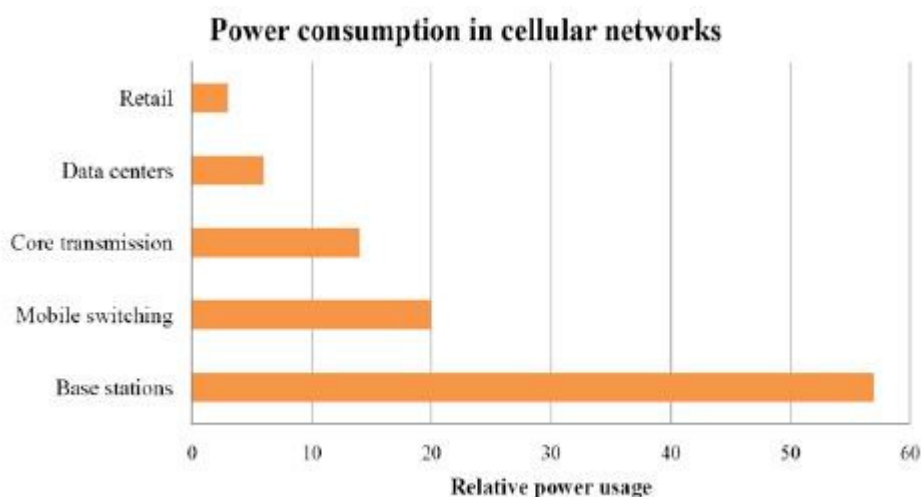
Ο σύγχρονος MSC διακομιστής (MSC-S), καταναλώνει γύρω στο 35% λιγότερη ισχύ ανά συνδρομητή από ότι ο προκάτοχός του. Επίσης ένας σύγχρονος MSC-S κόμβος, ο οποίος εξυπηρετήσει 1.3 εκατομμύρια συνδρομητές, μπορεί πλέον να στεγαστεί σε ένα μόνο ερμάριο (καταλαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο χώρο λιγότερο από ένα τετραγωνικό μέτρο), σε σχέση με παλαιότερο αντίστοιχο κόμβο, όπου απαιτούνταν αρκετά ερμάρια για τη στέγαση εξοπλισμού του κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μείωση στο χώρο φύλαξης του εξοπλισμού του κόμβου, και κατά συνέπεια μείωση στην ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία και την ψύξη των συσκευών του κόμβου.

Επίσης, τα σύγχρονα κέντρα μεταγωγής και άλλοι κόμβοι του δικτύου, όπως ο κόμβος SGSN, ένας αριθμός διακομιστών και τα τμήματα του δικτύου που υποστηρίζουν τις πολυμεσικές εφαρμογές των χρηστών (mobile multimedia gateways), καταναλώνουν γύρω στο 30-50% της ενέργειας των προκατόχων τους.[12]

Τέλος, με την εξέλιξη του CN σε μία επίπεδη all-IP αρχιτεκτονική (αρχιτεκτονική LTE), θα έχουμε σαν πλεονέκτημα τη χρήση χαμηλής ισχύος και κόστους, δρομολογητών και εξοπλισμού ενός διακομιστή. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας του CN και των gateway servers, αναμένεται να μειωθεί σημαντικά, ανά bit μεταδιδόμενης πληροφορίας, μέσα στην επόμενη δεκαετία.

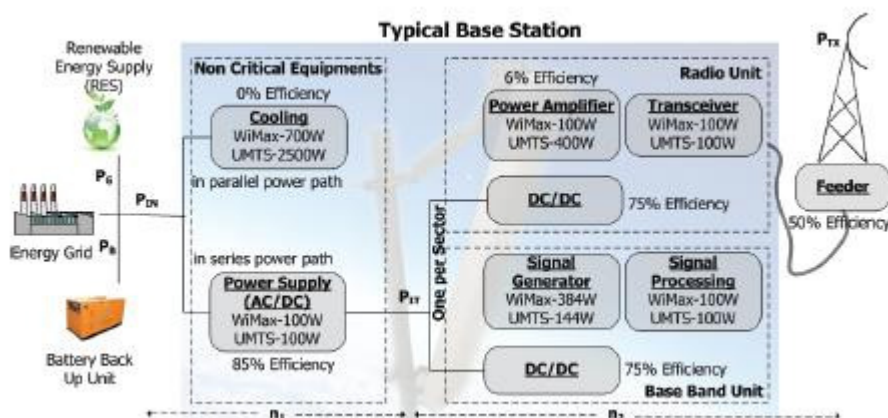
2.4. Κατανάλωση Ισχύος στο Σταθμό Βάσης

Οι σταθμοί βάσης είναι τα πιο απαιτητικά, από άποψη κατανάλωσης ενέργειας, συστατικά των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Καταναλώνουν ποσοστό 50-90% της συνολικής ισχύος του δικτύου, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τον τύπο του σταθμού βάσης, την τεχνολογία του δικτύου πρόσβασης και τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων που χρησιμοποιείται [13],[14],[15]. Το χαρακτηριστικό της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας που διέπει τους σταθμούς βάσης δίνεται και γραφικά στο σχήμα 2-4, όπου απεικονίζεται ένα διάγραμμα τυπικής κατανάλωσης ενός κυψελωτού κινητού δικτύου [18].



Σχήμα 2-4: Διάγραμμα κατανάλωσης ενέργειας στα κυψελωτά κινητά δίκτυα [18]

Οι περισσότεροι «σπάταλες» σε ενέργεια συσκευές στους Σταθμούς Βάσης είναι η υποδομή ψύξης, οι ενισχυτές ισχύος, οι μονάδες μετατροπής AC/DC και DC/DC και οι κάθοδοι κεραιών. Το μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού σταθμού βάσης, το οποίο συνοδεύεται και από τυπικά σχήματα κατανάλωσης ισχύος, για τα Wimax και UMTS δίκτυα, φαίνεται στο σχήμα 2-5 [16].

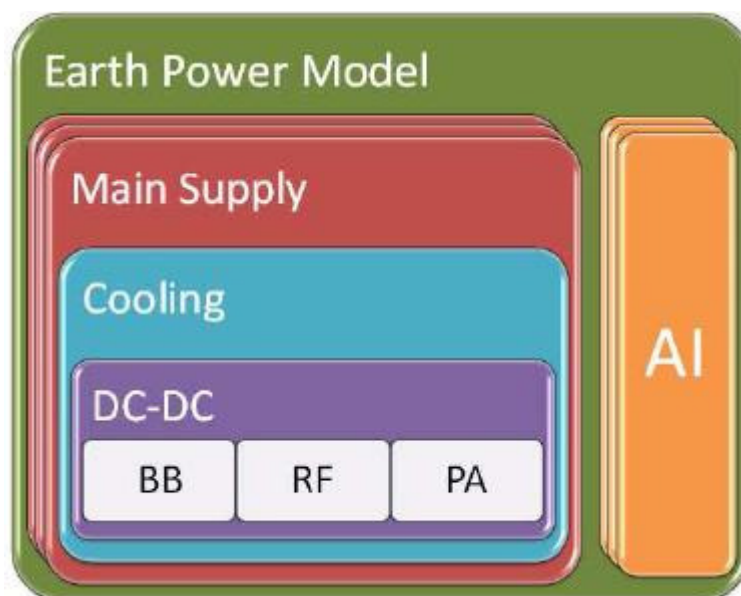


Σχήμα 2-5: Κατανάλωση ενέργειας σε έναν τυπικό κυψελωτό σταθμό βάσης

Στην υποενότητα που ακολουθεί, δίνεται μία πιο λεπτομερής εκτίμηση της κατανάλωσης ισχύος ενός σταθμού βάσης, βασισμένη σε ένα μοντέλο ισχύος που αφορά όλους τους τύπους των LTE σταθμών βάσης [17].

2.5. Μοντέλο κατανάλωσης ισχύος του LTE

Η κατανάλωση ισχύος ενός συμβατικού σταθμού βάσης (μακροσταθμός), πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο κατά τη λειτουργία των συσκευών του ραδιο-εξοπλισμού του. Ο ραδιο-εξοπλισμός προσφέρει τη φυσική διεπαφή ανάμεσα σε ένα μεγάλο αριθμό χρηστών κινητής τηλεφωνίας και στον πυρήνα του κινητού δικτύου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εγγυηθεί, κάθε χρονική στιγμή, μία συνεχή ροή πληροφορίας παρέχοντας επίσης μία αποδεκτή ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Το σχήμα 2-6 δείχνει ένα απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα ενός ολοκληρωμένου σταθμού βάσης που μπορεί να γενικευθεί για όλους τους τύπους σταθμών βάσης, συμπεριλαμβανομένου τους μακροσταθμούς, μικροσταθμούς, πικοσταθμούς και φεμτοσταθμούς.



Σχήμα 2-6: Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα ενός πομποδέκτη σταθμού βάσης

Ένας σταθμός βάσης αποτελείται από πολλαπλούς πομποδέκτες (TRXs) που διαθέτουν πολλαπλές κεραίες. Κάθε ένας από αυτούς τους πομποδέκτες περιλαμβάνει μία διεπαφή κεραίας (AI), έναν ενισχυτή ισχύος (PA), ένα τμήμα πομποδέκτη μικρού σήματος ραδιοσυχνότητας και μία διεπαφή βασικής ζώνης baseband, έναν ρυθμιστή παροχής ισχύος DC, ένα ενεργό σύστημα ψύξης και τέλος μία κύρια παροχή ισχύος AC-DC για σύνδεση με τον παροχέα ηλεκτρικού ρεύματος. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι το ενεργό σύστημα ψύξης αναφέρεται μόνο για το μακροσταθμό βάσης και παραβλέπεται σε μικρότερους σταθμούς βάσης.

Στις επόμενες υποπαραγράφους αναλύονται τα διάφορα κομμάτια του πομποδέκτη (TRX):

Διεπαφή κεραίας

Η επίδραση του τύπου της κεραίας συνήθως παραβλέπεται όσο αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα του σταθμού βάσης. Τα υπόλοιπα μέρη της διεπαφής της κεραίας συνεισφέρουν με ένα συγκεκριμένο ποσό στις απώλειες ενέργειας. Αυτές οι απώλειες έχουν άμεση επίδραση στην ισχύ εξόδου της ραδιοσυχνότητας και συνεπώς στην

κατανάλωση DC ισχύος του ενισχυτή ισχύος. Οι απώλειες μπορεί να περιλαμβάνουν τα καλώδια και τους συνδέσμους, τα ζωνοδιαβατά φίλτρα κεραίας, τους duplexers, καθώς επίσης και τους προσαρμογείς. Το ποσό των απωλειών ενέργειας, τυπικά, καθορίζει την επιλογή ενός συγκεκριμένου ενισχυτή ισχύος.

Ενισχυτής ισχύος

Ο ρόλος του ενισχυτή ισχύος είναι να μεταδίδει αποδοτικά την RF ισχύ εξόδου με την ελάχιστη κατανάλωση DC ισχύος. Τυπικά το πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας ενός ενισχυτή ισχύος είναι κοντά στη μέγιστη ισχύ εξόδου. Παρόλα αυτά, πρότυπα όπως το LTE, απαιτούν τον ενισχυτή ισχύος να λειτουργεί στη γραμμική περιοχή, πιο κάτω από το σημείο της μέγιστης ισχύος. Αυτό αποτρέπει το θόρυβο που προκαλείται από γειτονικά κανάλια, κάνοντας έτσι δύσκολο να επιτευχθεί υψηλή αποδοτικότητα. Μία σημαντική παράμετρος του τύπου του ενισχυτή ισχύος είναι και οι απώλειες των κεραιών που καλείται αυτός να αντισταθμίσει.

Πομπодέκτης RF (RF TRX) μικρού σήματος

Η διεπαφή μικρού σήματος σχετίζεται αποκλειστικά με τη λειτουργία των πομπодεκτηών και παραπέμπει στην κατανάλωση ενέργειας σε αυτούς, η οποία εξαρτάται από το απαιτούμενο εύρος ζώνης το επιτρεπόμενο λόγο σήματος προς θόρυβο, την ευασθησία των δεκτών και τον αριθμό των κεραιών που τυπικά απαιτούνται για πολλαπλή RF μετάδοση ή/και λήψη.

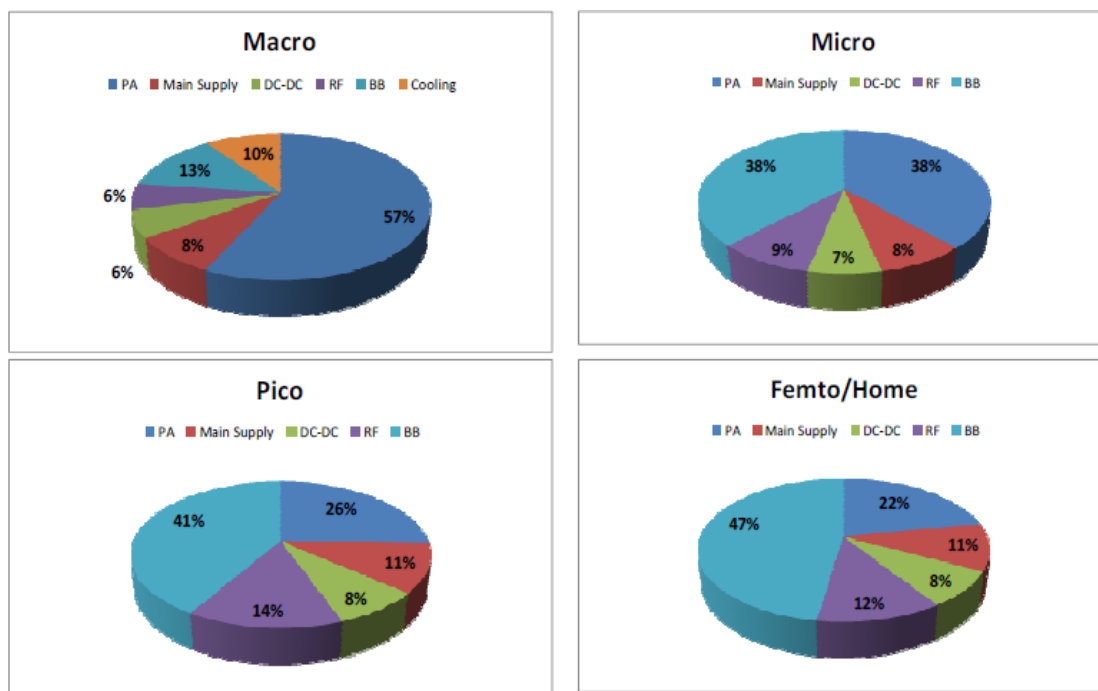
Διεπαφή βασικού σήματος

Η διεπαφή αυτή περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με την επεξεργασία της διακινούμενης πληροφορίας και ειδικότερα αφορούν στην καναλοποίηση, φιλτράρισμα, αντιστάθμιση RF. Επίσης περιλαμβάνονται και άλλες λειτουργίες που εκτελούνται μετά την υποβάθμιση του σήματος στη βασική ζώνη (baseband) και σχετίζονται με τον εντοπισμό-διόρθωση λαθών και με λειτουργίες σηματοδότησης (signaling). Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την κατανάλωση ισχύος σε αυτή τη διεπαφή, είναι το εύρος ζώνης σήματος, η λειτουργία MIMO, ο τύπος της αρχιτεκτονικής RF, και ο τύπος του σταθμού βάσης.

DC-DC Λειτουργία Ψύξης και Κύρια Τροφοδοσία

Για να λειτουργήσει κάθε ενσωματωμένο συστατικό του ραδιοεξοπλισμού ενός σταθμού βάσης, χρειάζεται μία «καθαρή» και ρυθμισμένη DC παροχή ισχύος, η οποία μπορεί να είναι διαφορετικών τύπων, ανάλογα με τις απαιτήσεις καθενός από τα συστατικά του εξοπλισμού, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ποσοστό απώλειας στη συνολική κατανάλωση ισχύος. Για τους μακρο- σταθμούς βάσης, η υψηλή ισχύς εξόδου μπορεί να υπερθερμάνει τα πιο πολλά συστατικά του εξοπλισμού, προκαλώντας έτσι δυσλειτουργία. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει μία απώλεια ισχύος κατά τη λειτουργία των συσκευών ψύξης (π.χ air-conditioners). Τέλος ένας μετατροπέας από AC σε DC απαιτείται για κάθε τύπο σταθμού βάσης, έτσι ώστε αυτός να μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία αυτή εισάγει επιπλέον απώλειες ισχύος.

Στο πιο κάτω σχήμα (σχήμα 2-7), παρουσιάζεται μία ανάλυση της κατανάλωσης ισχύος, για διαφορετικούς τύπους σταθμών βάσεων και κατά τη λειτουργία του δικτύου σε μέγιστο φορτίο.



Σχήμα 2-7: Ταξινόμηση της κατανάλωσης ενέργειας του σταθμού βάσης για διαφορετικά σενάρια σχεδιασμού του κινητού δικτύου

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι στο μακροσταθμό βάσης το κυρίαρχο ποσοστό ισχύος καταναλώνεται κατά τη λειτουργία του PA και οφείλεται κυρίως στις υψηλές απώλειες που συντελούνται στη διεπαφή της κεραίας. Από την άλλη μεριά, η ταξινόμηση της κατανάλωσης ισχύος είναι περισσότερο εξισορροπημένη στους μικροσταθμούς βάσης. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός, ότι στους μικρότερους σταθμούς βάσης, όπως στους πικοσταθμούς και στα femtocells, η διεπαφή βασικού σήματος κυριαρχεί στη συνολική κατανάλωση ισχύος.

3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ DRX

3.1. Εισαγωγή

Οι αναπτυσσόμενες ασύρματες τεχνολογίες τέταρτης γενιάς (4G), όπως είναι οι LTE τεχνολογίες της UMTS αρχιτεκτονικής και οι WiMAX, προσφέρουν μεγάλο εύρος ζώνης για τη μεταφορά δεδομένων. Σύμφωνα με αυτές τις τεχνολογίες, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που απαιτούνται για τη μεταφορά των δεδομένων πάνω από το κομμάτι του ΑΝ, επιτυγχάνονται με τη χρήση εξελιγμένων μεθόδων και τεχνικών. Μερικές από τις πιο πάνω μεθόδους, είναι η εφαρμογή διαμόρφωσης υψηλής σειράς, όπως η 64 QAM, η MIMO τεχνική που συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό-σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη-συσκευή του χρήστη και η μέθοδος πρόσβασης καναλιού SDMA [19]. Επιπλέον οι κινητές συσκευές-δέκτες (MSs, UEs) πρέπει να διαθέτουν πολύπλοκα κυκλώματα, τα οποία είναι αρκετά ενεργοβόρα, με αποτέλεσμα να αδειάζει η μπαταρία της συσκευής του χρήστη σε μικρό χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό περιορίζεται η χρήση των προηγμένων 4G υπηρεσιών η οποία απαιτεί, εκτός των άλλων και υψηλή χωρητικότητα μπαταρίας [20].

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής του χρήστη βελτιώνεται με την εφαρμογή του μηχανισμού ασυνεχούς λήψης (Discontinuous Reception Mode, DRX), ο οποίος χρησιμοποιείται στις προαναφερθείσες αρχιτεκτονικές δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Ο μηχανισμός DRX εφαρμόζεται ανάμεσα στο δίκτυο και στη συσκευή και επιτρέπει σε μία idle συσκευή να σβήσει το ραδιο-δέκτη της για μία προκαθορισμένη χρονική περίοδο, ενώ, στην αντίθετη περίπτωση ο ραδιο-δέκτης θα παρέμενε ενεργός συνεχώς, με σκοπό να ανιχνεύει τυχόν κίνηση στο ραδιοδίαυλο. Επιπλέον, υπάρχουν πρόσθετα πλεονεκτήματα από τη χρήση του DRX, όπως εξοικονόμηση πόρων, τόσο για την ασύρματη καθοδική ζεύξη (downlink), όσο και για την ασύρματη άνω ζεύξη (uplink), που έχουν σαν αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος.

Ο μηχανισμός DRX ελέγχεται από κάποιες παραμέτρους, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του κινητού δικτύου, μεταξύ των οποίων είναι ο χρονιστής αδράνειας στο κανάλι, και ο κύκλος DRX. Οι παράμετροι αυτές επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων να είναι οι μέγιστη δυνατή. Στις επόμενες υποενότητες θα εξετάσουμε τη λειτουργία του DRX στα δίκτυα UMTS και LTE.

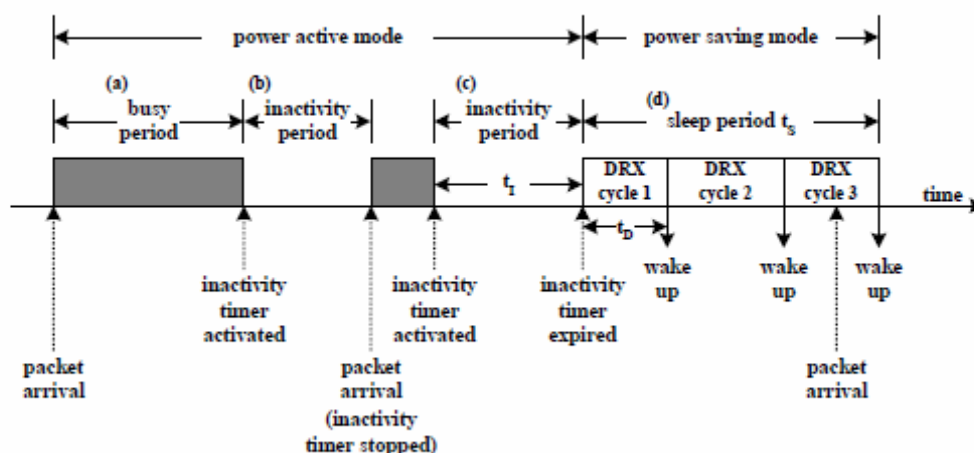
3.2. Μηχανισμός DRX στο UMTS

Στο δίκτυο UMTS ο μηχανισμός DRX πραγματοποιείται διαμέσω της μηχανής καταστάσεων του πρωτοκόλλου RRC (Radio Resource Control), η οποία ασκείται ανάμεσα στο RNC και στο MS.

Η μηχανή καταστάσεων παίρνει δύο τιμές, την RRC Idle κατάσταση και την RRC Connected κατάσταση. Στην κατάσταση RRC Idle, το MS ανιχνεύεται από το δίκτυο πυρήνα, χωρίς τη συμμετοχή του δικτύου UTRAN. Στην κατάσταση RRC Connected, πραγματοποιείται μία σύνδεση RRC ανάμεσα στο MS και τον αντίστοιχο RNC που το εξυπηρετεί. Αυτή η κατάσταση αναλύεται σε επιμέρους καταστάσεις, λεπτομέρειες των οποίων δίνονται στην εργασία [21].

Για την πραγματοποίηση της RRC σύνδεσης, ο ραδιο-δέκτης του MS είναι πάντα ανοιχτός, είτε όταν διατίθεται στο MS ένα κανάλι εξολοκλήρου ή όταν το MS μοιράζεται ένα κανάλι μαζί με άλλα MSs. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί με ένα μέρος της RRC Connection, στη μηχανή των καταστάσεων και αντιστοιχεί στη φάση power active mode κατά την οποία η συσκευή-δέκτης είναι συνέχεια ενεργή για τη λήψη των πακέτων πληροφορίας.

Ο Μηχανισμός DRX εφαρμόζεται στις υπόλοιπες καταστάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στη φάση power saving mode, και έχει σαν στόχο να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας στο MS. Στο σχήμα 3-1 απεικονίζονται οι ενέργειες του δέκτη στο MS, στον άξονα του χρόνου, καθώς επίσης και οι περίοδοι κατά τις οποίες εφαρμόζεται ο μηχανισμός DRX.



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα χρόνου για το μηχανισμό DRX στο UMTS

Οι περίοδοι που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα είναι οι:

- **Busy Period:** Η περίοδος κατά την οποία μεταδίδονται πακέτα. Το UMTS CN στέλνει πακέτα στο MS, διαμέσω του RNC και του Node B. Τα εισερχόμενα πακέτα αποθηκεύονται πρώτα στον buffer του RNC πριν παραδοθούν στο MS.
- **Inactivity Period:** Αν ο buffer του RNC αδειάσει, τότε ενεργοποιείται ο χρονιστής αδράνειας. Αν φθάσει κάποιο πακέτο στον RNC πριν λήξει ο παραπάνω χρονιστής, τότε ο χρονιστής σταματά. Τη στιγμή αυτή, ο επεξεργαστής RNC ξεκινά να μεταδίδει πακέτα και αρχίζει άλλη μία Busy Period. Παρατηρούμε ότι το MS είναι σε ενεργή κατάσταση ισχύος και κατά τη διάρκεια της Busy αλλά και στην Inactivity περίοδο, όπου ο δέκτης του MS είναι σβηστός.
- **Sleep Period:** Η περίοδος αυτή αντιστοιχεί την περίπτωση όπου δεν έχει φτάσει κανένα πακέτο πριν από τη λήξη του χρονιστή αδράνειας, οπότε το MS μπαίνει σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας και ο ραδιο-δέκτης του σβήνει. Η περίοδος Sleep του MS περιλαμβάνει τουλάχιστον έναν DRX κύκλο. Όταν λήξει ένας DRX κύκλος, το MS ανιχνεύει αν έφτασαν πακέτα στον RNC κατά τη διάρκεια του κύκλου αυτού. Αν αυτό συμβεί, το MS ξεκινά να λαμβάνει τα πακέτα αυτά και η περίοδος Sleep τελειώνει. Στην αντίθετη περίπτωση το MS γυρνά πάλι σε κατάσταση Sleep, μέχρι το τέλος του επόμενου DRX κύκλου.

Ο μηχανισμός DRX, στο δίκτυο UMTS, ελέγχεται από δύο παραμέτρους: το κατώφλι του χρονιστή αδράνειας και τον κύκλο DRX. Στην [21] και [22] προτείνονται, για τη μελέτη της επιλογής των βέλτιστων τιμών των παραπάνω παραμέτρων, μία παραλλαγή του M/G/1 μοντέλου αναμονής και το αναλυτικό μοντέλο. Οι βέλτιστες τιμές των παραπάνω παραμέτρων, μεγιστοποιούν την εξοικονόμηση ενέργειας, έχοντας σαν δεδομένο τον περιορισμό του μέσου χρόνου αναμονής των πακέτων στον buffer του RNC. Στην [22] σχεδιάζεται επίσης ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος που καλείται Dynamic DRX, ο οποίος ρυθμίζει δυναμικά τις τιμές των πιο πάνω παραμέτρων, με στόχο την βελτίωση της απόδοσης του UMTS DRX. Οι μελέτες των εργασιών [21] και [22], αποτελούν ένδειξη ότι με την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων, ο μηχανισμός UMTS DRX μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας.

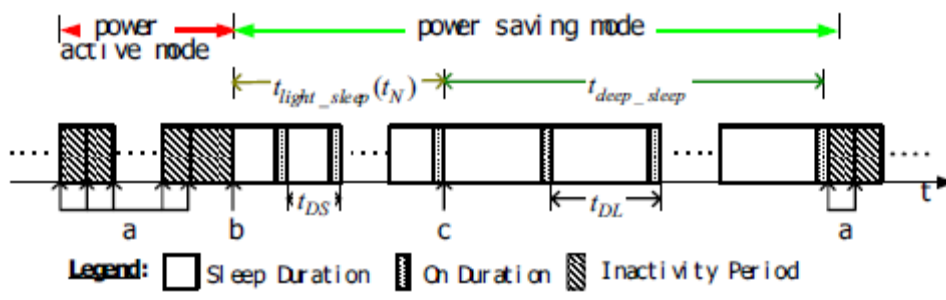
3.3. Μηχανισμός DRX στο LTE

Όπως και στο δίκτυο UMTS, στο δίκτυο LTE ο μηχανισμός DRX ενεργοποιείται στις καταστάσεις RRC Idle και RRC Connected. Οι παράμετροι από τις οποίες ελέγχεται η λειτουργία του DRX στο LTE είναι οι ακόλουθες:

- **DRX Short Cycle (t_{ds})**: Είναι ο πρώτος κύκλος DRX που ακολουθεί, αφού ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός DRX.
- **DRX Short Cycle Timer (t_n)**: Εκφράζεται σε αριθμό DRX Short Cycles. Η παράμετρος αυτή δείχνει τον αριθμό των αρχικών κύκλων DRX που ακολουθούν το DRX Short Cycle, πριν τη μετάβαση σε DRX Long Cycle.
- **DRX Long Cycle (t_{dl})**: Είναι ο DRX κύκλος που ακολουθεί μετά από t_n DRX κύκλους.
- **DRX Inactivity Timer (t_i)**: Η παράμετρος αυτή εκφράζει το χρόνο αναμονής πριν την ενεργοποίηση του DRX.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη λειτουργία του DRX, αν δεν υπάρχουν πακέτα προς λήψη ή μετάδοση, η συσκευή-δέκτης του χρήστη τροφοδοτεί με λιγότερη ενέργεια το μεγαλύτερο μέρος των κυκλωμάτων της.

Στο σχήμα 3-2 παρουσιάζεται μία περιγραφή των ενεργειών του δέκτη στο MS, στον άξονα του χρόνου, καθώς επίσης και οι περίοδοι κατά τις οποίες εφαρμόζεται ο μηχανισμός DRX [22].



Σχήμα 3-2: Διάγραμμα χρόνου για το μηχανισμό DRX στο UMTS

Οι περίοδοι που φαίνονται στο σχήμα είναι οι:

- **Inactivity Period:** Είναι η περίοδος κατά την οποία τρέχει ο DRX Inactivity Timer και η συσκευή-δέκτης είναι ενεργή για την ανίχνευση πακέτων. Η Inactivity Period τελειώνει με τη λήξη του DRX Inactivity Timer. Τότε ενεργοποιείται ο DRX Short Cycle Timer οπότε και ξεκινά η Light Sleep Period.
- **Light Sleep Period:** Είναι η περίοδος κατά την οποία ξεκινά να τρέχει ο DRX Short Cycle Timer. Υπάρχουν κάποιες περίοδοι, κατά τη διάρκεια των οποίων το UE «ξυπνά» και ελέγχει για τυχόν άφιξη πακέτων. Οι περίοδοι αυτές ονομάζονται On Duration και υφίστανται σε κάθε ένα DRX Short Cycle και πριν να λήξει ο DRX Short Cycle Timer. Σε περίπτωση που ανιχνευθούν πακέτα πληροφορίας κατά την On Duration, τότε ξεκινά ξανά ο DRX Inactivity Timer και η Inactivity Period. Αν δεν ανιχνευτούν πακέτα πληροφορίας, το UE πέφτει σε Sleep μέχρι την επόμενη περίοδο On Duration. Όταν λήξει ο DRX Short Cycle Timer, η light sleep period τελειώνει και ξεκινά η deep sleep time period. Κατά τη διάρκεια της light sleep period ο επεξεργαστής του eNodeB δεν μεταδίδει κανένα πακέτο στο UE.
- **Deep Sleep Period:** Είναι η περίοδος κατά την οποία ξεκινά ο DRX Long Cycle Timer. Υπάρχουν επίσης περίοδοι On Duration που υφίστανται σε έναν από τους DRX Long Cycles όπου το UE «ξυπνά» και ελέγχει για τυχόν άφιξη πακέτων. Σε περίπτωση που ανιχνευθούν πακέτα, τότε ξεκινά ξανά ο DRX Inactivity Timer και η Inactivity Period. Αν δεν ανιχνευτούν πακέτα, το UE πέφτει σε sleep μέχρι την επόμενη περίοδο On Duration. Κατά τη διάρκεια της deep sleep period ο επεξεργαστής του eNodeB δεν μεταδίδει κανένα πακέτο στο UE.

Κατά το μηχανισμό DRX, η φάση της ενεργούς ισχύος (power active mode) αντιστοιχεί με την inactivity period, ενώ η φάση της εξοικονόμησης ισχύος (power saving mode) περιλαμβάνει τις light sleep και deep sleep περιόδους.

Η αξιολόγηση της απόδοσης του DRX μηχανισμού, γίνεται με εφαρμογή μεθόδων που βασίζονται στην παραπάνω περιγραφή των δραστηριοτήτων της συσκευής-δέκτη. Η ενεργοποίηση του DRX πραγματοποιείται στην power saving mode της συσκευής-δέκτη. Το κόστος που συνδέεται με την ενεργοποίηση του DRX μηχανισμού είναι η καθυστέρηση που προκαλείται (wake up delay) όταν το UE πρέπει να μεταδώσει ή να λάβει πακέτα, ενώ είναι σε power saving mode. Σε περίπτωση που το UE βρίσκεται σε power off mode λόγω της εφαρμογής του DRX, απαιτείται η επάνοδός του στο δίκτυο (network re-entry), γεγονός που καθυστερεί περαιτέρω τη λήψη ή τη μετάδοση πακέτων. Ως εκ τούτου είναι πολύ σημαντική η προσεχτική επιλογή των DRX παραμέτρων, έτσι ώστε να υπάρχει εξισορρόπηση αφενός μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και του ραδιοφάσματος και αφετέρου του κόστους που συνδέεται με την απορρέουσα καθυστέρηση των πακέτων.

Έχοντας ως στόχο τη μέτρηση της απόδοσης του μηχανισμού DRX, στην [22] χρησιμοποιείται μία ημι-μαρκωβιανή διαδικασία για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι ο LTE DRX μπορεί να επιτύχει πολύ πιο αποδοτική χρήση της μπαταρίας στη συσκευή-δέκτη, από ότι ο UMTS DRX, με ένα λογικό κόστος μεγαλύτερης καθυστέρησης wake up delay. Τα αποτελέσματα της μελέτης στην [23] δείχνουν επίσης ότι με την εφαρμογή του LTE DRX υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και βελτιστοποίηση των πόρων στην άνω ζεύξη (UL). Επίσης στην [23] περιγράφεται η χρήση του DRX σε εφαρμογές VoIP και Video Streaming, όπου επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστά 60% και 40% αντίστοιχα. Τα συμπεράσματα και των δύο εργασιών [22], [23], δείχνουν ότι η ορθή επιλογή των DRX παραμέτρων παίζει σημαντικό ρόλο στην αποφυγή καθυστερήσεων

που προκαλούνται από την εφαρμογή του μηχανισμού DRX και είναι απαραίτητη για την ομαλή μετάδοση των πακέτων πληροφορίας στο δίκτυο.

4. ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ

4.1. Εισαγωγή

Τα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα λειτουργούν σε μία βάση 24 ώρες X 7 ημέρες την εβδομάδα (“always-on”), καταναλώνοντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικό ποσό ισχύος, ακόμα και όταν το δίκτυο δεν διέπεται από κίνηση. Οι απαιτήσεις κίνησης στο δίκτυο έχουν σημαντικές μεταβολές ανάλογα με την ώρα, την ημέρα, τη γεωγραφική τοποθεσία, τον καιρό, τα κοινωνικά γεγονότα κλπ.

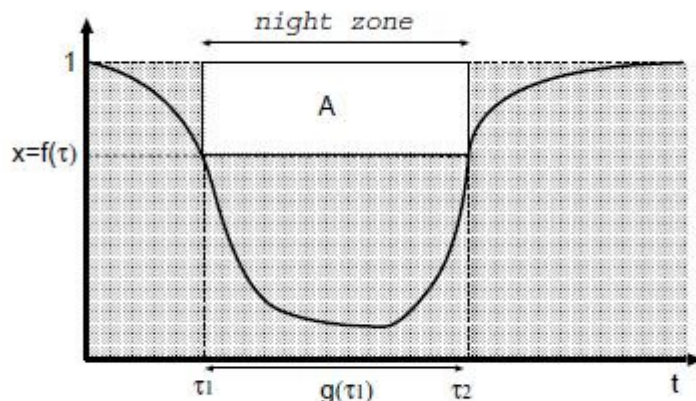
Στις προσεγγίσεις που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες, έχει διερευνηθεί η πιθανότητα απενεργοποίησης (sleeping) σταθμών βάσης στο δίκτυο, σε περιόδους που η κίνηση στο δίκτυο είναι χαμηλή. Οι παραπάνω προσεγγίσεις έχουν σαν στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο ΑΝ του κινητού δικτύου, αφού απενεργοποιούνται οι ενεργές κυψέλες που υποχρησιμοποιούνται όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι χαμηλή.

4.2. Ντετερμινιστική μεταβολή της κίνησης του δικτύου

Η εργασία [24] προτείνει ένα προκαθορισμένο σχήμα απενεργοποίησης ενός αριθμού σταθμών βάσης, βασιζόμενη σε ένα μοντέλο ντετερμινιστικής μεταβολής της κίνησης του δικτύου, στο πεδίο του χρόνου.

Ο στόχος είναι να χαρακτηριστεί το ποσό της ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί με τη μείωση του αριθμού των ενεργών κυψελών στο ΑΝ, κατά τη διάρκεια που αυτές δεν είναι απαραίτητες λόγω της χαμηλής κίνησης στο δίκτυο. Όταν κάποιες κυψέλες «σβήνουν», η κάλυψη και η παροχή υπηρεσιών πραγματοποιούνται μέσω των κυψελών που παραμένουν ενεργές.

Οι διακυμάνσεις στην κίνηση είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού καταστάσεων, όπως η διαφορετική χρήση του δικτύου τη νύχτα, σε σχέση με την ημέρα και η μαζική μετακίνηση των χρηστών από οικιστικές περιοχές, στις περιοχές όπου αυτοί εργάζονται και το αντίθετο. Στο σχήμα 4-1 φαίνεται ένα σχέδιο καθημερινής κίνησης στο δίκτυο.

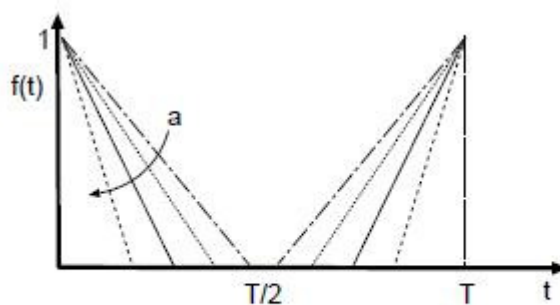


Σχήμα 4-1: Παράδειγμα σχεδίου καθημερινής κίνησης στο δίκτυο και την ενέργειας που εξοικονομείται με το «σβήσιμο» κυψελών

Ο σχεδιασμός των κινητών δικτύων γίνεται κατά βάση, με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετεί τις απαιτήσεις των χρηστών σε ώρες αιχμής, κάνοντας όμως το σύστημα υπερδιαστασιοποιημένο κατά τη διάρκεια των περιόδων που η κίνηση στο δίκτυο είναι χαμηλή. Αν πάρουμε σαν δεδομένο ότι οι περίοδοι αιχμής της κίνησης μπορούν να εξυπηρετηθούν από K κυψέλες, όπου η κάθε μία εξυπηρετεί μία κίνηση f , όταν η κίνηση μειώνεται κατά ένα κλάσμα x του f , xfK ($x < 1$), τότε μόνο xK κυψέλες είναι απαραίτητες για να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Η βελτιστοποίηση του κλάσματος των κυψελών που πρέπει να απενεργοποιηθούν, για τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο, γίνεται σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο σενάριο, το οποίο στηρίζεται σε μία από τις δύο υποθέσεις: Είτε υποθέτουμε ότι απενεργοποιείται ένας μεγάλος αριθμός κυψελών κατά τη διάρκεια μίας μικρής χρονικής περιόδου ή ένας μικρός αριθμός κυψελών κατά τη διάρκεια μίας μεγαλύτερης χρονικής περιόδου.

Η ανάλυση πραγματοποιείται θεωρώντας μία συνάρτηση $f(t)$, ούτως ώστε να μοντελοποιηθεί η καθημερινή κίνηση. Η συνάρτηση $f(t)$ είναι κανονικοποιημένη ως προς την ώρα αιχμής. Υποθέτουμε ότι το μοντέλο της κίνησης είναι το ίδιο για όλες τις εξεταζόμενες κυψέλες. Στην περίπτωση που απενεργοποιείται ένα κλάσμα κυψελών $x < 1$, οι υπόλοιπες κυψέλες που παραμένουν ενεργές πρέπει να εξυπηρετήσουν ένα επιπλέον ποσοστό κίνησης $1/x f(t)$, το οποίο πρέπει να είναι < 1 για να ικανοποιείται το QoS. Για να υπολογιστεί η βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας, θεωρούμε τόσο συμμετρικά όσο και ασύμμετρα σχήματα κίνησης και χρησιμοποιούμε εξισώσεις που υπολογίζουν τη χρονική στιγμή κατά την οποία πρέπει να απενεργοποιηθούν οι σταθμοί βάσης, καθώς επίσης και ποιος είναι ο αριθμός αυτών των σταθμών βάσης.

Σαν παράδειγμα εφαρμογής της παραπάνω ανάλυσης, χρησιμοποιούμε ένα τραπεζοειδές σχήμα κίνησης, με διαφορετικές κλίσεις (ορίζονται από το συντελεστή a), όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Τραπεζοειδές σχήμα κίνησης

Με βάση το σχήμα κίνησης που φαίνεται στο σχήμα 4-2, υπολογίζουμε τη χρονική στιγμή t και το a για τα οποία επιτυγχάνεται η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει σαν αποτέλεσμα, σε αναφορά ενός σχήματος κίνησης always-on, είναι το λιγότερο 25%.

Τέλος, μελετούμε διαφορετικές συνήθειες τοπολογίες δικτύου, όπου και υπολογίζουμε το κλάσμα των κυψελών που μπορούν να απενεργοποιηθούν σε κάθε μία από αυτές, λαμβάνοντας υπόψη ένα πραγματικό προφίλ κίνησης.

4.3. Δυναμική κατανομή της κίνησης του δικτύου

Όπως είδαμε, η εργασία [24] προτείνει ένα προκαθορισμένο σχήμα απενεργοποίησης των σταθμών βάσης, το οποίο βασίζεται σε μία ντετερμινιστική κατανομή της κίνησης στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η τυχαία μεταβολή αλλά ούτε και η χωρική κατανομή της κίνησης του δικτύου. Στην εργασία [25], που επίσης ασχολείται με το θέμα της απενεργοποίησης των σταθμών βάσης σε συνθήκες χαμηλής κίνησης στο δίκτυο, διερευνούμε τη δυναμική μείωση των ενεργών σταθμών, λαμβάνοντας υπόψη την πληροφορία της τυχαίας κατανομής της κίνησης όλου του δικτύου, στον άξονα του χώρου και του χρόνου. Βασιζόμαστε σε προηγούμενες μελέτες [26], [27] αντιστάθμισης του φορτίου στο δίκτυο, οι οποίες επικεντρώνονται σε περιπτώσεις υψηλής κίνησης.

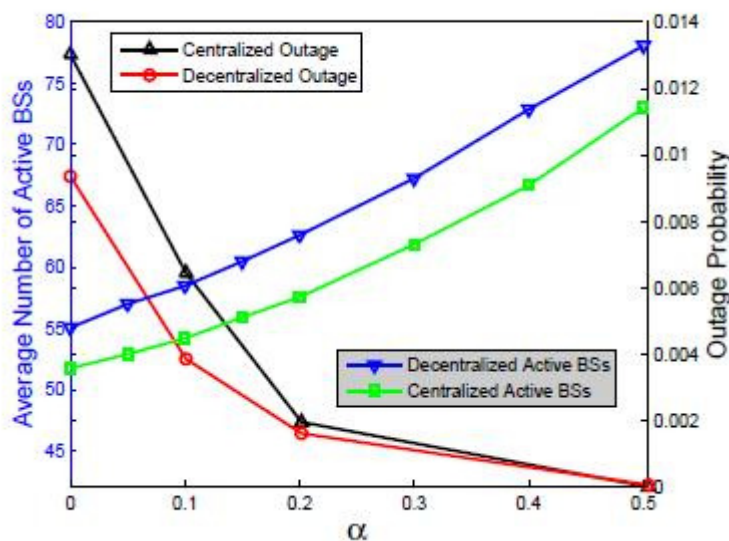
Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η μέση κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις κίνησης των χρηστών. Αρχικά διατυπώνουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, κατά το οποίο η συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, είναι η ενέργεια που καταναλώνεται στους ενεργούς σταθμούς βάσης. Το πρόβλημα υπόκειται σε δύο περιορισμούς: Κάθε χρήστης εξυπηρετείται από ένα μόνο σταθμό βάσης ενώ η συνολική χρήση του εύρους ζώνης από τους χρήστες ενός σταθμού δεν μπορεί να υπερβαίνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συγκεκριμένου σταθμού.

Επίσης θεωρούμε ως δεδομένο, ότι οι παρεμβολές μέσα σε μία κυψέλη έχουν ήδη ληφθεί υπόψη. Κατόπιν, προτείνουμε έναν κεντριοποιημένο (όταν όλες οι πληροφορίες για το κανάλι και οι απαιτήσεις κίνησης είναι γνωστές) και έναν κατανεμημένο (δεν απαιτείται να είναι γνωστή καμία πληροφορία για το κανάλι και τις απαιτήσεις κίνησης) αλγόριθμο για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος.

Σύμφωνα με τον κεντριοποιημένο αλγόριθμο, ο σταθμός βάσης που έχει τους περισσότερους πόρους του απασχολημένους, ενεργοποιείται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν όλοι οι χρήστες εξυπηρετούνται από ένα σταθμό, ή όταν όλοι οι σταθμοί έχουν ενεργοποιηθεί. Παρόλα αυτά, επειδή η κίνηση είναι συγκεντρωμένη στους ενεργούς σταθμούς βάσης και επειδή η άφιξη των νέων χρηστών είναι τυχαία, μπορεί ένας αριθμός χρηστών να μην μπορεί να εξυπηρετηθεί. Για το λόγο αυτό, εισάγουμε ένα περιθώριο προστασίας $\alpha_\beta \in [0,1]$.

Για τον κατανεμημένο αλγόριθμο δεν απαιτείται να είναι γνωστές, από την πλευρά του δικτύου, οι απαιτήσεις για την κίνηση στο δίκτυο και οι πληροφορίες για το κανάλι. Η βασική ιδέα στην περίπτωση αυτή, είναι ότι ο χρήστης επιλέγει το σταθμό βάσης από τον οποίο θα εξυπηρετηθεί, σύμφωνα με τη μεγιστοποίηση μίας συνάρτησης χρησιμότητας.

Η αξιολόγηση της απόδοσης των δύο παραπάνω προτεινόμενων αλγορίθμων, πραγματοποιείται μέσω προσομοιώσεων. Η διάταξη της κάθε προσομοίωσης είναι κυψέλες, εξαγωνικού σχήματος, με στρογγυλεμένες άκρες για την αποφυγή της οριακής επίδρασης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 4-3. Σύμφωνα με το σχήμα 4-3, όσο αυξάνεται το α (περιθώριο προστασίας), αμφότεροι οι δύο αλγόριθμοι απενεργοποιούν λιγότερους σταθμούς βάσης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται κατά πολύ η πιθανότητα διακοπής ζεύξης (outage probability). Επίσης, ο κατανεμημένος αλγόριθμος έχει καλύτερη απόδοση (μείωση πιθανότητας διακοπής ζεύξης), ενώ ταυτόχρονα ενεργοποιεί περισσότερους σταθμούς βάσης.



Σχήμα 4-3: Απόδοση των ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων

Οι παραπάνω παρατηρήσεις αναδεικνύουν μία εξισορρόπηση ανάμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην εξασφάλιση κάλυψης, γεγονός που είναι κρίσιμο για το μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας και παρακινούν για μελλοντική διερεύνηση των πιο πάνω αλγορίθμων, όπως η ατομική και δυναμική ρύθμιση του α_β .

4.4. Μεγέθυνση/Σμίκρυνση της κυψέλης (Cell Zooming)

Η έρευνα της εργασίας [25] συνεχίζεται στην [28], όπου και προτείνονται δύο δυναμικοί αλγόριθμοι που βασίζονται στην εφαρμογή της μεγέθυνσης/σμίκρυνσης της κυψέλης (cell zooming), έχοντας ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας σε συνδυασμό με την εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης στο δίκτυο.

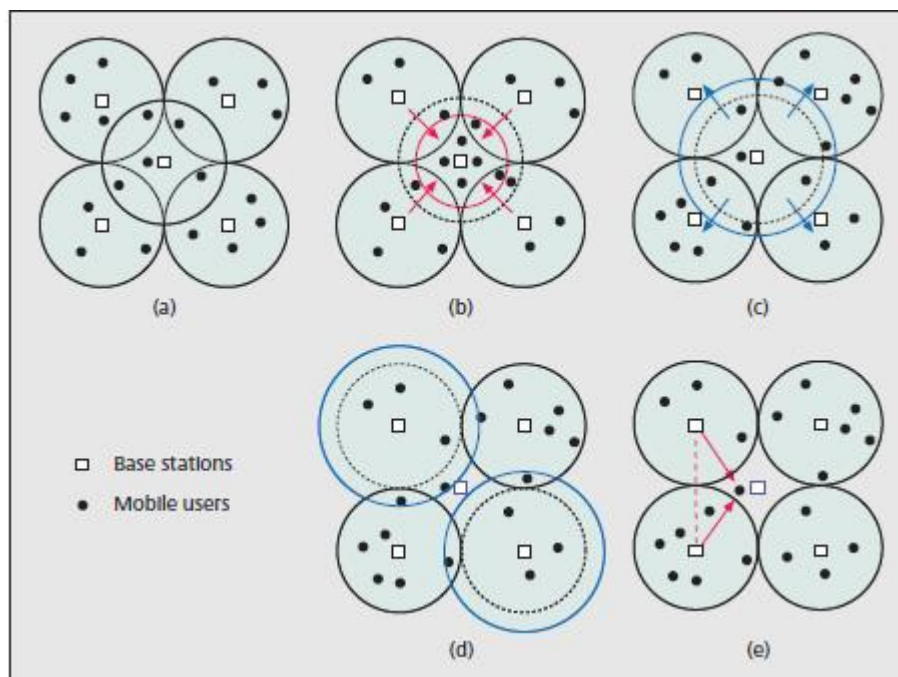
Αρχικά παρουσιάζεται η ιδέα του cell zooming, σύμφωνα με την οποία, το μέγεθος της κυψέλης ρυθμίζεται ανάλογα με τις συνθήκες κίνησης στο δίκτυο. Το cell zooming έχει την ικανότητα να αντισταθμίζει το φορτίο κίνησης και ταυτόχρονα να μειώνει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Ο όρος cell zooming είναι παρόμοιος με τον όρο cell breathing, ο οποίος και απαντάται συχνότερα στη βιβλιογραφία.

Ένα παράδειγμα του cell zooming δίνεται στο σχήμα 4-4.

Σε αυτό το σχήμα, απεικονίζεται ένα κυψελωτό δίκτυο με πέντε κυψέλες. Μία κεντρική κυψέλη περιβάλλεται από τέσσερις γειτονικές. Οι σταθμοί βάσεις στο κέντρο της κάθε κυψέλης απεικονίζονται με ένα μικρό τετράγωνο. Οι συνδρομητές κατανέμονται τυχαία στις κυψέλες και απεικονίζονται με τελείες. Όταν κάποιοι συνδρομητές κινούνται στην κεντρική κυψέλη και προκαλούν συμφόρηση, η κεντρική κυψέλη μπορεί να σμικρυνθεί (zoom in) και με αυτόν τον τρόπο να απελευθερωθεί από τη συμφόρηση (σχήμα 4-4b).

Από την άλλη μεριά, αν κάποιοι συνδρομητές μετακινούνται εκτός της κεντρικής κυψέλης και προκαλούν συμφόρηση στις γειτονικές κυψέλες, τότε αυτές μπορούν να σμικρυνθούν και η κεντρική κυψέλη να υποστεί μεγέθυνση, έτσι ώστε να αποφευχθεί οποιοδήποτε κενό στην κάλυψη.

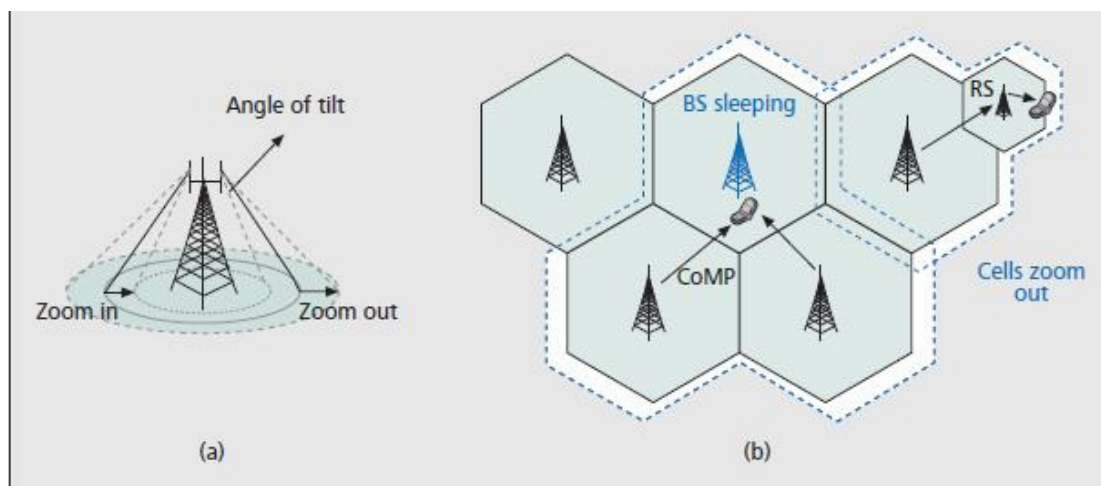
Αν οι γειτονικές κυψέλες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν υψηλή χωρητικότητα και δεν είναι απαραίτητο να σμικρυνθούν, τότε η κεντρική κυψέλη μπορεί επίσης να επιλέξει να μεταβεί σε κατάσταση sleep με στόχο να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, οι γειτονικές κυψέλες μπορούν είτε να κάνουν zoom out έτσι ώστε να φροντίσουν τις ανάγκες κάλυψης (σχήμα 4-4d), ή μπορούν να εξυπηρετήσουν τους εναπομείναντες συνδρομητές μεταδίδοντας συνεργατικά (σχήμα 4-4e).



Σχήμα 4-4: Λειτουργία Cell zooming στα κυψελωτά δίκτυα

α)Κυψέλες στο πρωτότυπο μέγεθός τους β) Zoom in της κεντρικής κυψέλης όταν αυξάνεται το φορτίο της γ) Zoom out της κεντρικής κυψέλης όταν το φορτίο της μειώνεται δ) Η κεντρική κυψέλη σε κατάσταση sleep και zoom out των γειτονικών ε) Η κεντρική κυψέλη σε κατάσταση sleep και οι γειτονικές μεταδίδουν συνεργατικά

Διάφορες ήδη υπάρχουσες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του cell zooming, όπως η φυσική ρύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος του σταθμού βάσης, η συνεργατική λειτουργία των σταθμών βάσης, και οι σταθμοί αναμετάδοσης (Relay stations) (σχήμα 4-5).



Σχήμα 4-5: Τεχνικές υλοποίησης του cell zooming: α) Zoom in και zoom out με φυσικές ρυθμίσεις της κεραίας β) Cell zoom out μέσω συνεργατικής λειτουργίας των BS και μέσω relaying.

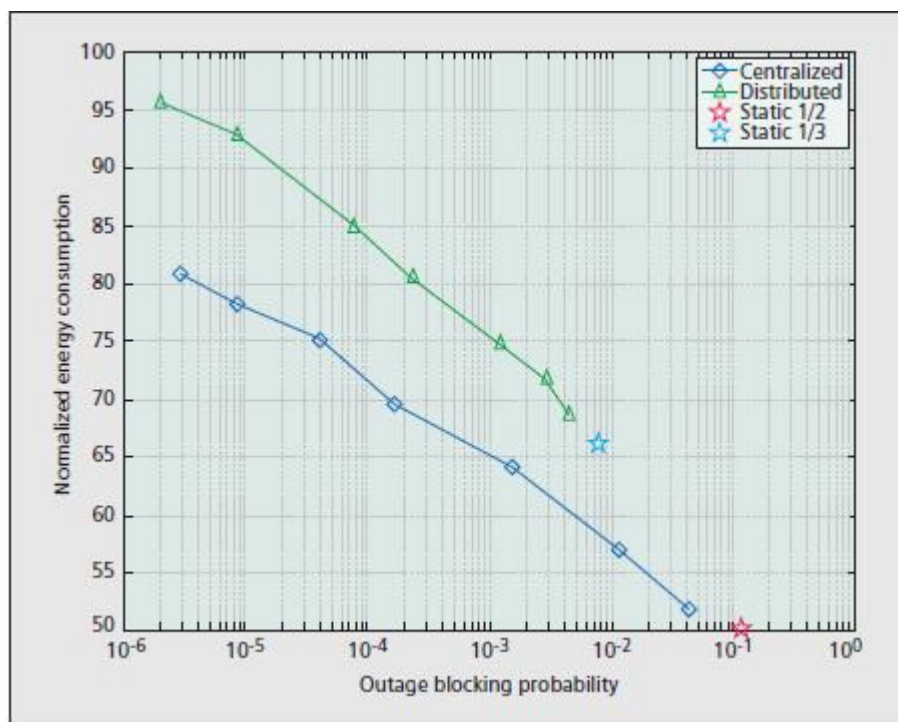
Στην περίπτωση μελέτης της εφαρμογής του cell zooming για εξοικονόμηση ενέργειας, προτείνονται στην [28] δύο δυναμικοί αλγόριθμοι για cell zooming. Ο πρώτος είναι ένας κεντροποιημένος αλγόριθμος, στον οποίο οι συνθήκες του καναλιού και οι απαιτήσεις του χρήστη στο δίκτυο, συλλέγονται μέσω ενός διακομιστή (cell zooming server) και η κατανομή πόρων και οι λειτουργίες του cell zooming πραγματοποιούνται με ένα κεντροποιημένο τρόπο. Ο δεύτερος αλγόριθμος είναι ένας κατανεμημένος αλγόριθμος. Κάθε χρήστης (MU) διαλέγει το σταθμό βάσης (BS) από τον οποίο θα εξυπηρετηθεί, βάσει των πληροφοριών που μεταδίδονται από όλους τους σταθμούς βάσης του δικτύου.

Ο προτεινόμενος κεντροποιημένος αλγόριθμος σκοπεύει στην μετατόπιση της κίνησης προς τους σταθμούς με το υψηλότερο φορτίο. Η μετατόπιση της κίνησης επιτυγχάνεται με έναν λεγόμενο άπληστο τρόπο, έχοντας ως στόχο να απενεργοποιηθούν όσο το δυνατό περισσότεροι σταθμοί με πολύ χαμηλό φορτίο. Αυτός ο αλγόριθμος βρίσκει εφαρμογή σε κάθε ένα χρήστη ξεχωριστά, εξετάζοντας κάθε φορά αν η διαδικασία μετακίνησης καθενός χρήστη ικανοποιεί τους στόχους κάλυψης και εξυπηρέτησης φορτίου κίνησης.

Ο προτεινόμενος κατανεμημένος αλγόριθμος παρέχει εξοικονόμηση ενέργειας σαν μία τεχνική μεταπομπής παραμέτρου συνάρτησης. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, κάθε χρήστης διαλέγει το σταθμό βάσης μόνος του, ανάλογα με την κατάσταση στο κανάλι και την κίνηση στον συγκεκριμένο σταθμό βάσης. Η ρύθμιση των παραμέτρων προτίμησης, κατά τη μεταπομπή του χρήστη, γίνεται με τη χρήση μίας συνάρτησης που δίνει μεγαλύτερο βάρος στους σταθμούς βάσης που συγκεντρώνουν μεγαλύτερο φορτίο

κίνησης σε συγκεκριμένες θέσεις και που ταυτόχρονα επιτρέπει στους σταθμούς βάσης με χαμηλότερο φορτίο να πέφτουν σε κατάσταση sleep.

Κατά τη μελέτη της προσομοίωσης, συγκρίνονται οι δύο παραπάνω εκδοχές δίνοντας έμφαση στο συμβιβασμό ανάμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας και την κάλυψη. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φαίνεται στο σχήμα 4-6, όπου και παρατηρούμε ότι ο κεντρικοποιημένος αλγόριθμος έχει καλύτερη απόδοση από τον αντίστοιχο κατακεντρωμένο.



Σχήμα 4-6: Απόδοση των cell zooming αλγορίθμων

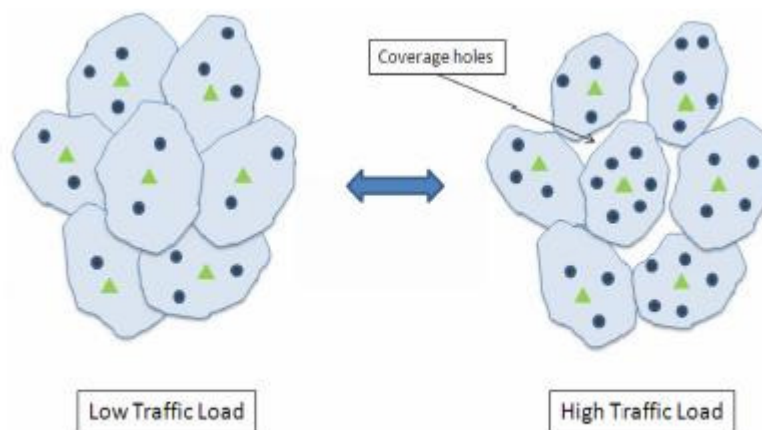
4.5. Cell Breathing και εξοικονόμηση ενέργειας

4.5.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της αλλαγής του μεγέθους της κυψέλης, διερευνάται επίσης σαν τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας, στις εργασίες [29], [30], όπου το φαινόμενο αυτό συναντάται με τον όρο cell breathing.

Τα breathing cells είναι πιθανό να εμφανιστούν αν η διαδικασία ελέγχου ισχύος, στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, δεν λειτουργεί ικανοποιητικά. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει, αν λόγω αυξημένων παρεμβολών οι μακρινοί χρήστες δεν εξυπηρετούνται πια και συνεπώς, η ενεργή ακτίνα της κυψέλης μειώνεται. Μαζί με τη μείωση όμως της κυψέλης, σταδιακά μειώνονται και οι χρήστες και άρα οι παρεμβολές. Συνεπώς, νέοι χρήστες απομακρυσμένοι από το Node B μπορούν πάλι να συνδεθούν στο σύστημα, γεγονός που συνεπάγεται την αύξηση της ακτίνας κάλυψης της κυψέλης [31].

Το cell breathing μπορεί να οδηγήσει σε κενά κάλυψης (coverage holes). Τα κενά αυτά είναι συγκεκριμένες περιοχές στο δίκτυο όπου δεν υπάρχει εγγυημένη κάλυψη του χρήστη, λόγω χαμηλών επιπέδων σήματος. Μία απεικόνιση του cell breathing φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4-7). [29]



Σχήμα 4-7: Cell breathing και κενά κάλυψης στο δίκτυο

Στις δύο επόμενες υποπαραγράφους, περιγράφονται οι μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας που διερευνώνται στις [29],[30] και οι οποίες βασίζονται στο φαινόμενο του cell breathing. Η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία [29], μελετά την εφαρμογή του cell breathing σε συνδυασμό με την βελτιστοποίηση στην κλίση (tilt optimization) της κεραίας, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στο δίκτυο. Η εργασία [30] βασισμένη στο cell breathing, προτείνει ένα σχήμα δύο επιπέδων για τη λειτουργία των σταθμών βάσης του δικτύου. Η αρχιτεκτονική των δύο επιπέδων που προτείνεται στην [30], έχει επίσης σαν στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας στο κινητό δίκτυο.

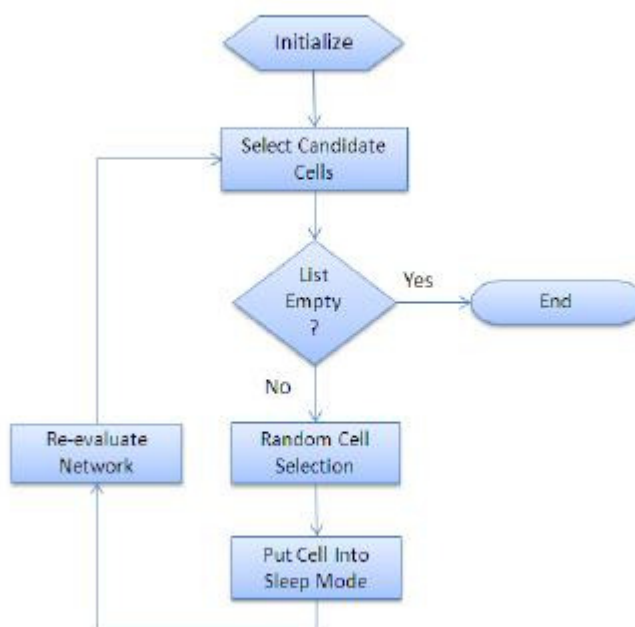
4.5.2 Cell breathing και tilt optimization

Η εργασία [29] διερευνά το φαινόμενο του cell breathing σαν ένα τρόπο εξοικονόμησης ενέργειας, σε συνδυασμό με την προϋπόθεση ότι οι κυψέλες του δικτύου, καθ' όλη τη διάρκεια που το φορτίο τους είναι πολύ χαμηλό, μεταβαίνουν σε κατάσταση sleep. Η έρευνα πραγματοποιείται σε tilt optimized δίκτυο, το οποίο χρειάζεται να επαναβελτιστοποιηθεί, έπειτα από τη μετάβαση των κυψελών σε κατάσταση sleep. Στην εργασία [29] μελετάται επίσης το πιθανό κέρδος από τη διαδικασία της επαναβελτιστοποίησης.

Η τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας που προτείνεται στην [29] εκμεταλλεύεται το γεγονός των μεταβολών στην κίνηση του φορτίου στο δίκτυο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (24 ώρες). Η πιο πάνω τεχνική, προτείνει τη μετάβαση σε κατάσταση sleep ορισμένων σταθμών βάσης τις ώρες της ημέρας κατά τις οποίες το φορτίο των πιο πάνω σταθμών είναι χαμηλό.

Η επιλογή της ομάδας των κυψελών που μπορεί να τεθεί σε κατάσταση sleep, γίνεται συγκρίνοντας το μέσο φορτίο των κυψελών με μία προκαθορισμένη τιμή κατώφλι. Η τιμή κατώφλι θέτει προτεραιότητες ανάμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην απόδοση του δικτύου. Ένα υψηλό επίπεδο κατωφλίου θα οδηγούσε πάρα πολλές κυψέλες σε κατάσταση sleep, επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο αρνητικά την απόδοση του δικτύου. Από την άλλη μεριά, μία χαμηλή τιμή κατώφλι, θα έκανε εξαιρετικά δύσκολη τη μετάβαση μίας κυψέλης σε κατάσταση sleep, γεγονός που θα έβαζε εμπόδια στην πιθανότητα εξοικονόμησης ενέργειας στο δίκτυο. Η τιμή κατώφλι που επιλέγεται στην έρευνα [29] προέρχεται από έναν συμβιβασμό των δύο παραπάνω υποθέσεων, μιας και επιτρέπει τη μετάβαση των κυψελών σε κατάσταση sleep, ενώ παράλληλα περιορίζει τις επιδράσεις που μπορεί να δημιουργηθούν στην απόδοση του δικτύου από την πιο πάνω μετάβαση.

Η επιλογή των κυψελών που θα μεταβούν σε κατάσταση sleep, δεν αποφασίζεται αυτόνομα από κάθε κυψέλη, αλλά ακολουθείται η ακολουθιακή διαδικασία που απεικονίζεται στο σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας sleep mode

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, κάθε φορά που μία συγκεκριμένη κυψέλη τίθεται σε κατάσταση sleep, το δίκτυο αξιολογεί τις επιδράσεις από αυτή τη μετάβαση. Στη συνέχεια εξετάζεται ένα νέο σετ κυψελών. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν δεν υπάρχει καμία κυψέλη υποψήφια προς εξέταση.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται κατά τη φάση των προσομοιώσεων είναι η εξής: Αρχικά βελτιστοποιείται η κλίση των κεραιών στο δίκτυο. Οι μεταβολές της κίνησης αναπαρίστανται με την μεταβολή στον αριθμό των χρηστών. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μία ανάλυση για τον υπολογισμό των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει το βελτιστοποιημένο δίκτυο.

Η βελτιστοποίηση κεραίας εκτελείται μέσω ενός αλγορίθμου που επιλέγει για κάθε σταθμό βάσης την καλύτερη κλίση της κεραίας. Η απόφαση για την πιο πάνω επιλογή

βασίζεται σε ένα σύνολο από παράγοντες που περιλαμβάνουν: Το κάθετο σχέδιο ακτινοβολίας της κεραίας, το ύψος της κεραίας και τη θέση του σταθμού βάσης σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς βάσης στο δίκτυο.

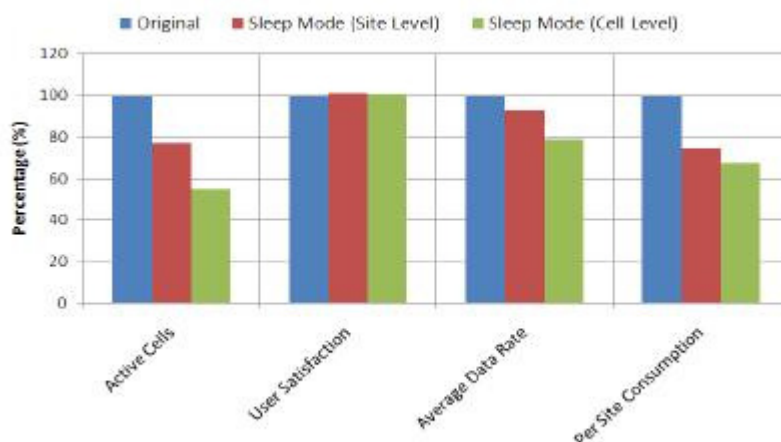
Κατόπιν προσδιορίζεται ποσοτικά η απόδοση και η ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου. Ο προσδιορισμός αυτός πραγματοποιείται για τα διαφορετικά προφίλ κίνησης του δικτύου. Οι τιμές που προκύπτουν από τον ποσοτικό προσδιορισμό, χρησιμοποιούνται σαν αναφορά για τη σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που αποκτώνται όταν κάποιες κυψέλες του δικτύου τεθούν σε κατάσταση sleep. Η διαδικασία μετάβασης των κυψελών σε κατάσταση sleep πραγματοποιείται μόνο κατά τις ώρες που το φορτίο κίνησης είναι χαμηλό. Αφού αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της μετάβασης των κυψελών σε κατάσταση sleep, πραγματοποιείται ξανά βελτιστοποίηση στην κλήση των κεραιών του δικτύου.

Το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις, βασίζεται σε ένα αστικό κυψελωτό δίκτυο και αποτελείται από τρεις κυψέλες. Η τοποθέτηση της κάθε κυψέλης και ο προσανατολισμός των κεραιών της (οριζόντιος και κάθετος) βασίζονται στο σχεδιασμό ενός πραγματικού κινητού δικτύου.

Κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος η κίνηση του δικτύου χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: Υψηλή και Χαμηλή. Ο αριθμός των χρηστών που χρησιμοποιείται σε κάθε κατηγορία, υπολογίζεται κατά αναλογία του μέγιστου αριθμού των χρηστών που υποστηρίζονται από το δίκτυο, όταν όλες οι κυψέλες είναι ενεργές.

Το μοντέλο ισχύος που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις, βασίζεται σε διάφορα μοντέλα πομποδεκτών σταθμού βάσης (BTS). Δεν περιλαμβάνει την ισχύ που δαπανάται στο σταθμό βάσης για τις συνδέσεις, την ψύξη και τη διατήρηση αντιγράφων ασφαλείας.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι αν εφαρμοστεί η μεθοδολογία μετάβασης των σταθμών σε κατάσταση sleep, είναι πιθανό να έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, κατά 33%. Η εξοικονόμηση αυτή δεν προκαλεί υποβάθμιση στην απόδοση του δικτύου. Από την άλλη μεριά όμως παρατηρείται μία μείωση στο μέσο ρυθμό δεδομένων του χρήστη. Η μείωση αυτή μετριάζεται αφού εκτελεστεί η βελτιστοποίηση της κεραίας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται και γραφικά στο σχήμα 4-9.



Σχήμα 4-9: Κανονικοποιημένα αποτελέσματα προσομοιώσεων

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υλοποίηση της μεθοδολογίας που προτείνεται στην [29], σε μία πυκνή περιοχή δικτύου, μπορεί να παρέχει μία υπολογίσιμη μείωση στη κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη μεριά, η βελτιστοποίηση κεραίας φαίνεται να έχει αμελητέα επίδραση την απόδοση του δικτύου.

4.5.3 Cell breathing και μέθοδος αρχιτεκτονικής δύο επιπέδων

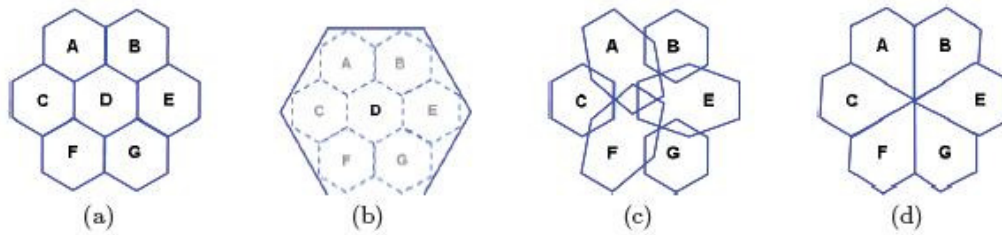
Η εργασία [30] διερευνά τη δυναμική εφαρμογή του cell breathing σαν ένα τρόπο μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο, σε συνδυασμό με το γεγονός των μεταβολών του φορτίου κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η τεχνική εξοικονόμησης της ενέργειας που προτείνεται, είναι ένα πρακτικό σχήμα 2 επιπέδων, που μεταβάλλει τα μεγέθη των κυψελών ανάμεσα σε δύο σταθερές τιμές, ανάλογα με το μέγεθος της κίνησης στο δίκτυο. Επίσης προτείνονται κάποιες αυτοδιαχειριζόμενες τεχνικές που κάνουν εφικτή την πιο πάνω δυναμική ρύθμιση του μεγέθους των κυψελών.

Από τη στιγμή που οι απαιτήσεις κίνησης στο δίκτυο μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, δεν μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο ένα μέγεθος κυψέλης έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα στο δίκτυο, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Από την άλλη μεριά, η αυθαίρετη μεταβολή στα μεγέθη των κυψελών, αφού το δίκτυο έχει υλοποιηθεί, ίσως δεν είναι πρακτικά εφικτή, τη στιγμή που οι σταθμοί βάσης μπορούν να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένες και σταθερές τοποθεσίες, κατά το σχεδιασμό του δικτύου.

Η ρύθμιση των συνόρων μίας κυψέλης-φαινόμενο cell breathing- χρησιμοποιείται ήδη στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, σε περιορισμένο όμως βαθμό. Σύμφωνα με το cell breathing, μία κυψέλη με υψηλό φορτίο συρρικνώνεται λόγω παρεμβολών, οπότε και οι πιο μακρινοί χρήστες της κυψέλης εξυπηρετούνται από γειτονικές κυψέλες. Η εργασία [30] προτείνει τη χρήση του cell breathing ως τρόπο εξοικονόμησης ενέργειας, προτείνοντας την απενεργοποίηση (και όχι τη συρρίκνωση) κάποιων κυψελών. Εισάγεται μία κυψελωτή αρχιτεκτονική 2 επιπέδων (υψηλό επίπεδο, χαμηλό επίπεδο), κατά την οποία γίνεται αυτόματη ανίχνευση των απαιτήσεων κίνησης σε διαφορετικές τοποθεσίες του δικτύου. Ακολούθως, επιλέγεται το καλύτερο μέγεθος για την κάθε κυψέλη, μεταξύ μίας μικρής λίστας προτεινόμενων τιμών. Η επιλογή της τιμής του μεγέθους, γίνεται ανάλογα με τις τρέχουσες απαιτήσεις κίνησης στις κυψέλες αυτές. Ως εκ τούτου, όλες οι κυψέλες είναι ενεργές και λειτουργούν ως εξής: Όταν οι απαιτήσεις χωρητικότητας στο δίκτυο είναι μεγάλες, το μέγεθος των κυψελών είναι μικρό. Κατά τις περιόδους που το φορτίο κίνησης είναι χαμηλό, οι κυψέλες που έχουν μέγεθος κάτω από το χαμηλό επίπεδο απενεργοποιούνται, ενώ οι κυψέλες που έχουν μέγεθος πάνω από το υψηλό επίπεδο επεκτείνονται ώστε να εξυπηρετήσουν τους χρήστες των απενεργοποιημένων κυψελών.

Η κίνηση στο δίκτυο είναι συνήθως υψηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας, φτάνει σε μέγιστη τιμή το απόγευμα και μειώνεται κατά πολύ τη διάρκεια της νύχτας. Η κυψελωτή αρχιτεκτονική 2 επιπέδων που προτείνεται στην [30], μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας, προσαρμόζοντας το μέγεθος της κάθε κυψέλης σύμφωνα με τις διακυμάνσεις της κίνησης που αναφέρονται παραπάνω.

Για παράδειγμα, θεωρούμε τους 7 σταθμούς βάσης A-G, σύμφωνα με το σχήμα 4-10a. Θεωρούμε επίσης μία ομοιόμορφη κατανομή 700 ενεργών χρηστών σε αυτήν την περιοχή, κατά την ώρα αιχμής. Τα μεγέθη των κυψελών είναι σχεδιασμένα ώστε να υποστηρίζουν το μέγιστο φορτίο της ώρας αιχμής. Αν υποθέσουμε ότι κατά τη διάρκεια των ωρών μη αιχμής, υπάρχουν μόνο 70 χρήστες στην περιοχή και μόνο 10 από αυτούς εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης F.



Σχήμα 4-10: (a) Διάταξη κυψελών για υψηλή κίνηση, (b) Η κυψέλη D καλύπτει την περιοχή των δευτερευόντων κυψελών (c) Κάποιοι από τους γείτονες της D αναλαμβάνουν την κάλυψη (d) Όλοι οι γείτονες της D αναλαμβάνουν την κάλυψη

Οι 10 χρήστες αυτοί μπορούν να εξυπηρετηθούν είτε από το σταθμό βάσης D, οποίος θα χρειαστεί να αυξήσει την ισχύ του, είτε μπορούν να εξυπηρετηθούν από τον κεντρικό σταθμό βάσης F. Από πλευράς κατανάλωσης ισχύος, αν το ποσοστό επαύξησης της ισχύος στο σταθμό βάσης D, που χρησιμεύει για να εξυπηρετήσει τους 10 χρήστες, είναι μικρότερο από το ποσό ισχύος που δαπανάται για να παραμένει ενεργός ο σταθμός βάσης F, εξυπηρετώντας τους 10 χρήστες, ο σταθμός βάσης F θα πρέπει να απενεργοποιηθεί και οι χρήστες να εξυπηρετηθούν από το σταθμό D.

Σύμφωνα με το σχήμα 4-10b, η κυψέλη κάτω από το σταθμό D, αναφέρεται σαν *κυψέλη ομπρέλα*, ενώ οι υπόλοιπες κυψέλες λέγονται *δευτερεύουσες κυψέλες*. Οι σταθμοί βάσης των κυψελών, αναφέρονται σαν *σταθμοί βάσης ομπρέλα* και *δευτερεύοντες σταθμοί βάσης* αντίστοιχα. Αν ένας σταθμός βάσης είναι ενεργός, ο *σταθμός βάσης ομπρέλα* μπορεί να μειώσει την ισχύ μετάδοσής του σε αυτόν τον τομέα (μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την κάλυψη σε αυτήν την κατεύθυνση) για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας. Στα σχήματα 4-10c και 4-10d, η κυψέλη D είναι η δευτερεύουσα κυψέλη με πολλαπλές *κυψέλες ομπρέλες*. Οι δευτερεύουσες κυψέλες μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορους τρόπους όπως:

- **Μικροκυψέλες:** Οι συμβατικοί σταθμοί βάσης που έχουν ανεξάρτητες συνδέσεις στο δίκτυο κορμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υλοποιήσουν δευτερεύουσες κυψέλες. Οι σταθμοί αυτοί μπορούν να εφοδιαστούν με υλικό που είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό σε σύγκριση με το υλικό των *σταθμών βάσης ομπρέλα*, για το λόγο ότι οι σταθμοί βάσης μικροκυψελών εξυπηρετούν μικρότερες περιοχές. Η διαχείριση κάθε μίας κυψέλης γίνεται ανεξάρτητα και πραγματοποιείται από το δίκτυο πρόσβασης.
- **Σταθμοί αναμετάδοσης (Relays):** Σαν δευτερεύουσες κυψέλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν οι σταθμοί αναμετάδοσης. Αν θεωρήσουμε τη μακροκυψέλη σαν κυψέλη ομπρέλα, τότε μπορούν να υλοποιηθούν δευτερεύουσες απομακρυσμένες κυψέλες μέσω της χρήσης των σταθμών αναμετάδοσης. Η διαχείριση των σταθμών αναμετάδοσης γίνεται από το δίκτυο πρόσβασης και όχι από το δίκτυο κορμού. Το μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση, είναι ότι η διαχείριση που αφορά την εκχώρηση των καναλιών των κυψελών ομπρέλα στις διάφορες απομακρυσμένες κυψέλες μέσω των relays, δεν είναι μία εύκαμπτη διαδικασία.
- **Remote Radio Heads (RRHs):** Ένας εναλλακτικός τρόπος υλοποίησης δευτερευουσών κυψελών, είναι τα RRH, στα οποία μεταφέρεται το σήμα του

σταθμού ομπρέλα μέσω οπτικής ίνας. Στη συνέχεια και αφού ενισχυθεί κατάλληλα, το σήμα επανεκπέμπεται για την κάλυψη της δευτερεύουσας κυψέλης.

Για να αντιμετωπίσουμε τη δυναμική φύση της μεταβολής του φορτίου κίνησης σε συνάρτηση με το χρόνο, θα ήταν πιο αποδοτικό, το δίκτυο των κυψελών ομπρέλας και των δευτερευόντων κυψελών, να οργανωθεί σε μία περιοχή που βασίζεται στην τρέχουσα ζήτηση χωρητικότητας αυτής της συγκεκριμένης περιοχής. Κάθε σταθμός βάσης πρέπει να μπορεί να αποφασίζει το μέγεθος ζήτησης στην κυψέλη του, οπότε και να παίρνει αυτός το ρόλο της δευτερεύουσας κυψέλης, ή να τίθεται σε κατάσταση sleep, ούτως ώστε η κυψέλη ομπρέλα να μπορεί να εξυπηρετήσει την περιοχή. Στην ουσία, η κυψελωτή αρχιτεκτονική θα πρέπει να διαθέτει αυτό-οργάνωση (self-organization), έχοντας ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Η περιγραφή του self organized network (SON) υπάρχει στο πρότυπο της 3GPP TS 32.521. Ο σκοπός του δικτύου SON είναι να αυτοματοποιήσει τη διαχείριση ενός δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό κόμβων. Η έννοια του SON επεκτείνεται στην [30,] έτσι ώστε η διαχείριση του δικτύου να αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η αυτο-διαχείριση του δικτύου μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους όπως:

Σχήμα time sleep: Σε αυτό το σχήμα, κάθε δευτερεύον σταθμός βάσης ενεργοποιείται μετά από ένα προκαθορισμένο διάστημα χρόνου, και ελέγχει τη ζήτηση στην περιοχή κάλυψής του. Ο δευτερεύον σταθμός παραμένει ενεργός και αναλαμβάνει τους χρήστες στην περιοχή κάλυψής του, μόνο αν η ζήτηση είναι αρκετά υψηλή, σε βαθμό ώστε να είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό να εξυπηρετηθεί η περιοχή από τον δευτερεύον σταθμό βάσης παρά από τον σταθμό βάσης ομπρέλα. Αν η ζήτηση πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, ο δευτερεύον σταθμός βάσης μεταβαίνει σε κατάσταση sleep.

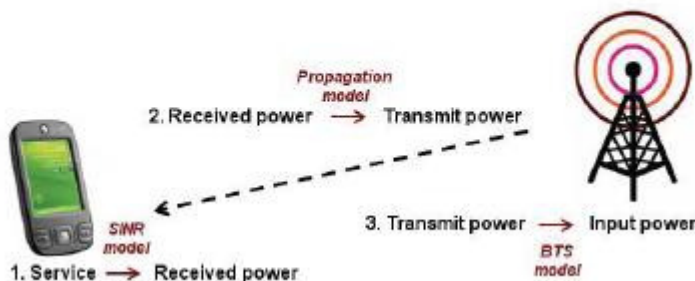
Πρόβλεψη περιοχής χρήστη: Η τρέχουσα θέση, η κατεύθυνση κίνησης και η ταχύτητα ενός χρήστη, ανιχνεύεται ελέγχοντας τη δύναμη του σήματος από αυτόν το χρήστη σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης ομπρέλα. Η μελλοντική τοποθεσία του χρήστη μπορεί να προβλεφθεί βάσει των παραπάνω στοιχείων. Αν ένας σταθμός βάσης ομπρέλα προβλέψει έναν αρκετά υψηλό αριθμό χρηστών στην περιοχή κάλυψης ενός δευτερεύοντα σταθμού βάσης, στέλνει ένα σήμα στη δευτερεύουσα κυψέλη για να την ενεργοποιήσει.

Reverse channel sensing: Σε αυτό το σχήμα αυτο-διαχείρισης, ο δευτερεύον σταθμός βάσης παραμένει σε μία κατάσταση πολύ χαμηλής ισχύος (τα στοιχεία που είναι ενεργά είναι το Rx και το κανάλι έλεγχου), ελέγχοντας το θόρυβο αντίστροφης ζεύξης (ανάμεσα στους χρήστες και στο σταθμό ομπρέλα). Με αυτόν τον τρόπο, ο σταθμός βάσης κάνει μία εκτίμηση στον αριθμό των χρηστών που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψής του. Αν ο εκτιμώμενος αριθμός των χρηστών είναι πάνω από ένα κατώφλι, τότε ενεργοποιείται ο δευτερεύον σταθμός βάσης για να εξυπηρετήσει τους χρήστες στην περιοχή κάλυψής του. Η κυψέλη ομπρέλα μπορεί να συνεισφέρει στο πιο πάνω σχήμα, παρέχοντας στον τρέχοντα χρήστη πληροφορίες για τις δευτερεύουσες κυψέλες που βρίσκονται γύρω από αυτήν.

Η ανάλυση της [30] περιλαμβάνει επίσης τη μοντελοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος και μελετάται πώς η συνολική κατανάλωση ισχύος εξαρτάται από το μέγεθος της κυψέλης και το φορτίο κίνησης του δικτύου.

Η μοντελοποίηση που προτείνεται για την κατανάλωση ισχύος μίας κυψέλης, βασίζεται στον τύπο της κυψέλης, τον τύπο της υπηρεσίας που παρέχει το δίκτυο, τον τύπο του εδάφους, τους ενεργούς χρήστες της κυψέλης και το σταθερό ποσό

ενέργειας που δαπανάται για τη λειτουργία του σταθμού βάσης της κυψέλης. Τα βασικά συστατικά του μοντέλου κατανάλωσης ισχύος φαίνονται και στο σχήμα 4-11.



Σχήμα 4-11: Μεθοδολογία υπολογισμού ισχύος ενός σταθμού βάσης για μία συγκεκριμένη υπηρεσία του χρήστη

Αρχικά μοντελοποιείται η κατανάλωση ενέργειας μίας κυψέλης και κατόπιν η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το μοντέλο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο, εξαρτάται, όπως αναφέρεται και παραπάνω και από το μέγεθος της κυψέλης (το δίκτυο που μοντελοποιείται αποτελείται από ομογενείς κυψέλες). Σύμφωνα λοιπόν με τον τύπο της μοντελοποίησης, μπορεί να αποφασιστεί το βέλτιστο μέγεθος κυψέλης, έτσι ώστε να η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο να είναι η μικρότερη δυνατή. Επίσης, μπορούμε να μελετήσουμε τις αλλαγές στο βέλτιστο μέγεθος της κυψέλης, μεταβάλλοντας και άλλες παραμέτρους, όπως τον τύπο της υπηρεσίας, τον αριθμό των ενεργών χρηστών και την ισχύ λειτουργίας του σταθμού βάσης.

Ακολουθεί η φάση των προσομοιώσεων, κατά την οποία προσομοιώνεται η ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου, με τη χρήση ενός μοντέλου κίνησης που βασίζεται σε αστικές μετρήσεις που προέρχονται από τρία διαφορετικά δίκτυα, GSM, UMTS και WiMAX, των οποίων οι παράμετροι φαίνονται στον πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Παράμετροι μοντελοποίησης αστικού δικτύου

	GSM900	UMTS FDD	WiMAX
Downlink Freq.	935 MHz	2110 MHz	2300 MHz
Channel b/w	200 kHz	5 MHz	10 MHz
GBR per user	13 kbps	384 kbps	5 Mbps
Channel Code	LPC	Turbo	Turbo, LDPC

Area of cell of radius d	hexagonal: $(3\sqrt{3}/2) * d^2$
Urban pathloss model	COST 231 Walfisch-Ikegami [1]
Urban fading values	Rayleigh [26] 9dB (0 for WiMAX) Shadow[21] 5dB, Indoor prop. 10dB
BS power model	Antenna feeder loss 3dB, Tx gain 10dB, Power amplifier efficiency ~ 50%

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με τη χρήση του μοντέλου κίνησης, φαίνονται στον πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-2: Μοντέλο προσομοίωση κίνησης

Parameters	GSM	UMTS	WiMAX
Area	100 Sq Km		
Population	20000	4000	2000
Cell Capacity	270 kbps	8 Mbps	10 Mbps
Fixed Radius	480 meters	300 meters	200 meters
Dynamic Radii	480 and 920 meters	300 and 700 meters	200 and 480 meters
Optimal Saving	36%	53%	54%
Dynamic Saving	29%	39%	40%

Η αρχιτεκτονική 2 επιπέδων αναφέρεται στον πίνακα 4-2, με τον όρο “Dynamic” σχήμα. Το σχήμα “Dynamic” επιλέγει δύο τιμές ακτίνας κυψέλης, οι οποίες ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας μέσα στην ημέρα και εναλλάσσει τη λειτουργία των κυψελών ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές, ανά μία ώρα. Η μεταβολή στις ακτίνες των κυψελών, γίνεται ανάλογα με την τρέχουσα κίνηση στο δίκτυο. Από τον πίνακα 4-2, φαίνεται ότι η αρχιτεκτονική 2 επιπέδων επιτυγχάνει ένα ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, που φτάνει μέχρι το 40% καθ’ όλη τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη φάση της προσομοίωσης εφαρμόζονται και άλλα δύο σχήματα αρχιτεκτονικής του δικτύου. Το σχήμα “Fixed”, σύμφωνα με το οποίο επιλέγεται μία σταθερή ακτίνα κυψέλης η οποία ελαχιστοποιεί τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και ταυτόχρονα ικανοποιεί τις απαιτήσεις χωρητικότητας του δικτύου. Το σχήμα “Optimal” δείχνει το ιδανικό σενάριο, όπου η ακτίνα της κυψέλης μεταβάλλεται με σκοπό να γίνει η βέλτιστη, από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας. Οι μεταβολές στην ακτίνα των κυψελών, λαμβάνουν χώρα ανά μία ώρα. Το σχήμα “Optimal”, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4-2, εξοικονομεί το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας και αποτελεί το πάνω όριο για κάθε σχήμα cell breathing που υιοθετείται σε ένα δίκτυο.

Τέλος, για να είναι εφικτή η αυτόματη ρύθμιση του μεγέθους των κυψελών σε ένα δίκτυο, χρειάζεται να ξεπεραστεί ένας αριθμός εμποδίων όπως, το ανομοιόμορφο σχήμα των κυψελών στο πραγματικό δίκτυο (προβλήματα στο σχεδιασμό των ραδιοσυχνοτήτων), ο καθορισμός των σημείων εναλλαγής και το σύστημα υποστήριξης λειτουργίας.

Παρά τις παραπάνω προκλήσεις, το κέρδος από την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται από τη μεταβολή του μεγέθους των κυψελών, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι οι αρχιτεκτονικές των δικτύων που μπορούν να ρυθμίζονται δυναμικά και αυτόματα, είναι πολύ πιο ενεργειακά αποδοτικές και για το λόγο αυτό θα πρέπει να προτιμούνται κατά το σχεδιασμό ενός κινητού δικτύου.

5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ «ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ» (DIMMING) ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ

5.1. Εισαγωγή

Το φορτίο κίνησης ενός κυψελωτού δικτύου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα ένας αριθμός σταθμών βάσης να υπολειτουργεί σε περιόδους χαμηλής κίνησης.

Η ιδέα της απενεργοποίησης (sleeping) των σταθμών βάσης όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι χαμηλή, προτείνεται σαν ένας τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας στο κινητό δίκτυο. Αντίστοιχες προσεγγίσεις που βασίζονται στην παραπάνω ιδέα, περιγράφονται στο κεφάλαιο 3. Παρόλα αυτά, οι προσεγγίσεις που στηρίζονται στο sleeping, δεν αποτελούν πάντα τις βέλτιστες επιλογές εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα κινητό δίκτυο για λόγους όπως: η τήρηση ρυθμιστικών απαιτήσεων των ραδιο-επικοινωνιών, η διατήρηση της κάλυψης στο δίκτυο, η ασφάλεια του δικτύου, ο συγχρονισμός κλπ.

Η προσέγγιση εξοικονόμησης ενέργειας που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο, εφαρμόζει τεχνικές βαθμιαίας εξασθένισης των σταθμών βάσης (dimming base stations) [32]. Με τον όρο dimming εννοούμε την κατάσταση κατά την οποία θέτουμε το σταθμό βάσης σε μειωμένη λειτουργία, όσον αφορά τη χωρητικότητα, τις προσφερόμενες υπηρεσίες και την κατανάλωση ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε τη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας μίας κυψέλης, χωρίς να θέτουμε την κυψέλη αυτή εξολοκλήρου σε κατάσταση sleeping. Στο εξής θα χρησιμοποιούμε αντί του όρου “dimming”, τον ελληνικό όρο «εξασθένιση».

Στις ενότητες που ακολουθούν, αναπτύσσονται οι τεχνικές διαχείρισης δικτύου που χρησιμοποιούν «εξασθένιση» συχνότητας και «εξασθένισης» του συνδυασμού συχνότητας και υπηρεσιών για την εξοικονόμηση ενέργειας στο κινητό δίκτυο πρόσβασης. Ειδικότερα, περιγράφονται οι τεχνικές «εξασθένισης» ενός σταθμού βάσης, η μοντελοποίηση της τεχνικής «εξασθένισης» και τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της στο κινητό δίκτυο.

5.2. Τεχνικές «εξασθένισης» του σταθμού βάσης

Οι σταθμοί βάσης μπορούν να υποστούν «εξασθένιση», με τρεις κυρίως βασικούς τρόπους, δηλαδή: (1) «εξασθένιση» χωρητικότητας, (2) «εξασθένιση» συχνότητας και (3) «εξασθένιση» υπηρεσιών.

Η «εξασθένιση» χωρητικότητας αναφέρεται στη μείωση της γεωγραφικής κάλυψης περιοχής μία κυψέλης, η οποία επιτυγχάνεται με τη μείωση του επιπέδου ισχύος λειτουργίας για όλες τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες. Για παράδειγμα, αν αποφασιστεί να μην υποστηρίζεται η soft μεταπομπή κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλού φορτίου κίνησης, τότε μπορεί να μειωθεί η επικαλυπτόμενη κάλυψη των κυψελών.

Η χωρητικότητα και η ισχύς κατανάλωσης σε μία κυψέλη, μπορεί να μειωθεί διαγράφοντας κάποιες ραδιοσυχνότητες. Η τεχνική αυτή, ονομάζεται «εξασθένιση» συχνότητας και συντελεί στη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται εξαιτίας των απαιτήσεων μετάδοσης και ψύξης/θέρμανσης.

Η τεχνική «εξασθένισης» υπηρεσιών των σταθμών βάσης που βρίσκονται σε λειτουργία, αναφέρεται στη παροχή μειωμένων υπηρεσιών από έναν σταθμό βάσης. Τα δίκτυα 3G (UMTS), 3.5G (HSPA) και 4G (LTE, WiMAX), παρέχουν επιπλέον μία κλίμακα εξελιγμένων υπηρεσιών δεδομένων (π.χ. streaming video, πρόσβαση στο Διαδίκτυο, βιντεοκλήσεις κλπ.) σε σχέση με τις υπηρεσίες της φωνής και SMS που παρέχουν τα δίκτυα 2G. Είναι γνωστό ότι η ψηλότερη ρυθμοαπόδοση των εξελιγμένων υπηρεσιών δεδομένων απαιτεί υψηλά επίπεδα ισχύος. Για το λόγο αυτό η τεχνική «εξασθένισης» υπηρεσιών (π.χ. παροχή μόνο 2G υπηρεσιών), είναι μία τεχνική διατήρησης ισχύος για τις 3G, 3.5G και 4G κυψέλες. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της νύχτας και κατά μήκος ενός εγχώριου αυτοκινητόδρομου, ένας πάροχος υπηρεσιών μπορεί να εφαρμόσει «εξασθένιση» υπηρεσιών στις κυψέλες της συγκεκριμένης περιοχής, εξουδετερώνοντας τις κινητές υπηρεσίες δεδομένων και υποστηρίζοντας μόνο υπηρεσίες φωνής και SMS.

Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι η μετάβαση σε κατάσταση sleeping ενός σταθμού βάσης, είναι μία ειδική περίπτωση «εξασθένισης» χωρητικότητας (π.χ. μείωση της ισχύος λειτουργίας στο μηδέν) και «εξασθένισης» συχνότητων (π.χ. «σβήνουν» όλα τα κανάλια συχνότητων).

5.3. Μοντέλα των τεχνικών «εξασθένισης»

Ο σκοπός της μοντελοποίησης των τεχνικών «εξασθένισης», είναι ο καθορισμός των συχνότητων και υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν σε κάθε κυψέλη σαν μία συνάρτηση του φορτίου της κυψέλης. Τα σενάρια μοντελοποίησης είναι δύο. Το πρώτο σενάριο μοντελοποίησης αφορά στην περίπτωση της τεχνικής «εξασθένισης» συχνότητας και το δεύτερο στην περίπτωση της τεχνικής «εξασθένισης» του συνδυασμού συχνότητας και υπηρεσιών.

Κατά τη μοντελοποίηση της «εξασθένισης» συχνότητας, θεωρούμε ένα δίκτυο που αποτελείται από μία ομάδα N κυψελών, το οποίο παρέχει υπηρεσίες σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Η μοντελοποίηση της τεχνικής «εξασθένισης» συχνότητας διατυπώνεται σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, έστω $P1$. Η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα $P1$, αναζητά την ομάδα των συχνότητων που απαιτούνται, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται για να μεταφερθεί όλη η ζήτηση της κίνησης κάθε κυψέλης για κάθε χρονική περίοδο της ημέρας. Στο παραπάνω πρόβλημα $P1$, θέτουμε σαν περιορισμό το γεγονός ότι η χωρητικότητα μίας κυψέλης για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Επιπλέον, απαιτείται να γνωρίζουμε με σαφήνεια αν κάθε συχνότητα της κυψέλης βρίσκεται σε χρήση ή όχι.

Εκτός από το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης $P1$, μοντελοποιούμε επίσης τις υπηρεσίες που παρέχονται από το δίκτυο, ανά ενεργή συχνότητα. Η μοντελοποίηση γίνεται ως εξής: Θεωρούμε ότι το κάθε σύνολο υπηρεσιών ανήκει σε μία κατηγορία, έστω s . Το s παίρνει τιμές από 1 έως μία μέγιστη τιμή, έστω S . Όταν ένας πάροχος προσφέρει μία κατηγορία υπηρεσιών, υπονοείται ότι προσφέρει επίσης στους συνδρομητές όλα τα σύνολα υπηρεσιών που ανήκουν σε χαμηλότερες κατηγορίες. Για παράδειγμα, αν το δίκτυο του παρόχου υποστηρίζει υπηρεσίες UMTS 384 kbps, κατηγορίας $s=3$, τότε σίγουρα το δίκτυο υποστηρίζει και τις υπηρεσίες για $s=2$ και $s=1$. Επίσης, αν για παράδειγμα ενεργοποιηθεί η υπηρεσία HSDPA, τότε υποστηρίζονται αυτόματα και οι UMTS, GPRS και GSM υπηρεσίες.

Ο στόχος της μοντελοποίησης της «εξασθένισης» υπηρεσιών, σύμφωνα με την πιο πάνω κατηγοριοποίηση των υπηρεσιών, είναι να μελετήσουμε τις επιδράσεις που

προκαλούνται από τη μείωση των υπηρεσιών που προσφέρονται σε μία ενεργή συχνότητα και ως εκ τούτου έχουμε μείωση στην κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.

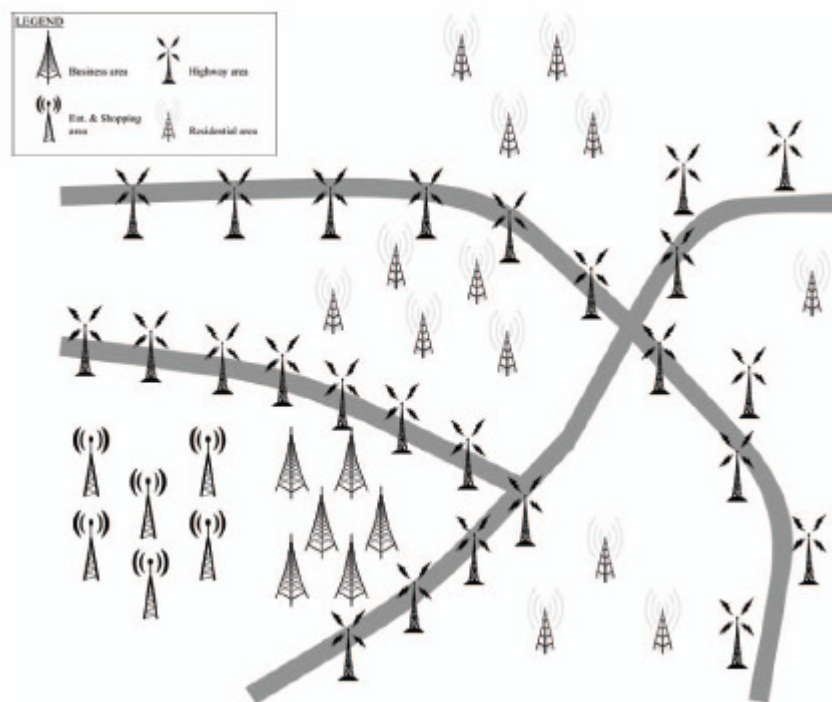
Η μοντελοποίηση της «εξασθένησης» συχνότητας και υπηρεσιών, διατυπώνεται σαν ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης έστω P2. Η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα P2, αναζητά την ομάδα των συχνοτήτων και υπηρεσιών που απαιτούνται, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται όταν μεταφερθεί όλη η ζήτηση της κίνησης κάθε κυψέλης για κάθε χρονική περίοδο της ημέρας. Στο πρόβλημα P2, θέτουμε σαν περιορισμό, το γεγονός ότι η χωρητικότητα μίας κυψέλης, για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση στη συγκεκριμένη κυψέλη. Θέτουμε επίσης σαν περιορισμό, ότι η χωρητικότητα που απαιτείται για κάθε κατηγορία υπηρεσιών, πρέπει να είναι τόση ώστε να μπορεί να μεταφέρει τη ζήτηση της κίνησης που δημιουργείται από την ενεργοποίηση της αντίστοιχης κατηγορίας υπηρεσιών. Επιπλέον, απαιτείται, κάθε φορά, να είναι ενεργοποιημένη μόνο μία κατηγορία υπηρεσιών για μία συχνότητα της κυψέλης. Θα πρέπει επίσης να γνωρίζουμε με σαφήνεια αν κάθε συχνότητα της κυψέλης βρίσκεται σε χρήση ή όχι.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης (P1) και (P2), είναι προβλήματα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, τα οποία μπορούν να λυθούν με τη χρήση τυποποιημένων τεχνικών, όπως η branch and bound μέθοδος.

5.4. Αριθμητικά αποτελέσματα

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της μελέτης των τεχνικών «εξασθένησης», προκύπτουν από την επίλυση των μοντέλων εξασθένησης. Η εφαρμογή των πιο πάνω μοντέλων γίνεται σε ένα δείγμα δικτύου UMTS, το οποίο είναι μία μικρογραφία ενός δικτύου μίας μικρής πόλης. Το σχεδιάγραμμα του δικτύου πρόσβασης, αποτελείται από 50 κυψέλες ($N=50$), και έχει τη μορφή του σχήματος 5-1. Στο σχήμα 5-1, παρατηρούμε επίσης, ότι οι κυψέλες χωρίζονται σε 4 κατηγορίες, ανάλογα με το προφίλ της κίνησης και το είδος της κοινωνικής χρήσης που χαρακτηρίζει την περιοχή της κάλυψης της κάθε κυψέλης. Οι κατηγορίες αυτές είναι: (1) Εργασία (Business), (2) Διασκέδαση και αγορές (Entertainment and Shopping), (3) Αυτοκινητόδρομος (Highway), (4) Οικιστική περιοχή (Residential).

Χωρίζουμε μία τυπική μέρα σε πέντε χρονικές περιόδους, για κάθε μία από τις οποίες το μέγιστο φορτίο κίνησης δίνεται στον Πίνακα 5-1. Το μέγιστο φορτίο, δίνεται σε % ποσοστό επί της χωρητικότητας της κυψέλης.



Σχήμα 5-1: Δείγμα 50 κόμβων ενός κυβελωτού δικτύου

Πίνακας 5-1: Μέγιστο φορτίο σαν ποσοστό της χωρητικότητας κυψέλης

	Period (hrs)				
	0-7	7-9	9-16	16-18.5	18.5-24
Business	10	20	90	90	20
Ent. and Shopping	10	10	35	50	90
Highway	20	90	20	90	20
Residential	20	35	20	50	90

Υποθέτουμε ότι ο πάροχος υπηρεσιών έχει άδεια φάσματος, η οποία αντιστοιχεί σε 5 FDD 5 MHz UMTS κανάλια και αναπτύσσει κάθε συχνότητα σε κάθε κυψέλη. Χρησιμοποιώντας τα τυπικά δεδομένα από τα φύλλα προϊόντων των κατασκευαστών εξοπλισμού για τα UMTS δίκτυα, θέτουμε την κατανάλωση ισχύος ανά συχνότητα, για τις HSDPA υπηρεσίες, στις περιοχές εργασίας, διασκέδασης, οικιστική περιοχή και αυτοκινητόδρομος, ως 165, 165, 200 και 210 W αντίστοιχα. Συνεπώς, μία κυψέλη στην οικιστική περιοχή που θα χρησιμοποιούσε και τις 5 συχνότητες, θα κατανάλωνε ισχύ ίση με 1000 W. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από τα μοντέλα εξασθένισης προσδιορίζονται με τη χρήση του αλγορίθμου branch and bound ο οποίος υλοποιείται με τον optimizer CPLEX 9.1.

Αρχικά, αξιολογούμε τα αριθμητικά αποτελέσματα για το μοντέλο «εξασθένισης» της συχνότητας (P1). Ειδικότερα, υπολογίζουμε το μέσο ποσό εξοικονόμησης ημερήσιας ενέργειας για κάθε περιοχή κίνησης και παίρνουμε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 5-2. Παρατηρούμε ότι το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να φτάσει το 65% σε κάποια τμήματα του δικτύου.

Πίνακας 5-2: Μέση εξοικονόμηση ενέργειας, ανά τύπο σταθμού βάσης, από την «εξασθένιση» συχνότητας

Cell Type	Energy saving
Business	48.33%
Ent. and Shopping	51.67%
Highway	65.00%
Residential	44.79%

Στη συνέχεια, αξιολογούμε τις επιδράσεις από την «εξασθένιση» του συνδυασμού υπηρεσιών και συχνότητας. Θεωρούμε ότι κάθε κυψέλη παρέχει 4 κατηγορίες υπηρεσιών (HSDPA δεδομένα, UMTS δεδομένα, GPRS δεδομένα, UMTS/GSM υπηρεσίες φωνής). Υπολογίζουμε κατά προσέγγιση την εξοικονόμηση ενέργειας ανά συχνότητα, παρέχοντας μόνο υπηρεσίες της χαμηλότερης κατηγορίας. Ο υπολογισμός της ενέργειας που εξοικονομείται, γίνεται με τη χρήση πληροφοριών που βρίσκονται σε φυλλάδια κατασκευαστών με τεχνικά στοιχεία, τα οποία αφορούν UMTS σταθμούς βάσης. Ειδικότερα, η εξοικονόμηση ενέργειας ανά συχνότητα, που προέρχεται από τη μείωση των υπηρεσιών κατά σειρά, από HSDPA σε UMTS, GPRS και GSM, είναι αντίστοιχα 20%, 25% και 35%.

Η μέση ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε τύπο σταθμού βάσης, παρουσιάζεται στον πίνακα 5-3. Στον πιο κάτω πίνακα, παρατηρούμε ότι η «εξασθένιση» υπηρεσιών παρέχει επιπρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας, στο ήδη υπάρχον ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο έχει προέλθει από την «εξασθένιση» συχνότητας.

Πίνακας 5-3: Μέση εξοικονόμηση ενέργειας ανά τύπο σταθμού βάσης από τη συνδυασμένη «εξασθένιση» υπηρεσιών και συχνότητας

Cell Type	Energy saving
Business	58.65%
Ent. and Shopping	62.42%
Highway	70.60%
Residential	51.33%

Επίσης παρατηρούμε ότι η «εξασθένιση» του συνδυασμού συχνότητας και υπηρεσιών μπορεί να αποφέρει μέχρι και 70% εξοικονόμηση στη μέση ενέργεια που καταναλώνεται σε τμήματα του δικτύου.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω, είναι ότι η δυνατότητα των τεχνικών «εξασθένισης» να προσαρμόζουν τη χωρητικότητα και τις υπηρεσίες του κινητού δικτύου, ανάλογα με τις χρονικές και χωρικές μεταβολές του φορτίου κίνησης, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας στο κινητό δίκτυο.

6. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

6.1. Εισαγωγή

Ο κατάλληλος σχεδιασμός και ανάπτυξη του δικτύου πρόσβασης σε ένα κινητό δίκτυο, είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες αποδοτικής διαχείρισης της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Οι βελτιωμένες τεχνικές ανάπτυξης του δικτύου προϋποθέτουν, κατά κανόνα, τη μείωση του αριθμού των σταθμών βάσης στο δίκτυο, χωρίς όμως να επηρεάζεται αρνητικά η αποδοτικότητα του δικτύου.

Όσον αφορά τις ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές σχεδίασης, υπάρχει η άποψη ότι οι τοπολογίες δικτύου που διακρίνονται από υψηλή πυκνότητα μικρών και χαμηλής ισχύος σταθμών βάσης, βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου. Από την άλλη μεριά, οι τοπολογίες που έχουν χαμηλή πυκνότητα μεγάλων και υψηλής ισχύος σταθμών βάσης, δεν έχουν αρκετά καλή ενεργειακή αποδοτικότητα [13].

Το κέρδος που επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών στο σχεδιασμό του κινητού δικτύου, μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά με τον ορισμό κατάλληλων μετρικών απόδοσης του δικτύου, όπως είναι η ραδιοκάλυψη και η αποδοτικότητα φάσματος.

Το ζήτημα της ενεργειακής αποδοτικότητας των διαφορετικών τοπολογιών δικτύων, μελετάται στις εργασίες [33], [34], [35] και περιγράφεται στις επόμενες υποενότητες. Στις παραπάνω εργασίες, εισάγονται εκείνες οι έννοιες και μετρικές που βοηθούν στον υπολογισμό και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός ετερογενούς κυψελωτού κινητού δικτύου. Το ετερογενές δίκτυο αποτελείται από ένα συνδυασμό μακρο-σταθμών, μικρο-σταθμών και φεμτο-σταθμών. Οι μακροσταθμοί, μικροσταθμοί και τα femtocells, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, είναι διαφορετικοί τύποι σταθμών βάσης και περιγράφονται στην υποενότητα που ακολουθεί.

Ο αριθμός των διαφορετικών τύπων σταθμών που χρησιμοποιείται για τη μελέτη του ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού του δικτύου, ποικίλει ανάλογα με τους στόχους αποδοτικότητας του εκάστοτε συστήματος, όπως π.χ. είναι η ραδιοκάλυψη και η αποδοτικότητα φάσματος.

6.2. Είδη Κυψελών κινητών δικτύων

Τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών παρέχουν κάλυψη σε περιοχές με διαφορετική συγκέντρωση χρηστών (κέντρο πόλης, προάστια, αγροτικές περιοχές, κτίρια ή αυτοκινητόδρομοι) και κατά συνέπεια με διαφορετικές απαιτήσεις, όσον αφορά την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της κάθε περιοχής, τα δίκτυα χρησιμοποιούν κυψέλες διαφορετικών τύπων, το μέγεθος και το σχήμα των οποίων καθορίζεται από τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα, σε συνδυασμό με το συνολικό κόστος. Τα είδη κυψελών που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ανάγκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα διάφορα περιβάλλοντα είναι τα εξής:

Μακροκυψέλες : [36]

Είναι κυψέλες με ακτίνα μεγαλύτερη από 1km και χρησιμοποιούνται για τη ραδιοκάλυψη ευρύτερων γεωγραφικών περιοχών με μέση ή χαμηλή πυκνότητα χρηστών (όπως

αγροτικές περιοχές). Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, χρησιμοποιούνται ως κυψέλες-ομπρέλες (umbrella cell), που καλύπτουν μια περιοχή αποτελούμενη από πολλές μικρότερες κυψέλες, με σκοπό την κάλυψη των κενών που ενδεχομένως να υπάρχουν μεταξύ των μικρότερων κυψελών, την απορρόφηση μέρους της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, την ικανοποίηση διαπομπών, που προέρχονται από μη διαθέσιμότητα πόρων της αντίστοιχης μικρότερης κυψέλης, και τη δέσμευση διαπομπών χρηστών, που κινούνται γρήγορα για μείωση του αριθμού των διαπομπών ανά κλήση. Το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος της μακροκυψέλης καθορίζεται από περιορισμούς που αφορούν τη μέγιστη ισχύ και την πολυπλοκότητα του τερματικού.

Μικροκυψέλες: [36]

Αυξάνουν τη χωρητικότητα του συστήματος, αλλά η διαχείριση των ασυρμάτων πόρων του κυψελωτού συστήματος γίνεται πιο δύσκολη. Μπορούν να διακριθούν ως μονοδιάστατες, δύο ή τριών διαστάσεων, ανάλογα με το κατά πόσο καλύπτουν δρόμους, διασταυρώσεις δρόμων ή πολυώροφα κτίρια αντίστοιχα. Ο σταθμός βάσης μιας μικροκυψέλης (μικρο-σταθμός) εκπέμπει χαμηλή ισχύ και η κεραία του μπορεί να είναι τοποθετημένη σε στύλο φωτισμού, σε ύψος περίπου 5m από το έδαφος. Και το κινητό τερματικό επίσης εκπέμπει με χαμηλή ισχύ, γεγονός που συντελεί στη μεγαλύτερη διάρκεια της μπαταρίας του. Επειδή οι κεραίες των σταθμών βάσης βρίσκονται σε μικρό ύψος σε σχέση με τα τριγύρω κτίρια, τα ραδιοκύματα διαδίδονται κυρίως κατά μήκος των δρόμων. Οι κεραίες μπορεί να καλύπτουν αποστάσεις 100-200m προς κάθε κατεύθυνση του δρόμου, εξυπηρετώντας έτσι λίγα οικοδομικά τετράγωνα. Αυτό το περιβάλλον διάδοσης παρουσιάζει μικρή διασπορά καθυστέρησης, γεγονός που καθιστά δυνατή τη μετάδοση υψηλών ρυθμών δεδομένων.

Φεμτοκυψέλες: [37]

Πρόκειται για ένα μικρό κυψελωτό σταθμό βάσης, χαμηλού κόστους, που τοποθετείται από το χρήστη, δηλαδή ένα μικρής κλίμακας σημείο πρόσβασης χαμηλής ισχύος, που απευθύνεται σε οικιακά περιβάλλοντα ή σε μικρές επιχειρήσεις, παρέχοντάς τους υψηλής ποιότητας τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των φεμτοκυψελών, είναι η παροχή κάλυψης σε περιοχές που βρίσκονται στο εσωτερικό κτιρίων, όπου μέχρι τώρα η χρήση μακροκυψελών δεν επαρκούσε για τη μετάδοση καλής ποιότητας σήματος, λόγω των μεγάλων απωλειών διάδοσης. Επίσης η χρήση φεμτοκυψελών προσφέρει μεγαλύτερη επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και άρα μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Ακόμη συντελεί στην αποσυμφόρηση της κίνησης της μακροκυψέλης, αφού μπορεί να αναλάβει την εξυπηρέτηση χρηστών που βρίσκονται στην εμβέλειά της.

Αν συγκρίνουμε τους παραπάνω τύπους σταθμών βάσης, οι μικροσταθμοί βάσης καταναλώνουν μικρότερη ενέργεια σε σχέση με τους μακροσταθμούς. Επιπλέον, οι περιοχές που καλύπτονται από μικροσταθμούς, συνήθως χαρακτηρίζονται από καλύτερο μέσο λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή γιατί έχουν λιγότερες απώλειες όδευσης εξαιτίας της μικρότερης έκτασης των μικροκυψελών.

6.3.Ενεργειακή αποδοτικότητα των κινητών δικτύων με τη χρήση μικροσταθμών

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που απασχολεί τους παρόχους κινητών επικοινωνιών κατά το σχεδιασμό του δικτύου, είναι ο αριθμός των σταθμών βάσης που πρέπει να τοποθετηθούν, έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, να είναι η μικρότερη δυνατή, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιούνται και οι απαιτήσεις των χρηστών για ραδιοκάλυψη. Η τοποθέτηση μικροσταθμών βάσης παραπλευρώς με τους συμβατικούς

σταθμούς μεγαλύτερης ισχύος, προτείνεται στην [33] σαν ένας τρόπος ενεργειακά αποδοτικής σχεδίασης των κινητών δικτύων.

Η αξιολόγηση των εν δυνάμει βελτιώσεων στην κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο, από τη χρήση μικροσταθμών, υλοποιείται στη [33], με την εισαγωγή της έννοιας της κατανάλωσης ισχύος ανά περιοχή. Η έννοια αυτή, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου, σε συνάρτηση με το μέγεθός του και αποτελεί μία μετρική απόδοσης του συστήματος.

Η μετρική της κατανάλωσης ενέργειας ανά περιοχή, ορίζεται ως η μέση ισχύς που καταναλώνεται σε μία κυψέλη, διαιρούμενη με το μέσο εμβαδόν της συγκεκριμένης περιοχής και μετράται σε Watts ανά Km².

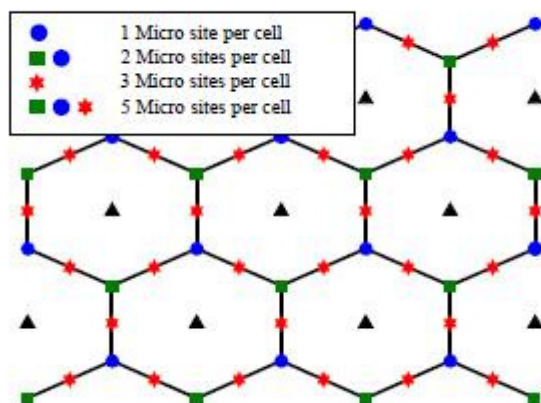
Σύμφωνα με την ανάλυση στην [33], το κινητό δίκτυο μοντελοποιείται σαν ένα κανονικό πλέγμα άπειρης έκτασης αποτελούμενο από εξαγωνικές κυψέλες που η μεταξύ τους απόσταση είναι D. Επίσης, γίνεται η παραδοχή, ότι η πυκνότητα της κίνησης στο δίκτυο ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή.

Η μοντελοποίηση του συστήματος ξεκινά με την ανάλυση του μοντέλου διάδοσης του σήματος. Το μοντέλο αυτό έχει διατυπωθεί στην εργασία [38] και βασίζεται στο γεγονός ότι η ποιότητα του σήματος μειώνεται εξαιτίας των απωλειών όδευσης, σκέδασης και ταχείας διάλειτουργίας. Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, τα μοντέλα διάδοσης που χρησιμοποιούνται, είναι αυτά που περιγράφονται στην εργασία [39].

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα μοντέλα ισχύος για τον συμβατικό μακροσταθμό και το μικροσταθμό. Τα μοντέλα αυτά είναι γραμμικά και απεικονίζουν τη σχέση ανάμεσα στη μέση κατανάλωση ισχύος και τη μέση μεταδιδόμενη, ανά σταθμό, ισχύ. Ακολούθως, δίνεται το μοντέλο κάλυψης της κυψέλης και η μετρική της αποδοτικότητας φάσματος ανά περιοχή [40].

Η αναλυτική μελέτη που βασίζεται στις πιο πάνω μετρικές και μοντέλα δείχνει ότι αν ληφθεί ως κριτήριο η κατανάλωση ισχύος ανά περιοχή, μπορεί να εκτιμηθεί το βέλτιστο μέγεθος της κυψέλης, δηλαδή η βέλτιστη απόσταση D μεταξύ δύο γειτονικών εξαγώνων. Το συμπέρασμα αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η απώλεια στο κανάλι (και συνεπώς η ισχύς μετάδοσης), επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την απόσταση D (κατά δύναμη μεγαλύτερη του 2), σε αντίθεση με το εμβαδόν της κυψέλης το οποίο είναι συνάρτηση του D².

Η μεταβολή της κατανάλωσης ισχύος ανά περιοχή, σε συνάρτηση της απόστασης των κυψελών και του αριθμού των μικροσταθμών, εξετάζεται και μέσω προσομοιώσεων. Στην εργασία [34] πραγματοποιούνται προσομοιώσεις που βασίζονται στην ανάλυση και τις προσεγγίσεις της [33]. Κατά τη φάση των προσομοιώσεων αυτών, λαμβάνεται υπόψη ένα κυψελωτό δίκτυο στο οποίο οι μακροσταθμοί είναι τοποθετημένοι σε ένα πλέγμα με εξαγωνικές κυψέλες και σε μία συγκεκριμένη απόσταση ο ένας από τον άλλον. Οι μικροσταθμοί τοποθετούνται στις άκρες των κυψελών, όπου το επίπεδο σήματος των μακροσταθμών αναμένεται να είναι χαμηλό (σχήμα 6-1).



Σχήμα 6-1: Τοποθέτηση μικροσταθμών σε ένα πλέγμα μακροσταθμών

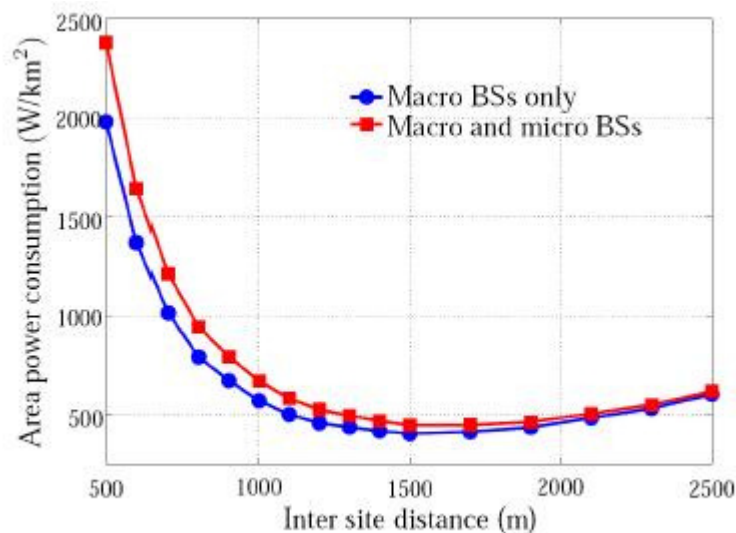
Οι μικροσταθμοί που τοποθετούνται στο δίκτυο, δεν δημιουργούν φαινόμενα επικάλυψης (δηλαδή δημιουργία νέων κυψελών), αλλά λειτουργούν συμπληρωματικά ως προς τους μακροσταθμούς, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου.

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται στην [34], λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα που προκύπτουν από τον ισολογισμό ισχύος και απεικονίζονται στον πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Ισολογισμός σχύος

	# Antennas (per sector)	# Sectors	Antenna gain	Noise figure
Macro BS	2	3	15 dBi	4 dB
Micro BS	1	1	2 dBi	4 dB
MS	1	–	-1 dBi	7 dB

Τα σενάρια των προσομοιώσεων είναι τα εξής: Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει ένα ομογενές δίκτυο μακροσταθμών, ενώ το δεύτερο ένα ετερογενές δίκτυο, που αποτελείται από συνδυασμό μακροσταθμών και μικροσταθμών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων απεικονίζονται στο σχήμα 6-2.



Σχήμα 6-2: Κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή συναρτήσει της απόστασης D

Από την ανάλυση του σχήματος 6-2, προκύπτει ότι στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ομογενές, δηλαδή αποτελείται μόνο από μακροσταθμούς, η κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή σημειώνει ελάχιστη τιμή όταν η απόσταση D είναι 1500 μέτρα. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ετερογενές, δηλαδή έχουν προστεθεί και μικροσταθμοί, η κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή σημειώνει ελάχιστη τιμή όταν η απόσταση D είναι 1600 μέτρα. Το γεγονός αυτό σημαίνει, ότι με την εισαγωγή των μικροσταθμών αυξάνεται το μέγεθος της κυψέλης, οπότε και είναι εφικτό να καλυφθεί μία συγκεκριμένη περιοχή με μικρότερο αριθμό μακροσταθμών.

Κατά τη φάση της προσομοίωσης, να μην λαμβάνεται η υπόψη η στατική ισχύς των μικροσταθμών, αλλά από την άλλη μεριά δεν λαμβάνεται επίσης υπόψη, το πλεονέκτημα που παρέχουν οι μικροσταθμοί στη χωρητικότητα του δικτύου. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η μετρική της κατανάλωσης ισχύος ανά περιοχή, δεν αποτελεί την αποκλειστική παράμετρο για τη μελέτη και σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών δικτύων. Επιπροσθέτως, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μετρικές που αφορούν την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου, σε σχέση με την ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία του δικτύου.

6.4. Βελτιώσεις στην αποδοτικότητα των ετερογενών κινητών δικτύων με τη χρήση μικροσταθμών

Η ετερογενής ανάπτυξη ενός κινητού δικτύου, η οποία περιλαμβάνει το συνδυασμό μακροσταθμών και μικροσταθμών, όπως έχει ήδη αναλυθεί στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν τεχνική σχεδιασμού η οποία στοχεύει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του δικτύου. Η μελέτη της παραπάνω τεχνικής και η αξιολόγηση των εν δυνάμει βελτιώσεων από την εφαρμογή της, πραγματοποιείται στην [33] και βασίζεται στις μετρικές της κατανάλωσης ενέργειας ανά περιοχή και της αποδοτικότητας φάσματος ανά περιοχή.

Οι παραπάνω μετρικές, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απόδοσης των κυψελωτών κινητών ραδιο-συστημάτων. Η έρευνα που πραγματοποιείται στην [33],

συνεχίζεται στην εργασία [35], όπου και επεκτείνεται η έννοια της αποδοτικότητας φάσματος ανά περιοχή.

Σύμφωνα με τις [33] και [40], η αποδοτικότητα φάσματος ανά περιοχή, ορίζεται ως το κλάσμα της μέσης συνολικής αποδοτικότητας φάσματος σε μία κυψέλη, προς το εμβαδόν της συγκεκριμένης κυψέλης. Μετράται συνήθως σε bit ανά second ανά Hertz ανά km^2 .

Ο πιο πάνω ορισμός, λαμβάνει υπόψη του μόνο τη μέση τιμή των εφικτών ρυθμών μετάδοσης ανά μονάδα εύρους ζώνης, ωστόσο δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη τις τιμές γύρω από τη μέση τιμή της κατανομής, αγνοώντας με αυτόν τον τρόπο τη δίκαια κατανομή συχνοτήτων (distribution fairness). Έχοντας ως στόχο την ενσωμάτωση της έννοιας της δικαιοσύνης (fairness) στη λογική της μετρικής της αποδοτικότητας φάσματος ανά περιοχή, η εργασία [35] επεκτείνει τους συλλογισμούς των [33] και [40], έτσι ώστε να συμπεριλάβει το fairness. Η αποδοτικότητα φάσματος ανά περιοχή, ορίζεται στην [35] ως το κλάσμα του α-ποσοστημορίου της συνολικής αποδοτικότητας φάσματος σε μία κυψέλη, προς το εμβαδόν της συγκεκριμένης κυψέλης. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στην [35] και για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιείται η λογική της ρυθμοαπόδοσης περιοχής ανά υποφέρων (T^{fo}).

Η αξιολόγηση της απόδοσης των διαφορετικών δικτύων που χρησιμοποιούνται κατά τη φάση των προσομοιώσεων της εργασίας [35], γίνεται με τη χρήση της μετρικής της κατανάλωσης ισχύος ανά περιοχή, όπως συμβαίνει και στην εργασία [33]. Κατά τη φάση των προσομοιώσεων, μελετάται παράλληλα η σχέση των ακολούθων παραμέτρων: Της απόστασης D μεταξύ δύο μακροσταθμών, του αριθμού των μικροσταθμών ανά κυψέλη, της αποδοτικότητας περιοχής, όπως επίσης και της ελάχιστης κατανάλωσης ισχύος ανά περιοχή.

Η δομή των κυψελωτών δικτύων που χρησιμοποιούνται κατά τις προσομοιώσεις, είναι ίδια με αυτήν που περιγράφεται στην προηγούμενη υποενότητα (βλέπε και σχήμα 6-1). Τα μοντέλα ισχύος για τον μακροσταθμό και τον μικροσταθμό είναι αυτά που προτείνονται στην εργασία [33]. Επίσης τα μοντέλα διάδοσης του σήματος, είναι αυτά που διατυπώνονται στην [41].

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται στην [35], λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του κυψελωτού δικτύου όπως αναφέρονται στον πίνακα 6-2, καθώς επίσης και τα δεδομένα που προκύπτουν από τον ισολογισμό ισχύος και παρουσιάζονται στον πίνακα 6-3.

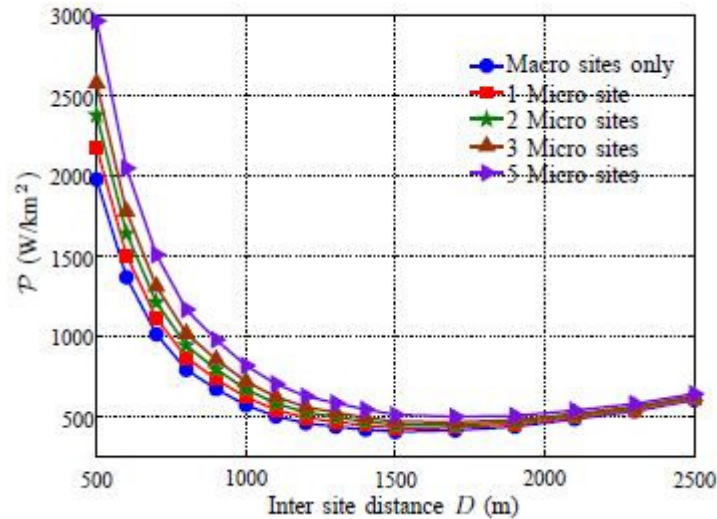
Πίνακας 6-2: Χαρακτηριστικά κυψελωτού δικτύου

Relevant LTE system parameters	
Carrier frequency	2.4 GHz
Bandwidth	5 MHz
FFT size	512
# Subcarriers occupied	300
Subcarrier spacing B_{sc}	15 kHz
Fading margins	
Fast fading margin	2 dB
Inter-cell interference margin	3 dB
Mobile terminal sensitivity	
Thermal noise	-174 dBm/Hz
SNR required	0 dB
Noise per subcarrier	-132 dBm
Receiver sensitivity per subcarrier	-120 dBm

Πίνακας 6-3: Ισολογισμός Ισχύος

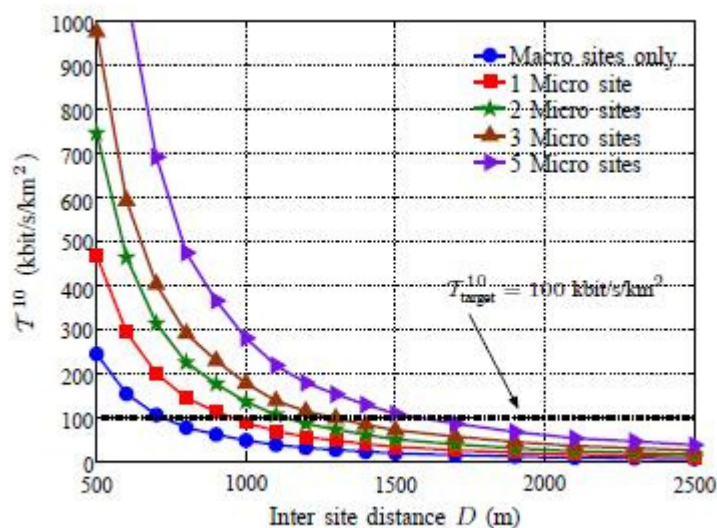
Parameter	Macro BS	Micro BS	MS
# Antennas (per sector)	2	1	1
# Sectors	3	1	–
Antenna gain (main lobe)	15 dBi	2 dBi	-1 dBi
Noise figure	4 dB	4 dB	7 dB

Η εκτίμηση της κατανάλωσης ισχύος ανά περιοχή, για τους διαφορετικούς σχηματισμούς του δικτύου, γίνεται με τον υπολογισμό της μέσης ισχύος που απαιτείται για κάλυψη $C=95\%$ και για αυξανόμενη απόσταση D . Από τη στιγμή που η αύξηση του μεγέθους της κυψέλης απαιτεί αύξηση της ισχύος, για σταθερή κάλυψη, υπάρχει μία σημαντική ανταλλαγή (tradeoff), ανάμεσα στην αύξηση της περιοχής υπό κάλυψη και στην αύξηση της κατανάλωσης ισχύος. Η κατανάλωση ισχύος για τους διαφορετικούς σχεδιασμούς του δικτύου (αυξανόμενος αριθμός μικροσταθμών ανά κυψέλη) συναρτήσει της απόστασης D , απεικονίζεται στο σχήμα 6-3.



Σχήμα 6-3: Κατανάλωση ισχύος ανά περιοχή συναρτήσει της απόστασης D , για διαφορετικές υλοποιήσεις

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις προσομοιώσεις, δείχνουν ότι ενώ η τοποθέτηση μικροσταθμών σε ένα ομογενές δίκτυο μακροσταθμών βελτιώνει την κάλυψη του δικτύου, από την άλλη δεν οδηγεί σε αξιοσημείωτη μείωση της κατανάλωσης ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μικροσταθμοί στοχεύουν στην αύξηση της ρυθμαπόδοσης τοπικά, εκμεταλλευόμενοι καλές συνθήκες μετάδοσης. Αυτό το γεγονός φαίνεται και στο σχήμα 6-4, όπου απεικονίζονται, για διαφορετικούς σχεδιασμούς δικτύων, η ρυθμαπόδοση περιοχής (για το 10-ποσοστημόριο της συνολικής αποδοτικότητας φάσματος) ανά υποφέρων (T^{10}), σε συνάρτηση με την απόσταση D .



Σχήμα 6-4: Ρυθμαπόδοση ανά υποφέρων για περιοχή 10-ποσοστημορίου, συναρτήσει της απόστασης D , για διαφορετικές υλοποιήσεις

Θέτοντας ως επιθυμητό στόχο μία συγκεκριμένη τιμή για το T^{10} , για διαφορετικούς σχεδιασμούς του δικτύου, μπορούν να προσδιοριστούν οι αποστάσεις D που

ικανοποιούν την παραπάνω τιμή στόχο. Βάσει αυτών των τιμών, βρίσκονται οι αποστάσεις που βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται και στην εργασία [33], στην οποία χρησιμοποιείται η μέση αποδοτικότητα φάσματος ανά περιοχή σαν μετρική αποδοτικότητας του δικτύου.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην [35], είναι ότι η τοποθέτηση μικροσταθμών σε ένα ομογενές δίκτυο μακροσταθμών, έχει σαν αποτέλεσμα μία αξιοσημείωτη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, όταν ταυτόχρονα επιδιώκεται ένας συγκεκριμένος στόχος ρυθμαπόδοσης στο κινητό δίκτυο.

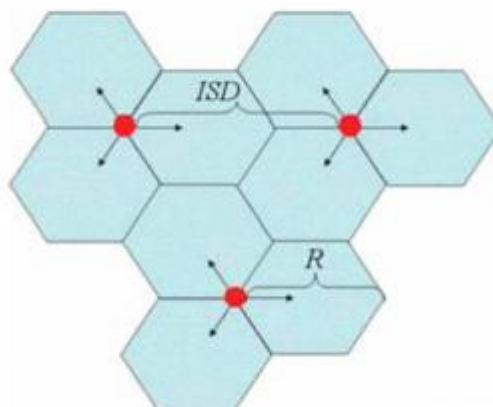
6.5.Ενεργειακή αποδοτικότητα του κινητού δικτύου με τη χρήση φεμτοκυψελών

Η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός κινητού δικτύου μπορεί να γίνει μέσω κατάλληλων τεχνικών ανάπτυξης του δικτύου πρόσβασης. Στις προηγούμενες υποενότητες αυτού του κεφαλαίου, μελετήθηκε το ενδεχόμενο μείωσης στην κατανάλωση ενέργειας του κινητού δικτύου, που μπορεί να προέλθει από τη χρήση μικροσταθμών σε ένα ομογενές δίκτυο μακροσταθμών. Σε αυτήν την υποενότητα, εστιάζουμε στην εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ταυτόχρονη χρήση μακροσταθμών και φεμτοσταθμών [41] στο δίκτυο πρόσβασης ενός WCDMA δικτύου.

Η ανάλυση και μελέτη της παραπάνω τεχνικής δε στηρίζεται σε μεθόδους προσομοιώσεων, όπως συμβαίνει στις προηγούμενες εργασίες [33], [34], [35]. Στην περίπτωση της [41], χρησιμοποιείται ένα απλό μοντέλο για την κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα περιοχής, το οποίο προέρχεται από τις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις για το φορτίο της WCDMA κάτω ζεύξης [42], [43]. Η συμπεριφορά των παραμέτρων που χρειάζονται για τη μελέτη της προσέγγισης, διακρίνεται μέσα από τις παραπάνω εξισώσεις μέσω της αφαιρετικής μεθόδου.

Η λογική της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η εξής: όταν σε ένα ομογενές δίκτυο εισάγονται φεμτοκυψέλες, ένα μέρος του φορτίου κίνησης εξυπηρετείται από τις φεμτοκυψέλες και δεν επιβαρύνει πια τους μακροσταθμούς. Στο WCDMA δίκτυο, η μείωση του φορτίου σε μία μακροκυψέλη, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης της πιο πάνω κυψέλης από τη γειτονική της ενεργή μακροκυψέλη, καθώς και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των πιο πάνω κυψελών.

Κατά τη φάση της μοντελοποίησης της προτεινόμενης προσέγγισης, η ακτίνα της κυψέλης (R) καθώς και η απόσταση (ISD) ανάμεσα στις δύο κυψέλες, ορίζεται σύμφωνα με το σχέδιο του σχήματος 6-5. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 6-5, κάθε κυψέλη αποτελείται από 3 τομείς και η περιοχή που καλύπτεται από μία κυψέλη τριών τομέων δίνεται από τη σχέση $A_{SITE}=9/4R^2=ISD^2$.



Σχήμα 6-5: Σχέδιο μακροκυψέλης: Ακτίνα κυψέλης και ISD

Το μοντέλο που προκύπτει κατά τη φάση της μοντελοποίησης, χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, η εξισορρόπηση φορτίου ανάμεσα στις μακροκυψέλες και τις φεμτοκυψέλες που εισάγονται στο δίκτυο των μακροκυψελών. Η παραπάνω διερεύνηση πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων που βασίζονται σε δύο σενάρια σύγκρισης. Ο στόχος των δύο σεναρίων, είναι να κάνουν ορατή την επίδραση της χρήσης των φεμτοκυψελών στην κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή.

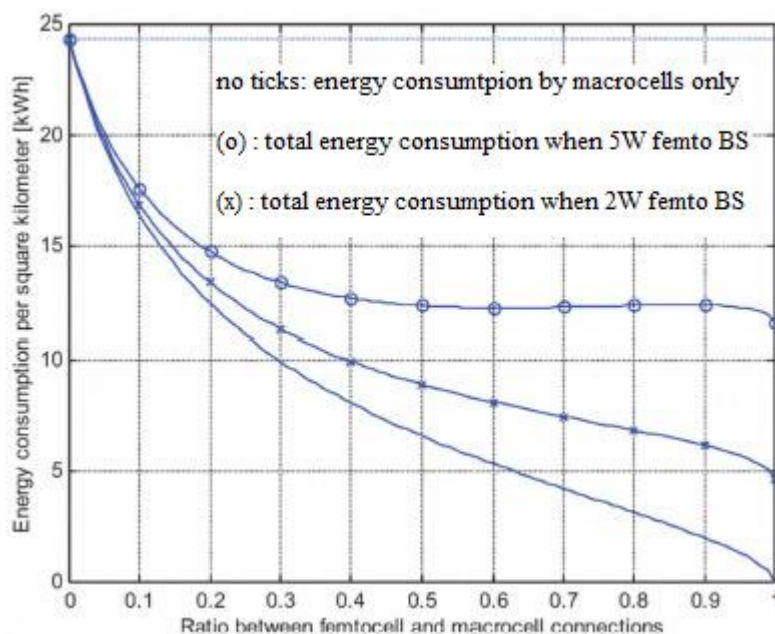
Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, υποθέτουμε ότι η ενδιάμεση απόσταση (ISD) μεταξύ των μακροκυψελών, διατηρείται σταθερή, όταν ταυτόχρονα εισάγονται φεμτοκυψέλες στο δίκτυο πρόσβασης. Ο αριθμός εισαγωγής των φεμτοκυψελών στο δίκτυο, αυξάνεται σε κάθε δοκιμή. Στο δεύτερο σενάριο, υποθέτουμε ότι η ISD αυξάνεται διαδοχικά, κάθε φορά που εισάγονται φεμτοκυψέλες στο δίκτυο. Αυτό που μένει σταθερό είναι το συνολικό φορτίο (target load). Συνεπώς, όταν ο αριθμός των εισαγόμενων φεμτοκυψελών αυξάνεται, το φορτίο στις μακροκυψέλες μειώνεται. Το γεγονός αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση του αριθμού των σταθμών βάσης της μακροκυψέλης. Η μετρική απόδοσης του συστήματος που χρησιμοποιούμε στα παραπάνω σενάρια, είναι η καθημερινή κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο του δικτύου.

Κατά την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων, με την εφαρμογή των δύο παραπάνω σεναρίων, θεωρούμε ένα WCDMA δίκτυο, του οποίου οι παράμετροι απεικονίζονται στον πιο κάτω πίνακα 6-4. Επίσης, θεωρούμε ότι οι φεμτοσταθμοί βάσης είναι ενεργοί μόνο όταν υπάρχει κίνηση, γιατί στην αντίθετη περίπτωση η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο αυξάνεται, αντί να μειώνεται, με την εισαγωγή των φεμτοκυψελών.

Πίνακας 6-4: Παράμετροι WCDMA δικτύου

Reference parameters	
Parameter	Value
Operating frequency	2000MHz
BS antenna height	30m
MS antenna height	1.5m
Propagation model	Okumura-Hata (urban area)
Indoor penetration loss	10dB
BS antenna gain (incl. losses)	16dBi
User data rate	64kbps, 128kbps, 256kbps
E_b/N_0	5dB
Macro BS transmission power	20W
Femto BS input power	5W, 2W
Control overhead	15%
System chip rate	3.84Mcps
Shadow fading margin	7dB
Mean α	0.80
Mean i	0.65
Activity factor ν	1.00
Minimum load	0.10

Τα αριθμητικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του πρώτου σεναρίου δείχνουν, ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, ανά μονάδα περιοχής, αυξάνεται με τη χρήση φεμτοσταθμών βάσης που έχουν ισχύ εισόδου 5 W, γιατί η εξασθένιση του φορτίου στην μακροκυψέλη δεν μπορεί να αντισταθμίσει την επιπρόσθετη κατανάλωση λόγω των φεμτοκυψελών. Από την άλλη μεριά, η κατανάλωση ενέργειας φαίνεται ότι μειώνεται ελαφρώς με τη χρήση φεμτοσταθμών βάσης που έχουν ισχύ εισόδου 2 W. Στην περίπτωση εφαρμογής του δεύτερου σεναρίου, παρατηρούνται σημαντικά ποσά εξοικονόμησης ενέργειας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την πιο πάνω εφαρμογή απεικονίζονται στο σχήμα 6-6.

Σχήμα 6-6: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά km^2 δικτύου.

Η ενεργειακή κατανάλωση των μακροκυψελών μειώνεται γρήγορα, εξαιτίας της μείωσης του φορτίου που οφείλεται στη χρήση των φεμτοκυψελών. Η μείωση του φορτίου των μακροκυψελών, οδηγεί σε μείωση του αριθμού των μακροκυψελών. Η μείωση αυτή περιορίζεται από το γεγονός, ότι είναι απαραίτητο για λόγους κάλυψης των συνδρομητών, να παραμένει ενεργός ένας αριθμός μακροκυψελών, ανεξάρτητα από το φορτίο κίνησης του δικτύου. Εν τούτοις, αν υπήρχε η δυνατότητα το δίκτυο να κατασκευαστεί από την αρχή, το δεύτερο σενάριο θα ήταν προτιμητέο από πλευράς ενεργειακής αποδοτικότητας.

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα, στην περίπτωση εισαγωγής στο δίκτυο ενός ποσοστού φεμτοκυψελών (2W) ίσο με 50%, θα είχαμε μία εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 63%, η οποία θα μπορούσε να αυξηθεί με την αύξηση του ρυθμού εισαγωγής του αριθμού των φεμτοκυψελών στο δίκτυο. Τουναντίον, στην περίπτωση εισαγωγής στο δίκτυο ίσου ποσοστού φεμτοκυψελών (5W), η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας θα έφτανε στο ποσοστό 49%, χωρίς περαιτέρω αύξηση σε περίπτωση που εισαχθεί μεγαλύτερος αριθμός φεμτοκυψελών στο δίκτυο.

Για να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως το παραπάνω κέρδος, θα πρέπει να κατασκευάσουμε από την αρχή ένα νέο ετερογενές δίκτυο το οποίο θα περιλαμβάνει ένα συνδυασμό από μακροσταθμούς βάσης και φεμτο σταθμούς. Παρόλα αυτά, στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα, θα μπορούσαμε να εξοικονομήσουμε ένα μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται, με την απενεργοποίηση των σταθμών βάσης των μακροκυψελών, σε περιπτώσεις που η κάλυψη του δικτύου με μακροκυψέλες είναι πυκνή και το φορτίο των μακροκυψελών μειώνεται λόγω των φεμτοκυψελών.

Συμπερασματικά, όπως προκύπτει από τη μελέτη της προσέγγισης που προτείνεται στην [41], ο αριθμός των ενεργών φεμτοσταθμών βάσης που εισάγεται σε ένα κινητό δίκτυο, επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου αυτού. Η έρευνα της εργασίας [41] συνεχίζεται στην [44], όπου και προτείνεται επιπλέον, η απενεργοποίηση των φεμτοκυψελών, όταν δεν υπάρχει κίνηση στο δίκτυο.

7. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ

7.1. Εισαγωγή

Η προσέγγιση που περιγράφεται στις επόμενες υποενότητες, διερευνά την εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να πραγματοποιηθεί με την συνεργατική διαχείριση των κυψελωτών δικτύων πρόσβασης μεταξύ δύο διαφορετικών παρόχων, οι οποίοι προσφέρουν υπηρεσίες στην ίδια περιοχή. Κατά κύριο λόγο, αξιολογείται το ποσό ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί με τη χρήση και των δύο δικτύων των διαφορετικών παρόχων, σε συνθήκες υψηλής κίνησης στο δίκτυο. Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με το σβήσιμο των σταθμών βάσης σε ένα από τα δύο δίκτυα πρόσβασης, όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι τόσο χαμηλή, τόσο ώστε η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών να μπορεί να αποκτηθεί μόνο μέσω του ενός από τα δύο δίκτυα πρόσβασης. Στις υποενότητες που ακολουθούν, μελετώνται διάφορα σχήματα απενεργοποίησης του δικτύου πρόσβασης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην εξοικονόμηση ενέργειας από την συνεργατική διαχείριση των δικτύων πρόσβασης.

7.2. Περιγραφή της προσέγγισης

Οι τεχνικές που έχουν ήδη περιγραφεί και αφορούν την ενεργειακή διαχείριση ενός μεμονωμένου κυψελωτού δικτύου πρόσβασης, προτείνουν τη μείωση του αριθμού των ενεργών σταθμών βάσης στο δίκτυο πρόσβασης κατά τη διάρκεια των περιόδων που σταθμοί αυτοί δεν είναι απαραίτητοι, γιατί η κίνηση στο δίκτυο είναι χαμηλή.

Στην εργασία [45] διερευνάται μία διαφορετική προσέγγιση εξοικονόμησης ενέργειας στα κινητά δίκτυα, η οποία θεωρεί το γεγονός ότι οι μητροπολιτικές περιοχές συνήθως εξυπηρετούνται από διάφορους ανταγωνιστές παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Οι διαφορετικοί πάροχοι προσφέρουν πλήρη κάλυψη στη μητροπολιτική περιοχή και διαστασιοποιούν τα δίκτυα ανάλογα με τον αριθμό των συνδρομητών.

Όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι υψηλή, οι πόροι που έχει διαθέσιμους ο κάθε πάροχος, χρησιμοποιούνται με βάση τη χωρητικότητα του δικτύου, έχοντας οι πάροχοι ως στόχο να προσφέρουν την καλύτερη δυνατή ποιότητα υπηρεσιών στους συνδρομητές τους. Όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι χαμηλή, οι πόροι που διαθέτει ο κάθε πάροχος είναι πλεονάζοντες, οπότε σε κάποιες περιόδους θα ήταν εφικτό μόνο το ένα από τα δίκτυα των δύο παρόχων να εξυπηρετεί όλη την κίνηση στην περιοχή. Ως εκ τούτου, αν οι πάροχοι συνεργάζονται μεταξύ τους, μπορούν να απεργοποιούν τα δίκτυα τους εκ περιτροπής και με αυτόν τον τρόπο να γίνεται εξοικονόμηση στην ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του δικτύου.

Η μελέτη της απόδοσης της πιο πάνω τεχνικής, γίνεται στην [45] με βάση το πιο κάτω σενάριο: Έστω ότι δύο πάροχοι Α και Β προσφέρουν υπηρεσίες σε μία μητροπολιτική περιοχή και ότι είναι πρόθυμοι να συνεργαστούν μεταξύ τους, ούτως ώστε να εξοικονομήσουν ενέργεια. Στα πλαίσια της μεταξύ τους συνεργασίας, ο ένας πάροχος δέχεται τους συνδρομητές του συνεργαζόμενου παρόχου, ως πελάτες περιαγωγής, οπότε και το δίκτυο του δεύτερου παρόχου απενεργοποιείται. Με άλλα λόγια, ο πάροχος Α απενεργοποιεί περιοδικά το δίκτυο πρόσβασής του και όταν συμβαίνει αυτό, ο πάροχος Β δέχεται την κίνηση περιαγωγής του Α και αντίστροφα. Στην περίπτωση αυτή, εξοικονομείται ένα μέρος της ενέργειας που απαιτείται για να τροφοδοτηθεί το ένα

από τα δύο δίκτυα πρόσβασης, με το τμήμα της μεταφοράς κάποιων πελατών από το δίκτυο πρόσβασης του παρόχου του στο αντίστοιχο ενός συνεργαζόμενου παρόχου.

Η μεταφορά των πελατών από το ένα δίκτυο πρόσβασης στο άλλο, συνεπάγεται καταρχήν μία αυξημένη τεχνική πολυπλοκότητα στον εξοπλισμό του δικτύου. Επίσης, δημιουργούνται και κάποια έμμεσα κόστη που προκύπτουν από τη γνωστοποίηση στο συνεργαζόμενο πάροχο των ποιοτικών χαρακτηριστικών που αφορούν την κίνηση των πελατών στο δίκτυο του ανταγωνιστή παρόχου (πλήθος πελατών, συνήθειες πελατών, κλπ). Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται στην [45] ότι η εξοικονόμηση ενέργειας που προέρχεται με την απενεργοποίηση του ενός δικτύου πρόσβασης μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται τα αναλυτικά μοντέλα με τα οποία μελετάται στην [45] η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης εξοικονόμησης ενέργειας. Τα σχήματα απενεργοποίησης του δικτύου πρόσβασης που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της προτεινόμενης προσέγγισης, αφορούν στις περιπτώσεις όπου, i) υπάρχει εξισορρόπηση στις περιόδους απενεργοποίησης των δύο παρόχων (balance switching pattern), έτσι ώστε αυτοί να απενεργοποιούν διαδοχικά το δίκτυο πρόσβασης τους, ii) υπάρχει εξισορρόπηση στα κόστη περιαγωγής (roaming balance pattern), οπότε και δεν απαιτείται υπολογισμός κάποιου κόστους περιαγωγής κατά την απενεργοποίηση του δικτύου πρόσβασης, iii) τα ποσά εξοικονόμησης ενέργειας και για τους δύο παρόχους είναι ίδια (energy balance pattern), iv) το ποσό εξοικονόμησης ενέργειας είναι μέγιστο δυνατό (max energy pattern).

7.3. Μοντελοποίηση της προσέγγισης

Θεωρούμε μία περιοχή η οποία εξυπηρετείται από δύο παρόχους τον A και B των οποίων τα δίκτυα πρόσβασης (δίκτυο A και δίκτυο B αντίστοιχα) διαστασιοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις κίνησης των πελατών τους. Ορίζουμε με N_A και N_B τον αριθμό των πελατών των δύο παρόχων και με $f_A(t)$, $f_B(t)$ τα καθημερινά προφίλ κίνησης με $t \in \{0, T\}$ διάστημα που καλύπτει περίοδο 24 ωρών, Υποθέτουμε ότι το καθημερινό προφίλ κίνησης επαναλαμβάνεται περιοδικά και ότι η μέση κίνηση ανά χρήστη στα δύο δίκτυα πρόσβασης είναι η ίδια ούτως ώστε η συνολική κίνηση στο δίκτυο να είναι ανάλογη του αντίστοιχου αριθμού των χρηστών:

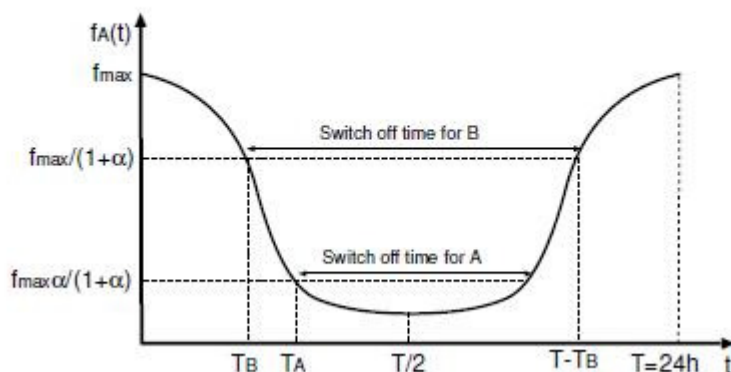
$$\frac{f_A(t)}{N_A} = \frac{f_B(t)}{N_B}$$

Αν θέσουμε $\alpha = N_B/N_A$ προκύπτει ότι $f_B(t) = \alpha f_A(t)$

Το σχήμα για το προφίλ της κίνησης που χρησιμοποιείται στη φάση της μοντελοποίησης, είναι ένα τυπικό σχήμα κίνησης και απεικονίζεται στο σχήμα 7-1. Παρατηρούμε στο σχήμα 7-1, ότι το προφίλ της κίνησης είναι συμμετρικό ως προς $T/2$ και η μέγιστη τιμή της κίνησης συμβαίνει κατά τη χρονική στιγμή $t=0$.

Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι $N_A > N_B$, οπότε και $f_A(t) > f_B(t)$ και $\alpha < 1$. Θέτουμε $f_{\max}$ ως το μέγιστο επίπεδο κίνησης που μπορεί να συμβεί σε ένα από τα δύο δίκτυα πρόσβασης, που σύμφωνα με την προηγούμενη υπόθεση είναι το δίκτυο A.

Από τη στιγμή που το κάθε δίκτυο πρόσβασης είναι διαστασιοποιημένο έτσι ώστε να μεταφέρει το μέγιστο ποσό κίνησής δεδομένων με το επιθυμητό QoS (το οποίο υποθέτουμε ότι είναι το ίδιο και για τα δύο δίκτυα), όταν η κίνηση στο δίκτυο μειώνεται σε τέτοιο επίπεδο ώστε μόνο το ένα από τα δύο δίκτυα



Σχήμα 7-1: Τυπικό προφίλ κίνησης για το δίκτυο Α & πιθανές περιόδους απενεργοποίησης για τα δίκτυο Α και Β

να είναι ικανό να εξυπηρετήσει την κίνηση και των δύο (χωρίς να αθετούνται οι περιορισμοί του QoS), το άλλο δίκτυο μπορεί να απενεργοποιηθεί.

Ειδικότερα, το δίκτυο Β μπορεί να απενεργοποιηθεί από τη χρονική στιγμή T_B μέχρι τη στιγμή $T-T_B$ (λόγω του συμμετρικού σχήματος που έχουμε από την υπόθεση) αν ισχύει:

$$f_A(T_B) + f_B(T_B) = f_{\max}$$

Από τη στιγμή που ισχύει $f_B(T_B) = af_A(T_B)$ συνεπάγεται ότι:

$$f_A(T_B) = \frac{f_{\max}}{1+a}$$

οπότε και το T_B μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T_B = f_A^{-1}\left(\frac{f_{\max}}{1+a}\right)$$

Με τον ίδιο τρόπο, το δίκτυο Α μπορεί να απενεργοποιηθεί από τη χρονική στιγμή T_A μέχρι τη στιγμή $T-T_A$, αν ισχύει:

$$f_A(T_A) + f_B(T_B) = af_{\max}$$

αφού $af_{\max}$ είναι η μέγιστη κίνηση στο δίκτυο Β και για την οποία το δίκτυο Β έχει διαστασιοποιηθεί. Η σχέση που προκύπτει για το T_A είναι:

$$T_A = f_A^{-1}\left(\frac{af_{\max}}{1+a}\right)$$

Από την υπόθεση ότι $N_A > N_B$, συνεπάγεται ότι $T_B < T_A$, γεγονός που σημαίνει ότι το δίκτυο Β, το οποίο διέπεται από λιγότερη κίνηση και απαιτεί μικρότερη χωρητικότητα, μπορεί να απενεργοποιηθεί για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους.

Στην υποενότητα που ακολουθεί, περιγράφονται τα διάφορα σχήματα απενεργοποίησης του δικτύου που προτείνονται στην [45].

7.4. Σχήματα απενεργοποίησης των δικτύων πρόσβασης

Το πρώτο σχήμα απενεργοποίησης του δικτύου πρόσβασης που προτείνεται στην [1], βασίζεται στην υπόθεση ότι τα δύο δίκτυα A και B, απενεργοποιούνται για ίσα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας του δικτύου.

Αν υποθέσουμε ότι κατά τη διάρκεια μίας περιόδου λειτουργίας 24 ωρών, μόνο το ένα από τα δύο δίκτυα απενεργοποιείται, μπορούμε να ορίσουμε τις συχνότητες P_A και P_B ως το κλάσμα των ημερών κατά τις οποίες τα δίκτυα A και B απενεργοποιούνται. Αν κάθε μέρα ένα από τα δύο δίκτυα απενεργοποιείται τότε είναι φανερό ότι:

$$P_A + P_B = 1$$

Εξισορροπώντας τις συχνότητες απενεργοποίησης των δύο δικτύων, συνεπάγεται ότι:

$$P_A = P_B = 0.5$$

Το δεύτερο σχήμα απενεργοποίησης που προτείνεται στην [45], βασίζεται στη υπόθεση, ότι κατά τη διάρκεια της απενεργοποίησης των δικτύων A και B, τα κόστη περιαγωγής που δημιουργούνται και για τους δύο παρόχους είναι ίδια (roaming balance pattern).

Πιο αναλυτικά, όταν ένα από τα δίκτυα πρόσβασης (για παράδειγμα το δίκτυο B) απενεργοποιείται, οι συνδρομητές του γίνονται δεκτοί σαν συνδρομητές περιαγωγής από τον πάροχο A, του οποίου το δίκτυο παραμένει ενεργό. Η διαδικασία της περιαγωγής συνεπάγεται ένα κόστος που αντιστοιχεί στην κίνηση που δημιουργείται από τους συνδρομητές του δικτύου B η οποία τώρα μεταφέρεται στο δίκτυο A. Η κίνηση περιαγωγής που μεταφέρεται στο δίκτυο A όταν το δίκτυο B απενεργοποιείται μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$\int_{T_B}^{T-T_B} f_B(t)dt = \int_{T_B}^{T-T_B} af_A(t)dt$$

Από την άλλη μεριά, το ποσό της κίνησης περιαγωγής που μεταφέρεται στο δίκτυο B, όταν απενεργοποιείται το δίκτυο A είναι:

$$\int_{T_A}^{T-T_A} f_A(t)dt$$

Για να μπορεί να ισχύει η υπόθεση ότι τα κόστη περιαγωγής των δύο παρόχων είναι ίδια, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητο να μεταφερθούν χρήματα από τον έναν πάροχο στον άλλον για την πληρωμή της κίνησης που μεταφέρεται, όταν το ένα από τα δύο δίκτυα απενεργοποιείται, πρέπει να ισχύει: $P_A \int_{T_A}^{T-T_A} f_A(t)dt = P_B \int_{T_B}^{T-T_B} f_B(t)dt$

γεγονός που οδηγεί στη σχέση:

$$\frac{P_A}{P_B} = \alpha \frac{\int_{T_B}^{T-T_B} f_A(t)dt}{\int_{T_A}^{T-T_A} f_A(t)dt}$$

Το τρίτο σχήμα απενεργοποίησης που προτείνεται στην [45], βασίζεται στην υπόθεση ότι η εξοικονόμηση ενέργειας που πραγματοποιείται από την απενεργοποίηση των δικτύων πρόσβασης, είναι η ίδια και για τα δύο παρόχους (energy balance pattern).

Ο σκοπός και σε αυτήν την περίπτωση, είναι η εύρεση σχέσεων για τα P_A και P_B με βάση την υπόθεση του συγκεκριμένου σχήματος απενεργοποίησης. Αρχικά υπολογίζουμε το κόστος λειτουργίας των δικτύων A και B. Το συνολικό κόστος λειτουργίας του καθενός από τα δύο δίκτυα μπορεί πρόχειρα να εκτιμηθεί σαν κόστος ανά χρήστη C_u , το οποίο πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των πελατών, μείον την ενέργεια που εξοικονομείται από την απενεργοποίηση του δικτύου. Η πιο πάνω ενέργεια υπολογίζεται σαν την ενέργεια που δαπανάται ανά μονάδα χρόνου, C_e ,

πολλαπλασιαζόμενη με την χρονική περίοδο απενεργοποίησης και με τη συχνότητα απενεργοποίησης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κόστος λειτουργίας για τα δίκτυα A και B είναι αντίστοιχα:

$$C_A = C_u N_A - C_e(A)(T - 2T_A)P_A$$

$$C_B = C_u N_B - C_e(B)(T - 2T_B)P_B$$

Το ενεργειακό κόστος για κάθε ένα από τα δύο δίκτυα είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων. Θεωρούμε τις εξής δύο ακραίες περιπτώσεις: Στην πρώτη περίπτωση, το ενεργειακό κόστος δεν εξαρτάται από τον αριθμό των συνδρομητών του δικτύου, το οποίο σημαίνει ότι $C_e(A)=C_e(B)=C_e$. Στη δεύτερη περίπτωση, υπάρχει μία άμεση αναλογικότητα ανάμεσα στον αριθμό των συνδρομητών και στο ενεργειακό κόστος, έτσι ώστε $C_e(A)=C_e N_A$ και $C_e(B)=C_e N_B$, όπου $C_e(B) = \alpha C_e(A)$. Τα πραγματικά ενεργειακά κόστη, πιθανότατα δεν είναι ούτε ανεξάρτητα από τον αριθμό των πελατών-συνδρομητών, ούτε ανάλογα με αυτόν, αλλά είναι μερικώς εξαρτημένα. Αφού έχουμε υποθέσει ότι τα ποσά εξοικονόμησης ενέργειας είναι ίδια και για τους δύο παρόχους, είναι απαραίτητο να ισχύει:

$$C_e(A)(T - 2T_A)P_A = C_e(B)(T - 2T_B)P_B$$

Η πιο πάνω εξίσωση, βάσει της υπόθεσης ότι κάθε μέρα μόνο ένα από τα δύο δίκτυα πρόσβασης απενεργοποιείται, οδηγεί στη σχέση:

$$P_A = \frac{T - 2T_B}{2(T - T_B - T_A)}, \quad \text{αν } C_e(B)=C_e(A) \text{ και}$$

$$P_A = \frac{\alpha(T - 2T_B)}{T - 2T_A + \alpha(T - 2T_B)}, \quad \text{αν } C_e(B) = \alpha C_e(A)$$

Το τέταρτο και τελευταίο σχήμα απενεργοποίησης που προτείνεται στην [45], προκύπτει από την μεγιστοποίηση της συνάρτησης του συνολικού ποσού ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί. Το συνολικό ποσό ενέργειας μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση:

$$C_e(A)(T - 2T_A)P_A + C_e(B)(T - 2T_B)P_B$$

Αν $C_e(A)=C_e(B)=C_e$, και από τη στιγμή που έχουμε ήδη υποθέσει ότι $T_B < T_A$, για να μεγιστοποιηθεί το ποσό της ενέργειας που εξοικονομείται, πρέπει να θέσουμε $P_B=1$ (το οποίο συνεπάγεται ότι $P_A=0$). Με άλλα λόγια, η μεγιστοποίηση της ενέργειας που εξοικονομείται σε αυτήν την περίπτωση, απαιτεί ότι το δίκτυο B (δηλαδή το μικρότερο δίκτυο) απενεργοποιείται κάθε μέρα. Αυτό μπορεί να κατανοηθεί και διαισθητικά, από τη στιγμή που τα ενεργειακά κόστη είναι ίσα για τα δύο δίκτυα, αλλά η πιθανή διάρκεια απενεργοποίησης είναι μεγαλύτερη για το μικρότερο δίκτυο.

Από την άλλη μεριά, αν $C_e(A)=C_e N_A$ και $C_e(B)=C_e N_B$, πρέπει να μεγιστοποιήσουμε το:

$$(T - 2T_A)P_A + \alpha (T - 2T_B)(1 - P_A)$$

το οποίο οδηγεί στο $P_A=1$, αν $(T - 2T_A) > \alpha (T - 2T_B)$ και $P_A=0$ στην αντίθετη περίπτωση.

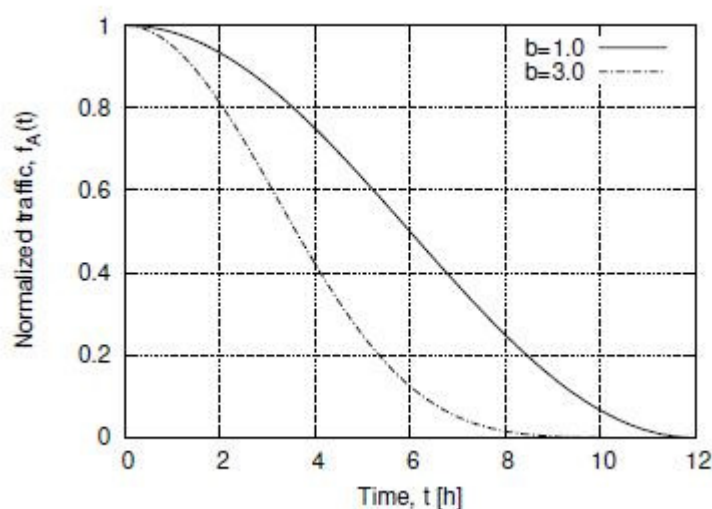
7.5. Αριθμητικά αποτελέσματα

Για την παραγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων, θεωρούμε δύο διαφορετικά σενάρια, τα οποία χαρακτηρίζονται από το ημερήσιο προφίλ κίνησής τους.

Στο πρώτο σενάριο, τα ημερήσια προφίλ κίνησης, ακολουθούν μία περίπου ημιτονοειδή περιοδική συμπεριφορά που εκφράζεται από τη σχέση:

$$f_A(t) = \frac{1}{2^b} \left[1 + \sin\left(\frac{\pi t}{12} + \frac{\pi}{2}\right) \right]^b$$

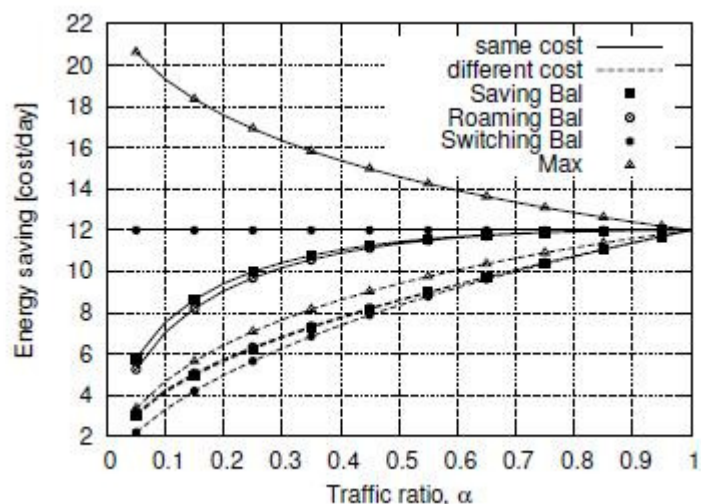
με $b=1,3$. Τα προφίλ κίνησης σε μία περίοδο 12 ωρών που ακολουθεί την κορυφή της ημιτονοειδούς καμπύλης, απεικονίζονται στο σχήμα 7-2.



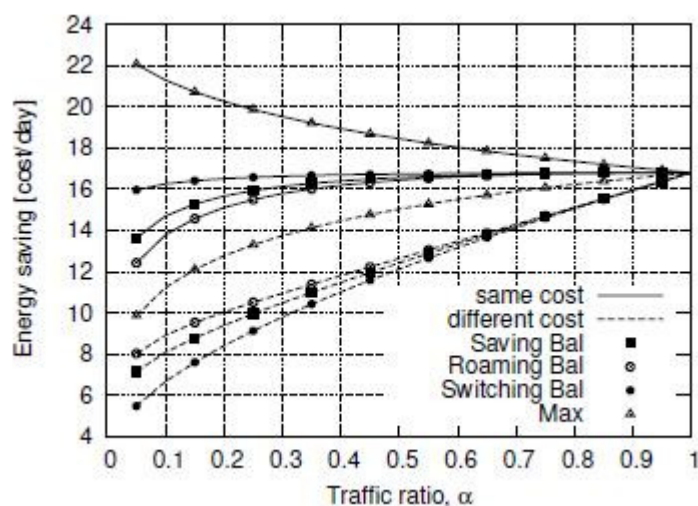
Σχήμα 7-2: Ημιτονοειδές προφίλ κίνησης

Θεωρούμε ότι $f_{\max}=1$. Από το σχήμα παρατηρούμε ότι για $b=3$, η καμπύλη έχει πιο απότομη κλίση και η μέση κίνηση είναι χαμηλότερη.

Τα ποσά ενέργειας που μπορούν να εξοικονομηθούν με τα σχήματα απενεργοποίησης των δικτύων που αναφέραμε στην προηγούμενη υποενότητα, απεικονίζονται στο σχήμα 7-3 και στο σχήμα 7-4, όταν $b=1$ και $b=3$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δίνονται σαν συνάρτηση του α , που είναι ο συντελεστής ανισορροπίας κίνησης ανάμεσα στα δύο δίκτυα. Οι συμπαγείς γραμμές των πιο πάνω σχημάτων, αναφέρονται στη περίπτωση όπου το κόστος λειτουργίας των δύο δικτύων είναι το ίδιο (same cost). Οι διακεκομμένες γραμμές, αναφέρονται στην περίπτωση όπου τα λειτουργικά κόστη των δύο δικτύων είναι διαφορετικά (different cost).



Σχήμα 7-3: Εξοικονόμηση ενέργειας για διάφορα μοντέλα κόστους και σχήματα απενεργοποίησης (παράμετρος $b=1$)



Σχήμα 7-4: Εξοικονόμηση ενέργειας για διάφορα μοντέλα κόστους και σχήματα απενεργοποίησης (παράμετρος $b=3$)

Σύμφωνα με το σχήμα 7-3, όπου $b=1$, στην περίπτωση που $\alpha = 1$ και για same cost, παρατηρούμε ότι η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται, είναι ίδια ανεξάρτητα από το ποιο δίκτυο (A ή B) απενεργοποιείται. Εξαιτίας του ημιτονοειδούς σχήματος του προφίλ της κίνησης όταν $b=1$, το ένα από τα δύο δίκτυα μπορεί να απενεργοποιηθεί για το μισό του χρόνου λειτουργίας (σαν χρόνος λειτουργίας θεωρούνται οι 24 ώρες), γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα μία εξοικονόμηση χρόνου λειτουργίας ίση με 12 ώρες, με άλλα λόγια το ποσοστό ενέργειας που εξοικονομείται είναι 25%.

Στην περίπτωση όπου το ποσό εξοικονόμησης ενέργειας μεγιστοποιείται (περίπτωση Max Δ), παρατηρούμε από την αντίστοιχη καμπύλη του σχήματος 3, ότι μπορεί να εξοικονομηθεί ποσοστό ενέργειας μεγαλύτερο από το 25%, για όλες τις τιμές του α . Στην περίπτωση του roaming balance pattern και energy balance pattern, παρατηρούμε χαμηλότερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, όσο μειώνονται οι τιμές του α . Επίσης, παρατηρούμε ότι το σχήμα απενεργοποίησης roaming balance είναι ελαφρώς λιγότερο αποδοτικό από το σχήμα saving balance.

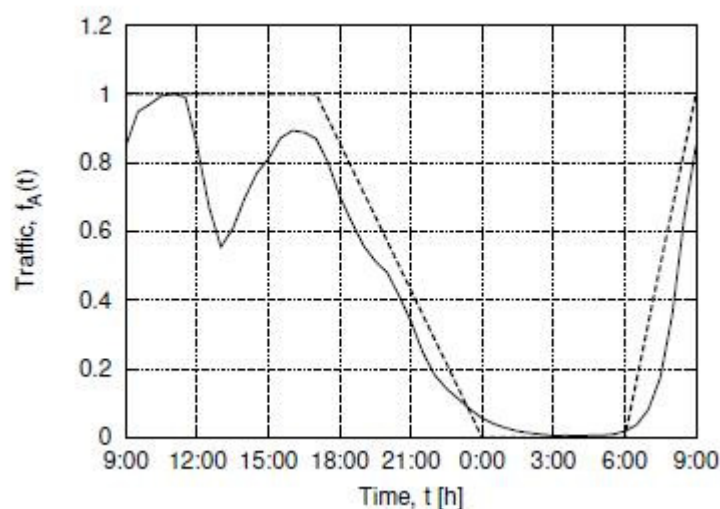
Στην περίπτωση του different cost, οι διαφορές στην ενέργεια που εξοικονομείται ανάμεσα στα διαφορετικά σχήματα απενεργοποίησης, είναι πολύ μικρότερες και η εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται μικρότερη, όσο μειώνεται το α . Στην περίπτωση αυτή όμως, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι μειώνεται ταυτόχρονα και το συνολικό ενεργειακό κόστος παράλληλα με τη μείωση του συντελεστή α . Η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας στην περίπτωση αυτή, αποκτάται απενεργοποιώντας πάντα το δίκτυο A, επειδή αυτό έχει μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος από το δίκτυο B.

Αν το $b=3$, σύμφωνα με το σχήμα 7-4, τα αποτελέσματα για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι παρόμοια με το σχήμα 7-3. Στην περίπτωση αυτή όμως ($b=3$) παρατηρούμε ότι μπορούμε να πετύχουμε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πιο απότομη κλίση της καμπύλης του σχήματος κίνησης και στη λιγότερη συνολική κίνηση, σύμφωνα με το προφίλ κίνησης για $b=3$.

Στο δεύτερο σενάριο, θεωρούμε ένα πιο ρεαλιστικό προφίλ κίνησης, που προκύπτει από πραγματική κίνηση δεδομένων που διέπει το δίκτυο ενός πραγματικού παρόχου. Το προφίλ κίνησης απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 7-5.

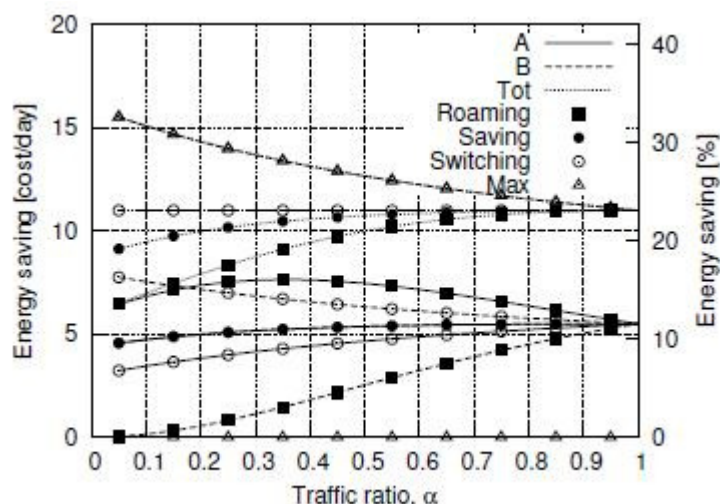
Η συνεχής γραμμή στο σχήμα 7-5, αναφέρεται στη μέτρηση του καθημερινού προφίλ κίνησης του παρόχου που έχει κανονικοποιηθεί ώστε $f_{\max} = 1$. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιούμε αντί για το $f_A(t)$, έτσι ώστε να μπορούμε να εξάγουμε αριθμητικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα που αφορούν στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην περίπτωση που έχω same cost, φαίνονται στο σχήμα 6. Θεωρούμε τα σχήματα απενεργοποίησης που έχουμε αναφέρει στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 7-5: Πραγματικό κανονικοποιημένο προφίλ κίνησης και

Το σχήμα 7-6 απεικονίζει τη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας (στικτές καμπύλες), καθώς επίσης και την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την απενεργοποίηση του δικτύου A (συνεχείς καμπύλες) και του δικτύου B (διακεκομμένες καμπύλες), αντίστοιχα. Η κλίμακα στα αριστερά του σχήματος 6, αναφέρει τα επί τις εκατό ποσοστά του συνολικού κόστους ενέργειας. Η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται απενεργοποιώντας συνεχώς

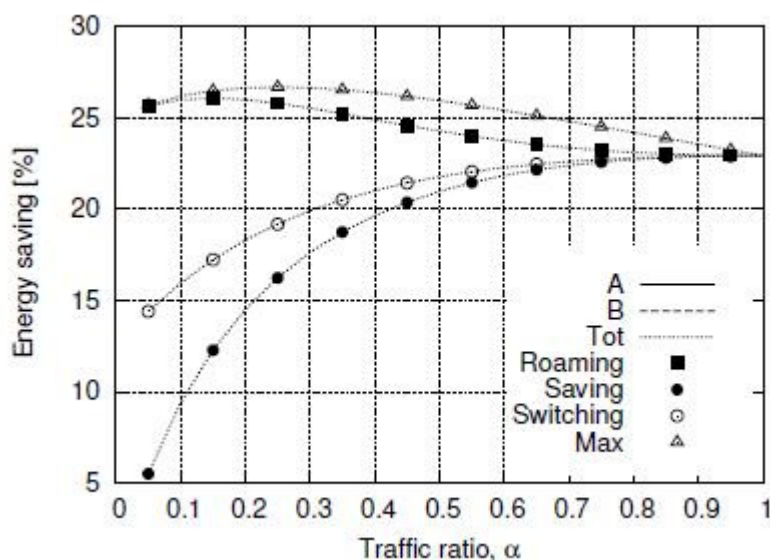


Σχήμα 7-6: Ρεαλιστική κίνηση δικτύου-Συνολική ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας & μέση ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε πάροχο στα διαφορετικά σχήματα απενεργοποίησης

το δίκτυο B, το οποίο μπορεί να απενεργοποιηθεί για μεγαλύτερες περιόδους από ότι το δίκτυο A, εξαιτίας του χαμηλότερου φορτίου κίνησης που το διέπει. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανισορροπία στην κίνηση (χαμηλές τιμές για το α), τόσο περισσότερη ενέργεια εξοικονομείται. Το σχήμα απενεργοποίησης που παράγει τη μικρότερη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας, είναι το roaming balance. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6, μπορούμε να πετύχουμε εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και 12% στη χειρότερη περίπτωση του roaming balance (δηλαδή για πολύ χαμηλές τιμές του α). Όπως και στο ημιτονοειδές προφίλ κίνησης, έτσι και στην περίπτωση του ρεαλιστικού προφίλ κίνησης, όταν δεν υπάρχει ανισορροπία στην κίνηση των δύο δικτύων, όλα τα σχήματα απενεργοποίησης έχουν σαν αποτέλεσμα την ίδια εξοικονόμηση ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας στην περίπτωση αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό σχεδόν ίσο με 25% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται και από τα δύο δίκτυα.

Στη σχήμα 7-7 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που τα ενεργειακά κόστη των δύο δικτύων είναι ανάλογα των συνδρομητών του κάθε δικτύου (περίπτωση different cost). Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 7 απεικονίζεται το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας επί του συνολικού κόστους λειτουργίας του δικτύου. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση (same cost), το σχήμα απενεργοποίησης που πλησιάζει στη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, είναι το roaming balance. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, επιτυγχάνεται απενεργοποιώντας συνεχώς το δίκτυο A (ενώ στην περίπτωση του same cost συνέβαινε το αντίθετο). Αυτό που ισχύει στην πραγματικότητα, είναι ότι ακόμα και αν έχω το δίκτυο A απενεργοποιημένο για μικρότερες περιόδους από ότι το δίκτυο B, το γεγονός ότι το A είναι απενεργοποιημένο μεταφράζεται σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Τα πιο πάνω αριθμητικά αποτελέσματα υπαινίσσονται ότι το πραγματικό μοντέλο κόστους, καθώς επίσης και ο βαθμός ανισορροπίας κίνησης α , μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά συμπεράσματα για το ποια τακτική είναι πιο κατάλληλη να υιοθετηθεί, έτσι ώστε να έχουμε τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Παρόλα αυτά παρατηρούμε, ότι η πραγματική εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να πραγματοποιηθεί, είναι σε κάθε



Σχήμα 7-7: Ρεαλιστική κίνηση δικτύου-Ποσοστιαία εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το συνολικό ενεργειακό κόστος λειτουργίας των δύο δικτύων (A & B)

περίπτωση αξιοσημείωτη (οι τυπικές τιμές είναι πάνω από το 15-20%).

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση που απορρέει από τα αριθμητικά αποτελέσματα που περιγράφονται σε αυτήν την υποενότητα, είναι ότι η συνύπαρξη δύο διαφορετικών παρόχων σε μία ανταγωνιστική αγορά, δεν είναι αποδοτική, από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό δίκτυο. Η συνεργατική συμπεριφορά των ανταγωνιστών παρόχων, μπορεί να αποτελέσει μία νέα πράσινη προσέγγιση στη διαχείριση των δικτύων με ικανοποιητικά αποτελέσματα στην εξοικονόμηση ενέργειας.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι κινητές επικοινωνίες συμβάλλουν ολοένα και περισσότερο στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Η ραγδαία αύξηση του διακινούμενου όγκου δεδομένων στα κινητά δίκτυα (υποστήριξη υπηρεσιών όπως mobile TV, mobile gaming, mobile streaming, κ.ά.) έχει αντίστοιχα επιφέρει μεγάλη αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία των κινητών δικτύων.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι το κλειδί για την αποτελεσματική ανάπτυξη των σύγχρονων κινητών δικτύων και ταυτόχρονα θα συμβάλει στη μείωση της αρνητικής επίδρασης που συντελείται στο περιβάλλον από τη χρήση των πιο παραπάνω δικτύων.

Σημαντικό εργαλείο για την κατασκευή ενεργειακά αποδοτικών δικτύων είναι η χρήση κατάλληλων μετρικών και μεθόδων αξιολόγησης οι οποίες επιτρέπουν την καταμέτρηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συνολικού συστήματος.

Η ασυνεχής μετάδοση από τους σταθμούς βάσης και η ασυνεχής λήψη από τις κινητές συσκευές, όπου μέρη του υλικού τους τίθενται σε κατάσταση sleep, είναι κάποιες από τις τεχνικές ενεργειακά αποδοτικής λειτουργίας στο επίπεδο σύνδεσης του δικτύου. Οι τεχνικές sleeping εφαρμόζονται σε σταθμούς βάσης με χαμηλό φορτίο και σε κινητές συσκευές οι οποίες παραμένουν ανενεργές για μεγάλο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας.

Στο επίπεδο δικτύου, η δυνατότητα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης κατά τη λειτουργία του κινητού δικτύου, βρίσκεται στο τρόπο σχεδιασμού του ίδιου του δικτύου και στη διαχείριση των συσκευών του. Στις παραπάνω περιπτώσεις, λαμβάνονται υπόψη οι ήπιες αλλαγές στο σχήμα του καθημερινού φορτίου κίνησης καθώς επίσης και οι δυναμικές διακυμάνσεις της κίνησης των δεδομένων στο δίκτυο.

Στην παρούσα εργασία περιγράφηκαν κάποιες από τις πιο πρόσφατες και πολλά υποσχόμενες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Τα συμπεράσματα που απορρέουν από την εξέταση των τεχνικών αυτών, είναι ότι η εφαρμογή τους θα μπορούσε να οδηγήσει σε μία γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας που να είναι ενεργειακά αποδοτικότερα από τα συμβατικά και ταυτόχρονα να προσφέρουν την ίδια και ίσως καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Access Network	Δίκτυο Πρόσβασης
Air Conditioner.	Συσκευή Κλιματισμού
Backhaul Connections	Ενδιάμεσοι Σύνδεσμοι
Baseband	Βασική ζώνη
Cell Zooming	Μεγέθυνση/Σμίκρυνση Κυψέλης
Core Network	Δίκτυο Κορμού
Coverage holes	Κενά Κάλυψης
Dimming	Εξασθένηση
Downlink	Καθοδική ζεύξη
Gateway Server	Διακομιστής Πύλης
Handover	Μεταπομπή
Idle	Αδρανής Κατάσταση
Mobile Multimedia Gateway	Πύλη Κινητών Πολυμεσικών Εφαρμογών
Network Re-entry	Επάνοδος στο Δίκτυο
Node	Κόμβος
Outage Probability	Πιθανότητα Διακοπής Ζεύξης
Relay Station	Σταθμός Αναμετάδοσης
Release	Έκδοση Κυκλοφορίας Προϊόντος
Self Organization	Αυτοδιαχείριση
Server	Διακομιστής
Signaling	Σηματοδοσία
Tradeoff	Ανταλλαγή
Umbrella Cell	Κυψέλη Ομπρέλα
Uplink	Ανοδική Ζεύξη
Mobile Video Streaming	Ροή Βίντεο σε κινητή συσκευή διαμέσω ασύρματου ψηφιακού σήματος
Wake up delay	Καθυστέρηση Επαναλειτουργίας

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

2G	2 nd Generation
3G	3 rd Generation
4G	4 th Generation
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
AC	Alternating Current
AI	Antenna Interface
AN	Access Network
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CN	Core Network
DC	Direct Current
DRX	Discontinuous Reception
EPS	Evolved Packet System
FDD	Frequency Division Duplex
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GHG	Green House Gas
GMSC	Gateway MSC
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
ISD	Inter Site Distance
LTE	Long-Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MSC	Message Switching Centre
MS	Mobile Station
MU	Mobile User
PA	Power Amplifier
PDN	Public Data Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRH	Remote Radio Head
SAE -GW	System Architecture Evolution Gateway
SDMA	Space Division Multiple Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMS	Short Message Services
SON	Self Organized Network
TRx	Transceiver
TS	Technical Specification
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
WCMDA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Wireless Application Protocol

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] "Climate change: Commission welcomes final adoption of Europe's climate and energy package", EC press release Dec. 2008
- [2] "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age", The Climate Group, GeSI. <http://www.smart2020.org>
- [3] M. Pickaret, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Develder, D. Colle, B. Dhoedt, P. Demeester, Worldwide "Energy Needs for ICT: the Rise of Power-Aware Networking", IEEE ANTS 2008 conf., 15-17 December 2008, Bombay (India)
- [4] Global Action Plan, "An inefficient truth", <http://globalactionplan.org.uk/>, Global Action Plan Rep., 2007
- [5] S. Pileri, "Energy and communication: engine of the human progress", http://www.ega.it/intelec2007/img/Stefano_Pileri.pdf, Intelec Opening Keynote Speech, 2007
- [6] Y. Hua, Z. Niu, Q. Zhang and Y. Fang, Energy-aware Network Planning for Wireless Cellular Systems with Inter-cell Cooperation
- [7] R. Kumar and L. Mieritz, "Conceptualizing 'Green IT' and data centre power and cooling issues", Gartner, Research paper G00150322, September 2007.
- [8] Ericsson, "Sustainable energy use in mobile communications," August 2007, White paper.
- [9] Node B datasheets, <http://www.motorola.com/>, 2008.
- [10] J.T. Louhi, "Energy efficiency of modern cellular base stations", INTELEC 2007, Rome, Italy
- [11] EARTH project overview poster, https://www.ict-earth.eu/news/2010/02-24_EARTH-Poster_ICT4EE.pdf
- [12] Motorola Technical white paper, "Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview"
- [13] G. Fettweis and E. Zimmermann, "ICT energy consumption – trends and challenges", The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2008.
- [14] M. Etoh, T. Ohya, and Y. Nakayama, "Energy consumption issues on mobile network systems", International Symposium on Applications and the Internet (SAINT), 2008.
- [15] D. Lister, "An operator's view of green radio, keynote speech", in Proc. IEEE GreenCom, June 2009.
- [16] M. Deruyck, et. Al., "Power consumption in wireless access networks", in Proc. European Wireless Conf., Aprl. 2010.
- [17] EARTH Deliverable D2.3 "Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown"
- [18] Zuckerman, D., "Green Communications – Management Included", in Proc. Of IEEE ICC, 2009, Keynote.
- [19] 3GPP TS 36.300, "E-UTRAN Overall Description –Stage 2" Rel. 8, v. 8.4.0. Mar. 2008.
- [20] Lin Y-B, Chlamtac I (2001) "Wireless and mobile network architectures", Wiley, New York.
- [21] Yang S-R, Lin Y-B (January 2005) "Modeling UMTS Discontinuous Reception Mechanism". IEEE Trans Wirel Commun 4(1):312–319.
- [22] Lei Zhou, Haibo Xu, Hui Tian, Youjun Gao, , "Performance Analysis of Power Saving Mechanism with Adjustable DRX Cycles in 3GPP LTE", Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University Of Posts.
- [23] Chandra S. Bontu, Ed Illidge "DRX Mechanism for Power Saving in LTE", Nortel
- [24] Marco Ajmone Marsan, Luca Chiaraviglio, Delia Ciullo and Michela Meo, "Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks", GreenComm 2009, Dresden, Germany, June 2009.
- [25] Sheng Zhou, Jie Gong, Zexi Yang, Zhisheng Niu and Peng Yang, "Green Mobile Access Network with Dynamic Base Station Energy Saving", MobiCom '09, September 20-25, 2009, Beijing, China
- [26] Y. Bejerano and S. J. Han. "Cell breathing technique for load balancing in wireless lans". IEEE Trans. Mob. Comput., 8(6):735{749, June 2009.
- [27] A. Sang, X. Wang, M. Madhian, and R. D. Gitlin. "Coordinated load balancing, handoff/cell-site selection and scheduling in multi-cell packet data systems". Proc. MobiCom'04, pages 302{314, Sept. 2004.
- [28] Zhisheng Niu, Yiqun Wu, Jie Gong, Zexi Yang, Tsinghua Univ. "Cell Zooming for Cost-Efficient Green Cellular Networks".
- [29] G. Micallef, P. Mogensen, H-O. Scheck, "Cell Size Breathing and Possibilities to Introduce Cell Sleep Mode".
- [30] S. Bhaumik, G.Narlikar, S.Chattopadhyay, S.Kanugovi, "Breathe to Stay Cool: Adjusting Cell Sizes to Reduce Energy Consumption".
- [31] Α. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος «Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών».
- [32] Tipper, D.; Rezgui, A.; Krishnamurthy, P.; Pacharintanakul, P., "Dimming Cellular Networks", Grad. Telecommun. & Networking Program, Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, USA.

- [33] F. Richter, A. J. Fehske, and G. P. Fettweis, "Energy efficiency aspects of base station deployment strategies in cellular networks".
- [34] O. Arnold, F. Richter, G. Fettweis, O. Blume, Vodafone Chair Mobile Communications Systems, Technische Universitat Dresden, Alcatel-Lucent Bell Labs, "Power Consumption Modelling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks".
- [35] F. Richter, A. J. Fehske, and G. P. Fettweis, "Energy efficiency Improvements through Micro Sites in Cellular Mobile Radio Networks"
- [36] Ε. Σδόγγος «Διερεύνηση φαινομένου σκίασης (shadowing) σε συστήματα κυτταρικής κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς», Τμήμα Ηλ/γων Μηχανικών & Τεχνολογίας Η/Υ, Πανεπιστήμιο Πατρών 2010.
- [37] Α. Μεσοδιακάκη «Έλεγχος Ισχύος σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα Δύο Επιπέδων» Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλ/γων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Ε.Μ.Π 2011.
- [38] A. Goldsmith, "Wireless Communications", New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [39] IST-4-02-7756 WINNER II, D1.1.2 V1.2 WINNER II "Channel Models", September 2007.
- [40] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 48, no. 4, pp.1047–1066, July 1999.
- [41] M. Jada, M. M. A. Hossain, J. Hamalainen, R. Jantti "Impact of femtocells to WCDMA network energy efficiency".
- [42] H. Holma, A. Toskala, "WCDMA for UMTS", Third edition, Wiley 2004.
- [43] K. Sipila, Z. Honkasalo, I. Laiho-Steffens, A. Wacker, "Estimation of Capacity and Required Transmission Power of WCDMA Downlink Based on a Downlink Pole Equation", IEEE Vehicular Technology Conference, Spring 2000.
- [44] M. Jada, J. Hamalainen, R. Jantti "Energy Savings in Mobile Networks: Case Study on Femtocells" Department of Communications and Networking Aalto University, School of Science and Technology, Finland.
- [45] M. A. Marsan, M. Meo "Energy Efficient Management of two Cellular Access Networks".