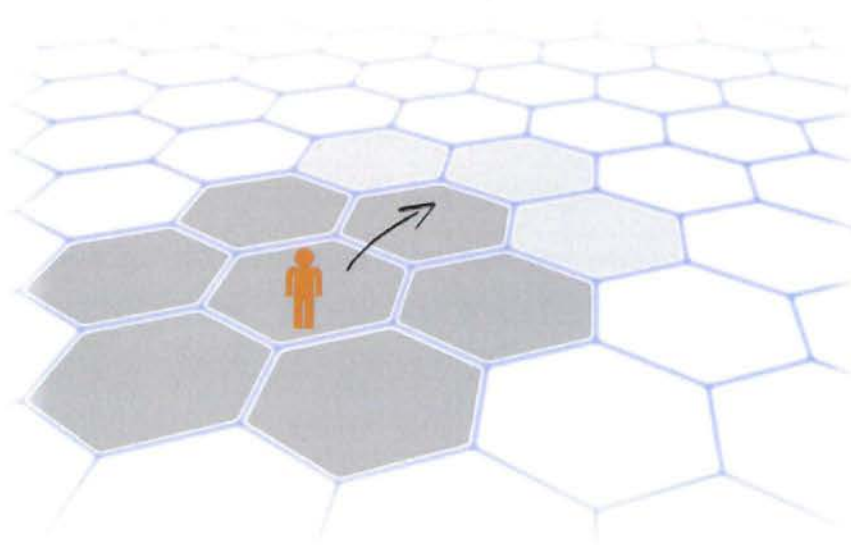


## ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



**Πτυχιακή εργασία με θέμα:**

Σχεδίαση και Ανάπτυξη Αλγορίθμων Διαπομπής για  
Ασύρματα Δίκτυα 60GHz

Σπουδαστής: Στέφανος Καλαντζής (Α.Μ.: 34158)

Εισηγητής: Δρ. Νικόλαος Τσελίκας

ΑΙΓΑΛΕΩ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

212 H

001

1950



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση και Ανάπτυξη Αλγορίθμων Διαπομπής για Ασύρματα Δίκτυα  
60GHz

Στέφανος Καλαντζής  
Α.Μ. 34158

Εισηγητής:

Δρ. Νικόλαος Τσελίκας

Εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Πρεζεράκος

Γεώργιος Τσελίκης

Ημερομηνία εξέτασης:





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Τσελίκα για την συνεχή βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διάρκεια της πτυχιακής καθώς και στην εύρεση εργασίας σε μία από τις μεγαλύτερες εταιρείες του κλάδου των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και της Επικοινωνίας (Information and Communication Technologies - ICT). Είναι ένας εξαιρετικός άνθρωπος και αξιέπαινος επιστήμονας που προσφέρεται στους συνεργάτες και στην κοινότητά του.

Επίσης ευχαριστώ όλους τους συγγενείς και φίλους μου για την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν κατά την συγγραφής της πτυχιακής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τις κοινότητες ανοιχτού κώδικα την συνεχή προσπάθεια και αγώνα τους, μιας και όλες οι τεχνολογίες και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ανοιχτού κώδικα. Ενδεικτικά αναφέρω τα πιο βασικά: Ubuntu, LibreOffice, Java, Maven, git.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με το πέρασμα των χρόνων και με τη ραγδαία πρόοδο της τεχνολογίας η ανάγκη για ασύρματες και κινητές επικοινωνίες γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση όμως, καθώς και η απαίτηση των χρηστών για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, οδηγούν στην αναζήτηση τρόπων βελτιστοποίησης των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών και εφαρμογών αλλά και στην εισαγωγή νέων.

Η εισαγωγή των ασύρματων οπτικών δικτύων (Radio over Fiber – RoF) αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο παράδειγμα για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών στα 60GHz. Ωστόσο, τα δίκτυα αυτά πρέπει να υπερνικήσουν τους περιορισμούς που υπάρχουν, ώστε να εξασφαλίσουν απρόσκοπτη ασύρματη επικοινωνία.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η σημαντική απώλεια διάδοσης των σημάτων μέσω του αέρα. Το γεγονός αυτό, περιορίζει τις ακτίνες των κυψελών μόλις σε μερικές δεκάδες μέτρα και έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό πικοκυψελών (pico-cells) με μικρές περιοχές επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Αυτό περιορίζει τον διατιθέμενο χρόνο που έχει στη διάθεσή του το σύστημα, ώστε να ολοκληρώσει επιτυχώς την διαδικασία της διαπομπής, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα μόνο σε χρήστες που κινούνται με πολύ χαμηλή ταχύτητα να διατηρήσουν την σύνδεσή τους ενεργή.

Για να ξεπεράσουμε σε ένα μεγάλο βαθμό αυτό το πρόβλημα και για να δώσουμε τη δυνατότητα και σε χρήστες που κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα να διατηρήσουν τη σύνδεσή τους ενεργή, θα εισάγουμε έναν νέο αλγόριθμο για την γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη διαδικασία της διαπομπής. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται Αλγόριθμος Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης (Moving Extended Cell – MEC) και ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα Radio over Fiber των 60 GHz. Σύμφωνα με τη μαθηματική ανάλυση και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία, μπορεί να εξασφαλιστεί απρόσκοπτη ασύρματη επικοινωνία ανεξάρτητα από το μέγεθος της περιοχής επικάλυψης μεταξύ των κυψελών, παρέχοντας μηδενική απώλεια πακέτων (packet loss) και πιθανότητα εγκατάλειψης κλήσεων (call drop) για ταχύτητες χρηστών έως και 40m/sec.

**Επιστημονική περιοχή:** Επιστήμη δικτύων

**Λέξεις κλειδιά:** ασύρματη επικοινωνία 60 GHz; μικροκυψελικά δίκτυα; Moving Extended Cell; εξομοίωση; Java







## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
1 Κατάλογος σχημάτων.....	11
2 Συντομογραφίες.....	12
3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
3.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	13
3.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	13
4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	14
4.1 Τα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών και η διαπομπή.....	14
4.1.1 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών.....	14
4.1.2 Η διαδικασία της διαπομπής.....	15
4.1.3 Βασικές απαιτήσεις και κριτήρια έναρξης της διαπομπής.....	18
4.1.4 Παράμετροι επίδοσης της διαπομπής.....	19
4.2 Προβλήματα προς επίλυση.....	20
4.2.1 Το φαινόμενο της γωνίας του δρόμου.....	20
4.2.2 Το φαινόμενο της ring-rong διαπομπής.....	21
5 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	23
5.1 Είδη και τεχνικές διαπομπής στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών.....	23
5.1.1 Σκληρή διαπομπή.....	23
5.1.2 Ήπια και ηπιότερη διαπομπή (Soft and softer handover).....	24
5.1.3 Οριζόντια και κάθετη διαπομπή.....	24
5.2 Δημοφιλείς αλγόριθμοι διαπομπής.....	25
5.2.1 Ορισμός του βασικού αλγόριθμου διαπομπής στο GSM.....	25
5.2.2 Μη παραδοσιακοί αλγόριθμοι διαπομπής.....	27
5.2.2.1 Fuzzy Διαπομπές.....	27
5.2.2.2 Προσαρμοστικές Κεραίες (Adaptive Antennas).....	27
5.3 Πρωτόκολλα διαπομπής.....	28
5.3.1 Cellular IP.....	28
5.3.2 Hawaii.....	29
5.3.3 Ιεραρχικό Mobile IP.....	30
6 ΔΙΚΤΥΑ 60GHz.....	31
6.1 Δίκτυα Radio over Fiber (RoF).....	31
6.1.1 Τι είναι τα δίκτυα Radio over Fiber.....	31
6.1.2 Οφέλη των RoF δικτύων.....	31
6.1.2.1 Χαμηλή απώλεια εξασθένησης.....	31
6.1.2.2 Μεγάλο εύρος ζώνης.....	32
6.1.2.3 Ασυλία από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων.....	32
6.1.2.4 Εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση.....	32
6.1.2.5 Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.....	33
6.1.2.6 Δυναμική κατανομή πόρων.....	33
6.1.2.7 Μελλοντική χρήση.....	33
6.1.3 Περιορισμοί των δικτύων RoF.....	34
6.2 Αλγόριθμοι μεταπομπής (hand-off).....	34
6.2.1 Αλγόριθμος Ιδεατής Ζώνης Κυψελών (Virtual Cell Zone, VCZ).....	37
6.2.2 Αλγόριθμος Εκτεταμένης Κυψέλης (Extended Cell, EC).....	39
6.2.3 Αλγόριθμος Κινούμενης Κυψέλης (Moving Cell, MC).....	41
6.3 Αλγόριθμος μεταπομπής Κινούμενης Εκτεταμένης Κυψέλης (Moving Extended Cell, MEC).....	42



6.3.1 Μαθηματικό μοντέλο.....	44
6.3.2 Απαιτήσεις – Προδιαγραφές.....	48
<b>7 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ.....</b>	<b>50</b>
7.1 Τεχνολογίες υλοποίησης.....	50
7.1.1 Γλώσσα προγραμματισμού Java.....	50
7.1.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	50
7.1.1.2 Χαρακτηριστικά.....	50
7.1.2 Σύστημα διαχείρισης λογισμικού Maven.....	51
7.1.3 YAML.....	52
7.1.4 Σύστημα ελέγχου εκδόσεων git (git version control system, VCS).....	53
7.2 Διάρθρωση υλοποίησης.....	53
7.2.1 Επεξήγηση πηγαίων αρχείων.....	55
7.2.1.1 pom.xml.....	55
7.2.1.2 src/main/assembly/assembly.xml.....	58
7.3 Το πρότυπο IEEE 754 και η βιβλιοθήκη APFloat.....	60
7.3.1 Λεπτομέρειες για την βιβλιοθήκη APFloat.....	61
7.4 Λεπτομέρειες υλοποίησης.....	61
7.4.1 Οργάνωση κώδικα.....	61
7.4.2 Επεξήγηση υλοποίησης.....	63
7.4.2.1 Γενική περιγραφή.....	63
7.4.2.2 Μονήρεις μοτίβο (Singleton pattern).....	63
7.4.2.3 Λογικές Εξομοίωσης.....	64
7.5 Κατασκευή λογισμικού (build).....	64
7.5.1 Προαπαιτούμενα.....	65
7.6 Διάρθρωση τελικού πακέτου.....	65
7.6.1 Το αρχείο εισόδου περιβάλλοντος.....	65
7.6.2 Το αρχείο εισόδου εξομοίωσης.....	66
7.6.2.1 Παράδειγμα και επεξήγηση του πεδίου userGroup:.....	66
7.6.2.2 Παράδειγμα και επεξήγηση του πεδίου users:.....	68
7.7 Αποτελέσματα υλοποίησης.....	69
<b>8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....</b>	<b>73</b>
8.1 Περίληψη.....	73
8.2 Συμπεράσματα και προοπτικές.....	73
<b>9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>75</b>



## 1 Κατάλογος σχημάτων

Εικόνα 4-1: Μηχανισμός διαπομπής. Παρατηρούμε την αλλαγή των συχνοτήτων καθώς το όχημα περνάει από τη μία κυψέλη στην άλλη.....	16
Εικόνα 4-2: Φαινόμενο της γωνίας του δρόμου.....	21
Εικόνα 4-3: Φαινόμενο ring-rong διαπομπής.....	21
Εικόνα 5-1: Οριζόντια και κάθετη διαπομπή.....	25
Εικόνα 5-2: DOA μέθοδος εντοπισμού θέσης με προσαρμοστικές κεραίες.....	28
Εικόνα 6-1: Κάλυψη του ίδιου κτηρίου στα 2.4 GHz (αριστερά) και στα 60 GHz (δεξιά).....	35
Εικόνα 6-2: Περιοχή επικάλυψης γειτονικών κυψελών σε εξωτερικό περιβάλλον.....	36
Εικόνα 6-3: Ο αλγόριθμος Virtual Cell Zone (VCZ).....	37
Εικόνα 6-4: Παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου VCZ σε δύο διαστάσεις.....	38
Εικόνα 6-5: Ο αλγόριθμος Εκτεταμένης Κυψέλης (EC).....	40
Εικόνα 6-6: Ο αλγόριθμος Κινούμενης Κυψέλης (MC).....	41
Εικόνα 6-7: Ο αλγόριθμος Κινούμενης Εκτεταμένης Κυψέλης (MEC).....	44
Εικόνα 6-8: Η τοπολογία του δικτύου, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιδόσεων του αλγορίθμου Moving Extended Cell.....	45
Εικόνα 7-1: Διάγραμμα μέσου ρυθμού τερματισμού κλήσεων προς την ταχύτητα του κινούμενου χρήστη.....	69
Εικόνα 7-2: Διάγραμμα μέσης απώλειας πακέτων προς το μήκος της οπτικής ζεύξης για την απλή περίπτωση διαπομπής.....	71
Εικόνα 7-3: Διάγραμμα μέσης απώλειας πακέτων προς το μήκος της οπτικής ζεύξης για την περίπτωση του αλγορίθμου Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης.....	72



## 2 Συντομογραφίες

(σε αλφαβητική σειρά)

**AP:** Access Point  
**BSS:** Base Station Subsystem  
**BTS:** Base Transceiver Station  
**CDMA:** Code division multiple access  
**CIR:** Carrier to Interference Ratio  
**DOA:** Difference Of Arrival  
**DWDM:** Dense Wavelength Division Multiplexing  
**EC:** Extended Cell  
**GC:** Garbage Collector  
**GPL:** General Public License  
**GSM:** Global System for Mobile Communications  
**HHO:** Hard Handover  
**IDE:** Integrated Development Environment  
**JCP:** Java Community Process  
**JVM:** Java Virtual Machine  
**LTE:** Long Term Evolution  
**MC:** Moving Cell  
**MEC:** Moving Extended Cell  
**MSC:** Mobile Switching Center  
**NaN:** Not a Number  
**OFDM:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
**OTDM:** Optical Time Division Multiplexing  
**RAU:** Radio Access Unit  
**RoF:** Radio over Fiber  
**RSS:** Received Signal Strength  
**SHO:** Soft Handover  
**SIR:** Signal to Interference Ratio  
**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System  
**UTRAN:** UMTS Terrestrial Radio Access Network  
**VCS:** Version Control System  
**VCZ:** Virtual Cell Zones  
**WCDMA:** Wideband Code Division Multiple Access  
**WDM:** Wavelength Division Multiplexing  
**YAML:** YAML Ain't a Markup Language



## 3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 3.1 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι οι διαπομπές, που λαμβάνουν χώρα στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών, τα προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και οι απαιτήσεις των χρηστών για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Σε συνάρτηση με τα παραπάνω, θα παρουσιαστεί ένας νέος αλγόριθμος, ο οποίος συντελεί στη σωστότερη και αποτελεσματικότερη διαδικασία της διαπομπής και υπερνικά πολλά από τα προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί, εξασφαλίζοντας απρόσκοπτη ασύρματη επικοινωνία ανεξάρτητα από το μέγεθος της περιοχής επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ο Αλγόριθμος Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης (Moving Extended Cell), ο οποίος λειτουργεί σε δίκτυα Radio over Fiber των 60 GHz και παρέχει στους χρήστες μηδενική απώλεια πακέτων και πιθανότητα εγκατάλειψης κλήσεων για ταχύτητες έως και 40m/sec.

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που θα παρουσιάσουμε, θα συγκρίνουμε τον παρόντα αλγόριθμο με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, θα αναλύσουμε κάποιες βασικές έννοιες και θα δείξουμε πώς εξαλείφονται κάποια από τα προβλήματα που υπάρχουν στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών.

### 3.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία ξεκινάει με μία παρουσίαση του απαραίτητου θεωρητικού υποβάθρου των σύγχρονων κυψελωτών συστημάτων, το οποίο θα συντελέσει στην καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση του θέματος. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 4, γίνεται μία αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας της διαπομπής στα κυψελωτά συστήματα καθώς και τα προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα. Ακολουθεί, στο κεφάλαιο 5, η παρουσίαση των ειδών και τεχνικών της διαπομπής, καθώς και οι δημοφιλείς αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα διαπομπής που χρησιμοποιούνται σήμερα. Στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης, αφού πρώτα κάνουμε μία περιγραφή των δικτύων Radio over Fiber (RoF). Στη συνέχεια αναλύονται οι απαιτήσεις και οι προδιαγραφές για την αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου, καθώς και το μαθηματικό μοντέλο για τη χρήση του στα δίκτυα RoF. Στο κεφάλαιο 7, αναλύονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του προγράμματος προσομοίωσης, καθώς και τα αποτελέσματα αυτής και γίνεται η σύγκριση του αλγορίθμου με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Τέλος, στο κεφάλαιο 8, γίνεται μία περίληψη της εργασίας, παρατίθενται κάποια γενικά συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές.



## 4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 4.1 Τα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών και η διαπομπή

#### 4.1.1 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών

Ο αντικειμενικός σκοπός των συστημάτων κινητών επικοινωνιών είναι η δυνατότητα παροχής επικοινωνίας μεταξύ χρηστών συστημάτων κινητών επικοινωνιών, αλλά και μεταξύ χρηστών συστημάτων κινητών επικοινωνιών και χρηστών δικτύων σταθερών επικοινωνιών, οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Επιπλέον, κάθε σύστημα πρέπει να μπορεί να διασφαλίζει την ολοκλήρωση των επικοινωνιών (κλήσεων) που βρίσκονται σε εξέλιξη, ανεξάρτητα από το αν κινούνται οι χρήστες ή όχι, κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας.

Η σχεδιαστική επιδίωξη για τα πρώτα ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών ήταν η επίτευξη ραδιοκάλυψης σε μία μεγάλη περιοχή. Επιλεγόταν συνήθως ένας ή περισσότεροι δίαυλοι από μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων για να χρησιμοποιηθούν σε αυτόνομες γεωγραφικές ζώνες. Η περιοχή κάλυψης κάθε ζώνης σχεδιαζόταν συνήθως να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη, γεγονός που σήμαινε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη, αλλά φυσικά εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Ο χρήστης, που πραγματοποιούσε μία κλήση και άρχιζε την επικοινωνία ευρισκόμενος σε κάποια ζώνη, έπρεπε να ξαναρχίσει την κλήση αυτή όταν έμπαινε σε νέα ζώνη, διότι κατά την είσοδό του στη νέα ζώνη, η κλήση αποκοπτόταν. Δεν προβλεπόταν στα πρώτα συστήματα η διαδικασία της διαπομπής, δηλαδή, η αυτόματη αλλαγή ραδιοδιαύλου (συχνότητας την εποχή εκείνη), όταν το κινητό έμπαινε σε διαφορετική γεωγραφική ζώνη, ώστε να μπορεί να συνεχιστεί η επικοινωνία στη νέα ζώνη χωρίς την ανάγκη να γίνει επανεγκατάσταση της κλήσης.

Με την ανωτέρω προσέγγιση, ενώ επιτυγχάνεται πολύ καλή ραδιοκάλυψη, δεν είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθούν οι ίδιες συχνότητες στην περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος, διότι οποιαδήποτε επαναχρησιμοποίηση θα έχει ως αποτέλεσμα παρεμβολές. Άλλο μειονέκτημα των συμβατικών συστημάτων είναι ότι ο αριθμός των ταυτόχρονα εξυπηρετούμενων χρηστών περιορίζεται από τον αριθμό των διαύλων που αφιερώνονται σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική ζώνη. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού συνδρομητών σε αυτή την περίπτωση, έχει ως συνέπεια την αρκετά μεγάλη πιθανότητα αποκλεισμού των κλήσεων κατά τις ώρες αιχμής. Επίσης, όσον αφορά τη χρησιμοποίηση του φάσματος, το συμβατικό σύστημα δεν χρησιμοποιεί αποδοτικά το φάσμα, καθότι κάθε ραδιοδίαυλος μπορεί να εξυπηρετεί μόνο έναν χρήστη κάθε φορά σε όλη την περιοχή που εξυπηρετείται από το υπόψη σύστημα.

Οι περιορισμοί που υπεισέρχονται από το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, αποτελούν το μεγάλο πρόβλημα στις ασύρματες επικοινωνίες. Το ιδανικό κινητό σύστημα επικοινωνιών θα πρέπει να λειτουργεί σε μία περιορισμένη προκαθορισμένη ζώνη και να εξυπηρετεί σχεδόν απεριόριστο αριθμό χρηστών σε απεριόριστες, όσον αφορά την έκτασή τους, περιοχές.



Αρκετές ενδιάμεσες λύσεις έχουν προταθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για να παρέχουν αναγνώριση, παράδοση των κλήσεων και εξασφάλιση της ολοκλήρωσής τους ανεξάρτητα από την κίνηση των χρηστών. Το 1971, η κυψελωτή προσέγγιση έδειξε να είναι το πιο αποδοτικό σύστημα, όσον αφορά το φάσμα. Τα κυψελωτά συστήματα χρησιμοποιούν ραδιοδιαύλους για μετάδοση των σημάτων σε αποστάσεις που κυμαίνονται από λίγες δεκάδες μέτρα μέχρι λιγότερο από μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων εφαρμόζεται κατά κανονικό και συστηματικό τρόπο. Στα ήδη λειτουργούντα κυψελωτά συστήματα, παρακολουθείται διαρκώς από τον σταθμό βάσης η στάθμη ισχύος κάθε κινητού που πραγματοποιεί κλήση. Αν η στάθμη ισχύος πέσει κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι το κινητό τερματικό εγκαταλείπει την κυψέλη, λαμβάνει χώρα αυτόματα μία ακολουθία λειτουργιών, στις οποίες περιλαμβάνονται η εξεύρεση του καλύτερου σταθμού βάσης για την κάλυψη του τερματικού, η εκχώρηση ενός νέου διαύλου στον προτιμότερο σταθμό βάσης για την εξυπηρέτηση του κινητού τερματικού και η διαπομπή στη νέα κυψέλη. Οι διαδικασίες αυτές πρέπει να πραγματοποιούνται τόσο όταν οι διαδοχικές κυψέλες από τις οποίες διέρχεται το κινητό βρίσκονται υπό τον έλεγχο του ίδιου συστήματος, όσο και όταν βρίσκονται υπό τον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων.

Οι απαιτήσεις που ανακύπτουν από την εκπλήρωση του αντικειμενικού σκοπού των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών, αφορούν στους εξής βασικούς τομείς του δικτύου:

- τη ραδιοκάλυψη, δηλαδή, την κατάλληλη τοποθέτηση σταθμών βάσης (base stations) σε όλη την περιοχή κάλυψης του συστήματος.
- την υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών. Το δίκτυο κινητών επικοινωνιών, σε περίπτωση εισερχόμενης κλήσης, για να αποκαταστήσει την επικοινωνία προς τον καλούμενο κινητό χρήστη, πρέπει να έχει την υποδομή που μεριμνά για:
  - a) τον προσδιορισμό της παρούσας θέσης του καλούμενου (δηλ. τον προσδιορισμό του κατάλληλου σταθμού βάσης, που μπορεί να εξυπηρετήσει την κλήση), και
  - b) τη δρομολόγηση της κλήσης.

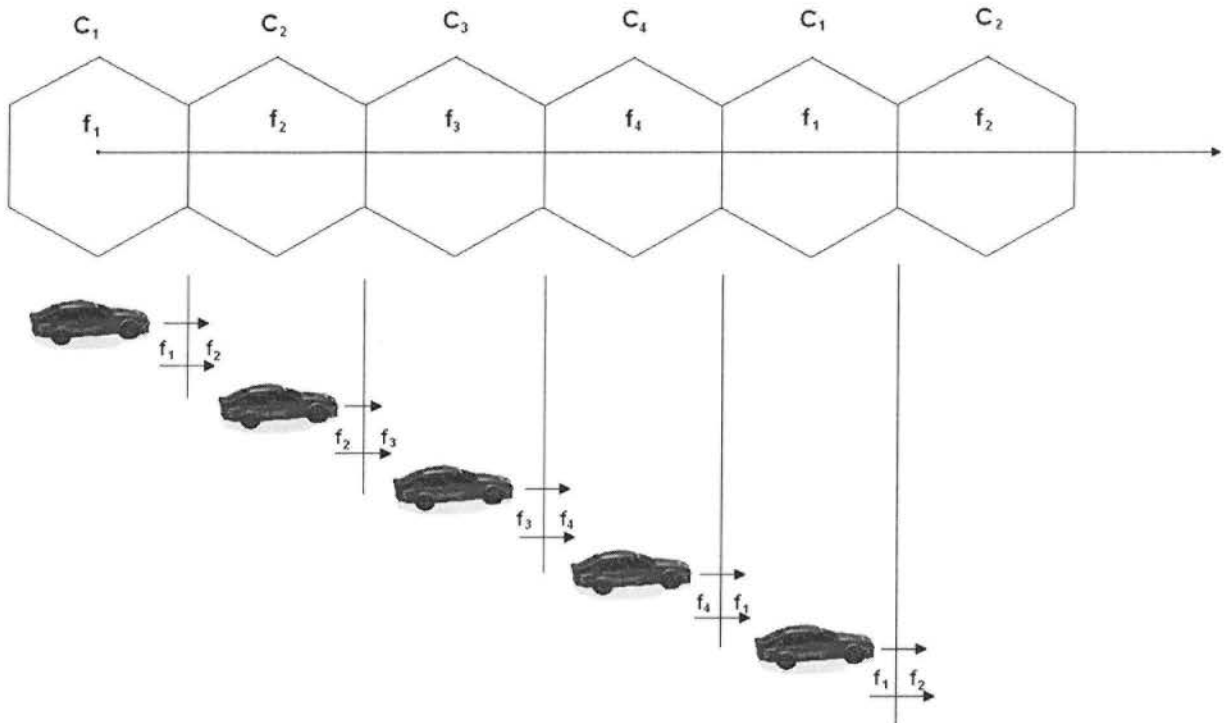
Μία επικοινωνία που βρίσκεται σε εξέλιξη δεν πρέπει να επηρεάζεται από την κίνηση του χρήστη, η οποία πιθανόν να εμπλέκει αλλαγή κυψέλης ή αλλαγή υποδικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της διαπομπής (handover).

#### 4.1.2 Η διαδικασία της διαπομπής

Ο μηχανισμός της διαπομπής είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που επιτρέπει στα κυψελωτά συστήματα να λειτουργούν αποτελεσματικά. Για να δώσουμε μία σαφή περιγραφή της έννοιας της διαπομπής χρησιμοποιούμε τη μονοδιάστατη εικόνα που φαίνεται στην εικόνα 4-1. Η έννοια της διαπομπής, όπως περιγράφεται για τη



μονοδιάστατη περίπτωση, μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των δύο διαστάσεων, που ισχύει κατά κανόνα στα κυψελωτά συστήματα.



**Εικόνα 4-1:** Μηχανισμός διαπομπής. Παρατηρούμε την αλλαγή των συχνοτήτων καθώς το όχημα περνάει από τη μία κυψέλη στην άλλη

Όταν ένα κινητό αρχίζει μία κλήση στην κυψέλη  $C_1$  και στη συνέχεια εισέρχεται στην  $C_2$ , η κλήση αυτόματα μεταφέρεται από την αρχική συχνότητα  $f_1$  στην νέα συχνότητα  $f_2$ , καθώς το κινητό βγαίνει από την κυψέλη  $C_1$  και εισέρχεται στην κυψέλη  $C_2$ . Αυτή η διαδικασία αλλαγής συχνότητας, που γίνεται αυτόματα από το σύστημα χωρίς τη μεσολάβηση του χρήστη, λέγεται διαπομπή (handover) και είναι χαρακτηριστική διαδικασία των κυψελωτών συστημάτων. Είναι μία διαδικασία μεταγωγής, όπου η επικοινωνία ενός τερματικού μεταφέρεται από έναν σταθμό βάσης σε έναν γειτονικό και η οποία ενεργοποιείται όταν ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες έχουν οριστεί κατά την αρχικοποίηση του συστήματος. Αυτό το είδος διαπομπής, το οποίο εμπλέκει αλλαγή σημείου πρόσβασης αναφέρεται ως διακυψελική διαπομπή (inter-cell handover).

Όπως γνωρίζουμε όμως, στα κυψελωτά συστήματα, η κάθε κυψέλη περιλαμβάνει έναν συγκεκριμένο αριθμό διαφορετικών διαύλων επικοινωνίας. Για λόγους που θα αναλύσουμε παρακάτω, υπάρχει η περίπτωση να απαιτείται αλλαγή συχνότητας (δηλαδή αλλαγή διαύλου επικοινωνίας) εντός της ίδιας κυψέλης. Επειδή όμως η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια παραμονής του κινητού στην ίδια κυψέλη (το κινητό εξακολουθεί μετά τη διαπομπή να εξυπηρετείται από τον ίδιο σταθμό βάσης), αναφέρεται ως ενδοκυψελική διαπομπή (intra-cell handover).





Ουσιαστικά, η διαπομπή είναι ένα χαρακτηριστικό των κυψελωτών συστημάτων που έχει σχέση με την αλλαγή φυσικών καναλιών, ραδιοδιαύλων ή σταθερών διαύλων κατά τη διάρκεια μίας κλήσης, με σκοπό τη διατήρησή της και είναι μεγάλης σημασίας, καθότι επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των επικοινωνιών, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες.

Κατά τη σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διαπομπή. Οι επιτυχείς διαπομπές, ο περιορισμός όλων των μη αναγκαίων διαπομπών και ο έλεγχος της κίνησης στην κυψέλη μέσω της αλλαγής του αλγορίθμου διαπομπής είναι βασικά στοιχεία στη σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων.

Το πρόβλημα που επιλύεται με τη διαδικασία της διαπομπής συνίσταται στη διάθεση μίας σύνδεσης από το κινητό τερματικό έως το κέντρο μεταγωγής κινητών επικοινωνιών κάθε στιγμή, σε όλη τη διάρκεια μίας κλήσης, παρά τις κινήσεις του χρήστη. Τούτο συνεπάγεται την ύπαρξη μίας περίπλοκης διαδικασίας στην οποία γίνονται μετρήσεις και λαμβάνεται απόφαση, η οποία προκαλεί τη μεταφορά της επικοινωνίας στην κατάλληλη κυψέλη την κατάλληλη στιγμή. Η διαδικασία της διαπομπής έχει μεγάλη σημασία στα κυψελωτά δίκτυα, καθότι επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των επικοινωνιών, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες, καθώς επίσης και την απόδοση φάσματος.

Η προετοιμασία για μία διαπομπή μπορεί να είναι πολύπλοκη διαδικασία. Πρώτα πρέπει να ληφθεί η απόφαση πού και πότε πρέπει να γίνει η διαπομπή και στη συνέχεια να γίνει μεταγωγή και στο δίκτυο και στο τερματικό. Ο αλγόριθμος απόφασης χρησιμοποιεί συνήθως μετρήσεις της έντασης του πεδίου του λαμβανόμενου σήματος και του BER για να ανιχνεύσει την ανάγκη για διαπομπή και πρέπει να προσδιορίσει έναν ελεύθερο δίαυλο σε γειτονική κυψέλη. Υπάρχουν κατώφλια για τη στάθμη του λαμβανόμενου σήματος και του BER και μπορεί να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι υστέρησης και χρονοκαθυστέρησης για να εμποδίσουν ένα κινητό τερματικό από το να πραγματοποιεί επανειλημμένες διαπομπές. Υπάρχουν αρκετές μορφές διαπομπής. Μερικές αποσκοπούν στο να ελαχιστοποιούν και την πιθανότητα αναγκαστικού τερματισμού των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη, λόγω αποτυχιών στις διαπομπές, και την υποβάθμιση της χρησιμοποίησης του φάσματος. Μπορεί π.χ. να δεσμευθούν δίαυλοι για διαπομπές και υπάρχουν αλγόριθμοι για τη διαχείριση αυτών των δεσμεύσεων. Οι αλγόριθμοι αυτοί προέρχονται από αντίστοιχους των συστημάτων ενσύρματων επικοινωνιών μετά από κατάλληλη προσαρμογή. Άλλα χαρακτηριστικά της διαπομπής στοχεύουν στην εξισορρόπηση ή στην κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης κατά μήκος των γειτονικών κυψελών. Αν π.χ. το τηλεπικοινωνιακό φορτίο υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, γίνεται διαπομπή μερικών κλήσεων σε γειτονικές κυψέλες. Συχνά, χρησιμοποιούνται υπερκείμενες κυψέλες για να υποβοηθήσουν τις μικρότερες κυψέλες που δεν διαθέτουν προσωρινά ελεύθερους διαύλους για διαπομπή. Η στρωματωμένη αυτή αρχιτεκτονική κυψελών επιτρέπει στις μικρότερες κυψέλες να λειτουργούν με υψηλή χρησιμοποίηση των διαύλων τους, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα αποκλεισμού, γνωρίζοντας βέβαια ότι μία υπερκείμενη κυψέλη είναι διαθέσιμη για να παράσχει σκληρή διαπομπή, όταν χρειαστεί.



#### 4.1.3 Βασικές απαιτήσεις και κριτήρια έναρξης της διαπομπής

Βασικές απαιτήσεις που αφορούν τη διαδικασία διαπομπής είναι:

- Από την μεριά του χρήστη, η διαπομπή θα πρέπει να μην γίνεται αντιληπτή και να μην αποκόπτεται η επικοινωνία.
- Από την μεριά του δικτύου, η διαδικασία διαπομπής δεν θα πρέπει να αυξάνει σημαντικά το φορτίο σηματοδότησης και θα πρέπει να αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες διαπομπές.

Στην πράξη, χρησιμοποιούνται τέσσερα κριτήρια έναρξης της διαπομπής στα κυψελωτά συστήματα:

- i. η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength, RSS)
- ii. ο λόγος του φέροντος προς παρεμβολή (Carrier to Interference Ratio, CIR)
- iii. η απόσταση κινητού τερματικού και σταθμού βάσης
- iv. κριτήρια σχετικά με το δίκτυο

Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι το κριτήριο που χρησιμοποιείται περισσότερο. Όταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στον τρέχοντα δίαυλο είναι μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή, ενεργοποιείται η διαδικασία της διαπομπής. Για την αποφυγή πρόωρων διαπομπών, χρησιμοποιούνται το παράθυρο μέσης τιμής και το περιθώριο υστέρησης (H), όταν πρόκειται να ληφθεί απόφαση για την πραγματοποίηση κάθε διαπομπής. Παρόλο που η απόσταση ανάμεσα στον σταθμό βάσης και στο κινητό τερματικό είναι η προφανέστερη αιτία εκκίνησης της διαδικασίας της διαπομπής, δεν είναι και η περισσότερο ενδιαφέρουσα στην περίπτωση που έχουμε μικροκυψέλες. Λόγω του ιδιαίτερου περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται το κινητό τερματικό, είναι πολύ πιθανό ο πιο κοντινός σταθμός βάσης να παρέχει χειρότερη ποιότητα υπηρεσίας από ότι ο πιο απομακρυσμένος. Έτσι οι ακριβείς αποφάσεις για διαπομπή εξαρτώνται όχι μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά και από το συγκεκριμένο μοντέλο διάδοσης. Ως εκ τούτου, η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του χρήστη χρησιμοποιείται ως ένα βοηθητικό κριτήριο μαζί με το CIR ή την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος ώστε να γίνεται αξιόπιστη και ακριβής έναρξη της διαδικασίας της διαπομπής.

Η υποβαθμισμένη ποιότητα όμως δεν είναι η μόνη αιτία για τις διαπομπές. Για την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών σε μία κυψέλη ή για την εξισορρόπηση της κίνησης μεταξύ των κυψελών, είναι μερικές φορές αναγκαίο να γίνεται αναδιάταξη των πόρων του συστήματος, π.χ. μεταφορά μίας κλήσης, που βρίσκεται σε εξέλιξη, από τον τρέχοντα δίαυλο σε κάποιον νέο δίαυλο. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαπομπή ενεργοποιείται από το ίδιο το δίκτυο. Ο κύριος σκοπός της διαπομπής αυτού του είδους είναι να παρέχει υψηλότερη χωρητικότητα και καλύτερη επίδοση του συστήματος χρησιμοποιώντας πληροφορίες από ολόκληρο το σύστημα.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι διαπομπές είναι μεν αναγκαίες, αλλά δεν μπορούν να γίνουν. Μία τέτοια περίπτωση είναι, όταν το κινητό πλησιάζει στα όρια μίας κυψέλης, αλλά



δεν υπάρχουν διαθέσιμοι δίαυλοι στη νέα κυψέλη. Σε αυτή την περίπτωση, εάν η νέα κυψέλη δεν μπορεί με αναδιατάξεις στις εκχωρήσεις διαύλων της να δεχθεί την κλήση, τότε η κλήση θα απορριφθεί. Μία άλλη περίπτωση είναι όταν το κινητό βρίσκεται σε μια περιοχή της κυψέλης όπου παρατηρείται χαμηλή ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, αλλά δεν βρίσκεται στα όρια της κυψέλης ώστε να γίνει διαπομπή σε γειτονική κυψέλη, ούτε υπάρχουν άλλοι διαθέσιμοι δίαυλοι στην ίδια κυψέλη, ώστε να πραγματοποιηθεί ενδοκυψελική διαπομπή. Σε αυτή την περίπτωση, η κλήση πρέπει να παραμείνει στον δίαυλο που χρησιμοποιεί μέχρι να διακοπεί λόγω μη παραδεκτής στάθμης του σήματος.

#### 4.1.4 Παράμετροι επίδοσης της διαπομπής

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστεί η επίδοση της διαπομπής είναι:

- Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης (call blocking probability): η πιθανότητα να αποκλειστεί κάποια αίτηση για νέα κλήση.
- Πιθανότητα αποκλεισμού διαπομπής (handover blocking probability): η πιθανότητα να αποκλειστεί κάποια αίτηση για διαπομπή.
- Πιθανότητα διαπομπής (handover probability): η πιθανότητα να απαιτείται διαπομπή πριν τον τερματισμό μίας κλήσης που βρίσκεται σε εξέλιξη σε συγκεκριμένη κυψέλη. Η παράμετρος αυτή μεταφράζεται στον μέσο αριθμό διαπομπών ανά κλήση.
- Πιθανότητα απόρριψης κλήσης (call dropping probability): η πιθανότητα να τερματιστεί μία κλήση λόγω αποτυχίας της διαπομπής, Η παράμετρος αυτή μπορεί να παραχθεί άμεσα από την πιθανότητα αποκλεισμού διαπομπής και από την πιθανότητα διαπομπής.
- Πιθανότητα μη αναγκαίας διαπομπής (probability of an unnecessary handover): η πιθανότητα να γίνει διαπομπή σύμφωνα με τον εφαρμοζόμενο αλγόριθμο, ενώ ο χρησιμοποιούμενος δίαυλος είναι ακόμη κατάλληλος.
- Ρυθμός διαπομπών (handover rate): ο αριθμός των διαπομπών ανά μονάδα χρόνου. Σε συνδυασμό με τη μέση διάρκεια κλήσεων, είναι δυνατό να καθορίσουμε στη συνέχεια τον μέσο αριθμό διαπομπών ανά κλήση και, συνεπώς, την πιθανότητα διαπομπής.
- Διάρκεια διακοπής (duration of interruption): το χρονικό διάστημα, κατά τη διαδικασία της διαπομπής, για το οποίο το κινητό τερματικό δεν επικοινωνεί με κανέναν από τους σταθμούς βάσης. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται πολύ με την τοπολογία του συγκεκριμένου δικτύου και τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο.
- Καθυστερήση (delay): η απόσταση που διανύει το κινητό τερματικό από τη στιγμή που θα εμφανιστεί η ανάγκη διαπομπής μέχρι να πραγματοποιηθεί η διαπομπή.



Οι παραπάνω παράμετροι αποτελούν βασικούς παράγοντες στη σχεδίαση των αλγορίθμων διαπομπής και είναι πολύ σημαντικοί για την παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας στους χρήστες.

## 4.2 Προβλήματα προς επίλυση

Λόγω της διαδεδομένης επέκτασης των κυψελοειδών δικτύων, της όλο και αυξανόμενης ζήτησης νέων υπηρεσιών τα τελευταία χρόνια αλλά και παράλληλα της έλλειψης περαιτέρω διαθέσιμου φάσματος, ο σχεδιασμός αξιόπιστων αλγορίθμων handover κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός για τη σωστή και αξιόπιστη λειτουργία των κυψελοειδών συστημάτων επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό έχει δοθεί σημαντικό βάρος στη μελέτη και έρευνα αλγορίθμων διαπομπής ικανών στο να προσφέρουν την απαιτούμενη αξιοπιστία στους ασύρματους φορείς παροχής υπηρεσιών.

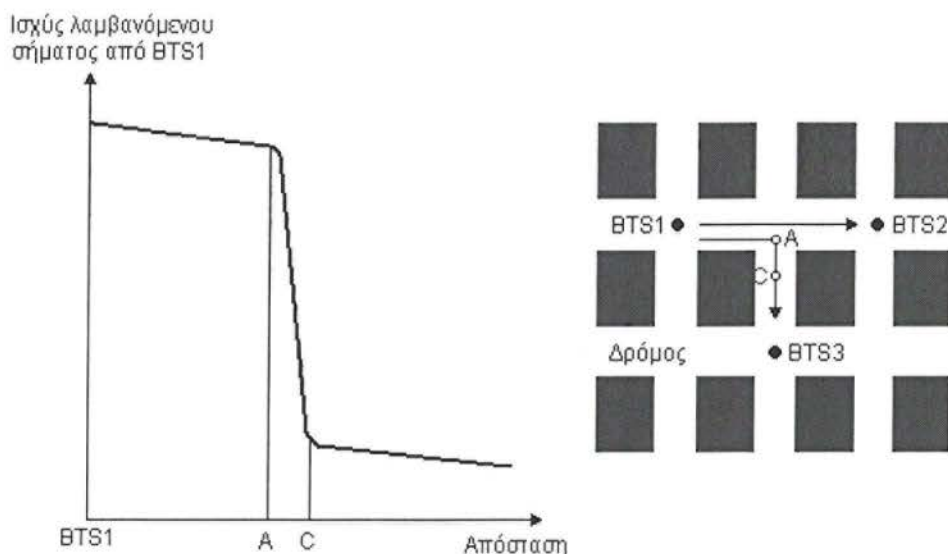
Παρ' όλες τις μακροχρόνιες μελέτες και έρευνες ο χώρος για βελτιστοποίηση αλλά και εξερεύνηση νέων αλγορίθμων διαπομπής παραμένει ανοιχτός. Προκειμένου όμως μια εμπειριστατωμένη έρευνα για βελτιστοποίηση των αλγορίθμων διαπομπής να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα θα πρέπει αρχικά να εξετασθούν σε βάθος και να καταγραφούν κάποια από τα προβλήματα και τις κρίσιμες παραμέτρους που περιορίζουν την ομαλή λειτουργία δικτύου και ειδικότερα της διαδικασίας διαπομπής στα υπάρχοντα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την επικέντρωση της μελέτης στην εξεύρεση τρόπων και μεθόδων καταπολέμησης αυτών των προβλημάτων και περιορισμών.

### 4.2.1 Το φαινόμενο της γωνίας του δρόμου

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών εξελίσσονται διαρκώς ώστε να διορθώνονται τα όποια προβλήματα προκύπτουν και να παρέχεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας προς τους χρήστες.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που έχουν ανακύψει στα μικροκυψελωτά συστήματα είναι το φαινόμενο της γωνίας του δρόμου. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται από απότομη πτώση της στάθμης του σήματος, της τάξης των 20-30 dB για διανυόμενη απόσταση 10-20 μέτρων, και εμφανίζεται όταν το κινητό τερματικό στρίβει στη γωνία ενός δρόμου και χάνει την οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης (Εικόνα 4-2). Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η απότομη πτώση της στάθμης του σήματος λαμβάνει χώρα καθώς ο χρήστης μετακινείται από την θέση Α στην θέση C, όπου και χάνει απότομα την οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης 1.

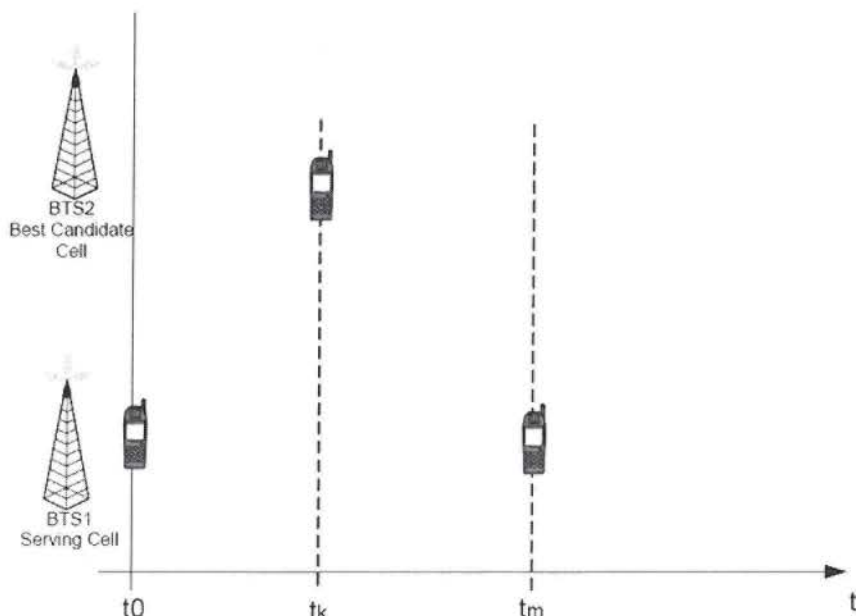
Το φαινόμενο γωνίας του δρόμου απαιτεί γρηγορότερη διαπομπή και μπορεί να μεταβάλει την ποιότητα του σήματος πολύ γρήγορα και να συντελέσει στον τερματισμό μίας κλήσης. Το βασικότερο πρόβλημα είναι ότι είναι δύσκολο να προβλεφθεί, καθώς η κίνηση του κάθε χρήστη είναι μοναδική και τυχαία. Για αυτό το λόγο, το φαινόμενο αυτό έχει μεγάλο αντίκτυπο στη διαδικασία της διαπομπής και επιδρά στη λήψη απόφασης για την εκτέλεσή της.



Εικόνα 4-2: Φαινόμενο της γωνίας του δρόμου

#### 4.2.2 Το φαινόμενο της ring-pong διαπομπής

Συνήθως οι ring-pong διαπομπές εμφανίζονται σε περιοχές όπου τα σύνορα δύο κυψελών επικαλύπτονται (overlapping cell borders). Έχει παρατηρηθεί ότι, καθώς το τερματικό εισέρχεται σε μια τέτοια περιοχή οι διαπομπές είναι συχνές και αρκετά πιθανές. Η Εικόνα 4-3 δείχνει τον συνηθή ορισμό αυτής από τους πάροχους δικτύου.



Εικόνα 4-3: Φαινόμενο ring-pong διαπομπής



Ας υποθέσουμε ότι, κάποιος χρήστης, τη χρονική στιγμή  $t_0$  έχει πραγματοποιήσει μία κλήση, ενώ βρίσκεται στη θέση  $S_0$ , όπως φαίνεται στο σχήμα, και η κυψέλη που τον εξυπηρετεί είναι η κυψέλη BTS1 (Serving Cell). Ας θεωρηθεί επίσης, ότι, τις επόμενες χρονικές στιγμές  $t_k$ ,  $t_m$  ο χρήστης βρίσκεται στις θέσεις  $S_k$ ,  $S_m$  αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στις χρονικές αυτές στιγμές, ο χρήστης συνεχίζει την ίδια κλήση. Αν την χρονική στιγμή  $t_k$  το τερματικό πραγματοποιήσει διαπομπή στην κυψέλη BTS2 και στη συνέχεια την χρονική στιγμή  $t_m$ , πριν τον τερματισμό της κλήσης, αυτό «επιστρέψει» και πάλι στην κυψέλη που τον εξυπηρετούσε αρχικά, τότε λέγεται ότι αυτό το τερματικό πραγματοποίησε μία ring-rong διαπομπή.

Γενικά το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί τόσο στον χρόνο όσο και στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, ένα τερματικό, παρόλο που μπορεί να βρίσκεται ακίνητο, λόγω του γνωστού φαινομένου των διαλείψεων μπορεί, κάλλιστα, να υποπέσει σε ring-rong διαπομπή λόγω των αρκετών και σημαντικών αυξομειώσεων που παρατηρούνται στο λαμβανόμενο σήμα από τις κυψέλες γύρω του.



## 5 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

### 5.1 Είδη και τεχνικές διαπομπής στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών

Στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα υπάρχουν δύο βασικές μορφές διαπομπής:

- η σκληρή διαπομπή (hard handover, HHO), όπου η επικοινωνία του κινητού τερματικού με το σταθμό βάσης αποκόπτεται πριν αποκατασταθεί μέσω του νέου σταθμού βάσης.
- Η ήπια διαπομπή (soft handover, SHO), όπου και ο αρχικός σταθμός βάσης και εκείνος που δέχεται τελικά τη συνέχιση της κλήσης επικοινωνούν ταυτόχρονα με το κινητό τερματικό παρέχοντας μία μορφή διαφορικής λήψης και στο κινητό και στο δίκτυο.

#### 5.1.1 Σκληρή διαπομπή

Σκληρή καλείται η διαπομπή, κατά την οποία μια σύνδεση τερματίζεται, προτού εγκαθιδρυθεί μια νέα σύνδεση μεταξύ του τερματικού και του δικτύου πρόσβασης. Αυτός ο τύπος διαπομπής χρησιμοποιείται στα κυψελωτά συστήματα GSM (Global System for Mobile Communications), στο πλαίσιο των οποίων μια διαφορετική ζώνη συχνότητας έχει οριστεί για κάθε κυψέλη. Όταν ένας χρήστης εισέρχεται στην περιοχή κάλυψης μιας νέας κυψέλης, η υπάρχουσα σύνδεση οδηγείται σε διακοπή, πριν εγκαθιδρυθεί μια νέα σύνδεση σε μια διαφορετική συχνότητα στην κυψέλη προορισμού. Ο αλγόριθμος πίσω από αυτόν τον τύπο παράδοσης είναι ιδιαίτερα απλός. Ο κινητός σταθμός εκτελεί μια διαπομπή, κάθε φορά που η ισχύς σήματος μιας γειτονικής κυψέλης υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι, την ισχύ σήματος της εξυπηρετούσας κυψέλης.

Στο UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) οι σκληρές διαπομπές χρησιμοποιούνται, όταν π.χ. αλλάζει η ζώνη ραδιοσυχνότητας της σύνδεσης μεταξύ του τερματικού και του επίγειου ασύρματου δικτύου πρόσβασης UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network, UTRAN). Εφαρμόζονται επίσης και στην περίπτωση, που πραγματοποιείται αλλαγή κυψέλης στην ίδια συχνότητα. Όταν ένα τερματικό κινείται προς μια διαφορετική κυψέλη ενός δικτύου UMTS, παράλληλα με ένα κανάλι, που διατίθεται να το εξυπηρετεί, η σκληρή διαπομπή επιλέγεται μόνο στην περίπτωση που η ήπια ή έστω ηπιότερη διαπομπή είναι αδύνατη.

Το κύριο πρόβλημα που ανακύπτει στις σκληρές διαπομπές εντός των συστημάτων GSM είναι οι – κάποιες φορές υψηλές – πιθανότητες διακοπής μιας κλήσης, έτσι όπως αυτές βιώνονται από τους χρήστες κατά την μετάβαση σε μια νέα κυψέλη. Οι εν λόγω πιθανότητες είναι δυνατόν να μειωθούν με την παραχώρηση προτεραιότητας στους χρήστες διαπομπής σε σχέση με τους νέους χρήστες, παραχώρηση η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την δέσμευση π.χ. ενός ορισμένου μέρους της χωρητικότητας κάθε κυψέλης για τους χρήστες σε τρέχουσα επικοινωνία. Όμως, τέτοιου είδους λύσεις μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερες πιθανότητες μπλοκαρίσματος για τους νέους χρήστες. Για την



αποφυγή ενός τέτοιου φαινομένου θα πρέπει να υπάρξει αποδοτική διαχείριση μεταξύ απόρριψης τρεχόντων κλήσεων και αποκλεισμού νέων. Οι εκτιμήσεις αυτές μαζί με άλλες παραμέτρους του CDMA (Code division multiple access) οδήγησαν στην επιλογή και επιπρόσθετων τύπων διαπομπής, προκειμένου να συνυπάρξουν στο δίκτυο πρόσβασης WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access): οι ήπιοι και ηπιότεροι αλγόριθμοι διαπομπής αναγκαία έρχονται αντιμέτωποι με κάποια από τα μειονεκτήματα των συστημάτων CDMA και ως εκ τούτου, η γενική απόδοση συστημάτων αυξάνεται. Χαρακτηριστικά, οι σκληρές παραδόσεις χρησιμοποιούνται μόνο για λόγους κάλυψης και φορτίου, ενώ η ήπια και ηπιότερη διαπομπή είναι τα κύρια μέσα για την υποστήριξη της κινητικότητας.

### 5.1.2 Ήπια και ηπιότερη διαπομπή (Soft and softer handover)

Οι ήπιες και ηπιότερες διαπομπές αποτελούν συγκεκριμένους τύπους διαπομπών CDMA, που αναπτύχθηκαν στο σύστημα UMTS. Αυτές διαμορφώνουν ένα από τα χαρακτηριστικότερα γνωρίσματα της επαναστατικής μεθόδου προσπέλασης WCDMA.

Μια ήπια ή ηπιότερη διαπομπή εμφανίζεται πρωτίστως στην περίπτωση, κατά την οποία ο κινητός σταθμός βρίσκεται σε περιοχή κάλυψης, που επικαλύπτεται από δύο παρακείμενες κυψέλες. Ο χρήστης έχει δύο ταυτόχρονες συνδέσεις στο μέρος UTRAN του δικτύου χρησιμοποιώντας κατά τον ίδιο χρόνο περισσότερα διαφορετικά κανάλια διεπαφών. Στην περίπτωση της ήπιας διαπομπής ο κινητός σταθμός βρίσκεται στην επικαλυπτόμενη περιοχή κάλυψης κυψελών από δύο διαφορετικούς τομείς (sectors), που ανήκουν, όμως, σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Η ηπιότερη διαπομπή είναι η κατάσταση, κατά την οποία ένας σταθμός βάσης λαμβάνει δύο σήματα χρηστών από δύο παρακείμενους τομείς (sectors), που αυτός εξυπηρετεί. Αν και υπάρχει υψηλός βαθμός ομοιότητας μεταξύ των δύο τύπων διαπομπών υπάρχουν, ωστόσο, σημαντικές διαφορές. Στην πράξη, η ήπια διαπομπή εμφανίζεται σε ποσοστό 5-10% των συνδέσεων.

Στην περίπτωση της ηπιότερης διαπομπής ο σταθμός βάσης λαμβάνει δύο χωριστά σήματα μέσω της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Λόγω των αντανάκλασεων στα κτίρια ή στα φυσικά εμπόδια, το σήμα, που στέλνεται από τους κινητούς σταθμούς, φθάνει στο σταθμό βάσης από δύο διαφορετικούς τομείς. Τα σήματα, που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της ηπιότερης διαπομπής, αντιμετωπίζονται ομοίως ως σήματα πολλαπλών διαδρομών. Στη ζεύξη ανόδου τα σήματα, που λαμβάνονται στο σταθμό βάσης, δρομολογούνται στον ίδιο δέκτη και συνδυάζονται ακολουθώντας τη μέγιστη αναλογία της συνδυαστικής τεχνικής. Στην ζεύξη καθόδου η κατάσταση είναι ελαφρώς διαφορετική, δεδομένου ότι ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί διαφορετικούς κώδικες περίπλεξης, προκειμένου να διαχωρίσει τους διαφορετικούς τομείς, που εξυπηρετεί.

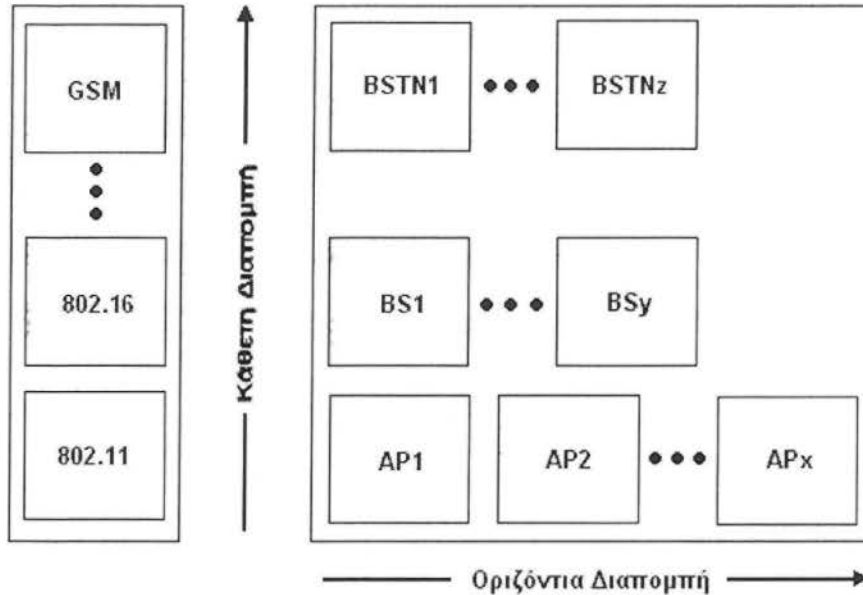
### 5.1.3 Οριζόντια και κάθετη διαπομπή

Εάν κοιτάξουμε την διαπομπή από αρχιτεκτονικής άποψης, υπάρχουν 2 διαφορετικά είδη, η κάθετη και η οριζόντια. Οριζόντια διαπομπή είναι η διαπομπή μεταξύ σταθμών βάσης που ανήκουν στον ίδιο τύπο τεχνολογίας δικτύου, ενώ κάθετη διαπομπή έχουμε μεταξύ σταθμών βάσης διαφορετικών τεχνολογιών δικτύου, όπως φαίνεται και στο





παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5-1: Οριζόντια και κάθετη διαπομπή

Τόσο η οριζόντια όσο και η κάθετη διαπομπή μπορούν να είναι είτε σκληρές είτε ήπιες. Επειδή όμως η ήπια διαπομπή είναι πιο πολύπλοκη και απαιτεί συνεργασία μεταξύ των συστατικών του δικτύου, είναι πιο συνήθης στις οριζόντιες παρά στις κάθετες διαπομπές.

## 5.2 Δημοφιλείς αλγόριθμοι διαπομπής

### 5.2.1 Ορισμός του βασικού αλγόριθμου διαπομπής στο GSM

Στη παρούσα παράγραφο θα περιγράψουμε ένα βασικό γενικό αλγόριθμο διαπομπής, που μπορεί να υλοποιηθεί και να εφαρμοστεί σε ένα σύστημα GSM. Οι προδιαγραφές παρακάτω περιέχουν ένα σύνολο αρχικών αλγορίθμων από τους οποίους περισσότερο περίπλοκοι αλγόριθμοι διαπομπής θα μπορούσαν να μελετηθούν.

Ο υπάρχων αλγόριθμος βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Έχουμε μία κυψέλη ανά υποσύστημα σταθμού βάσης (Base Station Subsystem, BSS).
- Η ανάγκη για πραγματοποίηση διαπομπής σύμφωνα με κριτήρια ραδιοκάλυψη αναγνωρίζεται στο BSS. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ενδοκυψελική ή διακυψελική διαπομπή.
- Η αποτίμηση της λίστας με τις κυψέλες στόχους πραγματοποιείται στο BSS.



- Η επιλογή κυψέλης γίνεται στο κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Mobile Switching Center, MSC).
- Η ενδοκυψελική διαπομπή για κριτήρια ραδιοκάλυψης (π.χ. προβλήματα παρεμβολών) μπορεί να εκτελεστεί απευθείας από το BSS.
- Η ανάγκη για διαπομπή για λόγους φορτίου αναγνωρίζεται από το MSC.
- Όλες οι παράμετροι που ελέγχουν τη διαδικασία διαπομπής θα πρέπει να ελέγχονται κυψέλη προς κυψέλη.

Η γενική διαδικασία διαπομπής διασπάται στα παρακάτω τμήματα:

i. Προ-επεξεργασία και σύγκριση με τα κατώφλια στο BSS.

Για το σκοπό της διαδικασίας της διαπομπής, το BSS αποθηκεύει μία σειρά από παραμέτρους και κατώφλια. Στη συνέχεια γίνεται η απαραίτητη επεξεργασία των μετρήσεων και σύγκριση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων, οι οποίοι καθορίζουν κατά πόσο είναι απαραίτητη η διαδικασία της διαπομπής.

ii. Αλγόριθμος απόφασης στο BSS.

Το BSS, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες παραμέτρους που έχει υπολογίσει στο προηγούμενο βήμα και συγκρίνοντας με παραμέτρους των γειτονικών κυψελών, αναγνωρίζει την ανάγκη πραγματοποίησης μιας διαπομπής και στέλνει ένα μήνυμα "handover required message" στο MSC περιέχοντας τη λίστα με τις πιθανές κυψέλες στόχους. Θα πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι, από τη στιγμή που τα αποτελέσματα μετρήσεων μπορούν να σταλούν στο MSC μέσα από το μήνυμα "handover required", η απόφαση για διαπομπή μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο MSC είτε στο BSS.

iii. Αλγόριθμος επιλογής κυψέλης στο MSC.

Σε αυτό το βήμα το MSC, έχοντας λάβει την λίστα με τις πιθανές κυψέλες στόχους, κρίνει ποια είναι η καλύτερη επιλογή.



## 5.2.2 Μη παραδοσιακοί αλγόριθμοι διαπομπής

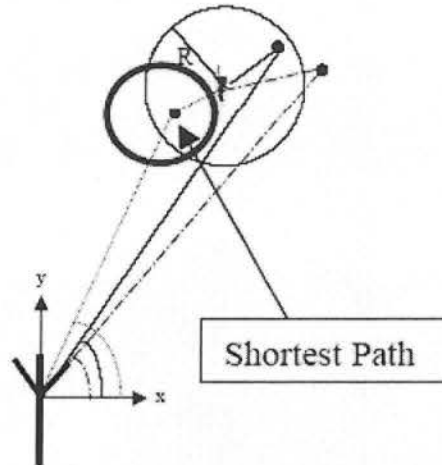
Η διαδικασία διαπομπής στα κυψελοειδή συστήματα δεν είναι πλήρως προτυποποιημένη. Οι αλγόριθμοι διαφέρουν από πάροχο σε πάροχο, καθώς αυτοί προσαρμόζουν τις παραμέτρους με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά σχήματα διαπομπών. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται κάποιοι από τους ευφυείς αλγορίθμους διαπομπής (πέρα από τους παραδοσιακούς αλγορίθμους) στα συστήματα 2G, όπως αυτά έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια.

### 5.2.2.1 Fuzzy Διαπομπές

Ευφυείς τεχνολογίες λογισμικού, όπως είναι π.χ. η ασαφής (fuzzy) λογική, τα νευρωνικά δίκτυα και η αναγνώριση σημάτων, μπορούν να εφαρμοστούν στη διαδικασία διαπομπής στο GSM. Η ασαφής (fuzzy) διαπομπή ουσιαστικά συντελείται μέσω μιας βελτιωμένης διαδικασίας επεξεργασίας των προτυποποιημένων αναφορών μετρήσεων στο GSM. Ασαφής διαπομπή είναι η διαδικασία εκείνη, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένας fuzzy ελεγκτής για τη λήψη απόφασης διαπομπής. Τα μετρούμενα δεδομένα που φθάνουν στο τερματικό, μετασχηματίζονται σε fuzzy τιμές, οι οποίες τροφοδοτούν μια μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων. Η μηχανή αυτή χρησιμοποιεί ένα σετ ασαφών κανόνων, προκειμένου να αποφασιστεί, κατά πόσο μια διαπομπή είναι αναγκαία. Η ενοποίηση της ασαφούς λογικής με τα υπάρχοντα συστήματα έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο σταθερή διαδικασία απόφασης διαπομπής.

### 5.2.2.2 Προσαρμοστικές Κεραίες (Adaptive Antennas)

Οι προσαρμοστικές κεραίες συμβάλλουν στη δημιουργία πιο «έξυπνων» διαπομπών. Οι διαπομπές αυτές, όπως είδαμε, είναι κατά κύριο λόγο, είτε σκληρές, είτε ήπιες. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της καλής εκτίμησης της θέσης του τερματικού, μέσω αυτών των κεραιών, που επιτρέπει την πρόβλεψη της ταχύτητας του χρήστη. Η εκτίμηση της θέσης στηρίζεται στην τεχνολογία DOA (Difference Of Arrival). Ορισμένα μοντέλα προσδιορίζουν έναν κανονικά κατανομημένο σκεδαστή και οι ακτίνες με την μικρότερη απόσταση μεταξύ τερματικού και σταθμού χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της γωνίας άφιξης. Η ακτίνα σκέδασης R εξαρτάται από την περιοχή. Με την χρήση της μικρότερης DOA ακτίνας και μιας εικονικής χρονικής προώθησης, η θέση μπορεί να καθοριστεί με συγκεκριμένη ακρίβεια.



Εικόνα 5-2: DOA μέθοδος εντοπισμού θέσης με προσαρμοστικές κεραίες

Η εκτίμηση, που πραγματοποιείται βάσει της μεθόδου DOA στις προσαρμοστικές κεραίες, μπορεί να έχει αποτελέσματα μόνο σχετικά με βραχυπρόθεσμες προβλέψεις. Αντίθετα, μακροπρόθεσμες προβλέψεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν, με την εφαρμογή νευρωνικών δικτύων, με τη γνώση της συμπεριφοράς του χρήστη, τόσο όσον αφορά τον χρόνο όσο και την θέση.

Όλες αυτές οι πληροφορίες μπορούν να μεταφερθούν από τον σταθμό βάσης σε ένα κέντρο ελέγχου. Σκοπός του κέντρου αυτού ελέγχου θα είναι η βελτίωση της κατανομής των διαθέσιμων πόρων, εφόσον η διαδικασία διαπομπής θα έχει ήδη γίνει αποδοτικότερη λόγω της γνώσης της θέσης του χρήστη.

### 5.3 Πρωτόκολλα διαπομπής

#### 5.3.1 Cellular IP

Το πρωτόκολλο αυτό, το οποίο δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο της Columbia και την εταιρία Ericsson, υποστηρίζει την υπηρεσία της τηλεϊδοποίησης (paging) καθώς και μία σειρά από τεχνικές διαπομπής. Η διαχείριση θέσης και η υποστήριξη διαπομπής του κινητού τερματικού ενσωματώνονται με τη δρομολόγηση στα δίκτυα πρόσβασης του Cellular IP.

Για να ελαχιστοποιηθούν τα μηνύματα ελέγχου, η τακτική ροή των πακέτων δεδομένων που μεταδίδονται από τα κινητά τερματικά, χρησιμοποιείται για την ενημέρωση της θέσης του κινητού. Το πρωτόκολλο, χρησιμοποιεί τα πακέτα που προέρχονται από το κινητό



τερματικό, ώστε να διατηρεί μία λίστα με τις διαδρομές προς αυτό το τερματικό. Οι κόμβοι στο δίκτυο πρόσβασης παρακολουθούν την διαδρομή που ακολούθησε το πακέτο μέχρι να φτάσει εκεί και την καταγράφουν στην βάση δεδομένων τους βήμα προς βήμα, ώστε να μπορούν στη συνέχεια να δρομολογήσουν πακέτα προς το εκάστοτε κινητό τερματικό, χρησιμοποιώντας τις IP διευθύνσεις.

Το πρωτόκολλο αυτό υποστηρίζει δύο είδη διαπομπής. Η σκληρή διαπομπή, που βασίζεται σε μια απλή προσέγγιση, η οποία εμπορεύεται κάποια απώλεια πακέτων σε αντάλλαγμα για την ελαχιστοποίηση της σηματοδοσίας, αντί να προσπαθεί να εγγυηθεί μηδενική απώλεια πακέτων. Η ήπια διαπομπή προετοιμάζει την διαδικασία της διαπομπής, ενημερώνοντας εκ των προτέρων τον νέο σταθμό βάσης πριν από την πραγματική διαπομπή. Η ήπια διαπομπή ελαχιστοποιεί την απώλεια πακέτων και παρέχει καλύτερη απόδοση των TCP και UDP πρωτοκόλλων, σε σχέση με τη σκληρή διαπομπή.

Το Cellular IP επίσης υποστηρίζει την υπηρεσία της τηλεειδοποίησης (paging) και έχει τη δυνατότητα να ξεχωρίζει τους ενεργούς από τους αδρανείς χρήστες. Τα συστήματα τηλεειδοποίησης βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των μηνυμάτων σηματοδοσίας και μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας των κινητών τερματικών. Το πρωτόκολλο εντοπίζει την τοποθεσία των αδρανών χρηστών με αποτελεσματικό και ακριβή τρόπο. Ως εκ τούτου, τα κινητά τερματικά δεν χρειάζεται να ενημερώνουν για την τοποθεσία τους ύστερα από κάθε διαπομπή, πράγμα το οποίο επεκτείνει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας και μειώνει τις παρεμβολές. Όταν αποσταλούν πακέτα προς έναν αδρανή χρήστη, τότε ο χρήστης λαμβάνει ένα μήνυμα τηλεειδοποίησης, το οποίο τον καθιστά σε ενεργή κατάσταση, και εν συνεχεία ενημερώνει για την τοποθεσία του, έως ότου μεταβεί ξανά σε κατάσταση αδράνειας.

Το πρωτόκολλο Cellular IP υποστηρίζει ακόμα ένα μοντέλο ασφάλειας, το οποίο είναι κατάλληλο για περιβάλλοντα που βασίζονται στην διαχείριση των κλειδιών συνόδου (session keys). Αντί να ορίζεται καινούργια σηματοδοσία, το δίκτυο πρόσβασης του Cellular IP χρησιμοποιεί ειδικά κλειδιά συνόδου, τα οποία υπολογίζονται ξεχωριστά στον κάθε σταθμό βάσης. Αυτή η διαδικασία εξαλείφει την ανάγκη για σηματοδοσία για την διαχείριση των κλειδιών συνόδου, η οποία θα πρόσθετε επιπλέον καθυστέρηση στην διαδικασία της διαπομπής.

### 5.3.2 Hawaii

Το πρωτόκολλο αυτό δημιουργήθηκε από την εταιρία Lucent Technologies και προτείνει έναν ξεχωριστό πρωτόκολλο δρομολόγησης για την ενδοκινητικότητα. Βασίζεται στο Mobile IP για να παρέχει μεγάλου εύρους κινητικότητα. Όταν ένα κινητό τερματικό εισέρχεται στη ζώνη ενός ξένου φορέα, του παρατίθεται μία συγκεκριμένη διεύθυνση. Το κινητό κρατάει αυτή τη διεύθυνση σταθερή όσο κινείται στην περιοχή του ξένου φορέα και έτσι ο αρχικός φορέας δεν χρειάζεται να αναμειχθεί παρά μόνο εάν ο χρήστης μεταβεί σε μία νέα περιοχή.

Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο Hawaii εκτελούν ένα γενικό πρωτόκολλο δρομολόγησης IP και διατηρούν τις συγκεκριμένες πληροφορίες δρομολόγησης σύμφωνα με τις διαδρομές των



χρηστών που προστίθενται στους πίνακες δρομολόγησης. Υπό αυτή την έννοια, οι κόμβοι αυτοί μπορούν να θεωρηθούν ενισχυμένοι IP δρομολογητές, όπου η υφισταμένη λειτουργία προώθησης πακέτων επαναχρησιμοποιείται. Οι πληροφορίες τοποθεσίας δημιουργούνται, ενημερώνονται και τροποποιούνται με συγκεκριμένα μηνύματα σηματοδότησης τα οποία αποστέλλονται από τα κινητά τερματικά.

Το πρωτόκολλο Hawaii ορίζει τέσσερα εναλλακτικά σχέδια δημιουργίας διαδρομών, τα οποία ελέγχουν την διαδικασία της διαπομπής μεταξύ των σημείων πρόσβασης. Το κατάλληλο σχέδιο δημιουργίας διαδρομής επιλέγεται ανάμεσα από τα τέσσερα, ανάλογα με τις προτεραιότητες του διαχειριστή, οι οποίες έχουν να κάνουν με την εξάλειψη απώλειας πακέτων, την ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής κατά την διαπομπή και τη διατήρηση της σειράς των αποσπελλόμενων πακέτων. Το πρωτόκολλο, επίσης, χρησιμοποιεί την πολλαπλή εκπομπή (multicasting) ώστε να ενημερώσει τους αδρανείς χρήστες όταν υπάρχουν εισερχόμενα πακέτα δεδομένων στο δίκτυο, σε περίπτωση που δεν υπάρχουν πρόσφατες πληροφορίες δρομολόγησης προς τον συγκεκριμένο χρήστη.

### 5.3.3 Ιεραρχικό Mobile IP

Το Ιεραρχικό Mobile IP δημιουργήθηκε από τις εταιρίες Ericsson και Nokia και χρησιμοποιεί μία ιεραρχία ξένων φορέων για να χειρίζεται τοπικά τις εγγραφές του Mobile IP. Σε αυτό το πρωτόκολλο, οι κινητοί χρήστες στέλνουν μηνύματα εγγραφής για να ενημερώσουν για την εκάστοτε τοποθεσία τους. Τα μηνύματα αυτά εγκαθιδρύουν τούνελ μεταξύ των γειτονικών φορέων καθ' όλη τη διαδρομή από το κινητό τερματικό μέχρι τον φορέα πύλης (Gateway Foreign Agent). Τα πακέτα τα οποία προορίζονται για το κινητό τερματικό ταξιδεύουν σε αυτό το δίκτυο από τούνελ, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα ξεχωριστό δίκτυο δρομολόγησης πάνω από το IP δίκτυο. Η χρήση των τούνελ δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο και σε κάποιο IP δίκτυο, το οποίο χειρίζεται και μη κινητές υπηρεσίες.

Συνήθως, ένα επίπεδο ιεραρχίας θεωρείται εκεί όπου όλοι οι ξένοι φορείς συνδέονται με την πύλη. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν τούνελ τα οποία συνδέουν απευθείας την πύλη με τους ξένους φορείς, οι οποίοι βρίσκονται στα σημεία πρόσβασης. Παρουσιάζονται και επεκτάσεις του πρωτοκόλλου, οι οποίες αφορούν στην τηλεειδοποίηση (paging) και οι οποίες επιτρέπουν στους αδρανείς κινητούς κόμβους να λειτουργούν σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ παράλληλα μπορούν να εντοπιστούν ανά πάσα στιγμή σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή, την περιοχή τηλεειδοποίησης (paging area).

Η τοποθεσία των κινητών χρηστών είναι γνωστή στον αρχικό φορέα και αντιπροσωπεύεται από τις περιοχές τηλεειδοποίησης. Όταν ο αρχικός φορέας λάβει ένα πακέτο το οποίο προορίζεται για κάποιον κινητό χρήστη, ο οποίος βρίσκεται σε ένα ξένο δίκτυο, τότε ο αρχικός φορέας δημιουργεί ένα τούνελ προς τον συγκεκριμένο φορέα, μέσω του οποίου αποστέλλει το πακέτο. Ο ξένος φορέας με τη σειρά του τηλεειδοποιεί τον κινητό χρήστη ώστε να δημιουργήσει μία διαδρομή μέχρι την παρούσα τοποθεσία του. Το ισχύον σύστημα χρησιμοποιεί ειδικές χρονοθυρίδες για την επικοινωνία σε μία περιοχή τηλεειδοποίησης. Αυτό το σύστημα είναι παρεμφερές με τα κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς.



## 6 ΔΙΚΤΥΑ 60GHz

### 6.1 Δίκτυα Radio over Fiber (RoF)

#### 6.1.1 Τι είναι τα δίκτυα Radio over Fiber

Η τεχνολογία των ασύρματων οπτικών δικτύων (RoF) συνεπάγεται τη χρήση συνδέσεων οπτικών ινών για τη διανομή σημάτων RF από μία κεντρική τοποθεσία στις απομακρυσμένες κεραιές. Στα συστήματα στενής ζώνης επικοινωνίας και στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs), οι συναρτήσεις επεξεργασίας RF σήματος, όπως η διαμόρφωση φέροντος και η πολυπλεξία, λαμβάνουν χώρα στους σταθμούς βάσης και τροφοδοτούνται άμεσα στην κεραία. Η τεχνολογία των δικτύων RoF καθιστά δυνατή τη συγκέντρωση των λειτουργιών επεξεργασίας των RF σημάτων σε έναν κοινόχρηστο τόπο, και εν συνεχεία τη χρήση οπτικής ίνας, η οποία προσφέρει χαμηλή απώλεια σήματος (0.3 dB/km για μήκη κύματος 1550 nm και 0.5 dB/km για μήκη κύματος 1310 nm) για τη μεταφορά τους στις απομακρυσμένες κεραιές. Με τον τρόπο αυτό, οι απομακρυσμένες κεραιές απλοποιούνται σημαντικά, καθώς το μόνο που χρειάζεται είναι να εκτελούν τις λειτουργίες οπτοηλεκτρονικής μετατροπής και ενίσχυσης του σήματος. Η συγκέντρωση αυτή των λειτουργιών επεξεργασίας των σημάτων επιτρέπει την ανταλλαγή εξοπλισμού, τη δυναμική κατανομή των πόρων και την απλοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης του συστήματος.

#### 6.1.2 Οφέλη των RoF δικτύων

Παρακάτω, παρατίθενται μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη της τεχνολογίας RoF, σε σύγκριση με την ηλεκτρονική διανομή του σήματος.

##### 6.1.2.1 Χαμηλή απώλεια εξασθένησης

Η ηλεκτρική διανομή σημάτων υψηλής συχνότητας είτε στο κενό, είτε μέσω των γραμμών μεταφοράς, είναι δύσκολη και δαπανηρή. Στο κενό, οι απώλειες εξαιτίας απορρόφησης και αντανάκλασης αυξάνονται με την συχνότητα. Στις γραμμές μεταφοράς, η σύνθετη αντίσταση αυξάνεται επίσης με τη συχνότητα, οδηγώντας σε πολύ υψηλές απώλειες. Ως εκ τούτου, η ηλεκτρική διανομή σημάτων υψηλής συχνότητας σε μεγάλες αποστάσεις, απαιτεί ακριβό εξοπλισμό αναγέννησης του σήματος. Η λύση στο πρόβλημα αυτό, είναι να διανέμουμε σήματα σε χαμηλές και ενδιάμεσες συχνότητες από το κέντρο μεταγωγής προς τους σταθμούς βάσης. Τα σήματα αυτά μετατρέπονται στην απαιτούμενη συχνότητα στον εκάστοτε σταθμό βάσης και στη συνέχεια ενισχύονται και εκπέμπονται. Το σύστημα αυτό είναι το ίδιο που χρησιμοποιείται και στα κινητά συστήματα επικοινωνιών στενής ζώνης που αναφέραμε παραπάνω. Δεδομένου ότι θα απαιτούνταν υψηλή απόδοση της οπτικής επαφής για τη μετατροπή σε κάθε σταθμό βάσης, η ρύθμιση αυτή οδηγεί σε πολύπλοκους σταθμούς βάσης με αυστηρές απαιτήσεις επιδόσεων. Ωστόσο, από τη στιγμή που η οπτική ίνα προσφέρει πολύ χαμηλές απώλειες, η τεχνολογία RoF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει χαμηλή απώλεια κατά τη μετάδοση των σημάτων, αλλά και απλούστευση των σταθμών βάσης.



Οι μονότροπες ίνες που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, οι οποίες είναι φτιαγμένες από γυαλί, παρουσιάζουν απώλειες εξασθένησης χαμηλότερες των 0.2dB/km και 0.5dB/km στις περιοχές των 1550nm και 1300nm αντίστοιχα. Αυτά τα επίπεδα απωλειών είναι πολύ χαμηλότερα από αυτά που παρουσιάζονται στο κλασικό ομοαξονικό καλώδιο μέχρι και τρεις τάξεις μεγέθους. Ως εκ τούτου, εκπέμποντας μικροκύματα σε οπτική μορφή, οι αποστάσεις εκπομπής αυξάνονται πολύ, ενώ αντίστοιχα μειώνεται η απαιτούμενη ενέργεια για την εκπομπή.

#### 6.1.2.2 Μεγάλο εύρος ζώνης

Οι οπτικές ίνες προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης. Υπάρχουν τρία βασικά παράθυρα εκπομπής, τα οποία προσφέρουν χαμηλές απώλειες εξασθένησης. Συγκεκριμένα, τα 850nm, τα 1310nm και τα 1550nm. Για μία μονότροπη ίνα, το εύρος ζώνης που προσφέρεται από τον συνδυασμό των τριών αυτών παραθύρων υπερβαίνει τα 50THz. Ωστόσο, σήμερα τα εμπορικά συστήματα χρησιμοποιούν μόλις το 1.6THz από αυτά. Συνεχίζονται όμως οι προσπάθειες εκμετάλλευσης ακόμα περισσότερου εύρους ζώνης για κάθε οπτική ίνα.

Το τεράστιο εύρος ζώνης που προσφέρεται από τις οπτικές ίνες έχει και άλλα οφέλη εκτός από την υψηλή χωρητικότητα για τα εκπεμπόμενα σήματα. Το μεγάλο εύρος ζώνης επιτρέπει ταχύτερη επεξεργασία των σημάτων, κάτι το οποίο μπορεί να είναι πιο δύσκολο ή και αδύνατο σε ηλεκτρονικά συστήματα. Με άλλα λόγια, κάποιες από τις απαιτούμενες λειτουργίες μπορούν να υλοποιηθούν στον οπτικό τομέα. Επίσης, η επεξεργασία στον οπτικό τομέα μπορεί να καταστήσει δυνατή τη χρήση οικονομικότερων οπτικών στοιχείων, όπως διόδους λέιζερ και διαμορφωτές.

Η αξιοποίηση του τεράστιου φάσματος που προσφέρουν οι οπτικές ίνες εμποδίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον περιορισμό του εύρους ζώνης των ηλεκτρονικών συστημάτων, τα οποία είναι οι αρχικές πηγές αλλά και αποδέκτες των εκπεμπόμενων δεδομένων. Η λύση αυτού του προβλήματος έγκειται στην αποδοτική πολυπλεξία. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα ψηφιακά οπτικά συστήματα είναι πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Optical Time Division Multiplexing, OTDM) και με διαίρεση μήκους κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM).

#### 6.1.2.3 Ασυλία από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων

Η ικανότητα των δικτύων RoF να παραμένουν ανεπηρέαστα από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος των οπτικών επικοινωνιών. Αυτό ισχύει, διότι τα σήματα μεταδίδονται μέσα στην ίνα με τη μορφή φωτός. Εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού, τα οπτικά καλώδια προτιμώνται ακόμα και για μικρές συνδέσεις. Ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό όμως είναι και η ασυλία των δικτύων αυτών από υποκλοπές, κάτι το οποίο παρέχει τη μυστικότητα και την ασφάλεια που απαιτείται από τους χρήστες.

#### 6.1.2.4 Εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση





Στα δίκτυα RoF, τα πολύπλοκα και ακριβά μηχανήματα βρίσκονται στις κεντρικές περιοχές του δικτύου, καθιστώντας έτσι τις απομακρυσμένες κεραιές απλούστερες. Παραδείγματος χάριν, οι περισσότερες τεχνικές στα δίκτυα RoF εξαλείφουν την ανάγκη για έναν οπτικό ταλαντωτή και σχετικό εξοπλισμό στις απομακρυσμένες κεραιές. Σε αυτή την περίπτωση, η απομακρυσμένη κεραία αποτελείται από έναν φωτοανιχνευτή, έναν ενισχυτή ραδιοσυχνοτήτων και μία κεραία. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για διαμόρφωση και μεταγωγή βρίσκεται στις κεντρικές περιοχές και αξιοποιείται από πολλές απομακρυσμένες κεραιές ταυτόχρονα. Αυτή η διάταξη βοηθά τις απομακρυσμένες κεραιές να είναι μικρότερες και όχι τόσο επιβαρυνμένες, κάτι το οποίο συντελεί στην ευκολότερη εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος. Η εύκολη εγκατάσταση και το χαμηλό κόστος συντήρησης των απομακρυσμένων κεραιών είναι πολύ βασική απαίτηση των μικροκυματικών συστημάτων εξαιτίας του μεγάλου αριθμού κεραιών που απαιτούνται. Σε εφαρμογές όπου οι κεραιές δεν είναι εύκολα προσιτές, η μείωση των απαιτήσεων συντήρησης οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας. Επίσης, μικρότερες κεραιές οδηγούν σε μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

#### 6.1.2.5 Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας

Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας είναι συνέπεια των απλούστερων κεραιών που αναφέραμε παραπάνω, λόγω του μειωμένου εξοπλισμού που διαθέτουν. Όσο πιο απλός είναι ο εξοπλισμός από τον οποίο αποτελούνται, τόσο λιγότερη είναι η ενέργεια την οποία απαιτούν για να λειτουργήσουν.

#### 6.1.2.6 Δυναμική κατανομή πόρων

Από τη στιγμή που η μεταγωγή, η διαμόρφωση και οι υπόλοιπες λειτουργίες εκτελούνται στις κεντρικές περιοχές, δίνεται η δυνατότητα δυναμικής κατανομής των πόρων. Παραδείγματος χάριν, σε ένα δίκτυο RoF για κίνηση GSM, μπορεί να καταμεληθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα σε μία περιοχή (π.χ. σε ένα εμπορικό κέντρο) κατά τις ώρες αιχμής και εν συνεχεία να ανακαταμεληθεί σε άλλες περιοχές (π.χ. σε κατοικημένες περιοχές τις απογευματινές ώρες). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κατανέμοντας τα διαφορετικά μήκη κύματος ανάλογα με τις απαιτήσεις μέσω πολυπλεξίας WDM (Wavelength Division Multiplexing). Αυτή η δυναμική κατανομή των πόρων, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, προλαμβάνει την απαίτηση για μόνιμη κατανομή, κάτι το οποίο θα αποτελούσε μεγάλη σπατάλη πόρων σε περιπτώσεις όπου η κίνηση και οι απαιτήσεις ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό.

#### 6.1.2.7 Μελλοντική χρήση

Οι οπτικές ίνες είναι σχεδιασμένες ώστε να μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλές ταχύτητες, σε επίπεδο gigabit, πράγμα που σημαίνει ότι θα μπορούν να αντεπεξέλθουν σε ταχύτητες που θα προσφέρουν οι μελλοντικές γενιές των δικτύων στα χρόνια που θα ακολουθήσουν. Επίσης, η τεχνολογία RoF είναι ανεξάρτητη από πρωτόκολλα και ρυθμούς μετάδοσης, οπότε θα μπορεί να υιοθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί από οποιοδήποτε τρέχουσες ή μελλοντικές τεχνολογίες.



### 6.1.3 Περιορισμοί των δικτύων RoF

Δεδομένου ότι τα δίκτυα RoF περιλαμβάνουν αναλογική διαμόρφωση και ανίχνευση φωτός, είναι ουσιαστικά ένα αναλογικό σύστημα μετάδοσης. Συνεπώς, τα προβλήματα που υπάρχουν στα αναλογικά συστήματα επικοινωνιών, όπως ο θόρυβος και η παραμόρφωση, εμφανίζονται και στα συστήματα RoF. Αυτά τα χαρακτηριστικά τείνουν να περιορίζουν την εικόνα θορύβου και τη δυναμική περιοχή των συνδέσεων RoF. Η δυναμική περιοχή είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για τα κινητά (κυψελωτά) συστήματα επικοινωνιών, όπως τα δίκτυα GSM, εξαιτίας του μεγάλου εύρους της ισχύος που λαμβάνει ο σταθμός βάσης από τα διάφορα κινητά τερματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί, η ισχύς που θα λάβει ένας σταθμός βάσης από ένα κινητό τερματικό, το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά του, μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ που μπορεί να λάβει από ένα άλλο κινητό τερματικό, το οποίο βρίσκεται αρκετά χιλιόμετρα μακριά, πάντα όμως στα πλαίσια της ίδια κυψέλης.

Οι πηγές θορύβου στις αναλογικές οπτικές συνδέσεις περιλαμβάνουν την σχετική ένταση θορύβου των λείζερ, τον φασικό θόρυβο του λείζερ, τον θόρυβο βολής της φωτοδιόδου, τον θερμικό θόρυβο του ενισχυτή και την διασπορά της οπτικής ίνας. Στα δίκτυα RoF με μονότροπες ίνες, η χρωματική διασπορά μπορεί να περιορίσει το μήκος της οπτικής σύνδεσης και μπορεί να προκαλέσει αποσυσχέτιση, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο θόρυβο φέροντος. Στα δίκτυα με πολύτροπες ίνες η τροπική διασπορά περιορίζει σημαντικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την απόσταση.

## 6.2 Αλγόριθμοι μεταπομπής (hand-off)

Μεταπομπή (handover ή hand-off) καλείται ο μηχανισμός, που πραγματοποιεί αδιάλειπτα τη μεταφορά μιας ενεργής κλήσης από μια κυψέλη (cell) σε μια άλλη, καθώς ο χρήστης μετακινείται στην ευρύτερη περιοχή κάλυψης ενός ασύρματου κινητού συστήματος επικοινωνιών. Στο σημείο αυτό, έπειτα από μελέτη της τρέχουσας βιβλιογραφίας, παρουσιάζονται οι επικρατέστεροι αλγόριθμοι μεταπομπής που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα κινητά συστήματα τηλεπικοινωνιών των 60 GHz, με σκοπό να προκύψουν οι αντίστοιχοι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που θα μελετηθούν διεξοδικά, θα εξομοιωθούν και θα αποτιμηθεί η απόδοσή τους.

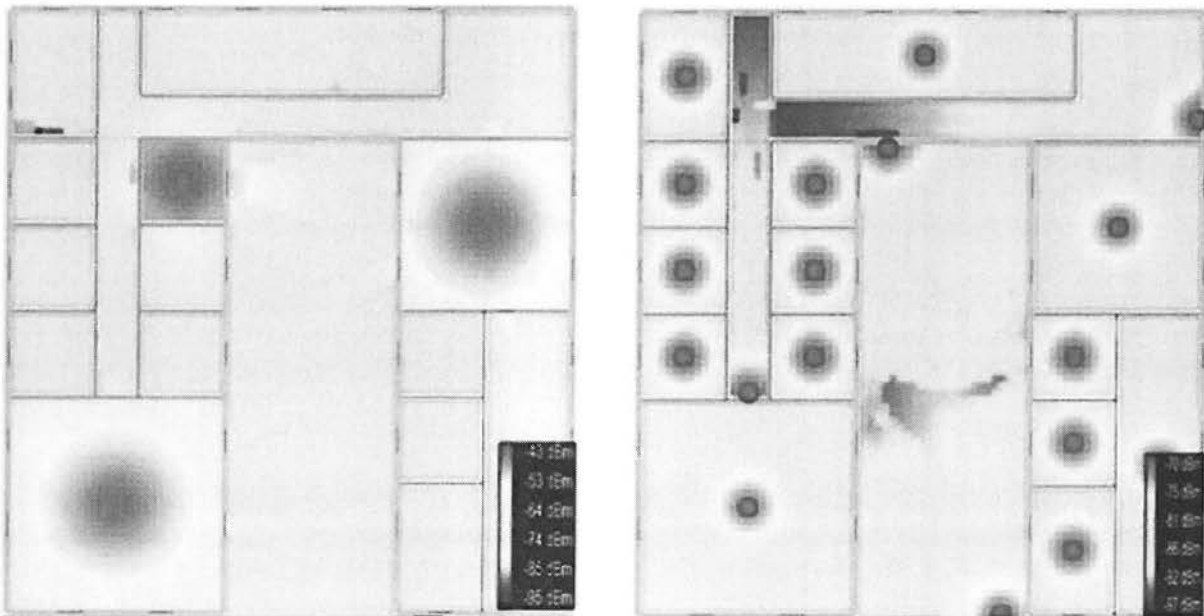
Στη βιβλιογραφία καταγράφεται ένας πολύ μεγάλος αριθμός αλγορίθμων μεταπομπής σε κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών (πχ. GSM, UMTS, WiMAX, LTE, κτλ.) και μία πρώτη σκέψη, θα ισχυριζόταν κανείς, θα μπορούσε να ήταν η πρόταση για δοκιμή των επικρατέστερων από αυτούς και η εφαρμογή τους στην αρχιτεκτονική του WiSePON.

Το πρώτο θέμα, όμως, που ανακύπτει είναι ότι στα προαναφερθέντα δίκτυα η έκταση των κυψελών είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες κυψέλες των δικτύων με συχνότητα εκπομπής τα 60 GHz. Ακόμα και οι μικρότερες κυψέλες κάλυψης που δημιουργούνται στην περίπτωση των ασύρματων τοπικών δικτύων (πχ. IEEE 802.11) είναι επίσης αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της περίπτωσης δικτύου με συχνότητα



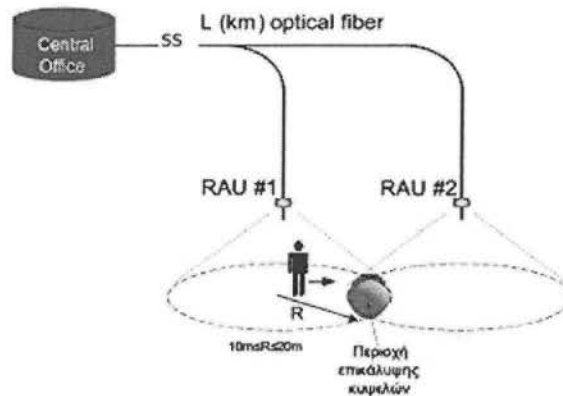
εκπομπής τα 60 GHz, τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον (indoor/outdoor environment).

Το τελευταίο γίνεται καλύτερα αντιληπτό και από την εικόνα 6-1, που παρουσιάζει την κάλυψη του ίδιου κτηρίου στα 2.4 GHz και στα 60 GHz, αριστερά και δεξιά στο σχήμα αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των 2.4 GHz απαιτούνται μόλις τρία Σημεία Πρόσβασης (Access Points, APs) και δημιουργούνται ισάριθμες κυψέλες, ενώ στην περίπτωση των 60GHz για την πλήρη κάλυψη απαιτούνται τουλάχιστον 18 Σημεία Πρόσβασης, τα οποία αποκαλούνται και Radio Access Units (RAUs), με ισάριθμες κυψέλες να δημιουργούνται, αντίστοιχα (ουσιαστικά απαιτείται τουλάχιστον ένα RAU ανά δωμάτιο).



Εικόνα 6-1: Κάλυψη του ίδιου κτηρίου στα 2.4 GHz (αριστερά) και στα 60 GHz (δεξιά)

Συνεπώς, στην περίπτωση των 60 GHz, ακόμα και μία μικρή κίνηση του τερματικού μπορεί να οδηγήσει σε εκκίνηση διαδικασίας μεταπομπής, με αποτέλεσμα την αυξημένη πιθανότητα για μεγάλο αριθμό μεταπομπών κατά τη διάρκεια μίας κλήσης, αφού η ακτίνα κάλυψης μιας κυψέλης στα 60GHz κυμαίνεται μεταξύ των 10 μέτρων (σε εσωτερικούς χώρους) και 20 μέτρων (για εξωτερικούς χώρους), αντίστοιχα (εικόνα 6-2).



Εικόνα 6-2: Περιοχή επικάλυψης γειτονικών κυψελών σε εξωτερικό περιβάλλον

Βάσει των παραπάνω, ανακύπτει κι ένα δεύτερο θέμα, αυτό της πολύ μικρής έκτασης των περιοχών επικάλυψης (overlapping area) μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Με δεδομένο ότι οι κυψέλες των συστημάτων GSM, UMTS, WiMAX, LTE, κτλ. είναι πολύ μεγαλύτερες σε έκταση από τις αντίστοιχες των συστημάτων στα 60 GHz, το αποτέλεσμα είναι οι αντίστοιχες περιοχές επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών να είναι κι αυτές πολύ μεγαλύτερες αντίστοιχα. Το ίδιο ισχύει και για την περιοχή επικάλυψης των μικρότερων κυψελών των WLAN στα 2.4 GHz. Συνεπώς, για έναν κινούμενο χρήστη, όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών, τόσο περισσότερο αυξάνεται και ο χρόνος κατά τον οποίο ο χρήστης κινείται μέσα σ' αυτή, οπότε αυξάνεται και η πιθανότητα επιτυχούς διεκπεραίωσης της μεταπομπής.

Στην περίπτωση των δικτύων των 60 GHz η αντίστοιχη περιοχή επικάλυψης είναι πολύ μικρότερη, ιδιαίτερα στους εσωτερικούς χώρους, στους οποίους περιοχές επικάλυψης συναντώνται συνήθως σε «ανοίγματα» του τοίχου όπως πχ. πόρτες, παράθυρα κτλ. Κατά συνέπεια, κατά την είσοδο/έξοδο από μία πόρτα σε κάποιο κτήριο, που ο χρήστης μπορεί να στρίψει απότομα (πχ. να στρίψει προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά). Σε τέτοιες περιπτώσεις η περιοχή επικάλυψης μπορεί να είναι πάρα πολύ μικρή ώστε να δώσει τον απαιτούμενο χρόνο στο κινητό τερματικό ώστε να επιτευχθεί επιτυχημένα η μεταπομπή, αν δεν έχει προσδιοριστεί έγκαιρα η ανάγκη για μεταγωγή, φαινόμενο γνωστό και ως corner effect.

Για να έχουμε και μία ένδειξη του απαιτούμενου χρόνου για μία επιτυχημένη μεταπομπή σε εσωτερικό χώρο, μπορούμε να θεωρήσουμε με ασφάλεια ότι ο χρήστης κινείται με ταχύτητα 2m/sec, οπότε απαιτούνται 5 sec για να διανύσει μία κυψέλη (αν θεωρήσουμε ως κυψέλη ένα δωμάτιο 10 x 10 m). Αν ο χρήστης κινείται συνεχώς στο κτήριο, το αποτέλεσμα είναι να γίνεται κάθε 5 sec μεταπομπή από κυψέλη σε κυψέλη. Βάσει των παραπάνω και θεωρώντας επίσης ότι η περιοχή επικάλυψης λόγω ύπαρξης μίας πόρτας είναι μόνο 1 m<sup>2</sup>, ο μέγιστος χρόνος για να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η μεταπομπή, δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0.5 sec.

Ένα τρίτο πρόβλημα είναι η εξασθένηση διάδοσης των 60 GHz από τα περιβάλλοντα



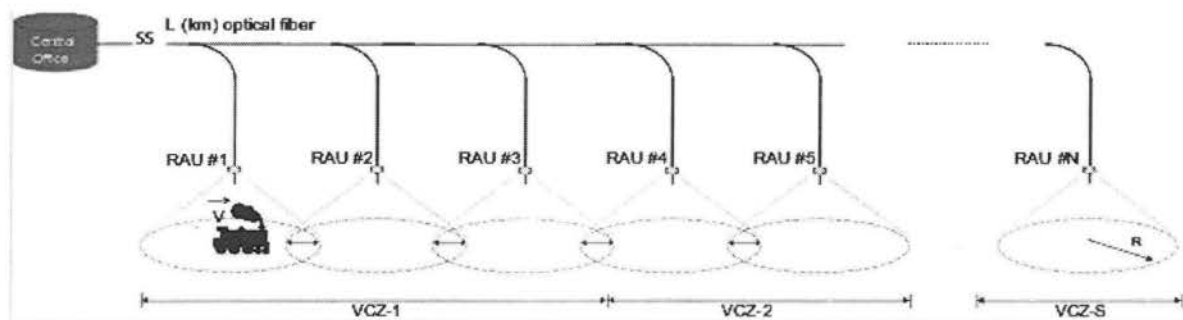
εμπόδια στον χώρο, ξανά κυρίως σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, η ύπαρξη επίπλων (που συνήθως υπάρχουν στο εσωτερικό των κτηρίων) μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα σκίασης (shadowing) ενώ ακόμα και η ύπαρξη ατόμων μπορούν να ανακόψουν τη διάδοση του σήματος μέχρι και 20dB αν παρεμβάλλονται στη απευθείας και με οπτική επαφή σύνδεση. Κατά συνέπεια, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio, SIR) μπορεί να πέσει από τα 20dB στα 0dB και μέσα σε λίγα μόνο εκατοστά του μέτρου να ξανανέβει στα 15dB, με αποτέλεσμα η χρήση του SIR να οδηγεί πολύ συχνά σε άσκοπες μεταπομπές, ιδιαίτερα στην περίπτωση που υπάρχουν αρκετοί άνθρωποι μέσα σε ένα δωμάτιο. Μπορούμε, λοιπόν, να συμπεράνουμε ότι το βασικό κριτήριο σκανδαλισμού (SIR) που χρησιμοποιείται επιτυχώς σε αλγορίθμους μεταπομπής δικτύων όπως GSM, UMTS, WiMAX, LTE, κτλ. δεν μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια στην περίπτωση των 60 GHz (ιδιαίτερα για εσωτερικούς χώρους).

Τέλος, δεδομένου ότι στο WiSePON έχουμε την ύπαρξη RoF δικτύου, δεν πρέπει να αγνοηθεί η προστιθέμενη καθυστέρηση διάδοσης που υπεισέρχεται κατά τη μετάδοση στο οπτικό κομμάτι του συστήματος. Αν και έχει παρατηρηθεί ότι για μήκη οπτικής ίνας (L) ακόμα και πάνω από 25 km επιτυγχάνεται καλής ποιότητας μετάδοση σήματος (τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη), η καθυστέρηση διάδοσης σε αυτή την περίπτωση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στον ανοιχτό χώρο και δεν μπορεί, σε καμία περίπτωση, να αγνοηθεί.

Βάσει των ανωτέρω, στη συνέχεια παρατίθενται οι επικρατέστεροι από τους υπάρχοντες αλγορίθμους μεταπομπής που χρησιμοποιούνται σε RoF δίκτυα των 60GHz.

### 6.2.1 Αλγόριθμος Ιδεατής Ζώνης Κυψελών (Virtual Cell Zone, VCZ)

Θεωρώντας ότι το RoF δίκτυο στα 60 GHz αποτελείται από N το πλήθος RAUs (κάθε RAU καλύπτει μία κυψέλη), στον συγκεκριμένο αλγόριθμο έχει προηγηθεί η ομαδοποίηση των υπάρχοντων N RAUs σε S ομάδες που αποκαλούνται ζώνες εικονικών κυψελών (Virtual Cell Zones, VCZs) όπου  $1 \leq S \leq N$  και η κάθε VCZ αποτελείται από γειτονικά RAUs.

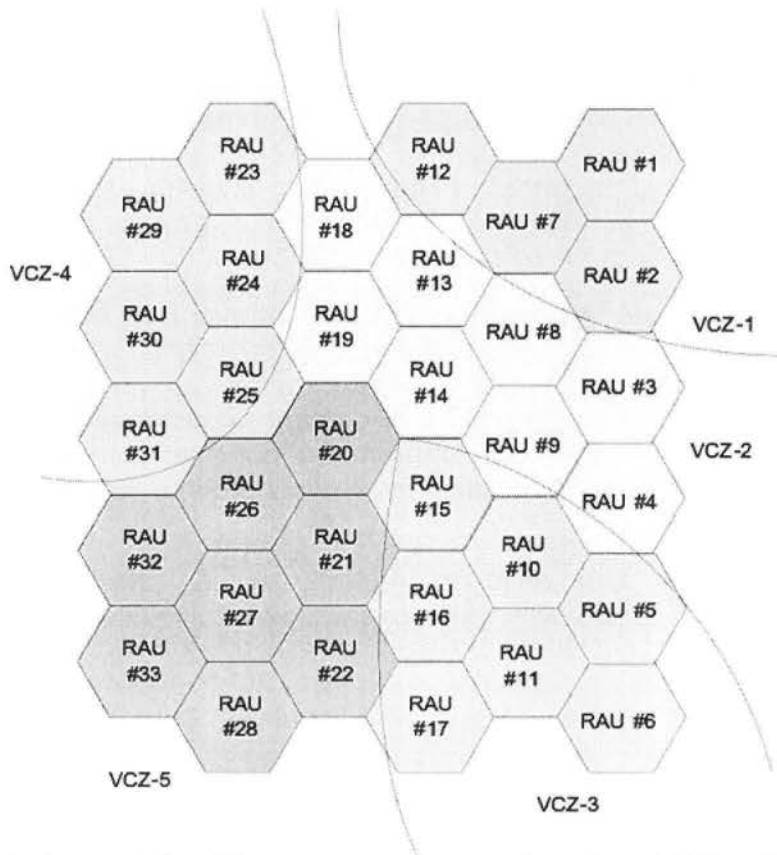


Εικόνα 6-3: Ο αλγόριθμος Virtual Cell Zone (VCZ)

Η εικόνα 6-3 παρουσιάζει την παραπάνω λογική θεωρώντας ότι τα RAUs καλύπτουν μέρος οδικού ή σιδηροδρομικού δικτύου, όμως - χωρίς βλάβη της γενικότητας - ο



αλγόριθμος που θα περιγραφεί μπορεί να εφαρμοστεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και για κάλυψη οποιασδήποτε χωροταξικής κατανομής των RAUs, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-4, στο οποίο 33 συνολικά RAUs έχουν ομαδοποιηθεί σε 5 VCZs αντίστοιχα (VCZ-1, VCZ-2, ... , VCZ-5).



Εικόνα 6-4: Παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου VCZ σε δύο διαστάσεις

Όσον αφορά την ασύρματη πρόσβαση, το σύστημα που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο VCZ χρησιμοποιεί παράλληλα και πολυπλεξία TDMA, κατά την οποία ορίζεται ένα σταθερού μεγέθους υπερ-πλαίσιο (super-frame) για κάθε VCZ. Κάθε super-frame αποτελείται από έναν αριθμό από frames ίσο με τον αριθμό των RAUs του συγκεκριμένου VCZ, ενώ κάθε frame αποτελείται από M το πλήθος χρονοθυρίδες, το οποίο μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με το φορτίο που εξυπηρετείται. Ως χρονοθυρίδα θεωρείται ο χρόνος που αντιστοιχεί για τη μετάδοση του ελάχιστου μεγέθους πακέτου δεδομένων στο δίκτυο. Στον αλγόριθμο VCZ, τα RAUs του κάθε VCZ χρησιμοποιούν το ίδιο συχνοτικό κανάλι (RF channel), ενώ τα γειτονικά μεταξύ τους VCZ δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούν το ίδιο συχνοτικό κανάλι, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ομοδιαυλικής παρεμβολής (co-channel interference). Κατά συνέπεια, σε ένα RoF δίκτυο που εφαρμόζεται ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, ο χρήστης που κινείται μέσα στο ίδιο VCZ δεν αλλάζει συχνοτικό κανάλι, αφού χρησιμοποιεί συνεχώς το ίδιο σε όλα τα RAUs του εν λόγω VCZ.



Δηλαδή, όταν ο χρήστης κινείται μεταξύ των RAUs του ίδιου VCZ, το μόνο που αλλάζει είναι το frame μέσα στο super-frame. Αλλαγή σε συχνοτικό κανάλι πραγματοποιείται μόνο όταν ο χρήστης κινείται από ένα VCZ προς κάποιο άλλο.

Σημειώνεται ότι δεν τίθεται θέμα ομοδιαυλικής παρεμβολής μεταξύ των RAUs του ίδιου VCZ, παρόλο που χρησιμοποιούν όλα το ίδιο συχνοτικό κανάλι, διότι το κάθε RAU είναι ενεργό μόνο κατά τη διάρκεια μετάδοσης του αντίστοιχου frame. Ορισμένα, βέβαια, μειονεκτήματα που ανακύπτουν από τον αλγόριθμο μεταπομπής VCZ αφορούν τα διπλά frames (duplicated frames) που λαμβάνονται από τον κινητό χρήστη όταν βρίσκεται στις περιοχές επικάλυψης μεταξύ δύο γειτονικών RAUs του ίδιου VCZ, στο ιδιαίτερα αυξημένο επιπλέον κόστος (overhead) στα πακέτα μετάδοσης για την υλοποίηση της λογικής του αλγορίθμου, στην ανάγκη για εκ των προτέρων διαμοιρασμό του φάσματος ανάλογα με το σχεδιασμό του δικτύου σε VCZ, αλλά και στην κατασπατάληση των πόρων (συγκεκριμένα, των frames σε ένα super-frame) ακόμα κι αν κάποιο RAU δεν εξυπηρετεί κάποιον χρήστη.

### 6.2.2 Αλγόριθμος Εκτεταμένης Κυψέλης (Extended Cell, EC)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί για περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου (indoor environments), με απώτερο σκοπό κατά πρώτο λόγο τη δημιουργία μεγαλύτερων και – κατ' επέκταση – αποδοτικότερων περιοχών επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Βάσει του αλγορίθμου, πολλαπλές γειτονικές κυψέλες, ομαδοποιούνται στη λεγόμενη Εκτεταμένη Κυψέλη (Extended Cell, EC) επιτρέποντας στα αντίστοιχα RAUs των κυψελών που απαρτίζουν την Εκτεταμένη Κυψέλη να μεταδίδουν την ίδια πληροφορία στο ίδιο συχνοτικό κανάλι. Κατά τη σχεδίαση για την εφαρμογή του αλγορίθμου EC, προσπαθούμε κάθε EC να περιέχει κυψέλες γειτονικών δωματίων, αλλά και κομμάτι της σχετικής «περιοχής μετάβασης» (transitional area), όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-5.

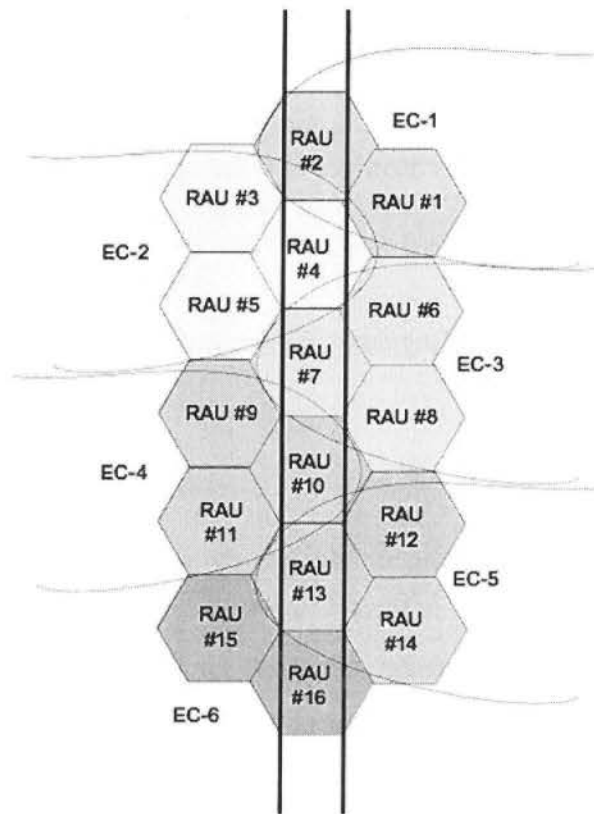
Η ιδέα για εφαρμογή του αλγορίθμου EC ενισχύεται σημαντικά από τις εξής παρατηρήσεις:

- i. Σε εσωτερικούς χώρους, ο κινητός χρήστης για να μεταβεί από ένα δωμάτιο σε κάποιο άλλο, πρέπει συνήθως να διέλθει από κάποια σχετική «περιοχή μετάβασης» (πχ. κάποιος διάδρομος, προθάλαμος, κτλ.),
- ii. Η ελαστικότητα του οπτικού μέρους του δικτύου στα RoF δίκτυα, επιτρέπει τη δυναμική κατανομή συχνοτικών καναλιών στα αντίστοιχα RAUs,
- iii. Η αφθονία του διαθέσιμου φάσματος στην περιοχή των 60GHz, επιτρέπει τη χρήση ευρυζωνικών συχνοτικών καναλιών (πχ. εύρος ζώνης συχνοτικού καναλιού της τάξης μεγέθους των 100MHz) για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού κινητών χρηστών.

Εφαρμόζοντας τη λογική του EC, είναι δυνατή η εξάλειψη ή – έστω – ο σημαντικός περιορισμός των corner effect φαινομένων, δεδομένου ότι ο χρήστης, όταν εξέρχεται ή εισέρχεται από/σε ένα δωμάτιο και στρίβει απότομα, συνήθως θα παραμένει στο ίδιο EC συνδεδεμένος και δεν θα χρειαστεί να γίνει μεταπομπή. Με άλλα λόγια, μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των απαιτούμενων αλλά και των ανεπιτυχών μεταπομπών,



δεδομένου ότι πλέον οι περιοχές επικάλυψης μεταξύ γειτονικών κυψελών ισοδυναμούν με τις περιοχές επικάλυψης των γειτονικών ECs, άρα είναι πολύ μεγαλύτερες σε έκταση και πλησιάζουν τις αντίστοιχες περιοχές επικάλυψης κυψελών εξωτερικού περιβάλλοντος. Επίσης, με χρήση OFDM πολυπλεξίας λύνονται και τα αντίστοιχα προβλήματα σκίασης και πολυδιόδευσης.



Εικόνα 6-5: Ο αλγόριθμος Εκτεταμένης Κυψέλης (EC)

Στα μειονεκτήματα του αλγορίθμου EC είναι ότι θα πρέπει ο εσωτερικός χώρος στον οποίο θα εφαρμοστεί να ενδείκνυται για τη δημιουργία καταλλήλων EC (πχ. να μην υπάρχει «τυφλό δωμάτιο» και όλα τα ECs να περιέχουν και κάποιο RAU στην «περιοχή μετάβασης», δηλ σε κάποιον διάδρομο), το επιπλέον κόστος (overhead) που προκύπτει στο Central Office, δεδομένου ότι θα πρέπει να διατηρεί έναν πίνακα που θα παρέχει την αντιστοίχιση των RAUs με τα ECs, να ανανεώνει και να κατανέμει δυναμικά τα μήκη κύματος και τα συχνοτικά κανάλια σε κάθε RAU βάσει κριτηρίων (πχ. φορτίο ανά κυψέλη, κινητικότητα χρηστών κτλ), κ.α.

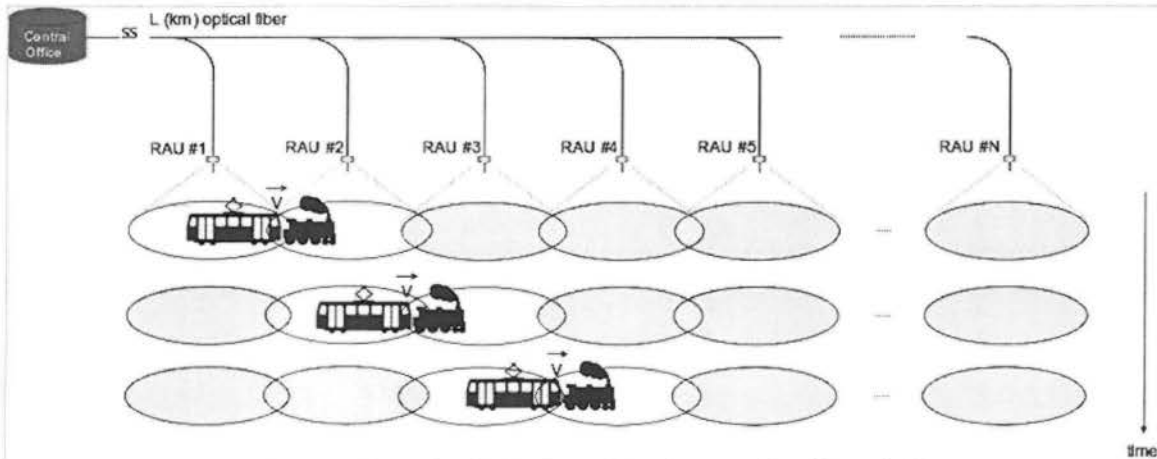




### 6.2.3 Αλγόριθμος Κινούμενης Κυψέλης (Moving Cell, MC)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αφορά κατ' αρχάς περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου (outdoor environments). Επιπλέον, αφορά κινητούς χρήστες των οποίων η διανυσματική της ταχύτητα, δηλαδή και το μέτρο της και η διεύθυνσή της, μπορούν με εύκολο τρόπο να υπολογιστούν ή – ακόμα καλύτερα – να είναι γνωστές εκ των προτέρων. Για τους παραπάνω λόγους, ο αλγόριθμος Κινούμενης Κυψέλης (Moving Cell, MC) βρίσκει κατά κύριο λόγο εφαρμογή σε δίκτυα επικοινωνιών σταθερής τροχιάς (πχ. συρμός αμαξοστοιχίας, αυτοκινητόδρομος, κτλ.).

Η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου είναι η εξής: αντί του κλασικού προτύπου, κατά το οποίο η αμαξοστοιχία κινείται κατά μήκος μίας σταθερής σειράς κυψελών, που καλύπτει όλο το μήκος ή τμήμα της συνολικής σιδηροδρομικής γραμμής, θεωρούμε ότι δημιουργείται μία συστοιχία από κυψέλες, η οποία κινείται παράλληλα και με την ίδια ταχύτητα με την αμαξοστοιχία, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης επικοινωνία των χρηστών της αμαξοστοιχίας με χρήση των ίδιων συχνοτικών καναλιών, χωρίς να απαιτείται – πλην ελαχίστων εξαιρέσεων – μεταπομπή. Η ιδέα του συγκεκριμένου αλγορίθμου δεν είναι καινούρια, αλλά στηρίζεται στην ιδέα του Gavrilovich, η οποία βέβαια ήταν αρκετά φουτουριστική και δεν έχει εφαρμοστεί, διότι πρότεινε φυσική κίνηση των RAU των κυψελών παράλληλα με την αμαξοστοιχία. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-6, η ίδια αρχή μπορεί να επιτευχθεί με «κίνηση» των συγκεκριμένων συχνοτικών καναλιών από RAU σε RAU με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας, γεγονός που επιτυγχάνεται με αναπροσαρμογή (reconfiguration) του οπτικού δικτύου που αποτελεί την είσοδο του Central Office και συγχρονίζοντας τις απαιτούμενες αναπροσαρμογές με την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας.



Εικόνα 6-6: Ο αλγόριθμος Κινούμενης Κυψέλης (MC)

Είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος αυτός είναι εφαρμόσιμος στην περίπτωση κινούμενης αμαξοστοιχίας, μέσα στην οποία συνυπάρχουν πολλοί χρήστες, όμως όλοι κινούνται με την ίδια ταχύτητα και προς την ίδια κατεύθυνση (αυτή της αμαξοστοιχίας). Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι χρήστες παραμένουν συνδεδεμένοι στο ίδιο φυσικό κανάλι επικοινωνίας καθ' όλη τη διάρκεια, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται



εγκατάσταση συνδέσεων χαμηλότερου επιπέδου μεταξύ των RAUs και των χρηστών που κινούνται μέσα στην αμαξοστοιχία. Ο χρόνος που εξοικονομείται είναι πολύτιμος, ιδίως αν αναλογιστούμε ότι η πιθανότητα αποτυχίας μίας κλασικής μεταπομπής, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον χρόνο αυτό.

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου MC, η μόνη ενέργεια που απαιτείται, είναι ότι – πχ. για την κάτω ζεύξη – τα δεδομένα που πρέπει να μεταδοθούν από το Central Office προς τον χρήστη θα μεταδίδονται, με την έλευση ενός χρονικού διαστήματος που συνδέεται αποκλειστικά με την ταχύτητα κίνησης της αμαξοστοιχίας, από το επόμενο RAU, μετά την έλευση του ίδιου χρονικού διαστήματος (αν θεωρήσουμε ότι η αμαξοστοιχία κινείται με σταθερή ταχύτητα) από το μεθεπόμενο RAU, κ.ο.κ. όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-6. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της άνω ζεύξης κατά την αντίθετη, βέβαια, κατεύθυνση μετάδοσης δεδομένων. Σημαντικό πλεονέκτημα, επίσης, είναι ότι ο αλγόριθμος MC μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με χρήση ενός απλού οπτικού μεταγωγέα.

### 6.3 Αλγόριθμος μεταπομπής Κινούμενης Εκτεταμένης Κυψέλης (Moving Extended Cell, MEC)

Ο αλγόριθμος μεταπομπής της Κινούμενης Εκτεταμένης Κυψέλης (Moving Extended Cell, MEC), αποτελεί τον συνδυασμό των προαναφερθέντων αλγορίθμων Εκτεταμένης Κυψέλης (Extended Cell, EC) και Κινούμενης Κυψέλης (Moving Cell, MC), με σκοπό την αποδοτικότερη μεταπομπή σε περιβάλλοντα είτε εσωτερικού είτε εξωτερικού χώρου (indoor and outdoor environments).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-7-α, θεωρούμε κατ'αρχάς ότι κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από ένα RAU, ενώ από τη στιγμή που ο χρήστης θα συνδεθεί (έστω ότι βρίσκεται στην κυψέλη που καλύπτεται από το RAU#14) – εφαρμόζοντας τη λογική του αλγορίθμου EC – δημιουργείται η Εκτεταμένη Κυψέλη που περιλαμβάνει και τις έξι γειτονικές κυψέλες της τρέχουσας (δηλαδή τις κυψέλες που εξυπηρετούνται από τα RAU#8, RAU#9, RAU#13, RAU#15, RAU#19 και RAU#20 στις εικόνες 6-7-α και 6-7-β). Βάσει της λογικής του αλγορίθμου EC και τα επτά RAUs των κυψελών που απαρτίζουν την Εκτεταμένη Κυψέλη μεταδίδουν τα ίδια δεδομένα που αφορούν τον χρήστη πάνω από το ίδιο συχνοτικό κανάλι.

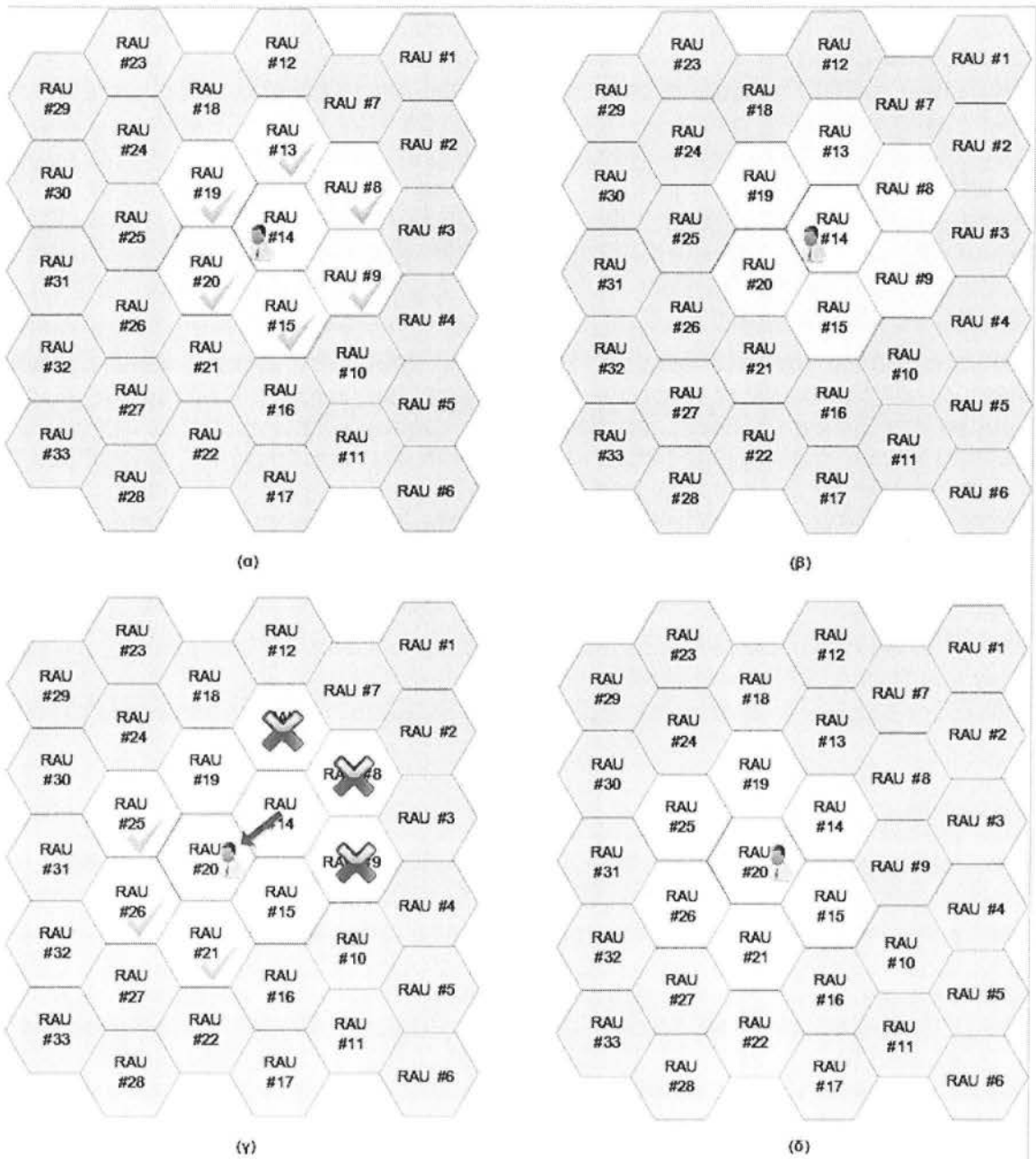
Συνεπώς, αν θεωρήσουμε ότι ο χρήστης κινείται και εισέρχεται στην κυψέλη του RAU#20, το αποτέλεσμα θα είναι να συνεχίσει να λαμβάνει (ή να αποστέλλει) αδιάλειπτα τα αντίστοιχα δεδομένα. Στο σημείο αυτό γίνεται η χρήση της λογικής του αλγορίθμου MC, οπότε, με τη λήψη του beacon σήματος από τη νέα κυψέλη (RAU#20), ξεκινά η αναπροσαρμογή της Εκτεταμένης Κυψέλης με «κέντρο», πλέον, την τρέχουσα κυψέλη στην οποία βρίσκεται ο χρήστης, δηλαδή, τη RAU#20 από την οποία έλαβε το τελευταίο beacon σήμα. Κατά συνέπεια, αποδεσμεύονται τα χρησιμοποιούμενα κανάλια στα RAU#8, RAU#9 και RAU#13 ενώ δεσμεύονται τα αντίστοιχα κανάλια στα RAU#21, RAU#25 και RAU#26 (εικόνα 6-7-γ), με αποτέλεσμα η νέα Εκτεταμένη Κυψέλη να απαρτίζεται από τα RAU#14, RAU#15, RAU#19, RAU#20, RAU#21, RAU#25 και RAU#26 (εικόνα 6-7-δ).

Τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου MEC προέρχονται από τον συνδυασμό των



εγγενών πλεονεκτημάτων των επί μέρους αλγορίθμων EC και MC. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος MEC μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου (όπως ο EC) δίνοντας το επιπλέον πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ευελιξίας στην κινητικότητα του χρήστη, ακόμα και στην περίπτωση που δύο γειτονικές κυψέλες που ανήκουν σε διαφορετικά, αλλά γειτονικά, ECs επηρεάζονται από corner effects και είναι πολύ μικρής ακτίνας. Κι αυτό γιατί, αν θεωρήσουμε ότι ο χρήστης κινείται με την ίδια ταχύτητα, ο διαθέσιμος χρόνος για την επίτευξη της μεταπομπής με χρήση του αλγορίθμου MEC διπλασιάζεται έναντι του αντίστοιχου που απαιτούνταν με χρήση του EC, δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να διανύσει τη διπλάσια απόσταση, μέχρι να σχηματιστεί η νέα Κινούμενη Εκτεταμένη Κυψέλη.

Επίσης, βάσει του ανωτέρω, ο αλγόριθμος MEC δεν απαιτεί κανενός είδους σχεδιασμό των Εκτεταμένων Κυψελών εκ των προτέρων, αφού οι Εκτεταμένες Κυψέλες δημιουργούνται δυναμικά, βάσει της κίνησης του χρήστη. Όσον αφορά τα περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου, ο αλγόριθμος MEC κληρονομεί τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου MC, άρα είναι κατάλληλος για εφαρμογή σε RoF δίκτυα που εξυπηρετούν κινητούς χρήστες σε σταθερή τροχιά (πχ. αμαξοστοιχία), προσδίδοντας επιπλέον το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται συνεχής ανατροφοδότηση του Central Office με την ταχύτητα του μεταφορικού μέσου δεδομένου ότι η νέα Κινητή Κυψέλη δημιουργείται δυναμικά, βάσει του λαμβανόμενου beacon σήματος. Αποτέλεσμα του ανωτέρω είναι ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου MEC, ο οποίος είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε δίκτυα κινητών χρηστών ακόμη και μη σταθερής τροχιάς.



Εικόνα 6-7: Ο αλγόριθμος Κινούμενης Εκτεταμένης Κυψέλης (MEC)

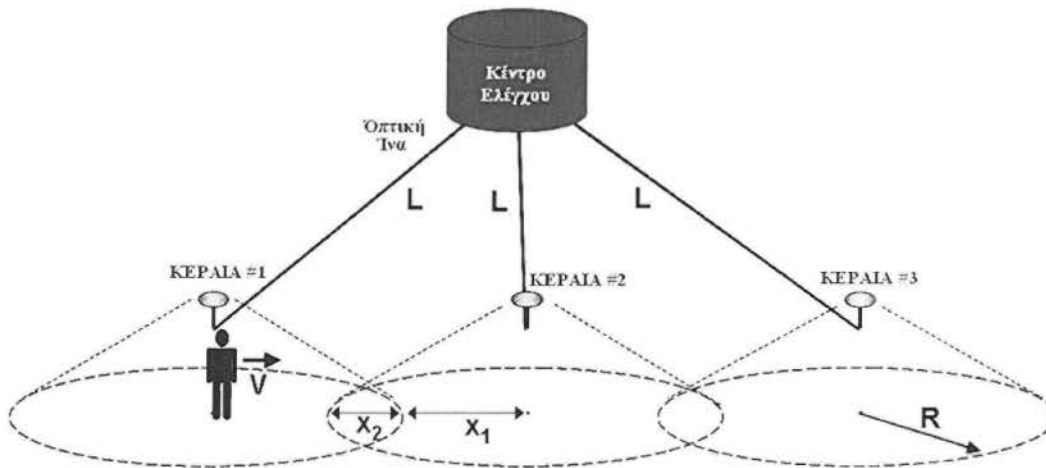
### 6.3.1 Μαθηματικό μοντέλο

Για να δώσουμε τη μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης, θα εισάγουμε μία πιο απλή τοπολογία δικτύου, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-8, όπου ο χρήστης κινείται μονοδιάστατα σε μία ευθεία γραμμή. Όπως βλέπουμε στο σχήμα, υπάρχουν τρεις κεραίες τοποθετημένες στη σειρά, με τις αντίστοιχες κυψέλες τους, ενώ ο



χρήστης κινείται με σταθερή ταχύτητα  $V$  στην ευθεία γραμμή που σχηματίζουν τα κέντρα των κυψελών. Η κάθε κεραία έχει ακτίνα κάλυψης  $R$ , ενώ η περιοχή επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών ισούται με  $x_2$ . Κατά συνέπεια, η απόσταση μεταξύ των ορίων της μίας κυψέλης και του κέντρου της επόμενης ισούται με  $R - x_2$  και θα την ονομάσουμε  $x_1$ .

Οι κεραίες ενώνονται με το Κέντρο Ελέγχου μέσω οπτικής ίνας, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει το ίδιο μήκος και για τις τρεις κεραίες και ισούται με  $L$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα. Η απόσταση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα των κυψελών, δεδομένου ότι η ακτίνα της κάθε κυψέλης είναι μόλις μερικές δεκάδες μέτρα, ενώ η απόσταση των κεραιών από το Κέντρο Ελέγχου είναι της τάξης των χιλιομέτρων. Τα αναγνωριστικά σήματα αποστέλλονται από τις κεραίες ανά χρονικά διαστήματα που ισούνται με  $T_b$  και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι συγχρονισμένα, εξαιτίας των κοινών διαδικασιών διαχείρισης που πραγματοποιούνται από το Κέντρο Ελέγχου προς τις κεραίες. Να σημειώσουμε, επίσης, ότι ο ρυθμός μετάδοσης και το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων αναφέρονται ως  $B$  και  $S$  αντίστοιχα.



Εικόνα 6-8: Η τοπολογία του δικτύου, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιδόσεων του αλγορίθμου Moving Extended Cell

Στην τοπολογία που απεικονίζεται στην εικόνα 6-8, ο χρήστης βρίσκεται αρχικά στο κέντρο της κυψέλης #1, το οποίο σημαίνει ότι η Εκτεταμένη Κυψέλη αποτελείται από την κυψέλη #1 και την κυψέλη #2. Αν υποθέσουμε ότι οι κεραίες αρχίζουν να αποστέλλουν αναγνωριστικά μηνύματα την χρονική στιγμή  $t = 0$  και ότι ο χρήστης μπαίνει στην περιοχή επικάλυψης μεταξύ των κυψελών #1 και #2 την χρονική στιγμή  $t_1$ , τότε η κεραία #2 θα ξεκινήσει να στέλνει αναγνωριστικά μηνύματα τη χρονική στιγμή  $t_h$ , η οποία δίδεται από τη σχέση:

$$t_h = \left\lceil \frac{t_1}{T_b} + 1 \right\rceil \cdot T_b \quad (1)$$

όπου οι αγκύλες υποδεικνύουν στρογγυλοποίηση στον αμέσως μικρότερο ακέραιο αριθμό.



Στην περίπτωση που το κινητό τερματικό βρίσκεται ακόμα στην κυψέλη #2 τη χρονική στιγμή  $t_h$ , θα λάβει το αναγνωριστικό μήνυμα και θα απαντήσει με ένα μήνυμα ACK στη κεραία #2, ανακοινώνοντας την ύπαρξή του και ξεκινώντας τη διαδικασία της αναδιαμόρφωσης της Εκτεταμένης Κυψέλης, με σκοπό να ενεργοποιηθεί η επόμενη κυψέλη (στην προκειμένη περίπτωση η κυψέλη #3). Σε αυτή την περίπτωση η νέα Εκτεταμένη Κυψέλη θα αποτελείται από τις κυψέλες #2 και #3, ώστε να αποφευχθεί ο τερματισμός της κλήσης όταν το κινητό τερματικό περάσει στην κυψέλη #3. Η κλήση θα τερματιστεί μόνο εάν ο χρήστης έχει διασχίσει την κυψέλη #2 πριν τη χρονική στιγμή  $t_h$ , πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να διασχίσει συνολική απόσταση ίση με  $2R$  σε χρονικό διάστημα ίσο με  $t_h - t_1$ . Αυτό θα συμβεί μόνο εάν η ταχύτητα του χρήστη ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$V > \frac{2R}{t_k - t_1} \quad (2)$$

Όσο η ταχύτητα του χρήστη διατηρεί τιμή μικρότερη από την παραπάνω, τότε η σύνδεση θα παραμένει ενεργή.

Κατά τη διάρκεια της μετάβασης του χρήστη από την κυψέλη #1 στην κυψέλη #2, δεν θα έχουμε καμία απώλεια πακέτων, δεδομένου ότι και οι δύο κεραίες αποτελούν κομμάτι της αρχικής Εκτεταμένης Κυψέλης και μεταδίδουν εξαρχής τα ίδια δεδομένα. Το κινητό τερματικό θα παρουσιάσει απώλεια πακέτων μόνο στην περίπτωση που φύγει από την κυψέλη #2 πριν την ολοκλήρωση της αναδιαμόρφωσης της Εκτεταμένης Κυψέλης, δηλαδή, πριν ξεκινήσει η κεραία #3 να αποστέλλει τα δεδομένα του συγκεκριμένου χρήστη.

Αν θεωρήσουμε ως  $\Delta t_{\#2}$  το χρόνο που χρειάζεται ο χρήστης για να διασχίσει ολόκληρη την κυψέλη #2, από τη στιγμή που θα λάβει το αναγνωριστικό σήμα από την κεραία #2, τότε αυτό θα ισούται με:

$$\Delta t_{\#2} = \frac{(2R + x_1) - V \cdot t_k}{V} \quad (3)$$

Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η σύγκριση της παραπάνω τιμής με τον ολικό χρόνο που απαιτείται ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία της αναδιαμόρφωσης της Εκτεταμένης Κυψέλης, ώστε να δούμε εάν αυτή η διαδικασία θα έχει ολοκληρωθεί πριν ο χρήστης προλάβει να μεταβεί στην κυψέλη #3. Αν ονομάσουμε τον χρόνο αυτό  $T_{total}$ , τότε αυτός θα δίνεται από τη σχέση:

$$T_{total} = \Delta t_{upgrade} + \frac{L}{c/n} \quad (4)$$



Στην παραπάνω σχέση, η τιμή  $\Delta t_{update}$  αντιστοιχεί στην καθυστέρηση διάδοσης του μηνύματος ACK που αποστέλλεται από το κινητό τερματικό, όταν αυτό λάβει το αναγνωριστικό μήνυμα από την κεραία #2, προκειμένου να ταξιδέψει διαμέσου της κυψέλης #2 και να ενημερώσει το Κέντρο Ελέγχου για την αίτηση αναδιαμόρφωσης της Εκτεταμένης Κυψέλης. Δηλαδή, η τιμή  $\Delta t_{update}$  περιλαμβάνει και την καθυστέρηση διάδοσης της ασύρματης ζεύξης  $[(2x_1 + x_2) - V \cdot t_h]$  μεταξύ του κινητού τερματικού και της κεραίας #2, αλλά και τον χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση διαμέσου της οπτικής ίνας μήκους  $L$ , από την κεραία #2 μέχρι το Κέντρο Ελέγχου. Δεδομένου ότι το σήμα ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός στην ασύρματη ζεύξη, και με ταχύτητα ίση με  $c/n$  μέσα στην οπτική ίνα (όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης της οπτικής ίνας), τότε το  $\Delta t_{update}$  θα ισούται με:

$$\Delta t_{update} = \left| \frac{(2x_1 + x_2) - V \cdot t_h}{c} \right| + \frac{L}{c/n} \quad (5)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η ποσότητα  $[L / (c/n)]$  αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάζονται τα πακέτα δεδομένων του χρήστη, που δρομολογούνται από τον Κέντρο Ελέγχου προς την κεραία #3, για να μεταδοθούν διαμέσου της οπτικής ίνας.

Η απώλεια πακέτων θα είναι μηδενική όσο ισχύει  $T_{total} < \Delta t_{\#2}$ , γιατί αυτό θα σημαίνει ότι η κεραία #3 θα έχει αρχίσει την αποστολή των πακέτων του χρήστη, πριν αυτός φύγει από την κυψέλη #2. Στην περίπτωση που ισχύει  $T_{total} > \Delta t_{\#2}$ , θα έχουμε απώλεια πακέτων που αντιστοιχούν σε χρονική διάρκεια  $T_{loss}$ , η οποία τιμή εξαρτάται από την καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ του Κέντρου Ελέγχου και της κεραίας #2, αλλά και από το αν το Κέντρο Ελέγχου ενημερώνεται πριν ή μετά την έξοδο του χρήστη από την κυψέλη #2. Εάν το κινητό τερματικό χάσει τη σύνδεσή του με την κεραία #2 πριν την ενημέρωση του Κέντρου Ελέγχου, τότε τα πακέτα που βρίσκονται εκείνη τη στιγμή στη διαδρομή από το Κέντρο Ελέγχου προς το κινητό τερματικό καθώς και τα πακέτα που θα επακολουθήσουν μέχρις ότου γίνει η ενημέρωση, δεν θα φτάσουν ποτέ στο χρήστη. Τα πακέτα που βρίσκονται μεταξύ του Κέντρου Ελέγχου και του κινητού τερματικού, όταν ο χρήστης φεύγει από την κυψέλη #2 μπορεί να βρίσκονται κατά μήκος τόσο της οπτικής ίνας όσο και της ασύρματης ζεύξης, αντιστοιχώντας σε συνολική καθυστέρηση ίση με  $[L / (c/n) + R/c]$ . Τα επόμενα πακέτα που θα περάσουν από το Κέντρο Ελέγχου πριν την ενημέρωσή του, αντιστοιχούν σε χρονικό διάστημα ίσο με  $\Delta t_{update} - \Delta t_{\#2}$ , και θα δρομολογηθούν και αυτά προς την κυψέλη #2. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή  $T_{loss}$  να παίρνει την παρακάτω έκφραση:

$$T_{loss} = \frac{L}{c/n} + \frac{R}{c} + (\Delta t_{update} - \Delta t_{\#2}), \quad \text{εάν } \Delta t_{\#2} < \Delta t_{update} \quad (6)$$

Ωστόσο, σε περίπτωση που το Κέντρο Ελέγχου ενημερωθεί πριν το κινητό τερματικό φύγει από τη κυψέλη #2, τότε τα πακέτα του χρήστη θα έχουν ήδη αρχίσει να δρομολογούνται προς την κεραία #3. Έτσι, τα πακέτα που έπονται της ενημέρωσης του



Κέντρου Ελέγχου και αντιστοιχούν σε διάρκεια ίση με  $\Delta t_{\#2} - \Delta t_{update}$ , θα ληφθούν από τον χρήστη μέσω της κεραίας #3. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της μεταβλητής  $T_{loss}$  θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$T_{loss} = \frac{L}{c/n} + \frac{R}{c} - (\Delta t_{\#2} - \Delta t_{update}), \text{ είναν } \Delta t_{update} < \Delta t_{\#2} \quad (7)$$

Στις δύο παραπάνω σχέσεις, ο όρος  $L / (c/n)$  είναι ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται το σήμα για να ταξιδέψει από το Κέντρο Ελέγχου μέχρι την κεραία, ενώ ο όρος  $R / c$  αποτελεί την καθυστέρηση μετάδοσης για την ασύρματη ζεύξη μεταξύ της θέσης του χρήστη, ο οποίος βρίσκεται στα όρια της κυψέλης και της κεραίας #2.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα πακέτα μεταδίδονται με ρυθμό μετάδοσης ίσο με  $r = S / B$ , τότε η συνολική απώλεια πακέτων (σε αριθμό πακέτων) που αντιστοιχεί σε διάρκεια ίση με την τιμή  $T_{loss}$  μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\text{packetloss} = T_{loss} * r \quad (8)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει μόνο στην περίπτωση που το κινητό τερματικό έχει ολοκληρώσει την λήψη και του τελευταίου πακέτου δεδομένων πριν την έξοδό του από την κυψέλη. Εάν το κινητό τερματικό λαμβάνει ένα πακέτο καθώς διασχίζει τα όρια της κυψέλης, τότε αυτό το πακέτο δεν θα ληφθεί σωστά, εξαιτίας της περιορισμένης ισχύος του σήματος και επομένως ολόκληρο το πακέτο θα απορριφθεί. Σε αυτή την περίπτωση, η σχέση (8) γίνεται:

$$\text{packetloss} = T_{loss} * r + 1 \quad (9)$$

### 6.3.2 Απαιτήσεις – Προδιαγραφές

Στις προηγούμενες παραγράφους δώσαμε τον γενικό ορισμό και το μαθηματικό μοντέλο του αλγορίθμου της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης. Όμως, όπως θα δούμε, υπάρχουν κάποιες απαιτήσεις και προϋποθέσεις για την σωστή και αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου αυτού.

Η βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου είναι η χρήση του σε δίκτυα RoF. Όπως αναφέραμε παραπάνω, τα δίκτυα RoF προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όμως ο βασικός λόγος για τον οποίο είναι αναγκαία στην προκειμένη περίπτωση είναι το μεγάλο εύρος ζώνης που μας προσφέρουν.

Σε ένα κοινό δισδιάστατο κυψελωτό σύστημα, η Εκτεταμένη Κυψέλη αποτελείται από 7 κυψέλες (την κεντρική κυψέλη που βρίσκεται ο χρήστης συν τις 6 γειτονικές της). Αυτό σημαίνει ότι για κάθε χρήστη του συστήματος μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, πρέπει να μεταδίδονται τα δεδομένα του και από τις επτά αυτές διαφορετικές κυψέλες. Αν λάβουμε





υπόψη μας τον μεγάλο αριθμό χρηστών που υπάρχει σε ένα σύγχρονο κυψελωτό σύστημα, είναι εύκολο να κατανοήσουμε τον τεράστιο όγκο πληροφορίας που μεταδίδεται κάθε χρονική στιγμή και τα μεγάλα προβλήματα συμφόρησης που θα μπορούσαν να προκληθούν. Με τα δίκτυα RoF, όμως, έχουμε στη διάθεσή μας όλο το εύρος ζώνης που απαιτείται ώστε να αποφευχθούν τέτοιου είδους προβλήματα.

Το μέγεθος της Εκτεταμένης Κυψέλης, όμως, μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο που έχουμε να αντιμετωπίσουμε. Παραδείγματος χάριν, εάν εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης για την κάλυψη των επιβατών ενός τρένου, η Εκτεταμένη Κυψέλη θα αποτελείται μόνο από δύο κυψέλες. Αυτό συμβαίνει γιατί η πορεία του τρένου είναι εξαρχής γνωστή και το σύστημά μας περιλαμβάνει κυψέλες κατά μήκος των γραμμών του τρένου. Καθώς το τρένο κινείται προς τον προορισμό του, για να εξυπηρετηθεί ένας χρήστης που βρίσκεται σε κάποιο βαγόνι, θα αρκεί να είναι ενεργοποιημένη η κυψέλη στην οποία βρίσκεται την προκειμένη στιγμή και η αμέσως επόμενη (δεδομένου ότι το τρένο κινείται μόνο προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση).

Μία άλλη βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία του αλγορίθμου είναι η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου για τον συγχρονισμό των κεραιών. Όταν ενεργοποιείται μία Εκτεταμένη Κυψέλη, οι κεραιές οι οποίες την απαρτίζουν θα πρέπει να είναι απόλυτα συγχρονισμένες και να αποστέλλουν τα πακέτα ενός συγκεκριμένου χρήστη, την ίδια χρονική στιγμή. Με βάση αυτή την προϋπόθεση έχουν εξαχθεί και οι παραπάνω σχέσεις που αφορούν στην μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου. Εάν δεν υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των κεραιών, τότε δεν μπορούμε να γνωρίζουμε πότε ο χρήστης θα λάβει τα αναγνωριστικά μηνύματα, ποιος θα είναι ο χρόνος καθυστέρησης και ποια θα είναι η απώλεια των πακέτων.

Επίσης, πρέπει να υπάρχει και ένα πρωτόκολλο, το οποίο να διασφαλίζει την αποφυγή λήψης πολλαπλών αντιγράφων του ίδιου πακέτου. Όταν ο χρήστης βρίσκεται στην περιοχή επικάλυψης μεταξύ δύο γειτονικών κυψελών, τότε μπορεί να λάβει δύο πανομοιότυπα πακέτα (με ικανοποιητική στάθμη ισχύος ώστε να μην απορριφθούν). Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να υπάρχει ένα πρωτόκολλο, το οποίο να μπορεί να ξεχωρίζει τα επιπλέον πακέτα και να τα απορρίπτει, ώστε να αποφευχθεί τυχόν αλλοίωση της πληροφορίας που θα λάμβανε κανονικά ο χρήστης.





αναλαμβάνει την ευθύνη της διαχείρισης μνήμης. Στην Java αυτή η διαδικασία γίνεται αυτόματα από τον GC. Αντικείμενα και μεταβλητές των οποίων έχουν χαθεί όλες οι αναφορές διαγράφονται αυτόματα από τον GC. Αυτό γίνεται περιοδικά με βάση τις ρυθμίσεις του JVM ή και με κλήση συνάρτησης. Τέλος, ο GC λύνει προβλήματα όπως πρόσβαση σε διευθύνσεις μνήμης εκτός του προγράμματος εκτέλεσης που σε γλώσσες όπως η C οδηγούν σε ορισμένες τρύπες ασφαλείας.

### 7.1.2 Σύστημα διαχείρισης λογισμικού Maven

Το Maven είναι ένα εργαλείο για αυτοματοποίηση διαδικασιών που χρησιμοποιούν οι προγραμματιστές στην καθημερινότητά τους. Για παράδειγμα μεταγλώττιση κώδικα (compilation), πακετάρισμα (packaging), εκτέλεση ελέγχων (testing), δημιουργία εγγράφων τεκμηρίωσης (documentation), εγκατάσταση της εφαρμογής (deployment).

Σε αντίθεση με προκατόχους του, το Maven έχει δύο βασικές πτυχές. Περιγράφει το πως θα κατασκευασθεί το λογισμικό (build), και ποιες είναι οι εξαρτώμενες βιβλιοθήκες του (dependencies). Οι αρχή του Maven είναι ότι δεν χρησιμοποιεί αρχεία ρυθμίσεων αλλά συμβάσεις τις οποίες πρέπει να τηρεί ο προγραμματιστής (convention over configuration). Χρησιμοποιεί ένα αρχείο XML για να περιγράψει ποιο λογισμικό είναι αυτό που κατασκευάζει, ποιες είναι οι εξαρτώμενες βιβλιοθήκες του, απαιτούμενους φακέλους από το σύστημα αρχείων και επεκτάσεις για επιπλέον λειτουργίες. Οι εξαρτώμενες βιβλιοθήκες που έχουν δηλωθεί στο XML αρχείο, όπως και οι επεκτάσεις λειτουργίας μεταβαίνουν αυτόματα από το διαδίκτυο όταν εκτελεσθεί το Maven. Για εξοικονόμηση χρόνου και δικτυακών πόρων, το Maven διατηρεί στον φάκελο του χρήστη τα πρόσφατα χρησιμοποιημένα μέσα.

Το Maven έχει κάποιους κύκλους ζωής κατά την εκτέλεσή του. Αυτοί εκτελούνται με την σειρά, και είναι προκαθορισμένοι. Ο προγραμματιστής μπορεί να επέμβει ανάμεσα σε αυτούς. Οι κύκλοι ζωής είναι οι παρακάτω:

**validate** - Εξασφάλιση εγκυρότητας του έργου και διαθεσιμότητας πληροφοριών

**compile** - Μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα του έργου

**test** - Δοκιμή του μεταγλωττισμένου κώδικα χρησιμοποιώντας κάποια βιβλιοθήκη

**package** - Μετατροπή του μεταγλωττισμένου κώδικα σε κάποιο πακέτο (π.χ. JAR)

**integration-test** - επεξεργασία και εγκατάσταση πακέτου σε περιβάλλον που μπορεί να γίνουν δοκιμασίες ένταξης και συνεργασίας του λογισμικού με άλλα.

**verify** - επαλήθευση πακέτου σύμφωνα με κριτήρια ποιότητας.

**install** - εγκατάσταση πακέτου στον υπολογιστή για τοπική επαναχρησιμοποίηση

**deploy** - εγκατάσταση πακέτου στον εξυπηρετητή δοκιμών ή παραγωγής.

... Το Maven έχει ενσωματωθεί με όλα τα δημοφιλή Ολοκληρωμένα Περιβάλλοντα Ανάπτυξης (IDE) εκμεταλλεύοντας τις λειτουργίες των, χωρίς να επηρεάζετε από τις



αδυναμίες του.

### 7.1.3 YAML

Η YAML είναι μια μορφή σειριακοποιημένων δεδομένων αναγνώσιμη από τον άνθρωπο. Δανείζεται έννοιες από γλώσσες προγραμματισμού όπως η Perl και η Python και ιδέες από XML και τη μορφή των δεδομένων του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου όπως περιγράφεται στο RFC 2822. Το YAML είναι ένα αναδρομικό ακρωνύμιο του "YAML Ain't a Markup Language". Δηλαδή, το YAML δεν είναι μια γλώσσα σήμανσης. Διαφοροποιείτε από τις γλώσσες σήμανσης (markup languages) λόγω της ιδιότητάς της για αναπαράσταση δεδομένων και αντικειμένων.

Βασικά παραδείγματα αναπαράστασης:

- **λίστες (lists)**
  - # movies
  - Pulp Fiction
  - The imaginary of Doctor Parnassus
  - The girl with the dragon tatoo
  
- # Shopping list  
[eggs, milk, corn flakes, apples]
- **συσχετισμένες διατάξεις (associative arrays)**
  - # Indented Block
  - name: John Doe
  - age: 26
  
- # Inline Block  
{name: John Doe, age: 26}
- **συνδυασμός των παραπάνω**
  - {name: John Doe, age: 26}
  - name: Mary Lay
  - age: 28
- **προσαρμοσμένα αντικείμενα (custom classes)**
  - 
  - myObject: !myClass { name: Joe, age: 15 }
- **αναφορές (references)**
  - # sound sequences
  - 
  - step: &id001
  - source: file1.wav
  - db: -10



```
duration: 12
repetition: 2
```

```
- step: &id002
source: file2.wav
db: -15
duration: 5
repetition: 1
```

```
- step: *id001 # reference to first step
- step: *id002 # reference to second step
```

#### 7.1.4 Σύστημα ελέγχου εκδόσεων git (git version control system, VCS)

Το git σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε από τον Linus Torvalds για την ανάπτυξη του πυρήνα Linux (Linux kernel) το 2005. Ο Torvalds και αρκετοί προγραμματιστές του πυρήνα του Linux, χρησιμοποιούσαν το ιδιοκτησιακό BitKeeper σαν σύστημα ελέγχου εκδόσεων. Επειδή ο πυρήνας του Linux ήταν ανοιχτός, και ο Torvalds δεχόταν κριτικές για την χρήση ενός ιδιοκτησιακού συστήματος, χρειαζόταν ένα ανοιχτό σύστημα το οποίο να τηρούσε 4 κριτήρια:

- Το σύστημα CVS να θεωρείτε παράδειγμα προς αποφυγή
- Να υποστηρίζει κατανεμημένες ροές εργασίας (distributed workflows)
- Να έχει πολύ ισχυρές δικλίδες ασφαλείας ενάντια στην αλλοίωση των αρχείων
- Να μην έχει προβλήματα επιδόσεων

Μετά από την αποτυχημένη προσπάθεια εύρεσης ενός τέτοιου συστήματος, και αμέσως μετά την κυκλοφορία της έκδοσης 2.6.12-rc2 του πυρήνα Linux, ο Torvalds υλοποίησε το git. Στις 16 Ιουνίου 2005, ο πρώτος πυρήνας Linux (έκδοση 2.6.12) κυκλοφόρησε μέσω των διαδικασιών του git και στις 21 Δεκεμβρίου του 2005 η έκδοση 1.0 του git κυκλοφόρησε.

## 7.2 Διάρθρωση υλοποίησης

Η διάρθρωση όλων των φακέλων και αρχείων προκύπτει από τους κανόνες του Maven.

### 1ο επίπεδο

```
|— pom.xml
|— README.md
|— src /
|— target/
```



- Το αρχείο `pom.xml` είναι αυτό με το οποίο περιγράφετε το έργο (project) στο Maven.
- Το αρχείο `README.md` περιέχει τις βασικές πληροφορίες που χρειάζεται κάποιος για να χρησιμοποιήσει το έργο.
- Ο φάκελος `src/` περιέχει όλα τα αρχεία του έργου.
- Ο φάκελος `target/` περιέχει όλα τα εκτελέσιμα του έργου.

### 2ο επίπεδο - `src/`

```
src
├── main
│   ├── assembly /
│   ├── java /
│   ├── resources /
│   └── scripts /
└── test
    └── java /
```

- Ο φάκελος `main/assembly` περιέχει τις πληροφορίες που θα χρησιμοποιηθούν για το πακετάρισμα του έργου.
- Ο φάκελος `main/java` περιέχει τον κώδικα του έργου.
- Ο φάκελος `main/resources` περιέχει όλα τα αρχεία που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα.
- Ο φάκελος `main/scripts` περιέχει όλες τις εκτελέσιμες δέσμες ενεργειών (executable scripts).
- Ο φάκελος `test/java` περιέχει όλες τις δοκιμασίες που περνάει ο κώδικας προκειμένου την επιβεβαίωση ότι το εκτελέσιμο κάνει όντως αυτό που προορίζεται.

### 2ο επίπεδο - `target`

Οι ονομασίες, επί το πλείστον, οφείλονται στα ονόματα των επεκτάσεων του Maven. Όλες οι λειτουργίες του οφείλονται σε επεκτάσεις, ακόμα και αυτές που διαθέτει εξ ορισμού.

```
target/
├── classes /
├── generated-sources /
├── generated-test-sources /
├── maven-archiver /
├── maven-status /
├── rofcore-<version>.jar
├── rofcore-<version>-release.tar.gz
├── rofcore-<version>-release.zip
└── surefire /
```



```
└─ surefire-reports /
└─ test-classes /
```

- Οι φάκελοι `generated-sources/` και `generated-test-sources/` περιέχουν πηγαίο κώδικα που έχει δημιουργηθεί από κάποια βιβλιοθήκη. Δεν χρησιμοποιήθηκε.
- Ο φάκελος `maven-archiver/` περιέχει ένα μικρό υποσύνολο του αρχείου `pom.xml` για την αρχειοθέτηση του έργου.
- Ο φάκελος `maven-status/` περιέχει την λίστα με τα αρχεία που μεταγλωττίστηκαν.
- Ο φάκελος `classes/` περιέχει τα μεταγλωττισμένα αρχεία κώδικα από τον φάκελο `src/main/java/` που είδαμε παραπάνω.
- Ο φάκελος `test-classes/` περιέχει τα μεταγλωττισμένα αρχεία κώδικα από τον φάκελο `src/main/test/`.
- Οι φάκελοι `surefire/` και `surefire-reports/` περιέχουν τα αποτελέσματα των ελέγχων που βρίσκονται στον φάκελο `src/main/test/`.
- Το αρχείο `rofcore-<version>.jar` περιέχει μεταγλωττισμένο τον κώδικα από τον φάκελο `src/main/java/`.

## 7.2.1 Επεξήγηση πηγαίων αρχείων

### 7.2.1.1 `pom.xml`

Περιεχόμενα αρχείου και επεξήγηση:

```
<project xmlns="http://maven.apache.org/POM/4.0.0"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://maven.apache.org/POM/4.0.0
http://maven.apache.org/xsd/maven-4.0.0.xsd">
  <modelVersion>4.0.0</modelVersion>
```

Οι αρχειοθετικές πληροφορίες του έργου

```
<groupId>eu.stefanos-ak.rof</groupId>
<artifactId>rofcore</artifactId>
<version>0.1</version>
<packaging>jar</packaging>
```

```
<name>rofcore</name>
```

Οι επεκτάσεις και οι ρυθμίσεις της διαδικασίας κατασκευής

```
<build>
  <resources>
    <resource>
```

Αποκλεισμός του φακέλου `conf/` και των αρχείων του από τον φάκελο `target/classes`



και το αρχείο target/rofcore-<version>.jar διότι δεν προορίζονται για εκεί όπως πιστεύει το Maven. Ο φάκελος conf/ και τα αρχεία του θα χρησιμοποιηθούν από την επέκταση maven-assembly-plugin

```
<directory>src/main/resources</directory>
<excludes>
  <exclude>conf/*</exclude>
</excludes>
</resource>
</resources>
<plugins>
```

Ορισμός της έκδοσης Java 1.7 για τον μεταγλωττιστή

```
<plugin>
  <groupId>org.apache.maven.plugins</groupId>
  <artifactId>maven-compiler-plugin</artifactId>
  <version>3.1</version>
  <configuration>
    <source>1.7</source>
    <target>1.7</target>
  </configuration>
</plugin>
```

Η επέκταση maven-assembly-plugin.

Εδώ ορίζουμε ποιο αρχείο περιγράφει τις ρυθμίσεις της επέκτασης, σε ποιο σημείο του κύκλου ζωής να τρέξει και τι να κάνει.

```
<plugin>
  <groupId>org.apache.maven.plugins</groupId>
  <artifactId>maven-assembly-plugin</artifactId>
  <version>2.4</version>
  <executions>
    <execution>
      <id>assembly:package</id>
```

Κύκλος ζωής package.

```
<phase>package</phase>
<goals>
```

Εκτέλεση του single σκοπού της επέκτασης

```
<goal>single</goal>
</goals>
<configuration>
  <descriptors>

  <descriptor>src/main/assembly/assembly.xml</descriptor>
  </descriptors>
</configuration>
</execution>
</executions>
</plugin>
```





Ορισμός της τοποθεσίας των βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα και της κύριας κλάσης του προγράμματος (main class).

```
<plugin>
  <groupId>org.apache.maven.plugins</groupId>
  <artifactId>maven-jar-plugin</artifactId>
  <version>2.4</version>
  <configuration>
    <archive>
      <manifest>

<addClasspath>true</addClasspath>

<classpathPrefix>lib/</classpathPrefix>

<mainClass>eu.stefanosak.rof.rofcore.Main</mainClass>
      </manifest>
    </archive>
  </configuration>
</plugin>
</plugins>
</build>
<properties>
  <project.build.sourceEncoding>UTF-
8</project.build.sourceEncoding>
  <org.slf4j.version>1.7.5</org.slf4j.version>
  <logback.version>1.0.13</logback.version>
</properties>
```

### Βιβλιοθήκες

```
<dependencies>
  <dependency>
    <groupId>junit</groupId>
    <artifactId>junit</artifactId>
    <version>4.11</version>
    <scope>test</scope>
  </dependency>

  <!-- load configuration -->
  <dependency>
    <groupId>commons-cli</groupId>
    <artifactId>commons-cli</artifactId>
    <version>1.2</version>
  </dependency>
```

Αυτή η βιβλιοθήκη μας βοηθάει να διαβάσουμε εύκολα τα αρχεία yaml που



χρησιμοποιούμε για να φορτωθούν οι ρυθμίσεις του προγράμματος.

```
<dependency>
  <groupId>org.yaml</groupId>
  <artifactId>snakeyaml</artifactId>
  <version>1.13</version>
</dependency>

<!-- logging -->
<dependency>
  <groupId>org.slf4j</groupId>
  <artifactId>slf4j-api</artifactId>
  <version>${org.slf4j.version}</version>
</dependency>
<dependency>
  <groupId>org.slf4j</groupId>
  <artifactId>jcl-over-slf4j</artifactId>
  <version>${org.slf4j.version}</version>
</dependency>
<dependency>
  <groupId>ch.qos.logback</groupId>
  <artifactId>logback-core</artifactId>
  <version>${logback.version}</version>
</dependency>
<dependency>
  <groupId>ch.qos.logback</groupId>
  <artifactId>logback-classic</artifactId>
  <version>${logback.version}</version>
</dependency>
<dependency>
  <groupId>commons-lang</groupId>
  <artifactId>commons-lang</artifactId>
  <version>2.6</version>
</dependency>
```

Αυτή η βιβλιοθήκη είναι ζωτικής σημασίας και θα επεξηγηθεί παρακάτω.

```
<dependency>
  <groupId>org.apfloat</groupId>
  <artifactId>apfloat</artifactId>
  <version>1.8.0</version>
</dependency>
</dependencies>
</project>
```

#### 7.2.1.2 [src/main/assembly/assembly.xml](#)



Περιεχόμενα αρχείου και επεξήγηση:

```
<assembly>
```

Όνομα πακέτου

```
<id>release</id>
```

Ορισμός των μορφών πακεταρίσματος

```
<formats>
```

```
<format>tar.gz</format>
```

```
<format>zip</format>
```

```
</formats>
```

Αντιγραφή των βιβλιοθηκών στον φάκελο lib/

```
<dependencySets>
```

```
<dependencySet>
```

```
<useProjectArtifact>>false</useProjectArtifact>
```

```
<outputDirectory>lib</outputDirectory>
```

```
<unpack>>false</unpack>
```

```
</dependencySet>
```

```
</dependencySets>
```

```
<fileSets>
```

Αντιγραφή των εκτελέσιμων δεσμών ενεργειών

```
<fileSet>
```

```
<directory>$
```

```
{project.build.scriptSourceDirectory}</directory>
```

```
<outputDirectory></outputDirectory>
```

```
</fileSet>
```

Αντιγραφή των αρχείων ρυθμίσεων

```
<fileSet>
```

```
<directory>$
```

```
{basedir}/src/main/resources/conf</directory>
```

```
<outputDirectory>conf</outputDirectory>
```

```
</fileSet>
```

Αντιγραφή του αρχείου που περιέχει τον μεταγλωττισμένο κώδικα (rofcore-  
<version>.jar)

```
<fileSet>
```

```
<directory>${project.build.directory}</directory>
```

```
<outputDirectory></outputDirectory>
```

```
<includes>
```

```
<include>*.jar</include>
```

```
</includes>
```

```
</fileSet>
```

```
</fileSets>
```

```
</assembly>
```



### 7.3 Το πρότυπο IEEE 754 και η βιβλιοθήκη APFloat

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που εμφανίστηκε έχει σχέση με την αναπαράσταση αριθμών διπλής ακρίβειας (double precision) στους υπολογιστές. Η πιο συνηθισμένη μορφή αναπαράστασης είναι με βάση το πρότυπο 754 της IEEE και αυτό είναι που χρησιμοποιεί και η Java. Το πρότυπο αυτό δημοσιεύτηκε το 1985 από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) και ορίζει:

- αριθμητικές μορφές: σύνολα δυαδικών και δεκαδικών δεδομένων κινητής υποδιαστολής, τα οποία αποτελούνται από πεπερασμένους αριθμούς, άπειρα, και ειδικές τιμές μη αριθμών (NaNs. "πληθυντικός" του NaN, Not a Number).
- μορφές ανταλλαγής: κωδικοποιήσεις (συμβολοσειρές από bit) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή δεδομένων κινητής υποδιαστολής σε μια αποδοτική και συμπαγή μορφή.
- κανόνες στρογγυλοποίησης: ιδιότητες που πρέπει να πληρούνται κατά τις αριθμητικές πράξεις και τις μετατροπές.
- πράξεις: αριθμητικές πράξεις και άλλες πράξεις σε αριθμητικές μορφές
- χειρισμός εξαιρέσεων: ενδείξεις για απρόβλεπτες συνθήκες (όπως η διαίρεση με το μηδέν, υπερχείλιση, κλπ)

Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε έχει σχέση με το πόσο ακριβές είναι το πρότυπο αυτό στην αναπαράσταση αριθμών στον υπολογιστή. Για να δείξουμε την σοβαρότητα του προβλήματος ο παρακάτω κώδικας Java παρουσιάζει σφάλμα γνωστό και ως "καταστροφική ακύρωση" (catastrophic cancellation):

```
double num1 = 0.7;  
double num2 = 0.8;  
if (num2 == num1+0.1) {  
    ...  
}
```

Είναι προφανές ότι η σύγκριση αυτή θα έπρεπε να είναι αληθής. Αυτό δεν ισχύει. Η αναπαράσταση του αποτελέσματος `num1+0.1` στον υπολογιστή αντιστοιχεί σε `0.7999999999999999`, κάτι το οποίο δεν είναι ίσο με το `0.8`, το οποίο επειδή ορισμένο εξ αρχής ως `0.8` αναπαρίσταται ως `0.8000000000000000`.

Για να προσπεραστεί αυτό το πρόβλημα η Java προσφέρει μια κλάση, την `BigDecimal`. Η κλάση αυτή ενώ λειτουργεί με τον αναμενόμενο μαθηματικό τρόπο, παρουσιάζει μη γραμμική αύξηση στον χρόνο εκτέλεσης με βάση το σημαντικό μήκος των αριθμών.

Έτσι καταλήγουμε στην βιβλιοθήκη `APFloat`. Είναι μιας υψηλής απόδοσης βιβλιοθήκη με αυθαίρετη αριθμητική ακρίβεια. Μπορεί να εκτελέσει υπολογισμούς με ακρίβεια εκατομμυρίων ψηφίων. Επίσης, προσφέρει μια πλήρη σουίτα μαθηματικών συναρτήσεων και πράξεων για αριθμούς αυθαίρετης ακρίβειας. Τέλος, διανέμεται υπό την άδεια χρήσης `GNU Lesser General Public License`.



### 7.3.1 Λεπτομέρειες για την βιβλιοθήκη APFloat

Κάθε αντικείμενο APFloat εκτός από τον αριθμό που περιέχει, ορίζεται και από μια ακρίβεια. Αυτή ορίζει τις μαθηματικές πράξεις που γίνονται με αυτόν τον αριθμό. Για παράδειγμα το αποτέλεσμα της τετραγωνικής ρίζας του 2 είναι ένας αριθμός με άπειρα δεκαδικά ψηφία χωρίς κάποιο επαναλαμβανόμενο μοτίβο. Για να χρησιμοποιηθεί αυτός ο αριθμός σε πράξεις πρέπει να αποθηκευτεί πρώτα, το οποίο για να γίνει πρέπει να οριστεί η ακρίβεια του αριθμού αυτού:

```
ApfloatMath.sqrt(new Apfloat(2, 500))
```

Έτσι ορίζουμε την τετραγωνική ρίζα του 2 με ακρίβεια 500 ψηφίων.

Η ακρίβεια του αποτελέσματος ενός πολλαπλασιασμού ή διαίρεσης ισούται με την μικρότερη της ακρίβειας των 2 τελεστών.

Για την ακρίβεια του αποτελέσματος μιας πρόσθεσης ή αφαίρεσης το αποτέλεσμα είναι λίγο πιο περίπλοκο. Ας εξετάσουμε τα ακόλουθα παραδείγματα:

```
  111.111111 // ακρίβεια 9 ψηφίων
+  22.222    // ακρίβεια 5 ψηφίων
-----
  133.333
```

Τα 3 παραπάνω ψηφία του πρώτου τελεστή δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν γιατί λείπουν τα αντίστοιχα ψηφία από τον δεύτερο τελεστή. Έτσι η ακρίβεια του αποτελέσματος είναι 6 ψηφίων.

```
  987.654    // ακρίβεια 6 ψηφίων
+  51.234    // ακρίβεια 5 ψηφίων
-----
 1038.888
```

Λόγω του ψηφίου υπερχειλίσης, η ακρίβεια του αποτελέσματος είναι 7 ψηφίων.

```
  111.222333 // ακρίβεια 9 ψηφίων
-  111.222222 // ακρίβεια 9 ψηφίων
-----
   0.000111
```

Τα περισσότερα ψηφία αλληλοαναιρούνται. έτσι η ακρίβεια του αποτελέσματος είναι 3 ψηφίων.

Η βιβλιοθήκη επίσης υποστηρίζει φανταστικούς αριθμούς, ρητούς αριθμούς και αριθμούς βάσεων εκτός του 10. Για παράδειγμα με βάση το 2 (δυναδικούς) ή το 16 (δεκαεξαδικούς).

## 7.4 Λεπτομέρειες υλοποίησης

### 7.4.1 Οργάνωση κώδικα

Ο κώδικας είναι οργανωμένος στα ακόλουθα πακέτα.



```
eu.stefanosak.rof.rofcore
├── CLIOptions.java
├── ConfigurationFiles.java
├── ConfigurationLoader.java
├── emulation /
│   ├── Emulate.java
│   └── impl /
│       └── *
├── EmulationSettings.java
├── EnvironmentSettings.java
├── exceptions /
│   └── *
├── extras /
│   └── *
├── Main.java
├── objects /
│   └── *
└── utils /
    └── *
```

Οι κλάσεις που βρίσκονται στο 1ο επίπεδο έχουν να κάνουν με την εκτέλεση του λογισμικού, την επεξεργασία των ορισμάτων που έχουν δοθεί και το διάβασμα των αρχείων που περιέχουν τις ρυθμίσεις εκτέλεσης (περισσότερα στην ενότητα 7.6).

Οι κλάσεις που βρίσκονται στο πακέτο (Java package) `emulation` έχουν να κάνουν με την εξομοίωση αυτή καθ' αυτή. Η κλάση `Emulate` είναι μία διεπαφή (Java Interface) η οποία προσφέρει αφαιρετικότητα (abstraction) στον τρόπο της υλοποίησης. Οι κλάσεις που βρίσκονται στο πακέτο `emulation/impl` είναι οι διαθέσιμες υλοποιήσεις για να εκτελεσθεί η εξομοίωση. Οι υλοποιήσεις χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Αυτές που εκτελούν τον κώδικα σειριακά με 1 νήμα (thread) και αυτές που τον εκτελούν παράλληλα με πολλά νήματα.

Το πακέτο `exceptions` περιέχει τις εξαιρέσεις (Java exceptions) που θα μπορούσαν να συμβούν στο συγκεκριμένο λογισμικό.

Το πακέτο `extras` περιέχει κλάσεις υπεύθυνες για το μάζεμα των στατιστικών της εξομοίωσης και βοηθητικές κλάσεις όσον αφορά την εξομοίωση. Για παράδειγμα η κλάση `Positioning` έχει μια μέθοδο που παίρνει σαν όρισμα την θέση στο εξαγωγικό σύστημα αξόνων και την κατεύθυνση σε αυτό, και επιστρέφει την επόμενη θέση με βάση την κατεύθυνση.

Το πακέτο `objects` περιέχει τις κλάσεις που περιγράφουν τα φυσικά αντικείμενα της εξομοίωσης όπως την κεραία, το κινητό (δηλαδή τον χρήστη), αλλά και σημεία στον καρτεσιανό χώρο ή στο εξαγωγικό σύστημα συντεταγμένων.

Το πακέτο `utils` περιέχει βοηθητικές κλάσεις, όχι για την εξομοίωση, αλλά για λειτουργίες όπως την μετατροπή ενός αντικειμένου σε συμβολοσειρά εύκολα αναγνώσιμη



από τον άνθρωπο.

## 7.4.2 Επεξήγηση υλοποίησης

### 7.4.2.1 Γενική περιγραφή

Η κλάση `Main` αρχικά διαβάζει τα ορίσματα μέσω της βοηθητικής κλάσης `CLIOptions` η οποία χρησιμοποιεί την βιβλιοθήκη `commons-cli` του ΜΚΟ (Μη κερδοσκοπικού οργανισμού) `Apache Software Foundation`. Στην συνέχεια διαβάζει τα αρχεία ρυθμίσεων μέσω της κλάσης `ConfigurationFiles` η οποία τα ελέγχει για επαρκή δικαιώματα ώστε να εμφανιστεί το κατάλληλο μήνυμα λάθους στον χρήστη. Η κλάση `ConfigurationLoader` φορτώνει τα περιεχόμενα των αρχείων στις κλάσεις `EmulationSettings` και `EnvironmentSettings`. Τέλος ξεκινάει η εξομοίωση μέσω τις διεπαφής `Emulate` και ανάλογα με τις ρυθμίσεις που έχουν οριστεί ο αντίστοιχος όγκος πληροφοριών θα εκτυπώνονται στην οθόνη και στα αρχεία εξόδου. Η επιλογή της ρύθμισης αυτής δίνεται διότι όσο περισσότερο είναι απασχολημένο το σύστημα με ενέργειες εισόδου/εξόδου (i/o) τόσο ελαττώνεται η ταχύτητα.

### 7.4.2.2 Μονήρεις μοτίβο (Singleton pattern)

Ή αλλιώς μοτίβο μοναδικού συνόλου όπως προκύπτει από τα μαθηματικά. Με αυτό το μοτίβο προγραμματισμού περιορίζεται η αρχικοποίηση της κλάσης σε ένα και μόνο αντικείμενο. Κάτι χρήσιμο όταν δεν απαιτούνται παραπάνω αντικείμενα για τον συντονισμό των ενεργειών καθ' όλη την διάρκεια ζωής της εκτέλεσης του προγράμματος.

Αυτό το μοτίβο χρησιμοποιείτε στην συγκεκριμένη εξομοίωση. Για παράδειγμα στην κλάση `EmulationSettings` υλοποιείτε από την μέθοδο (method) `getEmulationSettings`:

```
public static EmulationSettings getEmulationSettings() {
    if ( settingsInstance == null ) {
        settingsInstance = new EmulationSettings();
        settingsInstance.initDefaults();
    }
    return settingsInstance;
}
```

Η λέξη κλειδί `static` σημαίνει ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να καλεστεί από την κλάση χωρίς να έχει αρχικοποιηθεί. Η μεταβλητή `settingsInstance` είναι κι αυτή μια `static` μεταβλητή της κλάσης `EmulationSettings`. Εάν καλεστεί η εν λόγω μέθοδος λοιπόν, αρχικοποιείται η μεταβλητή `settingsInstance` εάν δεν είναι ήδη και επιστρέφεται. Άρα το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι πάντα το ίδιο.



#### 7.4.2.3 Λογικές Εξομοίωσης

Η εξομοίωση ενός τέτοιου δικτύου μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ο πλέον παραδοσιακός είναι σειριακά με ένα νήμα και ως βάση τον χρόνο. Το πρόβλημα σε αυτήν την προσέγγιση είναι το χρονικό βήμα. Πιο συγκεκριμένα, εάν θεωρήσουμε ότι ένα πακέτο δεδομένων “φεύγει” από την κεραία στα 60GHz και ο χρήστης βρίσκεται σε μία ελάχιστη απόσταση του ενός μέτρου, το πακέτο αυτό χρειάζεται περίπου 3 picosecond για να ταξιδέψει την απόσταση αυτή μέσω του αέρα. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο χρονικό βήμα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έτσι ώστε να μην έχουμε εσφαλμένα δεδομένα είναι 3 picosecond. Εάν υπολογίσουμε και το γεγονός το χρονικό βήμα πρέπει να είναι ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο του χρόνου που χρειάζεται ένα πακέτο δεδομένων για να ταξιδέψει από τις κεραίες στο κέντρο ελέγχου, τότε το χρονικό βήμα κατά πάσα πιθανότητα (ανάλογα με την χιλιομετρική απόσταση από το κέντρο ελέγχου) θα πρέπει να μειωθεί σε 1 picosecond. Όπως καταλαβαίνουμε αυτό καθιστά μια τέτοια εξομοίωση εξαιρετικά χρονοβόρα και απαιτεί τεράστια επεξεργαστική ισχύ. Χρειάζονται περίπου 60 τρισεκατομμύρια χρονικές επαναλήψεις για 1 λεπτό εξομοίωσης χωρίς να υπολογίζουμε το μέγεθος της εξομοίωσης (πλήθος κυψελών και χρηστών).

Ένας τρόπος να γίνει η συγκεκριμένη εξομοίωση αρκετά πιο γρήγορη είναι να προσπερνάτε ο νεκρός χρόνος. Το βήμα της εξομοίωσης μπορεί να αυξηθεί δραματικά σε κάποιο που θα έχει νόημα ως προς την κίνηση των χρηστών και όχι ως προς την κίνηση των πακέτων δεδομένων σε μικροκύματα. Έτσι βέβαια χάνεται η ακρίβεια των πακέτων δεδομένων, και δεν μπορούν να υπολογίζονται με ακρίβεια στατιστικά όπως το πόσες μεταγωγές απέτυχαν. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η αλλαγή του χρονικού βήματος ανά διαστήματα έτσι ώστε να συμβαδίζει με τις χρονικές στιγμές που οι κεραίες λαμβάνουν ή στέλνουν δεδομένα. Οι επαναλήψεις που συμβαίνει αυτό χειρίζονται διαφορετικά και υπολογίζονται οι κρίσιμες χρονικές στιγμές που τα πακέτα φτάνουν στους χρήστες ή δεν φτάνουν και έχουμε απώλειες. Ο παραπανίσιος χρόνος που έχει υπολογιστεί μαθηματικά για τον κάθε χρήστη αποθηκεύεται για να αφαιρεθεί στην επόμενη ή επόμενες επαναλήψεις (ανάλογα το χρονικό βήμα που έχει οριστεί).

Οι υλοποιήσεις με πολλά νήματα, δηλαδή παραλληλισμό, έχουν πολλές εναλλαγές. Για παράδειγμα μπορούν να χωρισθούν οι κυψέλες στα διαθέσιμα νήματα και το κάθε νήμα να υπολογίζει τα αποτελέσματα για τις κυψέλες που το αφορούν. Επίσης μπορούν να χωρισθούν οι χρήστες στα διαθέσιμα νήματα και το κάθε νήμα να υπολογίζει τα αποτελέσματα για τους χρήστες που το αφορούν.

## 7.5 Κατασκευή λογισμικού (build)

Η κατασκευή του λογισμικού γίνεται με την ακόλουθη εντολή:

```
mvn clean install
```

Ή εναλλακτικά με τους τρόπους που προσφέρει το κάθε περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment, IDE) όσον αφορά την συνδεσιμότητά του με το maven.





### 7.5.1 Προαπαιτούμενα

Μπορείτε να προμηθευτείτε την Java και το Maven από τις ακόλουθες τοποθεσίες:

- JDK 7 or higher  
<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/jdk7-downloads-1880260.html>
- maven 2.2 or maven 3.1 <https://maven.apache.org/download.cgi>

### 7.6 Διάρθρωση τελικού πακέτου

Το αποτέλεσμα της εντολής `mvn clean install` είναι να δημιουργήσει τον φάκελο `target` στον οποίο βρίσκεται το τελικό πακέτο και υπάρχει σε 2 μορφές, `zip` και `tar.gz`: `rofcore-<version>-release.zip`, `rofcore-<version>-release.tar.gz`.

Τα περιεχόμενα των πακέτων είναι:

```
├── conf
│   ├── emulation.yaml
│   ├── environment.yaml
│   └── log-config.xml
├── lib
│   └── * (libraries)
├── rofcore-<version>.jar
└── rof-init.bsh
```

- Ο φάκελος `conf/` περιέχει τις ρυθμίσεις του προγράμματος.
- Ο φάκελος `lib/` περιέχει τις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα
- Το αρχείο `rofcore-<version>.jar` περιέχει τον μεταγλωττισμένο κώδικα του προγράμματος
- Με το αρχείο `rof-init.bsh` μπορεί να ξεκινήσει το πρόγραμμα. Εναλλακτικά απευθείας με την εντολή που βρίσκεται μέσα στο συγκεκριμένο αρχείο:  
`java -jar rofcore-<version>.jar -n conf/environment.yaml -m conf/emulation.yaml -o results`

Τα ορίσματα του εκτελέσιμου είναι:

```
-m, --emu-file <arg>      Το αρχείο εισόδου εξομοίωσης
-n, --env-file <arg>      Το αρχείο εισόδου περιβάλλοντος
-o, --output-folder <arg> Ο φάκελος εξόδου
```

#### 7.6.1 Το αρχείο εισόδου περιβάλλοντος

Περιεχόμενα αρχείου:

Εάν η ρύθμιση των κυψελών είναι εκτεταμένη ή όχι:



```
extended: true
Το πλήθος των κυψελών στον άξονα i είναι ίσο με (2* iLength + 1)
iLength: 150
Το πλήθος των κυψελών στον άξονα j είναι ίσο με (2* jLength + 1)
jLength: 150
Άρα το συνολικό πλήθος των κυψελών είναι ίσο με (2*iLength+1)*(2*jLength)
Η χωρητικότητα των οπτικών ινών:
opticalCapacity: 1.0E8
Η απόσταση των κυψελών από το κέντρο ελέγχου (για όλες τις κυψέλες η ίδια):
opticalDistance: 10000.0
Η ταχύτητα των πακέτων μέσα στην οπτική ίνα:
opticalVelocity: 2.0E8
Η ακτίνα των κυψελών:
radius: 20.0
Η επικαλυπτόμενη απόσταση των κυψελών
x2: 5.0
Το μεσοδιάστημα του χρόνου που οι κυψέλες αποστέλλουν πληροφορίες
beaconInterval: 1.0
```

## 7.6.2 Το αρχείο εισόδου εξομοίωσης

### Περιεχόμενα αρχείου:

```
Η χρονική διάρκεια της εξομοίωσης:
totalDuration: 10.0
Το χρονικό βήμα της εξομοίωσης:
timeIncement: 0.1
Ομάδες χρηστών με παρόμοια χαρακτηριστικά:
userGroups:
Χρήστες:
users:
```

### 7.6.2.1 Παράδειγμα και επεξήγηση του πεδίου userGroup:

```
userGroups:
- {userCount: 5, tInit: 0.0, velocity: 30.0, acceleration:
0.0, iPosition: 0, jPosition: 0, direction: 0,
positioningExpandDirection: 1, timePlacementInceasementValue:
0, accelerationInceasementValue: 0, velocityInceasementValue: 1}
```

Πόσοι χρήστες θα εισαχθούν από αυτήν την ομάδα χρηστών:

userCount

Ο αρχικός χρόνος που θα χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή των χρηστών:

tInit

Η αρχική ταχύτητα που θα χρησιμοποιηθεί για τους χρήστες:



velocity

Η αρχική επιτάχυνση που θα χρησιμοποιηθεί για τους χρήστες:

acceleration

Η αρχική θέση που θα χρησιμοποιηθεί για τους χρήστες στον άξονα-i

iPosition

Η αρχική θέση που θα χρησιμοποιηθεί για τους χρήστες στον άξονα-j

jPotition

Η κατεύθυνση των χρηστών

direction

Η κατεύθυνση τοποθέτησης των χρηστών

positioningExpandDirection

Το βήμα αύξησης του χρόνου εισαγωγής του χρήστη

timePlacementInceasementValue

Το βήμα αύξησης της επιτάχυνσης που θα ανατεθεί στον κάθε χρήστη

accelerationInceasementValue

Το βήμα αύξησης της αρχικής ταχύτητας που θα ανατεθεί στον κάθε χρήστη

velocityInceasementValue

#### Συγκεκριμένα επιμέρους παραδείγματα για το πεδίο userGroups:

- Πιθανές τιμές του positioningExpandDirection :

0 = i-axis, forward, right (i++)

1 = j-axis, forward, up-right (j++)

2 = mirror-j-axis, up-left (i-- / j++)

3 = i-axis, backwards, left (i--)

4 = j-axis, backwards, down-left (j--)

5 = mirror-j-axis, down-right (i++, j--)

Παράδειγμα:

iPosition = 0, jPosition = 0, positioningExpandDirection = 2, userCount = 3

Αποτέλεσμα:

user1: iPosition = 0, jPosition = 0

user2: iPosition = -1, jPosition = 1

user3: iPosition = -2, jPosition = 2

- Παράδειγμα του timePlacementInceasementValue :

tInit=0, timePlacementInceasementValue=1, userCount=3

Αποτέλεσμα:

user1: tInit = 0

user2: tInit = 1

user3: tInit = 2

- Παράδειγμα του accelerationInceasementValue :

accelartion = 1, accelerationInceasementValue = 2, userCount = 3



Αποτέλεσμα:

```
user1: acceleration = 1  
user2: acceleration = 3  
user3: acceleration = 5
```

- Παράδειγμα του velocityInceasementValue :  
velocity=10, velocityInceasementValue=5, userCount=3

Αποτέλεσμα:

```
user1: velocity = 10  
user2: velocity = 15  
user3: velocity = 20
```

#### 7.6.2.2 Παράδειγμα και επεξήγηση του πεδίου users:

```
users:  
- {tInit: 0.0, velocity: 30.0, acceleration: 0.0, iPosition:  
0, jPosition: 0, direction: 0}  
- {tInit: 0.0, velocity: 10.0, acceleration: 15.0, iPosition:  
0, jPosition: 0, direction: 0}
```

Ο χρόνος εισαγωγής του χρήστη στην εξομοίωση:

tInit

Η αρχική ταχύτητα του χρήστη:

velocity

Η επιτάχυνση του χρήστη:

acceleration

Η αρχική θέση στον άξονα-i

iPosition

Η αρχική θέση στον άξονα-j

jPosition

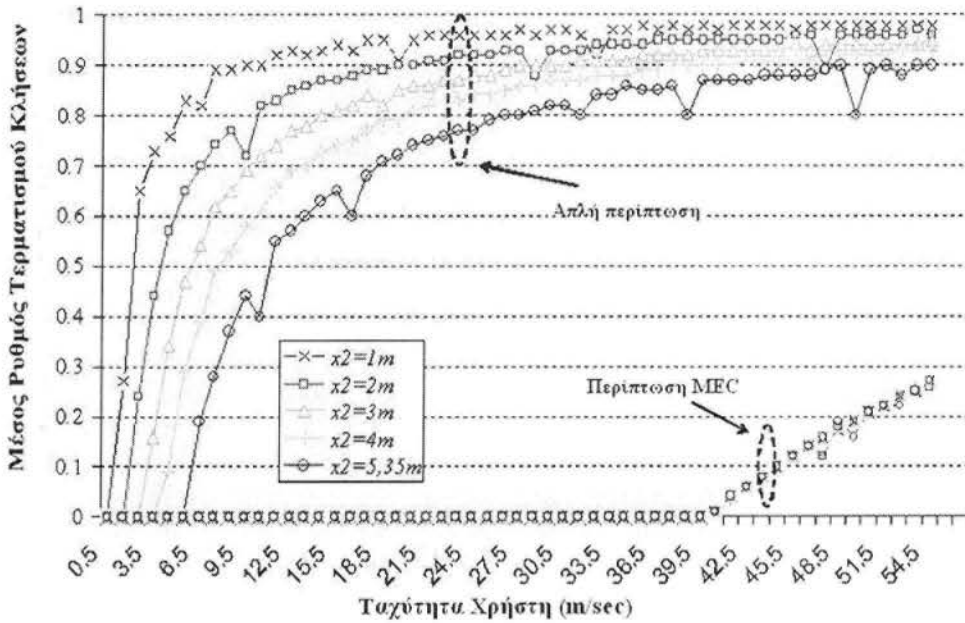
Η κατεύθυνση του χρήστη (για πληροφορίες ισχύουν τα ίδια με το παραπάνω πεδίο  
positioningExpandDirection) :

direction



### 7.7 Αποτελέσματα υλοποίησης

Η ανάλυση της επίδοσης του αλγορίθμου Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης πραγματοποιήθηκε για διαφορετικούς συνδυασμούς ταχύτητας χρήστη (V), μήκος οπτικής σύνδεσης (L), απόστασης της περιοχής επικάλυψης ( $x_2$ ) και ρυθμού μετάδοσης των πακέτων δεδομένων (B).



Εικόνα 7-1: Διάγραμμα μέσου ρυθμού τερματισμού κλήσεων προς την ταχύτητα του κινούμενου χρήστη

Στην εικόνα 7-1 απεικονίζεται ο μέσος ρυθμός τερματισμού μίας κλήσης ως συνάρτηση της ταχύτητας του χρήστη, τόσο για την απλή περίπτωση, όσο και για την περίπτωση της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης, για πέντε διαφορετικά μήκη της περιοχής επικάλυψης.

Στην περίπτωση της απλής διαπομπής, η πιθανότητα τερματισμού μίας κλήσης είναι μηδενική, μέχρι η ταχύτητα χρήστη να φτάσει την τιμή  $x_2 / T_b$ . Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του χρήστη, για να διατηρηθεί ενεργή η σύνδεση, εξαρτάται από την τιμή  $x_2$  και περιορίζεται σε ταχύτητες πεζών χρηστών, ακόμα και για περιοχή επικάλυψης ίση με 5.35m. Όταν η ταχύτητα του κινητού χρήστη υπερβεί την τιμή ( $x_2$  – μέγιστη τιμή ταχύτητας), τότε η πιθανότητα διακοπής της κλήσης αυξάνει ραγδαία, ξεπερνώντας το 20% , πριν καν η ταχύτητα του χρήστη φτάσει την τιμή των 10m/sec. Όπως είναι κατανοητό, όσο πιο γρήγορα κινείται ο χρήστης, τόσο αυξάνει ο πιθανότητα διακοπής της σύνδεσής του, πράγμα που καθιστά την απλή αυτή περίπτωση ικανοποιητική, μόνο για δίκτυα με πολύ χαμηλές ταχύτητες χρηστών.

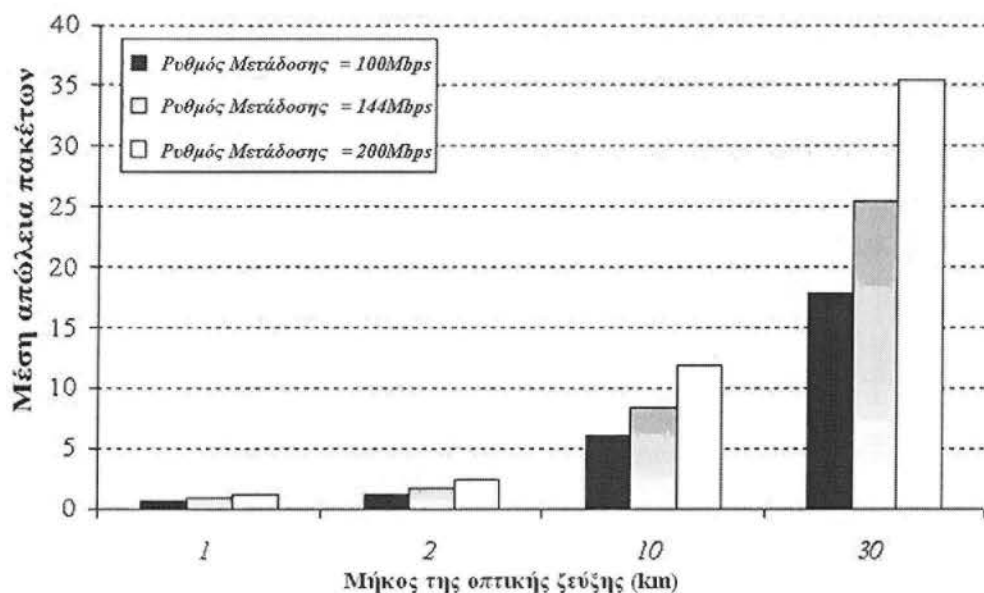
Στην περίπτωση του αλγορίθμου Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης, η πιθανότητα τερματισμού μίας κλήσης είναι ανεξάρτητη από την περιοχή επικάλυψης  $x_2$  και είναι



μηδενική για όλες τις τιμές ταχύτητας του χρήστη κάτω των 40 m/sec, πράγμα το οποίο είναι απόλυτα σύμφωνο με τη συνθήκη (2) που αναφέραμε στην μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου. Αυτό είναι αποτέλεσμα της δυναμικής ανακατανομής της Εκτεταμένης Κυψέλης, δημιουργώντας νέες συνδέσεις μεταξύ του χρήστη και της κεραίας κάθε γειτονικής κυψέλης, στην οποία μπορεί να μεταβεί, παρέχοντας έτσι απρόσκοπτη επικοινωνία για κάθε πιθανή κίνηση. Με αυτό τον τρόπο, το διαθέσιμο χρονικό παράθυρο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αναδιαμόρφωσης της νέας Εκτεταμένης Κυψέλης, εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος της κυψέλης και την ταχύτητα του κινητού χρήστη, ενώ είναι εντελώς ανεξάρτητο από την περιοχή επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Αυτό το χαρακτηριστικό μας παρέχει μεγάλη ευελιξία στον σχεδιασμό ενός δικτύου και απρόσκοπτες συνθήκες ακόμα και για ταχύτητες οχημάτων. Πέρα από τα 40 m/sec, ο ρυθμός τερματισμού των κλήσεων αυξάνεται, με μικρότερο όμως ρυθμό από ότι στην απλή περίπτωση, φτάνοντας αύξηση του 20% μόνο για ταχύτητες που ξεπερνούν τα 50 m/sec, δηλαδή περίπου 180 km/h.

Οι εικόνες 7-2 και 7-3 απεικονίζουν την απώλεια πακέτων για διαφορετικές τιμές μήκους της οπτικής ζεύξης ( $L$ ) για τρεις διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, σε όλο το εύρος των ταχυτήτων του χρήστη από 0 έως 55m/sec, για την απλή περίπτωση και για τον αλγόριθμο Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης αντίστοιχα.

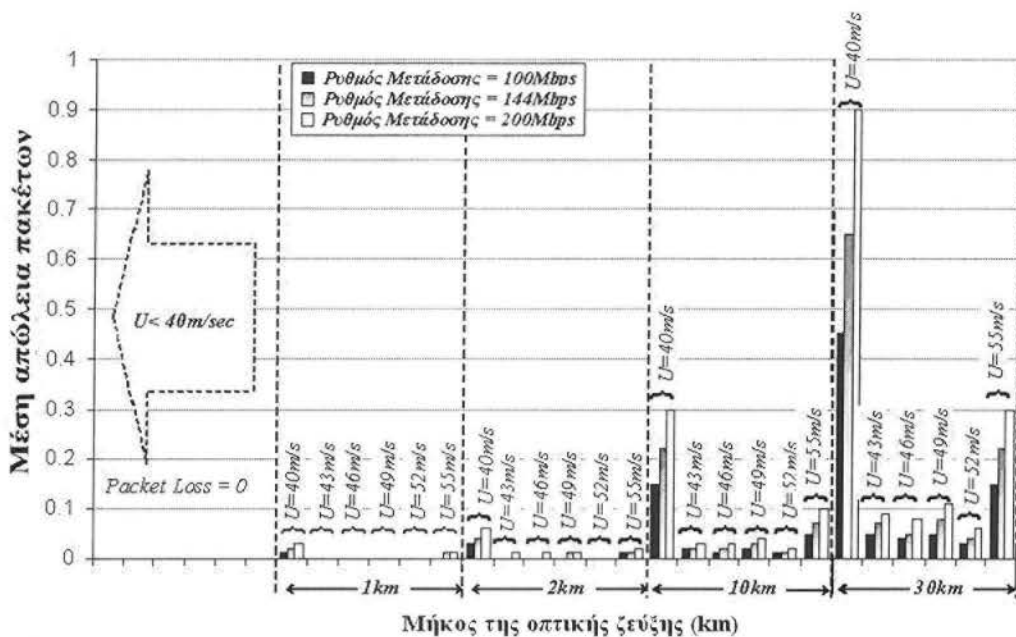
Όπως φαίνεται στην εικόνα 7-2, στην απλή περίπτωση διαπομπής, η απώλεια πακέτων είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας του χρήστη και αυξάνεται σχεδόν γραμμικά σε σχέση με το μήκος της οπτικής ζεύξης αλλά και σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, για υπηρεσίες μετάδοσης τηλεοπτικού σήματος υψηλής ανάλυσης (HDTV) στα 144 Mbps, παρουσιάζεται μέση απώλεια πακέτων ίση με δύο χαμένα πακέτα, για μήκος ίνας  $L = 2\text{km}$ . Αυτό το σενάριο θα μπορούσε να αντιστοιχεί στην υποδομή ενός δικτύου RoF εσωτερικού χώρου για κάποιο μικρό συνεδριακό κέντρο ή κάποιο αεροδρόμιο. Στην περίπτωση που η ίδια υπηρεσία απαιτείται για μήκος οπτικής ζεύξης ίσο με  $L = 30\text{km}$ , τότε η απώλεια πακέτων που παρουσιάζεται αυξάνει σημαντικά, φτάνοντας τα 25 χαμένα πακέτα δεδομένων.



Εικόνα 7-2: Διάγραμμα μέσης απώλειας πακέτων προς το μήκος της οπτικής ζεύξης για την απλή περίπτωση διαπομπής

Η κατάσταση αλλάζει σημαντικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης. Όπως δείχνει η εικόνα 7-3, η απώλεια πακέτων είναι μηδενική ανεξάρτητα από τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και την απόσταση της οπτικής ζεύξης μεταξύ του Κέντρου Ελέγχου και του σταθμού βάσης, όσο ο χρήστης κινείται με ταχύτητα χαμηλότερη από 40 m/sec. Η απώλεια πακέτων αυξάνεται μόνο όταν η ταχύτητα του χρήστη ξεπεράσει τα 40 m/sec, αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό από ότι στην απλή περίπτωση που είδαμε παραπάνω. Πέρα από αυτή την τιμή, η μέση απώλεια πακέτων φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα του κινητού τερματικού και να αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το μήκος της οπτικής ζεύξης  $L$  και τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων  $B$ .

Στο διάγραμμα βλέπουμε ότι για τις ίδιες τιμές μετάδοσης των δεδομένων και απόστασης της οπτικής ζεύξης, οι μεγαλύτερες τιμές απώλειας πακέτων εμφανίζονται για ταχύτητα ίση με 40 m/sec. Πέρα από αυτή την τιμή, η μέση τιμή της απώλειας πακέτων παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα για όλους του συνδυασμούς  $L$ ,  $B$  και  $V$  και είναι σχεδόν πάντα μικρότερη από 0.3, φτάνοντας την μέγιστη τιμή της 0.9 μόνο για τις τιμές  $V = 40$  m/sec,  $L = 30$  km και  $B = 200$  Mbps.



Εικόνα 7-3: Διάγραμμα μέσης απώλειας πακέτων προς το μήκος της οπτικής ζεύξης για την περίπτωση του αλγορίθμου Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης

Οι χαμηλές τιμές απώλειας πακέτων είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η διαδικασία της Εκτεταμένης Κυψέλης ενεργοποιείται πριν την είσοδο του χρήστη στην νέα κυψέλη, πράγμα που σημαίνει ότι ο χρήστης συνεχίζει να ακούει στην τρέχουσα κυψέλη ακόμα και μετά την αποστολή του μηνύματος ACK. Έτσι, τα πακέτα δεδομένων θα χαθούν μόνο εάν ο χρήστης φύγει από την τρέχουσα κυψέλη πριν την ολοκλήρωση της αναδιάταξης της Εκτεταμένης Κυψέλης. Ωστόσο, ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να ξεκινήσει η νέα κεραία την αποστολή των πακέτων δεδομένων, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (4), είναι μικρότερος από msec. Μέσα σε αυτό το μικρό χρονικό διάστημα, ο χρήστης έχει μετακινηθεί μόλις μερικά εκατοστά μακριά, πράγμα που σημαίνει ότι για να έχουμε απώλεια πακέτων θα πρέπει το κινητό τερματικό να βρίσκεται πολύ κοντά στα όρια της κυψέλης όταν στέλνει αίτηση για αναδιάταξη της Εκτεταμένης Κυψέλης. Το γεγονός αυτό μειώνει σημαντικά την πιθανότητα απώλειας πακέτων και είναι και ο λόγος για τον οποίο η μέση απώλεια πακέτων μεγιστοποιείται για ταχύτητα χρήστη ίση με 40 m/sec, η οποία αντιστοιχεί σε απόσταση διάδοσης ίση με ολόκληρο το μέγεθος της κυψέλης.





## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 8.1 Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, δώσαμε τον ορισμό ενός νέου αλγορίθμου, ο οποίος συντελεί στην καλύτερη και αποτελεσματικότερη διαδικασία της διαπομπής, τον αλγόριθμο της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης. Όπως είδαμε και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ο αλγόριθμος αυτός είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από τις υπάρχουσες τεχνολογίες και παρέχει καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες. Είδαμε πώς μπορούμε να επιτύχουμε μηδενικές απώλειες πακέτων και μηδενική πιθανότητα τερματισμού κλήσεων για ταχύτητες μέχρι και 40 m/sec, δηλαδή περίπου 144 km/h. Αλλά ακόμα και για μεγαλύτερες ταχύτητες είδαμε ότι τα αποτελέσματα ήταν πολύ πιο ικανοποιητικά από τα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου είναι η ανεξαρτησία της πιθανότητας τερματισμού μίας κλήσης και απώλειας πακέτων από την περιοχή επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Αυτό συμβαίνει, επειδή είναι τέτοια η δομή του αλγορίθμου, ώστε να μην επηρεάζεται παρά μόνο από την ταχύτητα του κινούμενου χρήστη, πράγμα που μας προσφέρει μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό ενός δικτύου επικοινωνιών.

Η ανεξαρτησία της πιθανότητας απώλειας πακέτων από την περιοχή επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών κυψελών προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα κυρίως σε δίκτυα εσωτερικών χώρων, όπου η οπτική επαφή μεταξύ κεραίας και χρήστη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Στους εσωτερικούς χώρους σχηματίζονται συνήθως στενές και κατευθυντικές περιοχές μετάβασης γύρω από παράθυρα και πόρτες και είναι πολύ συχνό το φαινόμενο της γωνίας του δρόμου. Με τη χρήση του αλγορίθμου Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης αποφεύγουμε αυτό το πρόβλημα δεδομένου ότι ο χρήστης θα βρίσκεται πάντα στην κεντρική κυψέλη της Εκτεταμένης Κυψέλης και θα μπορεί να διατηρεί τη σύνδεσή του ενεργή ακόμα και όταν παίρνει μία απότομη στροφή, ή βγαίνει έξω από το δωμάτιο.

Ο αλγόριθμος της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης μπορεί ακόμα να υποστηρίξει ευριζωνικές υπηρεσίες με υψηλή κινητικότητα, όπως φαίνεται και από την χαμηλή πιθανότητα διακοπής κλήσεων και απώλειας πακέτων για ρυθμούς μετάδοσης ίσους με 200Mbps και ταχύτητες χρήστη μέχρι και 50m/sec. Αυτά τα αποτελέσματα, σε συνδυασμό με τη χαμηλή απώλεια πακέτων ακόμα και για αποστάσεις μεγαλύτερες των 30km, τον καθιστούν κατάλληλο και για επικοινωνιακά συστήματα εξωτερικών χώρων σταθερής τροχιάς, όπως σιδηροδρομικές γραμμές, αυτοκινητόδρομοι και εθνικές οδοί.

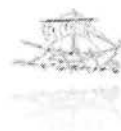
### 8.2 Συμπεράσματα και προοπτικές

Στα προηγούμενα κεφάλαια δείξαμε πως ο αλγόριθμος της Εκτεταμένης Κινούμενης Κυψέλης αποτελεί σημαντική καινοτομία για τα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών. Με την εισαγωγή του αλγορίθμου μπορούμε να αποφύγουμε κάποια από τα



προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα, αλλά και να παρέχουμε ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσίας προς τους χρήστες.

Όμως, ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να αντεπεξέλθει και για τυχόν μελλοντικές χρήσεις, εξαιτίας της τεχνολογίας RoF, πάνω στην οποία βασίζεται. Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλές ταχύτητες, σε επίπεδο gigabit, πράγμα που σημαίνει ότι θα μπορούν να αντεπεξέλθουν σε ταχύτητες που θα προσφέρουν οι μελλοντικές γενιές των δικτύων στα χρόνια που θα ακολουθήσουν. Επίσης, η τεχνολογία RoF, είναι ανεξάρτητη από πρωτόκολλα και ρυθμούς μετάδοσης, οπότε θα μπορεί να υιοθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί από οποιεσδήποτε τρέχουσες ή μελλοντικές τεχνολογίες.



## 9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ Θεολόγου Μ. Ε., “Δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2007
- ❖ Govind P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, John Wiley & Sons.Inc., 1997
- ❖ Nan Guo, Robert C. Qiu, Shaomin S. Mo, Kazuaki Takahashi, “*60-GHz Millimeter-Wave Radio: Principle, Technology and New Results*”, Hindawi Publishing Corporation, 2007
- ❖ H. S. Chung, S. H. Chang, J. D. Park, M.-J. Chu, K. Kim, “*Transmission of multiple HD-TV signals over a wired/wireless line millimeter-wave link with 60 GHz*”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, no. 11, pp. 3413-3418, Nov. 2007
- ❖ H. B. Kim, M. Emmelmann, B. Rathke, and A. Wolisz, “*A radio over fiber network architecture for road vehicle communication systems*”, *Proc. Veh. Technol. Conf.*, vol. 5, pp. 2920-2924, 2005.
- ❖ J. J. Vegas Olmos, Toshiaki Kuri, Ken-ichi Kitayama, “*Dynamic Reconfigurable WDM 60-GHz Millimeter-Waveband Radio-over-Fiber Access Network: Architectural Considerations and Experiment*”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25 No11. November 2007
- ❖ B .L. Dang, V. Prasad, I. Niemegeers, M. Garcia Larrode, A. Koonen, “*Toward a seamless communication architecture for in-building networks at the 60 GHz band*”, 31th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2006), 2006
- ❖ S.T.S. Chia, “*The control of handover initiation in microcells*”, IEEE Vehicular Technology Conference, St\_Louis, May 1991
- ❖ Filippo Giannetti, Marco Luise, Ruggero Reggiannini, “*Mobile and Personal Communications in the 60 GHz band: A survey*”, *Wireless and Personal Communications*, 10, 1999
- ❖ M. Garcia Larrode, A. M. J. Koonen, J. J. Vegas Olmos, G. J. Rijckenberg, L. Dang Bao, I Niemegeers, “*Transparent transport of wireless communication signals in Radio over Fiber systems*”, NOC 2005, 2005
- ❖ 7330 ISAM FTTN (ETSI) - <http://www.alcatel-lucent.com/products/7330-isam-fttn-etsi>
- ❖ B. L. Dang et al., “*Radio-over-Fiber based architecture for seamless wireless indoor communication in the 60 GHz band*,” *Elsevier Comput. Commun.*, vol. 30, no. 18, 2007, pp. 3598-3613.
- ❖ L. Bart et al., “*Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers [Topics in Optical Commun.]*,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 2, pp. 56-62, 2007.
- ❖ C. Plenge and H. Hussmann, “*Handover algorithms for cellular communication systems using 60GHz*,” in *Proc. 6th IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, ‘Wireless: Merging onto the Inform. Superhighway’, 1995, pp. 1057.
- ❖ H.-C. Ji et al., “*Cost-effective radio-over-fiber systems employing phasemodulated*



- downlink and intensity-modulated uplink," in Proc. Conf. on Optical Fiber Communications, San Diego, 2009, pp. 1-3.
- ❖ Bien Van Quang et al., "A Survey on Handoffs — Lessons for 60 GHz Based Wireless Systems," Communications Surveys & Tutorials, IEEE , vol.14, no.1, pp.64-86, 2012.
  - ❖ B. L. Dang et al., "Radio-over-Fiber based architecture for seamless wireless indoor communication in the 60 GHz band," Elsevier Comput. Commun., vol. 30, no. 18, 2007, pp. 3598-3613.
  - ❖ C. D. Gavrilovich, "Broadband Communication on the Highways of Tomorrow," IEEE Commun. Mag., vol. 39, no. 4, Apr. pp. 146–154, 2001,
  - ❖ L. Bart et al., "Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers [Topics in Optical Commun.]," IEEE Commun. Mag., vol. 45, no. 2, pp. 56-62, 2007.
  - ❖ N. Pleros, K. Tsagkaris, N. D. Tselikas, "A moving extended cell concept for seamless communication in 60 GHz radio-over-fiber networks," IEEE Commun. Lett., vol. 12, no. 11, 2008, pp. 852-854.
  - ❖ K. Tsagkaris, N. D. Tselikas, N. Pleros, "A handover scheme based on moving extended cells for 60 GHz radio-over-fiber networks," in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC), Dresden, Germany, 1–5, (14–18 June 2009).
  - ❖ G. Kalfas, S. Markou, D. Tsiokos, Ch. Verikoukis, N. Pleros " Very High Throughput 60GHz wireless enterprise networks over GPON infrastructure", Optical-Wireless Integrated Technology for Systems and Networks Workshop, ICC 2013, Budapest, June 2013.
  - ❖ China Mobile Research Institute, "C-RAN The Road Towards Green RAN", Whitepaper, Oct. 2011
  - ❖ D. Lee, H. Seo, B. Clerckx, E. Hardouin, D. Mazzaresse, S. Nagata, and K. Sayana, "Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: deployment scenarios and operational challenges", IEEE Communications Magazine, 2012, pp.148-155.



B