



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πολλαπλή πρόσβαση σε δίκτυα BPL σύμφωνα με το πρότυπο  
IEEE 1901**

**Προσομείωση λειτουργίας TDMA**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θεοδώρα Σ. Μπρισίμη**

**Επιβλέπων :** Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Πολλαπλή πρόσβαση σε δίκτυα BPL σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1901

### Προσομοίωση λειτουργίας TDMA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοδώρα Σ. Μπρισίμη

**Επιβλέπων :** Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2011.

.....  
Π. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χ. Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γ. Φικιώρης

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....

Θεοδώρα Σ. Μπρισίμη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Θεοδώρα Μπρισίμη, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάλυση των σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης σε δίκτυα ευρυζωνικής μετάδοσης πληροφορίας μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (τεχνολογία BPL- Broadband over Power Liners ή PLC- Power Line Communications) και η προσομοίωση δικτύου που λειτουργεί με βάση το σχήμα TDMA. Η BPL τεχνολογία είναι αναδυόμενη και αποτελεί μία επιχειρησιακή και επιχειρηματική δραστηριότητα που τώρα αρχίζει να αναπτύσσεται. Το ίδιο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά τη δυνατότητα αυτοδιαχείρισης, ενώ παράλληλα οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν και ως πάροχοι ευρυζωνικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε κάθε είδους χρήστες με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Σημαντικό βήμα ανάπτυξης της BPL τεχνολογίας ήταν η έκδοση του IEEE 1901 προτύπου το Δεκέμβριο του 2010, στη μελέτη του οποίου βασίζεται κυρίως η θεωρητική ανάλυση στη διπλωματική αυτή.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη BPL τεχνολογία και τις εφαρμογές της καθώς και αναφορά στο ερευνητικό πρόγραμμα υλοποίησης BPL δικτύου στη Λάρισα. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του MAC στρώματος, λειτουργία του οποίου αποτελεί ο έλεγχος της πολλαπλής πρόσβασης των χρηστών στον κοινό BPL δίαυλο. Στο τρίτο κεφάλαιο εισάγονται οι όροι και τα στοιχεία οργάνωσης ενός BPL δικτύου σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1901, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία πρόσβασης και ο έλεγχος αυτής καθώς και τα σχήματα πρόσβασης TDMA και CSMA/CA που χρησιμοποιούνται για πρόσβαση στο μέσο σε περιόδους χωρίς ανταγωνισμό (δεν συμβαίνουν συγκρούσεις, εξασφάλιση QoS) και με ανταγωνισμό (συμβαίνουν συγκρούσεις, υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας) αντίστοιχα. Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται με χρήση του δικτυακού προσομοιωτή OPNET προσομοίωση δικτύου που λειτουργεί με βάση το TDMA και συγκεκριμένα με χρήση σκυτάλης (token-based) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τόσο για ένα βασικό σενάριο αναφοράς όσο και για σενάρια στα οποία μεταβάλλονται παράμετροι, όπως ο αριθμός των BPL μονάδων, ο αριθμός των χρηστών, η κατανομή των χρηστών, η τοποθεσία μίας κακής ζεύξης στο δίκτυο κ.α.

## Λέξεις κλειδιά

BPL    PLC    ευρυζωνική μετάδοση μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος    IEEE 1901  
TDMA    CSMA/CA    OPNET    στρώμα MAC



## **Abstract**

The aim of this dissertation is to analyze multiple access schemes in broadband over power line transmission networks (BPL technology- Broadband over Power Liners or PLC technology- Power Line Communications) and simulate a networks which operates according to TDMA scheme. BPL is an emerginf technology and consists an operational and business activity that is starting to develop nowadays. The electric grid network itself can be self- managed, while at the same time the electric power providers can operate as Internet Service Providers for all type of users with what this may imply. An important step in the development of BPL technology was the issuance of IEEE 1901 standard in December 2010, on which the study in this dissertation was based.

In the first section , BPL technology and its applications are introduced and the research program in BPL network implementation in Larissa is reviewed. In the second section, the MAC layer is described, whose operation consists of control of the medium access of users to the commol BPL channel. In the third section the terms and elements of the organization of a BPL network according to IEEE 1901 standard are introduced, while in the fourth section the access process and its control are described in detail. The TDMA and CSMA/CA multiple access schemes which are used for access to the medium in contention-free periods (no collisions occur, ensuring of QoS) and in contention periods (collisions occur, best effort services) respectively are also described. In the last section , with the use of OPNET network simulator, a TDMA and in particular a token-based network simulation is carried out and the results are presented for a benchmark reference scenario and also for scenario in which parameters such as the number of BPL units, the number of users, the distribution of users, the location of a bad link the network are changed.

## **Key words**

BPL PLC broadband over power line transmission networks IEEE 1901 TDMA  
CSMA/CA OPNET MAC layer





## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Παναγιώτη Κωττή, ο οποίος δεν εφείσθη κόπου και χρόνου ώστε το προϊόν της εργασίας αυτής να εμφανισθεί άρτιο από επιστημονικής και εκφραστικής πλευράς. Με το παράδειγμά του και τις προσωπικές του αξίες μου εμφύσησε τη διάθεση για ερευνητική εργασία μεταδίδοντας μου παράλληλα την επαγγελματική δεοντολογία που πρέπει να χαρακτηρίζει κάθε επιστήμονα. Η στήριξη του προς εμένα δεν περιορίστηκε μόνο στην επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας αλλά επεκτάθηκε κατά πολύπλευρο τρόπο και στα επόμενα βήματα μου που οδηγούν στις μεταπτυχιακές σπουδές.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω θερμότερες ευχαριστίες στους Υποψήφιους Διδάκτορες Πέτρο Παπαϊωάννου και Αγγελική Σαράφη για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Οι γνώσεις τους και η αγάπη τους για έρευνα συνεισέφεραν καθοριστικά στην περάτωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για την αγάπη τους, την αμέριστη συμπαράσταση τους και στήριξη κατά τη διάρκεια όλων αυτών των χρόνων καθώς και για την ενθάρρυνσή τους για τα μελλοντικά μου βήματα.



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
1. Εισαγωγή στην Τεχνολογία Ευρυζωνικής Πρόσβασης μέσω Ηλεκτρικού Δικτύου .....	17
1.1 Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω ηλεκτρικού δικτύου .....	17
1.2 Η πορεία της τεχνολογίας BPL μέχρι σήμερα .....	18
1.3 Η βασική ιδέα λειτουργίας.....	19
1.3 Κατηγοριοποίηση επικοινωνιών μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος.....	21
1.3.1 Επικοινωνίες χαμηλής (narrowband) και υψηλής (broadband) ταχύτητας.....	21
1.3.2 In-home και Access BPL .....	23
1.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας BPL.....	26
1.5 Το ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα.....	29
2. Γενική περιγραφή του στρώματος MAC .....	35
2.1 Στρώμα MAC.....	35
2.1.1 Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις του MAC στρώματος.....	36
2.1.2 Σχήματα πολλαπλής πρόσβασης.....	39
2.1.3 MAC πρωτόκολλα .....	41
3. Το IEEE 1901 Standard (2010).....	45
3.1 Οι ηλεκτρικές γραμμές ως τηλεπικοινωνιακός διάυλος .....	45
3.2 Στοιχεία οργάνωσης και αρχιτεκτονικής του ηλεκτρικού δικτύου- BSSs και Cells.....	47
3.3 Στοιχεία οργάνωσης και αρχιτεκτονικής του ηλεκτρικού δικτύου- DS και ESS .....	54
4. Το στρώμα MAC στο πρότυπο IEEE 1901 .....	61
4.1 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο .....	61
4.2 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο από τον BM.....	61
4.3 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο στα δίκτυα πρόσβασης.....	63
4.4 Προτεραιότητες.....	64
4.5 CSMA/CA.....	64
4.5.1 CSMA/CA βασισμένο σε υποδοχές ανάλυσης προτεραιότητας (PRS- based prioritized CSMA/CA) .....	66
4.5.2 CSMA/CA με προτεραιότητες βασισμένο στα χρονικά διαστήματα μεταξύ πλαισίων (IFS- based prioritized CSMA/CA).....	75

4.6	TDMA.....	91
5.	Προσομοίωση token-based δικτύου BPL και Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	99
5.1	Το μοντέλο του δικτύου.....	99
5.2	Το πρόγραμμα OPNET των προσομοιώσεων .....	103
5.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων βασικού μοντέλου .....	109
5.4	Σύγκριση σεναρίων.....	111
5.4.1	Μεταβλητό πλήθος μονάδων .....	111
5.4.2	Μεταβλητός αριθμός χρηστών- Κατανομή χρηστών στο cell .....	112
5.4.3	Αριθμός χρηστών ανά μονάδα (ίδιος σε όλες τις μονάδες) .....	113
5.4.4	Τοποθεσία κακής ζεύξης στο cell .....	114
	Βιβλιογραφία .....	117

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1: Χρησιμοποίηση συχνοτήτων στο τηλεφωνικό καλώδιο (DSL τεχνολογία).....	20
Εικόνα 1.2: Άθροισμα του διαμορφωμένου PLC σήματος και του σήματος ηλεκτρικής ισχύος (πχ 110V/60Hz).....	21
Εικόνα 1.3: Φάσμα θορύβου αντριστροφέα σε ηλεκτρική γραμμή .....	22
Εικόνα 1.4: Access BPL .....	24
Εικόνα 1.5: In-Home BPL .....	24
Εικόνα 1.6: Εφαρμογή του HOMEPLUG σε In-Home BPL .....	25
Εικόνα 1.7: Αυτοματοποιημένο σύστημα για οικιακή διαχείριση με χρήση PLC χαμηλής ταχύτητας .....	27
Εικόνα 1.8: PLC για υπηρεσίες σχετικές με την ενέργεια .....	27
Εικόνα 1.9: Υπηρεσίες BPL προς χρήστες με χρέωση .....	28
Εικόνα 1.10: Υπηρεσίες BPL προς την επιχείρηση ηλεκτρικής ενέργειας.....	28
Εικόνα 1.11: Το υβριδικό ασύρματο- BPL δίκτυο που αναπτύχθηκε στη Λάρισα (Ελλάδα) από τη ΔΕΗ, BPL μονάδες στην πρώτη γραμμή ΜΤ .....	29
Εικόνα 1.12: Το υβριδικό ασύρματο- BPL δίκτυο που αναπτύχθηκε στη Λάρισα (Ελλάδα) από τη ΔΕΗ, BPL μονάδες στην δεύτερη γραμμή ΜΤ .....	30
Εικόνα 1.13: Σχηματικό διάγραμμα του W- BPL δικτύου που αναπτύχθηκε στην περιοχή της Λάρισας (Ελλάδα) .....	31
Εικόνα 1.14: Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας του υβριδικού W- BPL δικτύου που υλοποιήθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα (Ελλάδα) .....	34
Εικόνα 2.1: Το περιβάλλον του BPL MAC στρώματος .....	36
Εικόνα 2.2: Δομή λογικού συστήματος διαύλου του BPL δικτύου .....	37
Εικόνα 2.3: Δομή του στρώματος MAC .....	37
Εικόνα 2.4: TDMA .....	39
Εικόνα 2.5: CDMA .....	41
Εικόνα 2.6: Εκρηκτική κίνηση δεδομένων και πολιτική σταθερής πρόσβασης .....	42
Εικόνα 2.7: Κατηγοριοποίηση των δυναμικών MAC πρωτοκόλλων .....	43
Εικόνα 3.1: Τα BSS .....	48
Εικόνα 3.2: Παραδείγματα PHYNET και BSS.....	49
Εικόνα 3.3: Στοιχεία ενός IEEE 1901 access cell.....	50
Εικόνα 3.4: Cell δικτύου πρόσβασης.....	51
Εικόνα 3.5: Subcell.....	52
Εικόνα 3.6: Τα DS και τα BM .....	55
Εικόνα 3.7: ESS .....	56
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα προγράμματος πρόσβασης στο μέσο σε ένα BSS.....	62
Εικόνα 4.2: Δραστηριότητα στο μέσο όταν μεταδίδεται μία MPDU ή ανιχνεύεται κατά την περίοδο ανταγωνισμού .....	67
Εικόνα 4.3: Δραστηριότητα στο μέσο όταν ένας σταθμός αποκλείεται από τη χρήση του μέσου κατά την περίοδο ανάλυσης προτεραιοτήτων .....	67
Εικόνα 4.4: Δραστηριότητα στο μέσο όταν υπάρχει λάθος στην MPDU ή κάποια σύγκρουση .....	68
Εικόνα 4.5: Ρύθμιση του VCS μετρητή.....	68
Εικόνα 4.6: Η βασική διαδικασία πρόσβασης .....	69

Εικόνα 4.7: Προτεραιότητα πρόσβασης στο κανάλι- Υποδοχές PRS .....	70
Εικόνα 4.8: Προτεινόμενη αντιστοίχιση επιπέδων προτεραιοτήτων κίνησης χρηστών και προτεραιοτήτων κίνησης στο κανάλι.....	71
Εικόνα 4.9: CW και DC ως συνάρτηση των BPC και Priority .....	72
Εικόνα 4.10: Η διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας (Random backoff procedure) ....	73
Εικόνα 4.11: Χρονικά διαστήματα μεταξύ των πλαισίων .....	74
Εικόνα 4.12: EIFS.....	75
Εικόνα 4.13: Καθορισμός του NAV από το RTS/CTS.....	76
Εικόνα 4.14: CMSA/CA και NAV .....	77
Εικόνα 4.15: Χρονικά διαστήματα μεταξύ πλαισίων .....	78
Εικόνα 4.16: Βασικός μηχανισμός CSMA/CA.....	78
Εικόνα 4.17: INTP ως συνάρτηση των UP και της κατάστασης του μέσου.....	81
Εικόνα 4.18: Σχέση μεταξύ CW και INTP .....	82
Εικόνα 4.19: Σχέση μεταξύ FLL και INTP.....	82
Εικόνα 4.20: Διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής περιόδου με δυναμικό έλεγχο των CW και FL...	84
Εικόνα 4.21: Κατάσταση του μέσου στο CMSA/CA με έλεγχο προτεραιότητας .....	85
Εικόνα 4.22: Η διαδικασία ελέγχου προτεραιότητας.....	86
Εικόνα 4.23: UP κατάσταση μέσου .....	87
Εικόνα 4.24: Καθορισμός διαστήματος αναμονής (Μονάδα: χρονική σχισμή- Slot time) .....	87
Εικόνα 4.25: Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης στο DVTP .....	89
Εικόνα 4.26: Υπολογισμός του NAV .....	90
Εικόνα 4.27: Διαδικασία επιβεβαίωσης λήψης.....	90
Εικόνα 4.28: Προγραμματισμένη μετάδοση.....	92
Εικόνα 4.29: Διαδικασία Schedule front loading.....	94
Εικόνα 4.30: Σταθερή εκχώρηση .....	96
Εικόνα 4.31: Δυναμική εκχώρηση.....	97
Εικόνα 5.1: Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης .....	99
Εικόνα 5.2: Ασύρματη σύνδεση χρηστών σε BPL μονάδα .....	100
Εικόνα 5.3: Τοπολογία αστέρα προσομοίωσης .....	100
Εικόνα 5.4: Τοπολογία διαύλου BPL δικτύων.....	101
Εικόνα 5.5: Σύνδεση μονάδων με το κεντρικό Hub στο δίκτυο της προσομοίωσης .....	101
Εικόνα 5.6: Ornet Fddi Palette .....	103
Εικόνα 5.7: Ornet Wireless LAN Advanced Palette .....	104
Εικόνα 5.8: Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης .....	104
Εικόνα 5.9: Ornet Node Model για BPL μονάδα.....	105
Εικόνα 5.10: Ornet Node Model για BPL server .....	106
Εικόνα 5.11: Ornet Process Model για MAC στη BPL μονάδα.....	107
Εικόνα 5.12: Κώδικας εξόδου από μία κατάσταση στο MAC της BPL μονάδας .....	107
Εικόνα 5.13: Application Configuration.....	108
Εικόνα 5.14: Χαρακτηριστικά FTP κίνησης.....	108
Εικόνα 5.15: Profile Configuration.....	109
Εικόνα 5.16: TCP throughput per Unit- Basic Model .....	110

Εικόνα 5.17: TCP throughput per Unit- Μεταβλητός αριθμός μονάδων .....	111
Εικόνα 5.18: TCP throughput per Unit- Κατανομή χρηστών στο cell.....	112
Εικόνα 5.19: TCP throughput per Unit- Μεταβλητός αριθμός χρηστών ανά μονάδα.....	113
Εικόνα 5.20: TCP throughput per Unit- Τοποθεσία κακής ζεύξης στο cell .....	114





# 1. Εισαγωγή στην Τεχνολογία Ευρυζωνικής Πρόσβασης μέσω Ηλεκτρικού Δικτύου

## 1.1 Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω ηλεκτρικού δικτύου

Η ευρυζωνική μετάδοση πληροφορίας μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος ή αλλιώς η τεχνολογία **Broadband over Power Lines (BPL)** όπως ονομάζεται (συναντάται και με τους όρους **PLC**- Powerline Communications, **PLT**- Powerline Telecommunications, **BPLC**- Broadband Powerline Communications), είναι μία αναδυόμενη τεχνολογία η οποία παρέχει σύνδεση υψηλής ταχύτητας στο Internet για το γραφείο ή το σπίτι μέσω σύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι γραμμές ηλεκτρικής ισχύος, εκτός από τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν ταυτόχρονα να μεταδώσουν πληροφορία με ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υπερβεί, προς το παρόν θεωρητικά, τα 200 Mbps στο φυσικό επίπεδο. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον γύρω από αυτή την τεχνολογία εστιάζεται στο γεγονός ότι πρακτικά κάθε σπίτι ή γραφείο είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο και έχει εγκατεστημένες ηλεκτρικές καλωδιώσεις. Έτσι, οποιοσδήποτε μηχανισμός που παρέχει τη δυνατότητα να μεταδώσει δεδομένα σε υψηλούς ρυθμούς πάνω από το ηλεκτρικό δίκτυο, έχει τη δυνατότητα να παρέχει μία μέθοδο πρόσβασης στο Internet πραγματικά από οποιοδήποτε σημείο.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας ευρυζωνικής πρόσβασης μέσω ηλεκτρικού δικτύου εξυπηρετεί και άλλους σκοπούς [8]. Ενώ η ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο μπορεί να αποτελέσει κύρια εφαρμογή των συστημάτων BPL, το πλήθος των πιθανών εφαρμογών που μπορούν να εξυπηρετηθούν είναι μεγάλο και αποτελεί μία επιχειρησιακή και επιχειρηματική δραστηριότητα που τώρα αρχίζει να αναπτύσσεται. Τα οφέλη από την αναμενόμενη εγκατάσταση των συστημάτων BPL επί του δικτύου μέσης τάσης είναι άμεσα και έμμεσα. Το ίδιο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά τη δυνατότητα αυτοδιαχείρισης, ενώ παράλληλα οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν και ως πάροχοι ευρυζωνικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε κάθε είδους χρήστες με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής και παραδείγματα υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν αναπτύσσονται αργότερα στο κεφάλαιο.

## 1.2 Η πορεία της τεχνολογίας BPL μέχρι σήμερα

Η αρχή στην τεχνολογία BPL έγινε πριν από περίπου ογδόντα χρόνια όπου και επετεύχθη παράλληλη μετάδοση ενέργειας και δεδομένων χωρίς απώλειες σε έναν ικανοποιητικό βαθμό. Ωστόσο, δεν θεωρήθηκε τότε ως ένα ικανοποιητικό μέσο επικοινωνίας λόγω της χαμηλής ταχύτητας και του μεγάλου κόστους ανάπτυξης σε σύγκριση με τις υπηρεσίες που παρείχε. Τα τελευταία χρόνια, οι νέες ισχυρές τεχνικές διαμόρφωσης, οδήγησαν την BPL τεχνολογία στο να θεωρείται ως ένας ρεαλιστικός και πρακτικός τρόπος επικοινωνίας.

Οι τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί για μετάδοση δεδομένων στις ηλεκτρικές γραμμές είναι α) η CFS (Carrier Frequency System) και β) η RCS (Ripple Carrier Signaling) [2]. Η CFS χρησιμοποιείται κυρίως στην ΥΤ σε συχνότητες 15- 500 kHz για βελτίωση της λειτουργικότητας. Η RCS χρησιμοποιείται κυρίως στη ΜΤ και στη ΧΤ, όπου η ύπαρξη πολλών συνδέσεων γραμμών και τα διαφορετικά είδη φυσικών μέσων μετάδοσης καθιστούν την CFS μη ικανή για αποτελεσματική μετάδοση της απαραίτητης πληροφορίας. Τα RCS συστήματα λειτουργούν σε συχνότητες μικρότερες από 3 kHz και χρησιμοποιούνται κυρίως για διαχείριση φορτίου, απομακρυσμένες μετρήσεις και έλεγχο και για υπηρεσίες έξυπνου δικτύου (smart grid).

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι εξελίξεις στην επεξεργασία σήματος και οι προσπάθειες για προτυποποίηση από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για Ηλεκτροτεχνική Προτυποποίηση (European Committee for Electrotechnical Standardization) επέτρεψαν τη χρήση δικτύων επικοινωνιών χαμηλής ταχύτητας μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (narrowband power line communications- PLC). Επιπλέον οι προσπάθειες για προτυποποίηση των PLC επικοινωνιών από άλλους οργανισμούς, όπως η Federal Communication Commission (FCC) και η European Telecommunications Standards Institute (ETSI), απέφεραν πολύ θετικά αποτελέσματα όσον αφορά τα θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility- EMC), που είναι θεμελιώδες ζήτημα στις εφαρμογές PLC. Προσπάθειες προτυποποίησης που συνέβαλαν καθοριστικά στην προώθηση της τεχνολογίας έγιναν και από τον ευρωπαϊκό οργανισμό OPERA (Open PLC European Research Alliance). Ο HOMELUG, ένας άλλος οργανισμός προτυποποίησης, εξέδωσε ένα πρότυπο στις αρχές του αιώνα. Η εξέλιξη του προτύπου αυτού τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλει σημαντικά στην εξέλιξη των BPL συστημάτων. Σε αντίθεση με τις επικοινωνίες PLC χαμηλής ταχύτητας (narrowband PLC) που χρησιμοποιούν συχνότητες 9- 140 kHz, οι ευρυζωνικές επικοινωνίες PLC (broadband PLC)

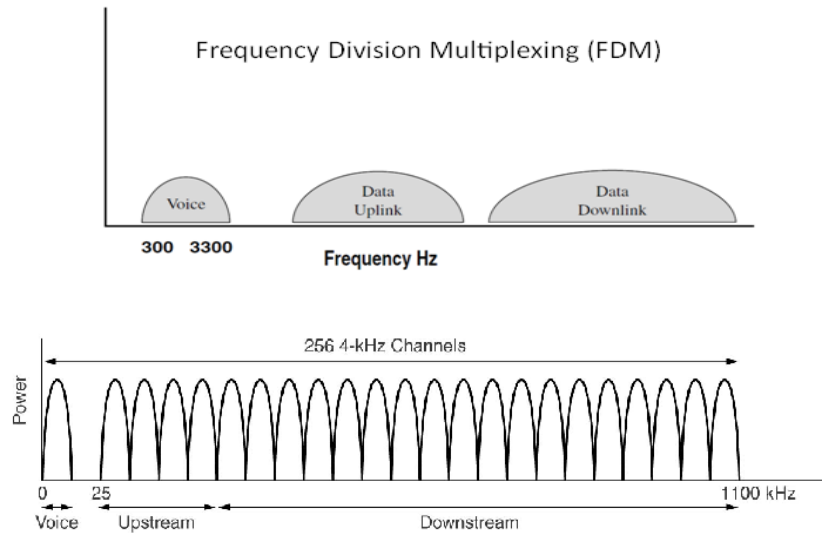
χρησιμοποιούν συχνότητες στην περιοχή 1- 34 MHz [11], προσφέροντας υπηρεσίες επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και ταυτόχρονα ένα πλήθος εφαρμογών προς την κατεύθυνση του έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου.

Μέχρι και σήμερα πλήθος εταιρειών προσπαθεί για την όσο το δυνατό καλύτερη μετάδοση δεδομένων σε καλώδια ρεύματος σε υψηλότερες ακόμα συχνότητες με όσο το δυνατόν μικρότερη απόσβεση και ποσοστό σφαλμάτων. Στις 30 Δεκεμβρίου 2010 η Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) εξέδωσε το πρότυπο P 1901 όπου υπάρχουν οι προδιαγραφές για το Φυσικό Στρώμα και το Medium Access Control (MAC) Στρώμα. Το πρότυπο αυτό αναμένεται να είναι η βάση για την περαιτέρω εξέλιξη και εμπορική υλοποίηση των BPL επικοινωνιών.

### **1.3 Η βασική ιδέα λειτουργίας**

Η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων πάνω από το ηλεκτρικό δίκτυο κατά πολλούς τρόπους είναι βασισμένη στην ιδέα με την οποία οι τηλεφωνικές εταιρίες παρατήρησαν ότι το ζεύγος καλωδίων που έφτανε μέχρι το σπίτι και το γραφείο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να μεταδώσει δεδομένα σε ρυθμούς άνω του 1 Mbps [10]. Οι τηλεφωνικές εταιρίες αναγνώρισαν το γεγονός ότι το ζεύγος καλωδίων μπορούσε να υποστηρίξει συχνότητες μέχρι περίπου 1Mbps. Επειδή μία τηλεφωνική συνομιλία χρησιμοποιεί περίπου 3 kHz από το διαθέσιμο εύρος, είναι δυνατή η μετάδοση δεδομένων με διαμόρφωση σε συχνότητες πάνω από αυτές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της φωνής. Αυτή η τεχνική, με την οποία η φωνή μεταδίδεται σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, ενώ τα δεδομένα χρησιμοποιώντας διαμόρφωση μεταδίδονται σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων, αναφέρεται ως «πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας» (frequency domain multiplexing- FDM) και χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη των DSL και καλωδιακών μόντεμ τεχνολογιών.

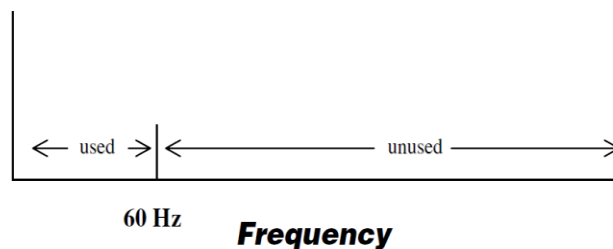
**Εικόνα 1.1: Χρησιμοποίηση συχνοτήτων στο τηλεφωνικό καλώδιο (DSL τεχνολογία)**



Πηγή: [10]

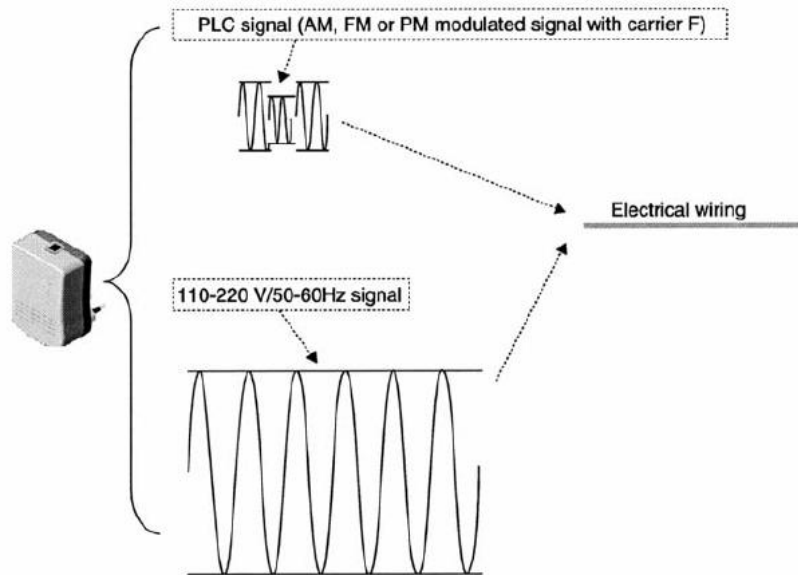
Κατά παρόμοιο τρόπο η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος (alternating current- AC) είναι 60 Hz στη Βόρεια Αμερική και 50 Hz στην Ευρώπη και σε πολλές άλλες περιοχές ανά τον κόσμο. Αυτό σημαίνει ότι, παρόμοια με τον τοπικό βρόχο μίας τηλεφωνικής εταιρίας, οι ηλεκτρικές γραμμές έχουν πολλές συχνότητες διαθέσιμες για χρησιμοποίησή τους για άλλους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης και της μετάδοσης δεδομένων. Για παράδειγμα σε μία γραμμή στη Βόρεια Αμερική (όπου επομένως η συχνότητα μετάδοσης του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι τα 60 Hz), οι συχνότητες πάνω από τα 60 Hz είναι αχρησιμοποίητες. Έτσι, η εξέλιξη της μετάδοσης δεδομένων στις αχρησιμοποίητες συχνότητες των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς βασίζεται στις ίδιες αρχές που επέτρεψαν στην DSL τεχνολογία να παρέχει σε χιλιάδες συνδρομητές πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στον παγκόσμιο ιστό.

**Εικόνα 1.2: Χρησιμοποίηση συχνοτήτων στην ηλεκτρική γραμμή (BPL τεχνολογία)**



Πηγή: [10]

Εικόνα 1.2: Άθροισμα του διαμορφωμένου PLC σήματος και του σήματος ηλεκτρικής ισχύος (πχ 110V/60Hz)



Πηγή: [12]

### 1.3 Κατηγοριοποίηση επικοινωνιών μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος

#### 1.3.1 Επικοινωνίες χαμηλής (narrowband) και υψηλής (broadband) ταχύτητας

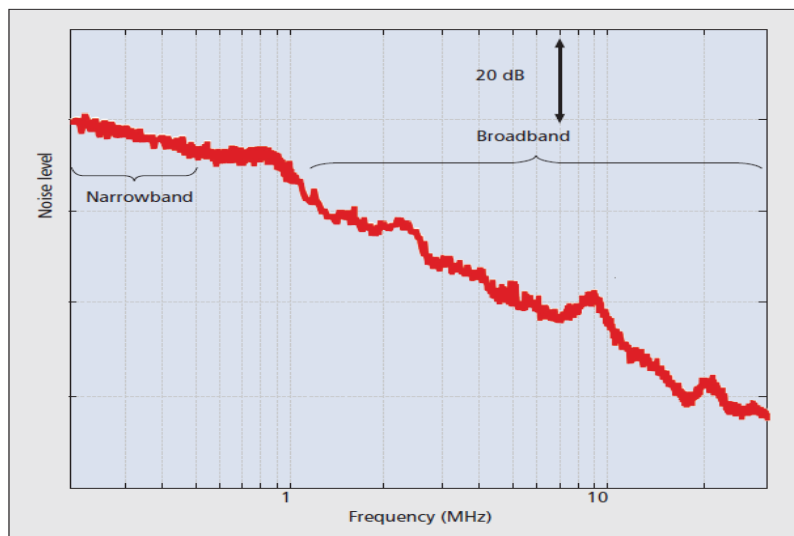
Οι επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος (Power Line Communications- PLC) χρησιμοποιούν το υπάρχον δίκτυο διανομής ενέργειας για μετάδοση δεδομένων και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες με κριτήριο τον τρόπο εκμετάλλευσης του τμηματοποιημένου εύρους ζώνης τους [8]:

- **Χαμηλής ταχύτητας επικοινωνίες (narrowband or low-speed PLC)**, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των λίγων Kbps. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση οικιακού εξοπλισμού σε μία οικία, για σηματοδότηση, για αντιμετώπιση προβλημάτων, κλπ. Είναι μία πλήρως αναπτυγμένη και προτυποποιημένη τεχνολογία. Στην Ευρώπη προτυποποιήθηκε από το CENELEC (Comite Européen de Normalisation ÉLECTrotechnique) EN 50065. Στην εφαρμογή αυτή εκχωρήθηκε η ζώνη συχνοτήτων από 3 kHz έως 148.5 kHz.

- **Υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες (broadband or high-speed PLC)**, με ρυθμούς δεδομένων από 1 Mbps και άνω. Οι επικοινωνίες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα σύνδεσης είτε στο Διαδίκτυο είτε σε LAN (Local Area Network) δίκτυα υπολογιστών και πολυμεσικού εξοπλισμού μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται το DSL (Digital Subscriber Line- ψηδιακή συνδρομητική γραμμή), διαποδιαμορφωτές καλωδίων (cable modems), δρομολογητές (routers), συσκευές ήχου, κάμερες ασφαλείας, τηλέφωνα IP, ηλεκτρονικοί προβολείς εικόνων (electronic picture frames) και κονσόλες παιχνιδιών (gaming consoles).

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των επικοινωνιών χαμηλής και υψηλής ταχύτητας είναι το εύρος ζώνης και οι συχνότητες φέροντος που χρησιμοποιούν [1]. Στο διάγραμμα της Εικόνας 1.3 φαίνεται το τυπικό φάσμα θορύβου ενός αντιστροφέα (inverter noise spectrum) που μπορεί να βρεθεί στις ηλεκτρικές γραμμές. Οι χαμηλής ταχύτητας επικοινωνίες συνήθως χρησιμοποιούν φέρουσες συχνότητες κάτω από τη ζώνη συχνοτήτων AM της Αμερικής (<500 kHz). Σε αυτές τις συχνότητες το υψηλό επίπεδο θορύβου ελαττώνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Οι γρήγορης ταχύτητας επικοινωνίες απαιτούν πολύ καλύτερες τιμές σηματοθορυβικού λόγου (signal-to-noise ratio- SNR) και συνήθως χρησιμοποιούν συχνότητες μεταξύ 2 και 30 MHz, όπου ο θόρυβος τείνει να είναι λιγότερος.

**Εικόνα 1.3: Φάσμα θορύβου αντιστροφέα σε ηλεκτρική γραμμή**



Πηγή: [1]

Οι υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες όχι μόνο βελτιώνουν τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αλλά εξασφαλίζουν και καλύτερες αποστάσεις μετάδοσης, καλύτερη σύζευξη σε διακοπές κυκλώματος και μεταξύ γραμμών.

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας BPL, οι οποίες θα αναφερθούν και αργότερα, όπως για παράδειγμα το έξυπνο δίκτυο (smart grid), χρειάζονται 100% ακριβή ανταλλαγή δεδομένων. Το σύστημα θα πρέπει να είναι εμπορικό (commercial grade) και πολύ σταθερό. Οι ευρυζωνικές επικοινωνίες PLC είναι ικανές να διαλέξουν το καλύτερο από πολλά φέροντα που υποστηρίζονται σε μία ευρύτερη (2-30 MHz) ζώνη, μία ποικιλία από τεχνικές διαμόρφωσης που προσαρμόζονται στον σηματοθορυβικό λόγο του καναλιού και έναν επιλεκτικό αυτόματο μηχανισμό ερώτησης απάντησης (Automatic Repeat-reQuest- ARQ) με σκοπό να επιτευχθεί μία σταθερή ζεύξη. Επιπλέον, όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός κόμβων, οι ευρυζωνικές επικοινωνίες μπορεί να χρειάζεται να καταναείμουν ζώνες μικρότερου εύρους σε κάθε κόμβο χωριστά.

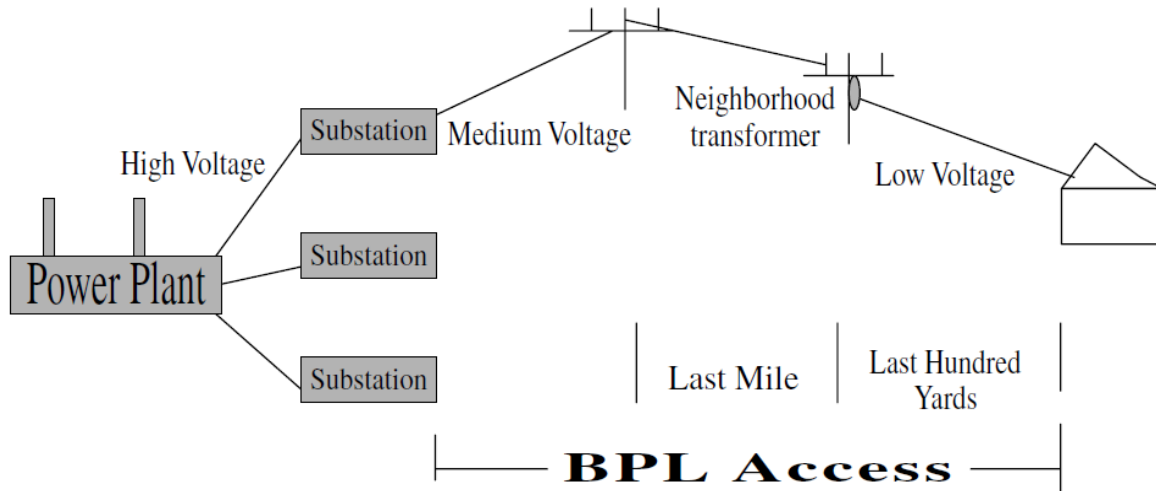
Για εφαρμογές πρόσβασης, όπως VoIP, εφαρμογές του ηλεκτρικού δικτύου και περιήγηση στο Internet, μπορεί να χρειάζονται διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service- QoS), όταν αυτές οι εφαρμογές ανταγωνίζονται για εύρος στο ίδιο μέσο. Για παράδειγμα, κάποιες ροές πακέτων είναι ισοχρονισμένες ροές βίντεο ή ήχου και άλλες μπορεί να είναι ασύγχρονες ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου (real time data). Αυτά τα δεδομένα μπορεί να έχουν πολύ υψηλότερες απαιτήσεις σε εύρος σε σχέση με εφαρμογές του ηλεκτρικού δικτύου για να μοιραστούν το ίδιο μέσο.

Γενικά αναμένεται ότι περισσότερο απαιτητικές εφαρμογές και εμπορικές ευκαιρίες θα αναδειχθούν στο μέλλον. Επειδή παραδοσιακά οι εταιρίες του ηλεκτρικού δικτύου επενδύουν σε τεχνολογίες με τη λογική της μακροπρόθεσμης βάσης, είναι εύλογη η επιλογή μίας ευρυζωνικής PLC λύσης με περισσότερες δυνατότητες σε σχέση με την επικοινωνία χαμηλής ταχύτητας.

### 1.3.2 In-home και Access BPL

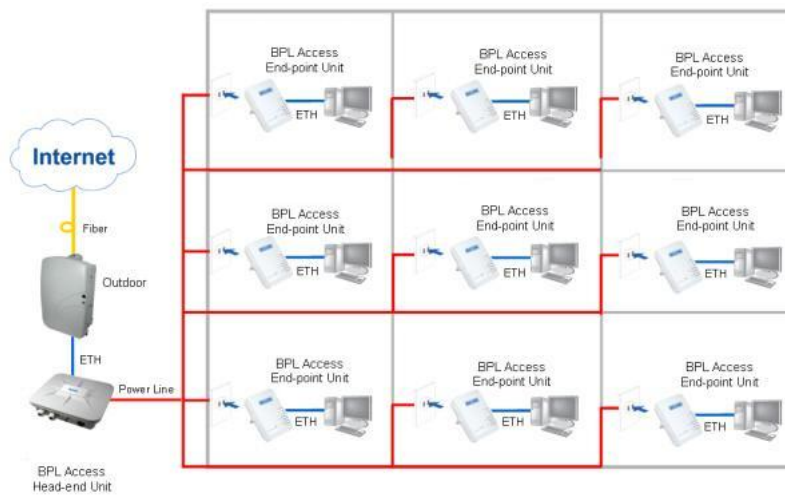
Όταν η τεχνολογία BPL χρησιμοποιείται για μετάδοση δεδομένων μέσα σε ένα κτήριο (σπίτι, γραφείο), τότε αναφέρεται ως **in-home BPL**. Όταν η μετάδοση δεδομένων γίνεται μέσω του ηλεκτρικού δικτύου, τότε αναφέρεται ως **access BPL**. Στη συνέχεια αναλύονται οι κύριες διαφορές μεταξύ in-home και access BPL [1].

Εικόνα 1.4: Access BPL



Πηγή: [10]

Εικόνα 1.5: In-Home BPL

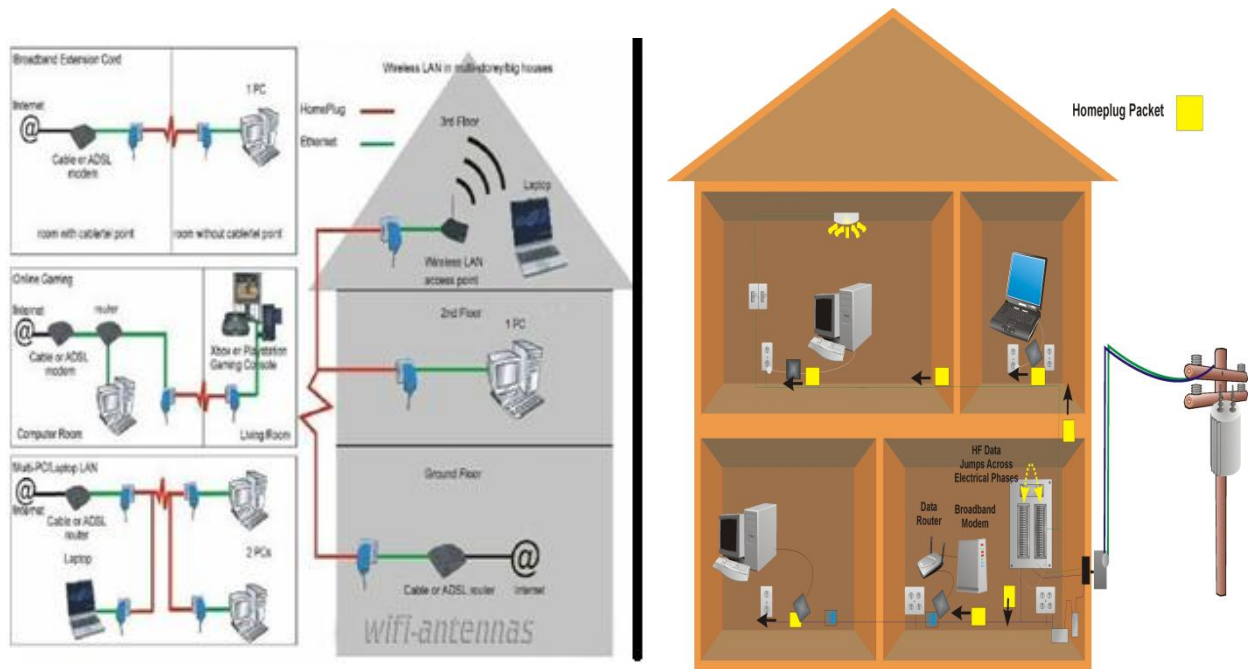


Πηγή: <http://pem.billion.com/images/Billion-bipac-2300-2103-application2.jpg>

(Η εικόνα έχει ελαφρώς τροποποιηθεί ώστε να μην περιέχει προϊόντα συγκεκριμένης εταιρίας)



Εικόνα 1.6: Εφαρμογή του HOMEPLUG σε In-Home BPL



Πηγή: 1) [http://www.allendale-stores.co.uk/wifi/images/homeplug\\_application.jpg](http://www.allendale-stores.co.uk/wifi/images/homeplug_application.jpg)

Πηγή: 2) [http://www.iptvmagazine.com/images/ag\\_PDN\\_Homeplug\\_low\\_res.jpg](http://www.iptvmagazine.com/images/ag_PDN_Homeplug_low_res.jpg)

Τα δίκτυα που έχουν στηθεί εντός ενός κτηρίου είναι συγκριτικά απλούστερα και μικρότερα. Η απόσταση μεταξύ των σταθμών είναι γενικά μικρή και η τοπολογία είναι συνήθως αστεροειδής ή δενδρική. Συνάρτηση επανάληψης (repeating function) σπάνια χρειάζεται και όταν γίνεται αυτό, ένας απλός επαναλήπτης μεταξύ των τελικών σημείων είναι αρκετός. Όλες οι συσκευές στο δίκτυο συνήθως ανήκουν και είναι υπό τη διαχείριση του ιδιοκτήτη.

Είναι πολύ μεγαλύτερη πρόκληση να βρεθούν λύσεις για τα access BPL δίκτυα μιας και δεν έχουν οριστική δομή. Μπορούν επίσης να περιέχουν δεκάδες, εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες από σταθμούς που βρίσκονται υπό τον ίδιο λογικό διαχειριστή δικτύου. Οι διαφορετικές τοπολογίες των ηλεκτρικών δικτύων μπορεί να είναι δενδρική (tree), πλεκτή / πλήρως διασυνδεδεμένη (mesh), δαχτυλιδιού (ring) ή κάποια υβριδική δομή που συνδυάζει τις τρεις προηγούμενες. Λύσεις για τα access BPL δίκτυα πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτες, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν όλες τις δυνατές τοπολογίες. Τέτοιο ευέλικτοι μηχανισμοί αυτοματισμού και βελτιστοποίησης χρειάζεται να ενσωματωθούν στα προϊόντα με σκοπό κάθε

σταθμός να μπορεί να προσαρμοστεί και να ξεπεράσει ζητήματα που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη τοπολογία, καθώς και να απλοποιηθεί η διαδικασία εγκατάστασης του σταθμού.

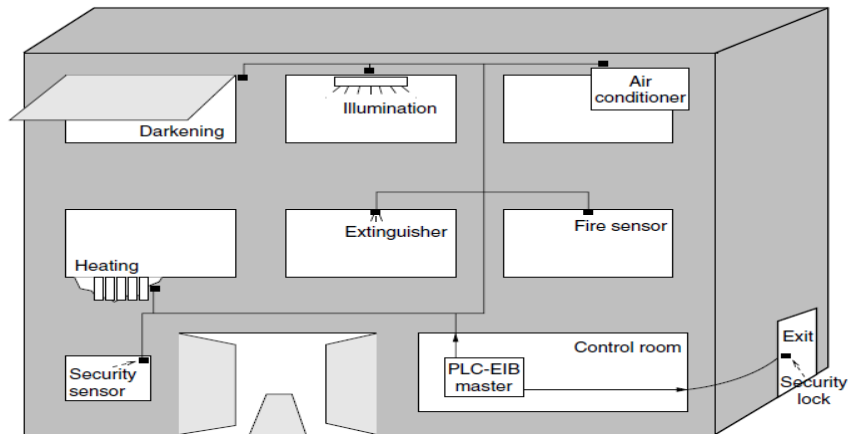
Τα δυναμικά χαρακτηριστικά των access δικτύων είναι μία άλλη πρόκληση. Ο αριθμός των πελατών, ο αριθμός των τερματικών σταθμών και η τοποθεσία των συσκευών (π.χ. ηλεκτρικά αυτοκίνητα) μπορούν να ποικίλουν στον χρόνο. Το ίδιο το δίκτυο μπορεί να αλλάζει με τον χρόνο λόγω ηλεκτρικών διακοπών που ανοίγουν και κλείνουν. Επιπλέον, η αντίσταση της γραμμής και οι εξωτερικές παρεμβολές μπορούν επίσης να επηρεάσουν το διαθέσιμο εύρος. Αυτές οι προκλήσεις χρειάζονται επεκτάσιμες και δυναμικές λύσεις, οι οποίες είναι πολύ μακριά από τις απαιτήσεις ενός in-home BPL δικτύου.

Ως αποτέλεσμα, η στοίβα πρωτοκόλλων για το access δίκτυο πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζει γενικές τοπολογίες, μεγάλο αριθμό διευθύνσεων γειτονικών και τελικών κόμβων, και γρήγορη επανάληψη ενώ παράλληλα πρέπει να προσαρμόζεται σε δυναμικές αλλαγές.

#### 1.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας BPL

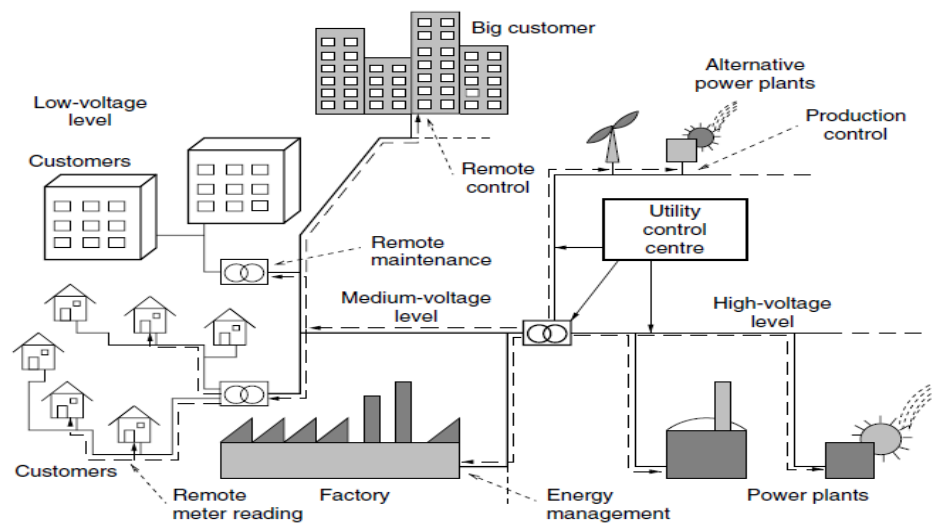
Παραδείγματα υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν μέσω των δικτύων BPL [8] είναι οι υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας που περιλαμβάνουν από ψυχαγωγία και τηλεφωνία VoIP (Voice over Internet Protocol) –εφαρμογές που έχουν ήδη υλοποιηθεί σε διάφορα συστήματα BPL– μέχρι λειτουργίες οικιακής διαχείρισης (home management functions), διαχείριση ασφαλείας (security management) και διαχείριση ενέργειας (energy management). Τα συστήματα BPL μπορούν να χρησιμεύσουν ως ο ενδιάμεσος μεταξύ των πελατών και των εταιριών ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ως υπόβαθρο για την εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών για λογαριασμό των πελατών. Με χρήση της τεχνολογίας BPL μπορούν να μεταδοθούν χρήσιμες πληροφορίες στον τελικό καταναλωτή/χρήστη, όπως τιμές ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (energy prices), λογαριασμοί κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και στοιχεία ενεργειακής χρήσης (billing and energy use data), καιρικές προβλέψεις (weather forecasts) κλπ ενώ ταυτόχρονα μπορούν αν ληφθούν αυτόματες ή προγραμματισμένες αποφάσεις που αφορούν ή προέρχονται από τους πελάτες, όπως σκόπιμη διακοπή φορτίων (load shedding), ρυθμίσεις θερμοστατών (thermostat settings) κλπ. Οι πελάτες αποκτούν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν και να αλληλεπιδράσουν με το δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας στο βαθμό που επιθυμούν.

Εικόνα 1.7: Αυτοματοποιημένο σύστημα για οικιακή διαχείριση με χρήση PLC χαμηλής ταχύτητας



Πηγή: [11]

Εικόνα 1.8: PLC για υπηρεσίες σχετικές με την ενέργεια



Πηγή: [11]

Η χρήση των συστημάτων BPL μπορεί να βελτιστοποιήσει τις υπάρχουσες λειτουργίες του ηλεκτρικού δικτύου (utility-based functions), γεγονός το οποίο με τη σειρά του μπορεί να βελτιώσει την επιχειρησιακή εφαρμογή των συστημάτων BPL για τους καταναλωτές ενθαρρύνοντας έτσι την επέκταση για ευρυζωνική χρήση. Τα εμπορικά συστήματα BPL περιλαμβάνουν ήδη εφαρμογές ηλεκτρικού δικτύου (utility applications).

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας BPL στη MT παρουσιάζονται στους πίνακες των Εικόνων 1.9 και 1.10 [8], [5].

### **Εικόνα 1.9: Υπηρεσίες BPL προς χρήστες με χρέωση**

#### **Εφαρμογές BPL και υπηρεσίες**

##### **Υπηρεσίες πελατών με χρέωση**

Τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου (VoIP)
Αυτόματη απεικόνιση (automated monitoring) και έλεγχος εξοπλισμού (control of end-use equipment), συμπεριλαμβανομένης και της αποστολής εντολών
Λογαριασμοί και δεδομένα κατανάλωσης (Billing and energy consumption data)
Παρακολούθηση ασφαλείας σε υποδομές και κτίρια και αναφορά κινήσεων (Real-time security monitoring/reporting)
Αυτόματη ανίχνευση αποθεματικών διαφορών αγαθών όπως αποθέματα καυσίμων (Automated tracking of various goods such as fuel stocks)
Δυναμική πληροφόρηση για τιμολόγια (Dynamic price information)
Βίντεο κατόπιν ζήτησης (Video on demand)
Παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο (Real-time internet-based games)
Παροχή πενταπλής δυνατότητας με μια σύνδεση δηλαδή σταθερή και κινητή τηλεφωνία, ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, τηλεόραση και Έξυπνο Δίκτυο (Quintuple game through the power grid)

Πηγή: [8], [5]

### **Εικόνα 1.10: Υπηρεσίες BPL προς την επιχείρηση ηλεκτρικής ενέργειας**

#### **Εφαρμογές BPL και υπηρεσίες**

##### **Διαχείριση δικτύου**

Αυτόματη ανάγνωση μετρητών (Automated meter reading)
Αυτόματη σύνδεση/αποσύνδεση φορτίων (Automated load connection/disconnection)
Απεικόνιση ποιότητας ενέργειας (Power quality monitoring)
Απεικόνιση δεδομένων του δικτύου διανομής (Distribution system data monitoring)
Έλεγχος φορτίου/ζήτησης (Load control/demand-side management)
Έλεγχος φωτισμού (Lighting detection and notification)
Εντοπισμός σφαλμάτων (Fault location)
Έλεγχος τάσης (Voltage control)
Δυναμικός καθορισμός τιμών (Dynamic pricing)
Κατανεμημένος έλεγχος διανομής (Distributed resource control and dispatch)
Διαχείριση προσωπικού αποκατάστασης βλαβών και συντήρησης (Crew management)
Παρακολούθηση για ασφάλεια του δικτύου (Security monitoring)

Πηγή: [8], [5]

### 1.5 Το ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα

Η περιοχή της Λάρισας είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα στην κεντρική Ελλάδα (5.390 km<sup>2</sup>) [2]. Ο πληθυσμός γύρω από το δοκιμαστικό υβριδικό δίκτυο W- BPL είναι περίπου 7.000. Η πλειοψηφία του πληθυσμού είναι αγρότες. Αυτό εξηγεί και τον μεγάλο αριθμό αρδευτικών συστημάτων που είναι εγκατεστημένα σε περιοχή έκτασης περίπου 900 km<sup>2</sup> και καταναλώνουν υψηλά ποσά ενέργειας που συχνά οδηγούν σε διακοπή λειτουργίας (blackouts) κατά τη θερινή περίοδο.

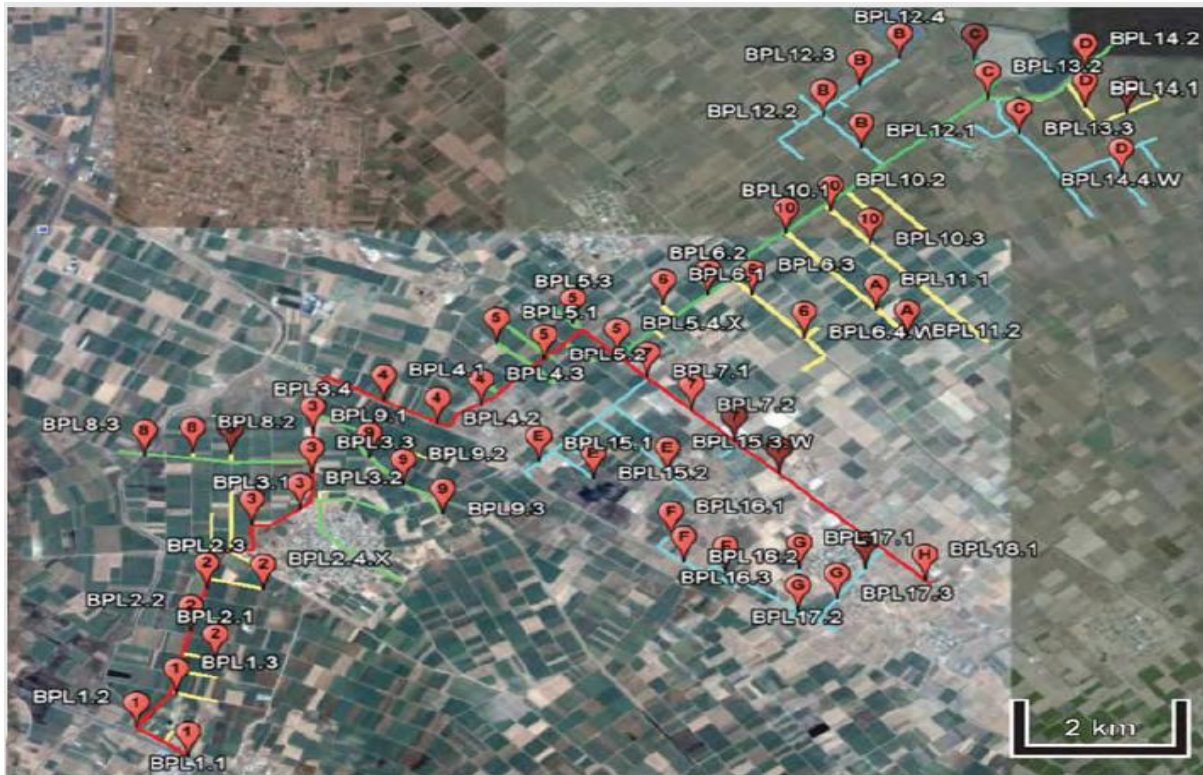
Το κίνητρο για αυτό το δοκιμαστικό ερευνητικό πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από την ελληνική επιχείρηση για το ηλεκτρικό δίκτυο (ΔΕΗ) ήταν η παρακολούθηση και ο έλεγχος εξ αποστάσεως του μεγάλου αριθμού αρδευτικών συστημάτων με σκοπό τη μείωση της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Το δοκιμαστικό υβριδικό ασύρματο- BPL (W-BPL) δίκτυο έχει εγκατασταθεί στη Λάρισα σε δύο γραμμές MT σε συνολικό μήκος 170 km. Το δίκτυο που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει 110 W-BPL κόμβους εγκατεστημένους σε κατάλληλες μεταξύ τους αποστάσεις σε αντίστοιχο αριθμό κόμβων MT, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.11.

**Εικόνα 1.11: Το υβριδικό ασύρματο- BPL δίκτυο που αναπτύχθηκε στη Λάρισα (Ελλάδα) από τη ΔΕΗ, BPL μονάδες στην πρώτη γραμμή MT**



Εικόνα 1.12: Το υβριδικό ασύρματο- BPL δίκτυο που αναπτύχθηκε στη Λάρισα (Ελλάδα) από τη ΔΕΗ, BPL μονάδες στην δεύτερη γραμμή MT



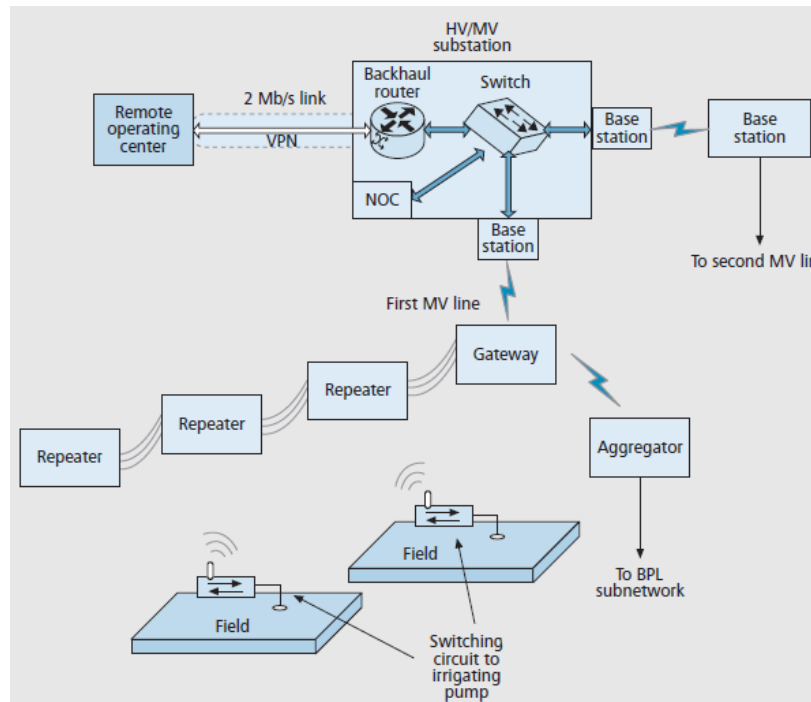
Πηγή: [2]

Το δίκτυο έχει χτιστεί σε τρία δικτυακά επίπεδα: α) W- BPL συγκεντρωτής κίνησης, β) W- BPL ενδιάμεσο μίλι, γ) W- BPL πρόσβαση στο τελευταίο μίλι.

Το πρώτο επίπεδο δικτύου είναι φυσικά τοποθετημένο μέσα στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και αποτελεί τον τερματισμό του W- BPL δικτύου. Περιλαμβάνει τον δρομολογητή που συνδέεται με το δίκτυο κορμού (backhaul router) και ο οποίος λειτουργεί ως πύλη για τη συσσωρευμένη κίνηση που δημιουργεί το W- BPL δίκτυο και συνδέεται και με τον κεντρικό μεταγωγέα (switch) του δικτύου. Ο πρώτος συγκεντρωτής κίνησης σε κάθε γραμμή ΜΤ λειτουργεί ως πύλη για την παραγόμενη στη ΜΤ κίνηση και συνδέεται ασύρματα στον αντίστοιχο σταθμό βάσης (base station). Ο σταθμός βάσης τοποθετείται στο τοπικό σημείο παρουσίας (Local Point of Presence) του τηλεπικοινωνιακού δικτύου -το οποίο στην περίπτωση του ερευνητικού έργου στη Λάρισα είναι ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ- και συνδέεται απευθείας στον δρομολογητή (backhaul router) που είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση του BPL δικτύου με το Internet. Η ασύρματη σύνδεση των πυλών (gateways) με τους σταθμούς βάσης (base stations) επιλέγεται ώστε να αποφευχθεί

σημαντική εξασθένιση που προκαλείται από τους μετασχηματιστές που έχουν εγκατασταθεί στα σημεία αυτά. Κάθε σταθμός βάσης λειτουργεί ως τερματισμός του W- BPL δικτύου που είναι εγκατεστημένο στην αντίστοιχη γραμμή MT συλλέγοντας τη συνολική παραγόμενη κίνηση.

**Εικόνα 1.13: Σχηματικό διάγραμμα του W- BPL δικτύου που αναπτύχθηκε στην περιοχή της Λάρισας (Ελλάδα)**



Πηγή: [2]

Οι δύο σταθμοί βάσης συνδέονται μέσω του μεταγωγέα στον δρομολογητή που λειτουργεί ως Τοπικό Σημείο Παρουσίας. Επιπλέον η διαχείριση δικτύου γίνεται σε αυτό το επίπεδο δικτύου. Το Κέντρο Διαχείρισης Δικτύου (Network Operating Center- NOC) είναι εγκατεστημένο εντός του υποσταθμού YT/MT και συμπεριλαμβάνει και το σύστημα λογισμικού για καταγραφή και έλεγχο του ηλεκτρικού δικτύου καθώς και πολλούς εξυπηρετητές εφαρμογών (application servers). Μία VPN σύνδεση εγκαθίσταται ανάμεσα στον δρομολογητή του υποσταθμού YT/MT και του δρομολογητή που βρίσκεται στις κεντρικές εγκαταστάσεις της επιχείρησης του ηλεκτρικού δικτύου επιτρέποντας την εξ αποστάσεως παρατήρηση του δοκιμαστικού BPL δικτύου μέσω DSL γραμμής των 2 Mbps. Παρόλο που στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα πολλές λειτουργικές οντότητες, όπως το NOC, οι σταθμοί βάσης και το Τοπικό

Σημείο Παρουσίας είναι εγκατεστημένες στον υποσταθμό YT/MT, αυτό δεν είναι απαραίτητο να συμβαίνει σε άλλες υλοποιήσεις W- BPL δικτύων.

Ο κύριος σκοπός του δεύτερου επιπέδου δικτύου είναι η κάλυψη της περιοχής του υβριδικού δικτύου, λειτουργώντας ως ενδιάμεσο μίλι (middle mile access) μεταξύ του δικτύου δεδομένων που προσφέρεται από τον πάροχο υπηρεσιών Internet (Internet Service Provider- ISP) και των χρηστών που έχουν ασύρματη διεπαφή, οι οποίοι είναι αραιά κατανομημένοι στην περιοχή. Έτσι, μέσω του δεύτερου επιπέδου δικτύου η ευρυζωνική ασύρματη- BPL πλατφόρμα επεκτείνεται ώστε να καλύψει την ευρύτερη αγροτική περιοχή. Μέσα σε κάθε μονάδα BPL υπάρχουν δύο ασύρματες διεπαφές. Η ασύρματη σύνδεση με άλλες BPL μονάδες (π.χ. συγκεντρωτής με επαναλήπτη ή αντίστροφα) παρέχεται από την πρώτη διεπαφή όταν είναι ενεργοποιημένη. Η δεύτερη ασύρματη διεπαφή είναι πάντα ενεργοποιημένη ώστε να λειτουργεί ως σημείο πρόσβασης (access point). Το υβριδικό δίκτυο συνδέεται στο NOC που είναι εγκατεστημένο στον υποσταθμό YT/MT μέσω των BPL μονάδων που είναι πρώτες εγκατεστημένες σε κάθε γραμμή MT. Αυτές οι μονάδες λειτουργούν ως πύλες (gateways). Ο αριθμός των BPL μονάδων που λειτουργούν ως επαναλήπτες για τους συγκεντρωτές (aggregators) ή για την πύλη (gateway) εξαρτάται από την τοπολογία του ηλεκτρικού δικτύου. Η ύπαρξη είτε φυσικών ασυνεχειών του ηλεκτρικού δικτύου είτε τμημάτων του δικτύου που παρουσιάζουν ισχυρές ανακλάσεις – οι οποίες προκαλούνται από άλλες συσκευές που μπορεί να έχουν εγκατασταθεί στις κολώνες του ηλεκτρικού δικτύου, όπως μονωτές, μετασχηματιστές και διακόπτες κυκλώματος - μπορεί να επιβαρύνει τις συνθήκες μετάδοσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ενεργοποιούνται οι ασύρματες συνδέσεις χωρίζοντας το BPL δίκτυο σε υποδίκτυα και αποτρέπουν την ηλεκτρομαγνητική απομόνωση ορισμένων τμημάτων του δικτύου. Έτσι, όταν χτίζεται ένα W- BPL δίκτυο, αποτελείται από: α) ενσύρματα BPL υποδίκτυα, όπου ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης ανά γραμμή MT είναι της τάξης των 200 Mbps, β) ασύρματες συνδέσεις δρουν εναλλακτικά προς ή συνεργατικά με τις ενσύρματες συνδέσεις όταν οι απαιτήσεις ποιότητας (Quality of Service- QoS) για ορισμένες υπηρεσίες δεν ικανοποιούνται. Σε αυτές τις περιπτώσεις, με διαθέσιμο και τον ασύρματο τρόπο μετάδοσης υπάρχουν δύο επιλογές δρομολόγησης (ενσύρματα ή ασύρματα) και επιλέγεται τελικά ο καλύτερος δρόμος μετάδοσης. Αυτό το χαρακτηριστικό αυξάνει τη διαθεσιμότητα και την επεκτασιμότητα του δικτύου. Επίσης δίνει τριπλό ρόλο στην πρώτη ασύρματη διεπαφή, δηλαδή:

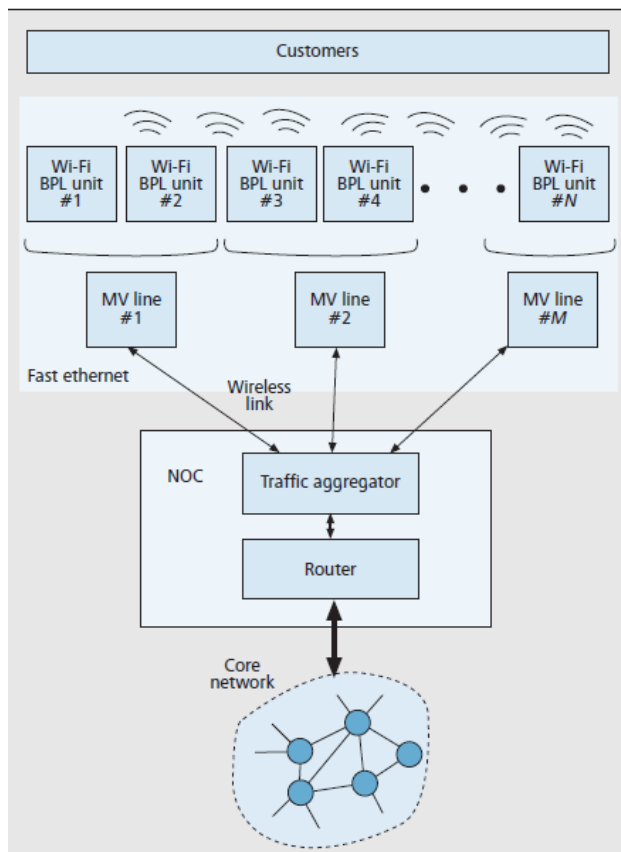


- a) Ενεργοποίηση κατόπιν εντολής της ασύρματης ζεύξης για σύνδεση των πυλών (gateways) στους σταθμούς βάσης (base stations) που βρίσκονται στο NOC
- b) Ενεργοποίηση κατόπιν εντολής των ασύρματων συνδέσεων όταν κάποια φυσική ασυνέχεια παρουσιαστεί στο ηλεκτρικό δίκτυο
- c) Δυναμική ενεργοποίηση της ασύρματης διεπαφής, ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Στην περίπτωση αυτή η ασύρματη διεπαφή ενεργοποιείται από τη μονάδα διαχείρισης ζεύξεων (μονάδα που αποφασίζει εάν οι διαθέσιμοι πόροι ενός κόμβου ικανοποιούν τις απαιτήσεις ποιότητας της εφαρμογής που εξυπηρετείται).

Τέλος, κάθε μονάδα BPL λειτουργεί ως σημείο πρόσβασης WiFi ώστε να παρέχει την πρόσβαση στο τελευταίο μίλι (last mile access). Γενικά, ένας συνδρομητής μπορεί να συνδεθεί στο W- BPL δίκτυο με δύο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο, οι χρήστες συνδέονται στο δίκτυο BPL μέσω των γραμμών XT χρησιμοποιώντας κατάλληλους BPL διαποδιαμορφωτές συνήθως εγκατεστημένους στη μονάδα του μετρητή τους. Όταν χρησιμοποιούνται οι γραμμές XT προκύπτουν διάφορα προβλήματα, όπως υψηλός θόρυβος, αναντιστοιχίες αντιστάσεων (impedance mismatches) εξαιτίας των διαφορετικών τύπων των γραμμών XT που χρησιμοποιούνται ακόμα και στην ίδια περιοχή και το κόστος εγκατάστασης καινούργιων BPL διαποδιαμορφωτών. Για αυτό το λόγο δε χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τρόπος σύνδεσης των χρηστών στο ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα. Σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο, ο οποίος και ήταν αυτός που εφαρμόστηκε, οι BPL μονάδες εξάγουν το σήμα από τη γραμμή MT και το μετατρέπουν σε σήμα κατάλληλο για ασύρματη μετάδοση (σύμφωνα με τα πρωτόκολλα IEEE 802.11 a/b/g). Έτσι, στο τρίτο επίπεδο δικτύου οι μονάδες BPL χρησιμεύουν ως ασύρματη διεπαφή επιτρέποντας τη σύνδεση στους τελικούς χρήστες με δυνατότητες WiFi.

Η συνολική αρχιτεκτονική επικοινωνιών στο ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα φαίνεται στην Εικόνα 1.14.

Εικόνα 1.14: Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας του υβριδικού W- BPL δικτύου που υλοποιήθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα στη Λάρισα (Ελλάδα)



Πηγή: [2]

## 2. Γενική περιγραφή του στρώματος MAC

### 2.1 Στρώμα MAC

Η βασική αποστολή του στρώματος MAC είναι ο έλεγχος πρόσβασης πολλών συνδρομητών που συνδέονται σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο χρησιμοποιώντας το κοινό μέσο μετάδοσης και η οργάνωση της ροής της πληροφορίας από τους διαφορετικούς συνδρομητές – χρήστες τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Γενικά, οι λειτουργίες του MAC στρώματος που εφαρμόζονται σε κάθε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μπορούν να χωριστούν στις εξής τρεις κατηγορίες [11]:

- Πολλαπλή πρόσβαση (multiple access)
- Διαμοιρασμός των πόρων (resource sharing)
- Λειτουργίες ελέγχου κίνησης (traffic control functions)

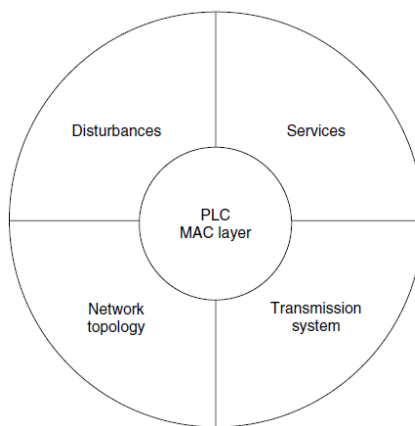
Ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης (multiple access scheme) θεσπίζει μία μέθοδο διαχωρισμού των πόρων σε ενότητες πρόσβασης οι οποίες μπορούν να προσπελαστούν από τους σταθμούς του δικτύου για μετάδοση πληροφορίας οποιουδήποτε τύπου. Η επιλογή του σχήματος πολλαπλής πρόσβασης εξαρτάται από το φυσικό μέσο μετάδοσης και τα χαρακτηριστικά του. Ακολουθώντας τον παραπάνω ορισμό της λειτουργίας του σχήματος μετάδοσης, προκύπτει η ανάγκη για τον προσδιορισμό της στρατηγικής για τον διαμοιρασμό των πόρων από το MAC πρωτόκολλο. Το έργο του MAC υποστρώματος είναι η οργάνωση της πρόσβασης των πολλών συνδρομητών που χρησιμοποιούν τους διαμοιραζόμενους πόρους του δικτύου, η οποία εξασφαλίζεται με τη διαχείριση των ενοτήτων πρόσβασης που παρέχονται από το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Η αμφίδρομη λειτουργία του δικτύου (duplex mode) είναι ένας από τους στόχους του MAC υποστρώματος καθώς και ο έλεγχος της κίνησης στις κατευθύνσεις downlink και uplink. Πρόσθετες λειτουργίες ελέγχου κίνησης, όπως η χρονοδρομολόγηση της κίνησης (traffic scheduling), η αποδοχή ελέγχου κλήσης (admission control) κλπ μπορούν να υλοποιηθούν και σε ανώτερα στρώματα, αλλά –ολικώς ή μερικώς- και στο MAC υπόστρωμα. Σε κάθε περίπτωση, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας των διάφορων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, το MAC στρώμα και τα MAC πρωτόκολλα πρέπει να είναι ικανά να υποστηρίξουν την υλοποίηση διαφορετικών διαδικασιών για έλεγχο κίνησης, όπως και την υλοποίηση ενός μηχανισμού ελέγχου αποδοχής κλήσεων (Connection Admission Control-CAC).

### 2.1.1 Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις του MAC στρώματος

Το MAC στρώμα είναι μέρος της συνηθισμένης αρχιτεκτονικής πρωτοκόλλων σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα με κοινό μέσο μετάδοσης. Υπάρχουν πολλές υλοποιήσεις του MAC στρώματος και των πρωτοκόλλων του που αναπτύσσονται για συγκεκριμένα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ανάλογα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μετάδοσης, το λειτουργικό περιβάλλον και το σκοπό τους. Η ιδιαιτερότητα των BPL δικτύων πρόσβασης έγκειται στο ότι αυτά είναι ένα ειδικό μέσο μετάδοσης (το δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος χαμηλής και μέσης τάσης) που παρέχει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης όταν υπάρχει θόρυβος που προκαλεί διαταραχές κατά τη μετάδοση των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, προκειμένου να διασφαλίσουν την ανταγωνιστικότητα ως προς τις άλλες τεχνολογίες πρόσβασης στο Διαδίκτυο, οι επικοινωνίες μέσω του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να προσφέρουν ένα μεγάλο σύνολο τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και να εξασφαλίζουν ικανοποίηση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS).

Οι ακόλουθοι τέσσερις παράγοντες έχουν άμεση επίδραση στη σχεδίαση και τη λειτουργία του BPL MAC υποστρώματος [11] και στα MAC πρωτόκολλα: α) η τοπολογία του δικτύου, β) το σενάριο των διαταραχών στο μέσο, γ) οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, δ) το φυσικό μέσο μετάδοσης.

**Εικόνα 2.1: Το περιβάλλον του BPL MAC στρώματος**

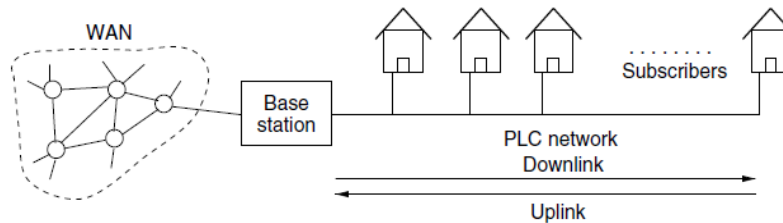


Πηγή: [11]

Η τοπολογία του BPL δικτύου πρόσβασης είναι η τοπολογία του δικτύου ηλεκτρικής ισχύος χαμηλής και μέσης τάσης το οποίο χρησιμεύει ως μέσο μετάδοσης και έχει δενδρική τοπολογία. Ωστόσο, για στρώματα υψηλότερα από το φυσικό, όπως είναι το MAC στρώμα, το BPL δίκτυο

μπορεί να θεωρηθεί ως ένα λογικό σύστημα διαύλου (logical bus system) στο οποίο οι κόμβοι του δικτύου χρησιμοποιούν το κοινό μέσο για να επικοινωνήσουν με το σταθμό βάσης που συνδέει το PLC δίκτυο και το δίκτυο κορμού.

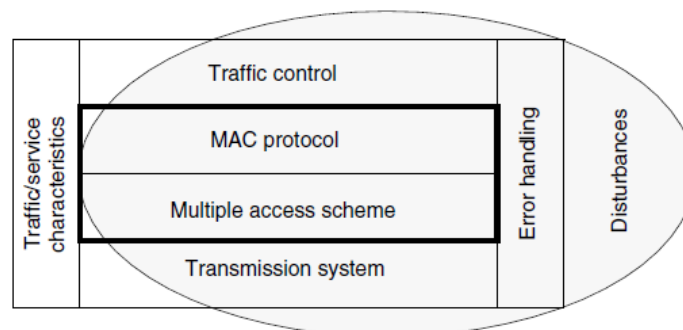
**Εικόνα 2.2: Δομή λογικού συστήματος διαύλου του BPL δικτύου**



Πηγή: [11]

Ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης και μία στρατηγική διαμοιρασμού των πόρων (ένα MAC πρωτόκολλο) βρίσκονται στον πυρήνα του MAC στρώματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3. Όπως αναφέρθηκε, το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης θεσπίζει μία μέθοδο διαχωρισμού των πόρων σε ενότητες πρόσβασης και εξαρτάται από το μέσο μετάδοσης και τα χαρακτηριστικά του. Σε συγκεκριμένο BPL σύστημα, το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης πρέπει να είναι κατάλληλο για το συγκεκριμένο σύστημα μετάδοσης που έχει επιλεγεί (πχ OFDM ή κάποια Spread Spectrum τεχνική). Από την άλλη πλευρά, ο ρόλος του MAC πρωτοκόλλου είναι η οργάνωση της πρόσβασης πολλαπλών χρηστών στο κοινό μέσο, η οποία εξασφαλίζεται με τη διαχείριση των ενοτήτων πρόσβασης που παρέχονται από το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης.

**Εικόνα 2.3: Δομή του στρώματος MAC**



Πηγή: [11]

Οι απαιτήσεις του MAC στρώματος για BPL δίκτυα περιγράφονται παρακάτω [11]:

- Τα BPL συστήματα λειτουργούν υπό δυσμενείς συνθήκες θορύβου επηρεάζοντας ολόκληρη την στοίβα πρωτοκόλλων των BPL επικοινωνιών και προκαλώντας διαταραχές στη μετάδοση δεδομένων. Έτσι, τόσο το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης όσο και τα MAC πρωτόκολλα πρέπει να είναι ανθεκτικά στο θόρυβο, ο οποίος αναμένεται να υπάρχει στα BPL δίκτυα.
- Οι δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης απαιτούν την εφαρμογή διαφόρων μηχανισμών για διόρθωση λαθών. Συνεπώς τόσο το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης όσο και τα MAC πρωτόκολλα πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να επιτρέπουν τη λειτουργία μηχανισμών διαχείρισης λαθών (όπως ο Automatic Repeat-reQuest μηχανισμός- ARQ).
- Τα BPL δίκτυα πρόσβασης πρέπει να παρέχουν συγκεκριμένες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και να εξασφαλίζουν τις απαιτήσεις ποιότητας των υπηρεσιών για διαφορετικά είδη κίνησης. Συνεπώς, τόσο το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης όσο και τα MAC πρωτόκολλα πρέπει να είναι κατάλληλα για την ικανοποίηση ποιότητας της μικτής τηλεπικοινωνιακής κίνησης που προκαλείται από διαφορετικές υπηρεσίες. Η ποιότητα υπηρεσίας εξασφαλίζεται επίσης και με εφαρμογή των μηχανισμών ελέγχου κίνησης που περιλαμβάνουν την αμφίδρομη ταυτόχρονη επικοινωνία, τη χρονοδρομολόγηση της κίνησης και τον έλεγχο αποδοχής σύνδεσης. Ωστόσο, ο έλεγχος της κίνησης πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να είναι ανθεκτικός στις εξωτερικές διαταραχές και να επιτρέπει την υλοποίηση μηχανισμών χειρισμού των λαθών.
- Μία ακόμα απαίτηση του BPL MAC στρώματος είναι η καλή χρησιμοποίηση του δικτύου, η οποία εξασφαλίζει την οικονομική αποδοτικότητα των BPL δικτύων. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με τη βέλτιστη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων δικτύου που παρέχονται από το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης και χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το MAC πρωτόκολλο, καθώς και σύμφωνα με τον έλεγχο κίνησης και τους μηχανισμούς διαχείρισης λαθών.

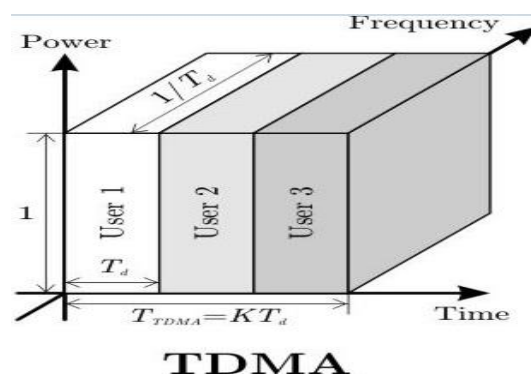
### 2.1.2 Σχήματα πολλαπλής πρόσβασης

Το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης εφαρμόζεται σε ένα μέσο μετάδοσης (ενσύρματο ή ασύρματο) στην περίπτωση πολλαπλών χρηστών που χρησιμοποιούν το κοινό μέσο. Τα τηλεπικοινωνιακά σήματα από μεμονωμένους χρήστες πρέπει να διαδοθούν από διαφορετικές ενότητες πρόσβασης, που παρέχονται από το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης και εξασφαλίζουν επικοινωνία χωρίς λάθη. Για αυτό τα σήματα από διαφορετικούς χρήστες, όταν μεταδίδονται σε κοινό κανάλι πρέπει να είναι μεταξύ τους ορθογώνια. Στην πράξη δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί τέλεια ορθογωνιότητα μεταξύ των διαφορετικών σημάτων που διαδίδονται στο ίδιο μέσο. Εάν όμως η επιρροή μεταξύ των σημάτων είναι μικρή, τότε είναι ένα αποδεκτό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Στα BPL συστήματα μετάδοσης χρησιμοποιούνται κυρίως τα ακόλουθα δύο σχήματα πολλαπλής πρόσβασης.

#### 2.1.2.1 TDMA- Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου

Κατά την πολλαπλή πρόσβαση TDMA οι χρήστες διαχωρίζονται στο πεδίο του χρόνου καθώς σε έκαστο εξ αυτών εκχωρούνται βάσει συγκεκριμένου προγράμματος χρονοσχισμές, όπως στην Εικόνα 2.4. Κάθε χρήστης εκφράζει τις απαιτήσεις του για ποιότητα υπηρεσίας στη μονάδα που εκδίδει το πρόγραμμα πρόσβασης στο κανάλι. Έπειτα η μονάδα αυτή (HE- θα εξηγηθεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο) μοιράζει το πρόγραμμα και ο κάθε σταθμός αρχίζει τη μετάδοση των δεδομένων του στη χρονική περίοδο που του αντιστοιχεί σύμφωνα με το πρόγραμμα πρόσβασης στο μέσο. Με τον τρόπο αυτό οι χρήστες δε χρειάζεται να ανταγωνιστούν για το μέσο και μπορούν να εξασφαλίσουν ικανοποίηση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών.

Εικόνα 2.4: TDMA



Πηγή: [http://www.gta.ufjf.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2008\\_2/renato/tecnol.htm](http://www.gta.ufjf.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/renato/tecnol.htm)

Επειδή κάθε χρονοσχισμή (κανάλι) TDMA καταλαμβάνει ολόκληρο το εύρος ζώνης του συστήματος και επειδή το BPL σύστημα είναι ευρυζωνικό πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια για τη μείωση της παρεμβολής ISI που προκαλείται μεταξύ των συμβόλων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Το γεγονός ότι οι χρήστες δεν μεταδίδουν συνεχώς συνεπάγεται ότι πρέπει να διαθέτουν τη δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των δεδομένων. Η TDMA διαθέτει επίσης το πλεονέκτημα της εύκολης απόδοσης διαφορετικών επιπέδων QoS στους χρήστες ρυθμίζοντας το πλήθος των χρονοσχισμών που εκχωρούνται στον καθένα.

Από την άλλη πλευρά, σημαντικός περιορισμός της TDMA – τουλάχιστον όσον αφορά την μετάδοση uplink- είναι η απαίτηση συντονισμού των χρηστών. Συγκεκριμένα κατά τη μετάδοση downlink τα σήματα προς όλους τους χρήστες εκπέμπονται από τον ίδιο πομπό (κεντρική μονάδα που ονομάζεται HE), οπότε εφόσον ο διάυλος εμφανίζει μη επιλεκτικές διαλείψεις, τα σήματα λήψης των πολλαπλών χρηστών διατηρούν την ορθογωνιότητά τους. Ωστόσο κατά τη μετάδοση uplink κάθε χρήστης (μονάδα BPL) μεταδίδει μέσω διαφορετικού διαύλου με αντίστοιχα διαφορετική καθυστέρηση διάδοσης. Για να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα των χρονοσχισμών κατά τη λήψη από τον πομπό, οι μεταδόσεις από τους διαφορετικούς σταθμούς πρέπει να είναι συγχρονισμένες. Η διαδικασία του συγχρονισμού και ο γενικότερος συντονισμός των μεταδόσεων στο δίκτυο ελέγχεται από την κεντρική μονάδα- HE. Το γεγονός ότι κατά τη μετάδοση TDMA κάθε χρήστης καταλαμβάνει ολόκληρο το εύρος ζώνης καθιστά τα BPL συστήματα αρκετά ευάλωτα σε παρεμβολές.

#### ***2.1.2.2 CDMA- Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα***

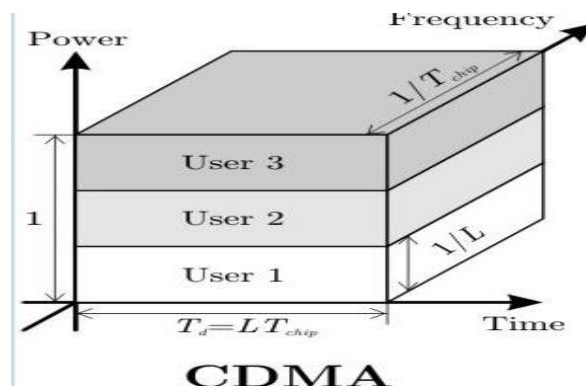
Η επιτυχία της τεχνολογίας CDMA, η οποία ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία σχημάτων απλωμένου φάσματος (spread spectrum), οφείλεται σε ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η πλήρης αναχρησιμοποίηση συχνότητας, η ήπια διαπομπή (soft handoff), η εγγενής διαφορική λήψη, η ευέλικτη αξιοποίηση της χωρητικότητας, η δυνατότητα παροχής μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης και η υψηλή φασματική απόδοση.

Αν δύο κόμβοι επιχειρήσουν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, οι κόμβοι οι οποίοι είναι εντός εμβέλειας και των δύο σημάτων θα αντιληφθούν σύγκρουση πακέτων με αποτέλεσμα την αποτυχία λήψης και των δύο πακέτων. Για το λόγο αυτό, στα BPL συστήματα χρησιμοποιείται ο CSMA/CA μηχανισμός, ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων. Ο μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων του CSMA/CA ονομάζεται backoff procedure ο οποίος λειτουργεί



συνοπτικά ως εξής: αρχικά ένας μετρητής λαμβάνει μία τυχαία τιμή σε ένα πεπερασμένο εύρος. Κάθε φορά που ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει ακούει το κανάλι και εφόσον δε χρησιμοποιείται αρχίζει να μετράει αντίστροφα ξεκινώντας από την τιμή που έχει και μέχρι να φτάσει στο μηδέν. Όταν το κανάλι χρησιμοποιείται, τότε ο μετρητής σταματάει την αντίστροφη μέτρηση και περιμένει μέχρι το κανάλι να απελευθερωθεί ώστε να ξεκινήσει και πάλι τη μέτρηση μέχρι να φτάσει στο μηδέν και να αρχίσει τη μετάδοση. Γνωρίζοντας πως λειτουργεί ο μηχανισμός γίνεται εύκολα αντιληπτό πως για να συμβεί σύγκρουση πακέτων θα πρέπει οι μετρητές backoff δύο ή περισσότερων σταθμών να μηδενιστούν ταυτόχρονα. Στα BPL συστήματα ο μηχανισμός CSMA/CA που χρησιμοποιείται καθορίζει προτεραιότητες για την κίνηση προς μετάδοση κάθε σταθμού και ο ακριβής τρόπος λειτουργίας του περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Εικόνα 2.5: CDMA



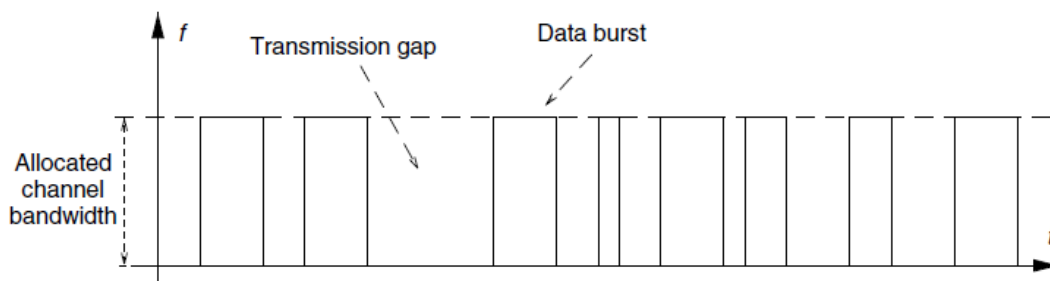
Πηγή: [http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2008\\_2/renato/tecnol.htm](http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/renato/tecnol.htm)

### 2.1.3 MAC πρωτόκολλα

Τα MAC πρωτόκολλα μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: σταθερής ή δυναμικής πρόσβασης [11]. Τα πρωτόκολλα σταθερής πρόσβασης εκχωρούν προκαθορισμένη σταθερή χωρητικότητα σε κάθε συνδρομητή για όλη τη διάρκεια της σύνδεσης, όπως συμβαίνει στην κλασική τηλεφωνία. Η προκαθορισμένη σταθερή χωρητικότητα παρέχεται στον χρήστη ανεξάρτητα από την τρέχουσα ανάγκη του για συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Έτσι, όταν πρόκειται για χρήση του Internet, η εκχωρημένη χωρητικότητα του δικτύου παραμένει αχρησιμοποίητη όσο ο χρήστης «βλέπει» τις σελίδες και δεν υπάρχει μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο προκαλώντας «κενά μετάδοσης» (transmission gaps) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6. Από την άλλη πλευρά, τα εκρηκτικά χαρακτηριστικά που μπορεί να έχει μία ροή δεδομένων

μπορεί να προκαλέσουν τα αποκαλούμενα «σημεία αιχμής της μετάδοσης» (transmission peaks), όταν η χωρητικότητα του εκχωρημένου καναλιού δεν επαρκεί ώστε να εξυπηρετήσει τη ροή των δεδομένων, προκαλώντας πρόσθετες καθυστερήσεις και μειώνοντας τη ρυθμαπόδοση ή αλλιώς την ικανότητα διαβίβασης των δεδομένων (throughput). Για αυτούς τους λόγους, οι στρατηγικές σταθερής πρόσβασης είναι κατάλληλες μόνο για συνεχή κίνηση (continuous traffic) και όχι για εκρηκτική κίνηση (bursty traffic) που είναι τυπική όταν μεταδίδονται διαφορετικά είδη δεδομένων όπως είναι αναμενόμενο σε δίκτυα πρόσβασης όπως τα ευρυζωνικά BPL δίκτυα.

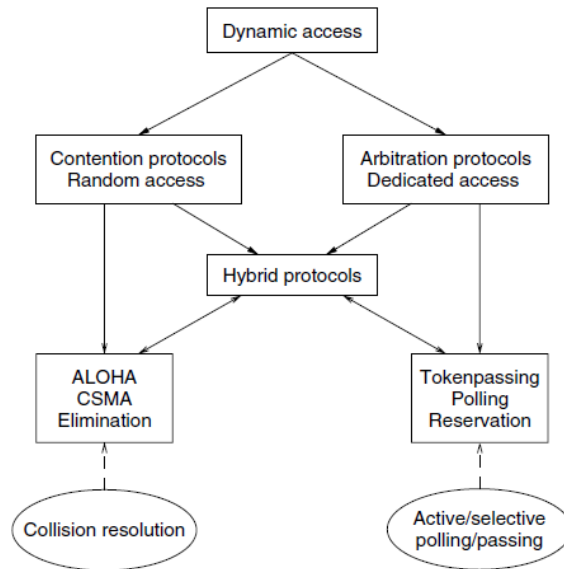
**Εικόνα 2.6: Εκρηκτική κίνηση δεδομένων και πολιτική σταθερής πρόσβασης**



Πηγή: [11]

Αντίθετα με τις στρατηγικές σταθερής πρόσβασης, τα δυναμικά πρωτόκολλα πρόσβασης επαρκούν για μετάδοση δεδομένων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να διασφαλίσουν τις απαιτήσεις ποιότητας για διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Τα δυναμικά πρωτόκολλα χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τα πρωτόκολλα ανταγωνισμού (contention protocols) και τα πρωτόκολλα διαιτησίας (arbitration protocols). Σύμφωνα με την αρχή του ανταγωνισμού για πρόσβαση, οι σταθμοί του δικτύου προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο κοινό μέσο τυχαία, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει συγκρούσεις μεταξύ των δεδομένων των διαφορετικών χρηστών. Ας σημειωθεί ότι ένας σταθμός του δικτύου δεν γνωρίζει τις ανάγκες μετάδοσης των άλλων σταθμών του δικτύου. Έτσι, όταν δύο ή περισσότεροι σταθμοί ξεκινήσουν να μεταδίδουν τα πακέτα τους στον ίδιο χρόνο θα επέλθει σύγκρουση. Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόκολλα διαιτησίας παρέχουν έναν συντονισμό μεταξύ των σταθμών, εξασφαλίζοντας την αποκλειστική χρήση του μέσου από κάποιο σταθμό κάθε στιγμή. Στην περίπτωση αυτή, οι σταθμοί του δικτύου αποκτούν πρόσβαση στο δίκτυο κατά καθορισμένο τρόπο, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις. Ωστόσο, η διαδικασία της διαιτησίας χρειάζεται αρκετό επιπλέον χρόνο και προκαλεί μεγαλύτερες καθυστερήσεις μετάδοσης στο δίκτυο.

Εικόνα 2.7: Κατηγοριοποίηση των δυναμικών MAC πρωτοκόλλων



Πηγή: [11]

Βασικά πρωτόκολλα, όπως το ALOHA και οι CSMA τυχαίοι τρόποι πρόσβασης στο μέσο, καθώς και τα πρωτόκολλα με χρήση σκυτάλης (token-passing protocols) και με ψηφοφορία (polling arbitration protocols) μπορούν να επεκταθούν ώστε να βελτιώσουν την απόδοσή τους. Έτσι, τα πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης μπορούν να επεκταθούν με διάφορους μηχανισμούς για αποφυγή συγκρούσεων ώστε να μειωθεί ο αριθμός των συγκρούσεων στο δίκτυο, ενώ τα πρωτόκολλα διαιτησίας μπορούν να ισχύουν επιλεκτικά, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση κίνησης του δικτύου, ώστε να μειωθούν οι μεγάλες καθυστερήσεις μετάδοσης. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα ανταγωνισμού και διαιτησίας μπορούν να συνδυαστούν για να υλοποιήσουν λύσεις υβριδικών πρωτοκόλλων. Ο σκοπός των υβριδικών πρωτοκόλλων είναι να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα από τους διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης στο μέσο, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου και να εξασφαλιστεί η ικανοποίηση της ποιότητας για διάφορες υπηρεσίες.



### 3. Το IEEE 1901 Standard (2010)

Τον Δεκέμβριο του 2010, η IEEE εξέδωσε το πρότυπο “IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications” [9]. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η γενική περιγραφή των BPL δικτύων, ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τους και οι όροι και έννοιες που χρησιμοποιούνται, ώστε, στο επόμενο κεφάλαιο, να γίνει η περιγραφή του MAC στρώματος που ενδιαφέρει κυρίως την διπλωματική αυτή.

#### 3.1 Οι ηλεκτρικές γραμμές ως τηλεπικοινωνιακός διάυλος

- Οι ηλεκτρικές γραμμές διαθέτουν ορισμένα θεμελιώδη χαρακτηριστικά και περιβάλλοντα που τις κάνουν να διαφέρουν σημαντικά από τα άλλα ενσύρματα τοπικά δίκτυα. Αυτά είναι τα ακόλουθα:
  - ❖ Το μέσο μετάδοσης προϋπάρχει (pre-existent medium)
  - ❖ Παρέχουν τις χειρότερες συνθήκες μετάδοσης (adverse medium)
  - ❖ Είναι μέσο που λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων και συνεπώς είναι ανοικτό σε κάθε πηγή θορύβου στην περιοχή αυτή (open medium)
  - ❖ Οι κανονισμοί και οι νομοθεσίες για το φάσμα συχνοτήτων και την επιτρεπόμενη ισχύ έγχυσης για τις PLC επικοινωνίες διαφέρουν από χώρα σε χώρα (regulatory variations)
- Η διεύθυνση προορισμού δεν μπορεί να αντιστοιχιστεί σε φυσική τοποθεσία. Αυτό συμβαίνει διότι η μονάδα προορισμού (addressable unit) είναι ένας σταθμός, ο οποίος δεν έχει πάντα σταθερή τοποθεσία στο δίκτυο (στη ΧΤ μπορεί να βγεί από την πρίζα σε ένα σημείο του δικτύου και να μπει στην πρίζα ξανά σε ένα άλλο). Σε ορισμένες περιπτώσεις ο σταθμός μπορεί να διατηρήσει το σύνδεσμό του με το δίκτυο για κάποιο χρονικό διάστημα, αφού εξέλθει από αυτό.
- Οι σταθμοί αντιμετωπίζουν διαφορετικά το φυσικό στρώμα σε σχέση με άλλα ενσύρματα μέσα μετάδοσης γιατί: α) χρησιμοποιούν ένα μέσο που δεν έχει ούτε απόλυτα, ούτε εύκολα παρατηρήσιμα όρια, β) είναι απροστάτευτοι από άλλους σταθμούς που μπορεί να χρησιμοποιούν το κοινό μέσο, γ) επικοινωνούν μέσω ενός διαύλου που είναι σαφώς λιγότερο αξιόπιστος σε σχέση με άλλα ενσύρματα μέσα, δ) λειτουργούν σε δίκτυα με δυναμικές τοπολογίες (ένας σταθμός που εισέρχεται ή εξέρχεται από το δίκτυο μπορεί να

ενεργοποιεί ή να ακυρώνει πιθανές διακλαδώσεις του δικτύου), ε) δεν έχουν πλήρη συνδεσιμότητα με όλους τους άλλους σταθμούς και επομένως ο ισχυρισμός ότι κάθε σταθμός μπορεί να ακούσει κάθε άλλο σταθμό δεν ισχύει, στ) το μέσο έχει μεταβαλλόμενες με το χρόνο και ασύμμετρες ιδιότητες διάδοσης και ζ) μπορεί να αντιμετωπίζουν παρεμβολές από άλλα δίκτυα που λειτουργούν σε επικαλυπτόμενες περιοχές συχνοτήτων.

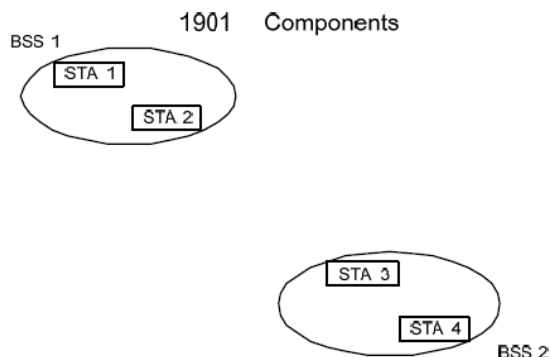
- Το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει τους νομαδικούς σταθμούς, δηλαδή τους σταθμούς οι οποίοι μετακινούνται από σημείο σε σημείο στο δίκτυο αλλά χρησιμοποιούνται μόνο όσο βρίσκονται σε σταθερή θέση.
- Επειδή γενικά γίνεται προσπάθεια για μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος και των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, θεωρείται ότι οι σταθμοί μπορεί να τεθούν σε κατάσταση μειωμένης ισχύος, οπότε δεν θα είναι πάντα διαθέσιμοι καίτοι συνδεδεμένοι στο δίκτυο.
- Το IEEE 1901 είναι σχεδιασμένο ώστε να εμφανίζεται στα υψηλότερα από το MAC στρώματα (συμπεριλαμβανομένου και του LLC) ως ένα παραδοσιακό ενσύρματο IEEE 802 τοπικό δίκτυο. Αυτό όμως σημαίνει ότι η φορητότητα των χρηστών πρέπει να αντιμετωπίζεται στο επίπεδο του φυσικού στρώματος. Για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ικανοποίηση των απαιτήσεων για ποιότητα υπηρεσίας το MAC υπόστρωμα πρέπει να ενσωματώσει λειτουργίες που παραδοσιακά δεν προορίζονταν για αυτό. Επιπλέον, ίσως είναι αναγκαίο υψηλότερα στρώματα να είναι σε θέση να είναι ενήμερα ως προς την κατάσταση του BPL διαύλου (power line network aware) τουλάχιστον τόσο ώστε να αντιλαμβάνονται ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τα χαρακτηριστικά ποιότητας της κίνησης υπόκεινται σε συχνές και ίσως ουσιαστικές αλλαγές εξαιτίας φορτίου κίνησης που δεν είναι υπό τον άμεσο έλεγχο των οντοτήτων διαχείρισης του δικτύου. Εντούτοις, στόχος του πρωτοκόλλου είναι τα υψηλότερα στρώματα να μην μπορούν να διακρίνουν τι είδους τοπικό δίκτυο (ηλεκτρικές γραμμές ή ασύρματο) χρησιμοποιείται στην πραγματικότητα.
- Η απόσταση που διανύει ένα σήμα μέσω του καλωδίου ισχύος εξαρτάται από την ποιότητα του καλωδίου, το θόρυβο, τα σήματα που παρεμβάλλουν, τους περιορισμούς σχετικά με την ισχύ έγχυσης και τη συχνότητα εκπομπής και άλλους παράγοντες που ποικίλουν, όπως είναι περιβαλλοντικοί λόγοι (πχ ο καιρός). Επαναλήπτες

χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που οι σταθμοί δεν μπορούν να ανταλλάξουν σήματα απευθείας μεταξύ τους ή όταν η ποιότητα του σήματος δεν είναι αρκετή. Οι επαναλήπτες μπορεί να περιέχουν λειτουργίες ώστε να καταγράφουν το περιβάλλον τους (το περιβάλλον των γειτονικών σταθμών) και να διατηρούν πίνακες δρομολόγησης με τις αποστάσεις. Η περιγραφή των επαναληπτών όμως στο πρότυπο αυτό περιορίζεται μόνο στο φυσικό και στο MAC στρώμα.

### 3.2 Στοιχεία οργάνωσης και αρχιτεκτονικής του ηλεκτρικού δικτύου- BSSs και Cells

- Η βασική αρχιτεκτονική μονάδα ενός IEEE 1901 δικτύου είναι ένα σύνολο IEEE 1901 σταθμών ή κόμβων (το φυσικό και το MAC στρώμα των οποίων ακολουθούν το πρότυπο 1901). Όταν πρόκειται για in-home δίκτυα, το σύνολο των σταθμών (STA) ονομάζεται **BSS** (Basic Service Set), ενώ όταν πρόκειται για access δίκτυα το σύνολο των κόμβων (nodes) ονομάζεται **cell**. Οι έννοιες αυτές αναπτύσσονται ακολούθως. Στην παρούσα διπλωματική μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στα δίκτυα πρόσβασης, επομένως το ενδιαφέρον εστιάζεται περισσότερο στα cells, αναφέροντας την αναλογία με τα BSS όπου χρειάζεται.
- Στα IEEE 1901 in-home δίκτυα, το σύνολο των σταθμών βασικών υπηρεσιών (Basic Service Set- BSS) είναι το βασικό δομικό στοιχείο. Κάθε σταθμός είναι μία οντότητα που περιλαμβάνει φυσικό και MAC στρώμα 1901. Ένα BSS είναι ένα σύνολο από σταθμούς που σχετίζονται από τον ίδιο σταθμό που ονομάζεται διαχειριστής του BSS- BM (BSS manager- BM). Ο όρος σύνολο σταθμών βασικών υπηρεσιών προέρχεται από το γεγονός ότι όλοι οι σταθμοί έχουν τις ίδιες υπηρεσίες. Διαφορετικά BSS μπορεί να παρέχουν διαφορετικές υπηρεσίες στους σταθμούς τους. Ωστόσο, εντός συγκεκριμένου BSS οι σταθμοί απολαμβάνουν όλοι τις ίδιες υπηρεσίες. Όπως αναφέρθηκε, στα δίκτυα πρόσβασης το BSS ονομάζεται και «κελί/κυψέλη» (cell). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1, η περιοχή κάλυψης επί της ηλεκτρικής γραμμής στην οποία οι σταθμοί παραμένουν σε επικοινωνία με τα μέλη του BSS ονομάζεται περιοχή βασικών υπηρεσιών (Basic Service Area- BSA).

Εικόνα 3.1: Τα BSS

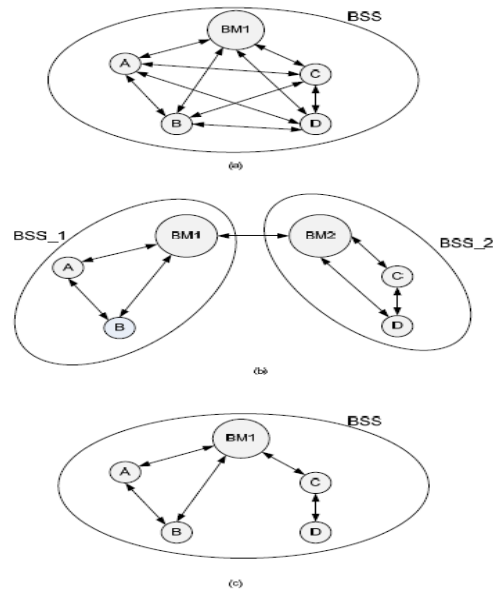


Πηγή: [9]

- Η συμμετοχή ενός σταθμού σε οποιοδήποτε BSS είναι δυναμική. Για να γίνει ένας σταθμός μέλος ενός BSS, πρέπει να ακολουθήσει συγκεκριμένη διαδικασία συγχρονισμού. Για να αποκτήσει πρόσβαση ο σταθμός στις υπηρεσίες του BSS πρέπει να συσχετιστεί με αυτό (become associated). Αυτός ο συσχετισμός είναι δυναμικός και περιλαμβάνει χρήση του συστήματος DSS (distribution system service) που θα αναφερθεί αργότερα. Για να γίνει μέλος ενός access cell ο κόμβος πρέπει και πάλι να ακολουθήσει συγκεκριμένη διαδικασία συγχρονισμού.
- Το φυσικό δίκτυο (**PHYNET**) ενός σταθμού/κόμβου είναι ένα σύνολο σταθμών/κόμβων των οποίων το φυσικό δίκτυο μπορεί να συνεργαστεί με το φυσικό δίκτυο του σταθμού/κόμβου (χωρίς την χρήση αναμεταδοτών ή επαναληπτών). Όλοι οι σταθμοί/κόμβοι σε ένα PHYNET μπορεί να παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Ωστόσο, έχουν τη δυνατότητα να ελαχιστοποιήσουν τις αμοιβαίες παρεμβολές μέσω συντονισμού. Στην Εικόνα 3.2, σε ένα in-home δίκτυο, φαίνεται το PHYNET κάθε σταθμού για διάφορες τοπολογίες. Στο πρώτο παράδειγμα, όλοι οι σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με όλους τους άλλους και το PHYNET είναι για όλους το ίδιο σύνολο. Στο τρίτο παράδειγμα το PHYNET του σταθμού D δεν περιλαμβάνει το BM1. Επίσης, ο σταθμός D δεν είναι στο PHYNET του BM1, γιατί ο σταθμός D είναι ένας κρυμμένος σταθμός. Κρυμμένος σταθμός είναι ένας σταθμός του οποίου οι μεταδόσεις δεν είναι δυνατό να ανιχνευτούν ασφαλώς με ακρόαση του μέσου (carrier sense) από ένα δεύτερο σταθμό, αλλά του οποίου οι μεταδόσεις μπορεί να παρεμβάλλουν με τις μεταδόσεις ενός τρίτου σταθμού από το δεύτερο σταθμό στον τρίτο σταθμό εντός του BSS.



Εικόνα 3.2: Παραδείγματα PHYNET και BSS

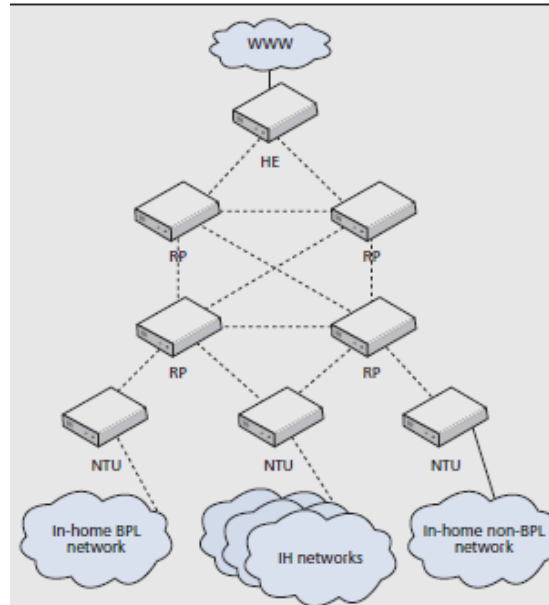


STA	A	B	C
A	{A, B, C, D, BM1}	{A, B, BM1}	{A, B, BM1}
B	{A, B, C, D, BM1}	{A, B, BM1}	{A, B, BM1}
C	{A, B, C, D, BM1}	{C, D, BM2}	{C, D, BM1}
D	{A, B, C, D, BM1}	{C, D, BM2}	{C, D}
BM1	{A, B, C, D, BM1}	{A, B, BM1, BM2}	{A, B, C, BM1}
BM2	N/A	{C, D, BM1, BM2}	N/A

Πηγή: [9]

- Το δίκτυο πρόσβασης IEEE 1901 (Access Network- AC) είναι καθορισμένο να λειτουργεί επί γραμμών χαμηλής και μέσης τάσης. Ένα δίκτυο πρόσβασης μπορεί να περιέχει ένα ή περισσότερα cells, τα οποία αποτελούν BSS. Είναι υπό τη διαχείριση μιας οντότητας παροχής υπηρεσιών και τυπικά υπάρχει μόνο ένα δίκτυο πρόσβασης επί ενός φυσικού δικτύου. Ο πάροχος υπηρεσιών θα ρυθμίσει το **cell** ώστε να περιέχει ένα σταθμό ελέγχου **HE (head end)**, τους απαραίτητους επαναλήπτες **RP (repeaters)**, τις μονάδες τερματισμού δικτύου **NTU (network terminal units)** και τον εξοπλισμό των χρηστών **CPE (customer premises equipment)** για να μπορέσει να παρέχει τις απαιτούμενες υπηρεσίες.

Εικόνα 3.3: Στοιχεία ενός IEEE 1901 access cell



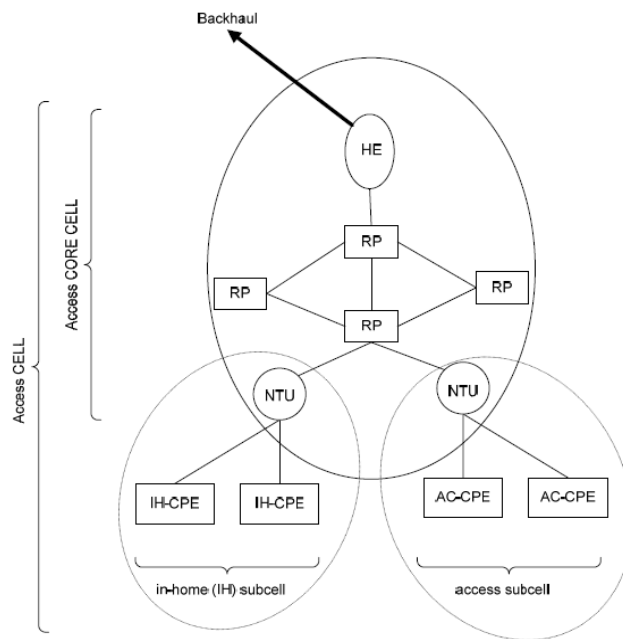
Πηγή: [1]

- Οι δυνατές τοπολογίες ενός cell είναι:
  - α) δακτυλίου (ring), όπου οι επαναλήπτες έχουν σχεδιαστεί να επεκτείνουν την εμβέλεια μεταξύ του HE και των άλλων κόμβων σχηματίζοντας δακτύλιο,
  - β) πλέγματος (mesh), όπου οι κόμβοι έχουν περισσότερους από ένα δρόμους επικοινωνίας μεταξύ τους. Ωστόσο, οι διακόπτες μπορεί να διακόψουν μία διαδρομή που ήδη υπάρχει ή να δημιουργήσουν μια νέα μεταξύ των κόμβων με αποτέλεσμα μία δυναμική τοπολογία που μεταβάλλεται με το χρόνο- κόμβοι που έχουν καλή συνδεσιμότητα μπορεί να τη χάσουν μόλις ανοίξει κάποιος διακόπτης, ενώ κόμβοι που δεν μπορούσαν να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλο μπορούν να επιτύχουν καλό επίπεδο συνδεσιμότητας όταν κλείσει κάποιος διακόπτης,
  - γ) δέντρου (tree), όπου υπάρχει μόνο μία διαδρομή μεταξύ ενός κόμβου και ενός άλλου κόμβου. Έτσι, η διαδρομή από ένα κόμβο σε ένα άλλο είναι σταθερή. Η πραγματική διαδρομή όμως του σήματος εξαρτάται από την ποιότητα σύνδεσης των ενδιάμεσων σταθμών- ένας σταθμός μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν απομακρυσμένο επαναλήπτη αντί ενός γειτονικού εφόσον το επίπεδο συνδεσιμότητας μέσω του πρώτου είναι καλύτερο. Ωστόσο, όταν εξωτερικοί παράγοντες, όπως θόρυβος, επιβαρύνουν τη σύνδεση αυτή, ένας κόμβος μπορεί να επιλέξει τον πλησιέστερο του γειτονικό κόμβο ως

επαναλήπτη. Αυτή η λειτουργία είναι λειτουργία επιπέδου ανώτερου από το MAC και συζητείται μόνο ως πληροφορία για δημιουργία γνωστικού υπόβαθρου,  
 δ) συνδυασμός των προηγούμενων.

- Ένα **cell του δικτύου πρόσβασης (access cell)** ορίζεται ως το BSS των κόμβων που έχουν κοινή διαχείριση, ασφάλεια, απαιτήσεις QoS και ρυθμίσεις πρόσβασης στο δίκτυο με λειτουργίες που σχετίζονται με το περιβάλλον πρόσβασης. Η επικοινωνία με το δίκτυο κορμού (backhaul) γίνεται σε κάθε cell από τον HE. Κάθε cell σε ένα δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από ένα πυρήνα (core cell) και από μία ή περισσότερες υποκυψέλες (subcells). Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα access cells.

**Εικόνα 3.4: Cell δικτύου πρόσβασης**

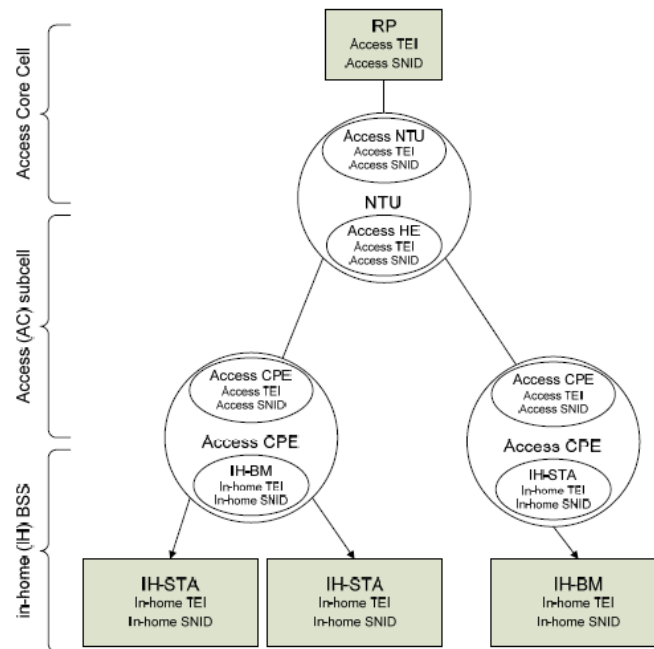


Πηγή: [9]

- Το core cell αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο κλειδί κρυπτογράφησης (network encryption key- NEK). Το core cell δεν είναι απαραίτητα το PHYNET του HE. Τυπικά είναι μεγαλύτερο. Η χρήση επαναληπτών επιτρέπει στον HE να διαχειρίζεται μία περιοχή ευρύτερη από το PHYNET του.
- Ένα access subcell αποτελεί επέκταση του access cell που παρέχει τη σύνδεση πολλών CPEs στο access cell μέσω μιάς ενεργής NTU. Το access subcell μπορεί να περιέχει

επαναλήπτες. Το MAC και οι κατηγορίες κίνησης στο φυσικό στρώμα από την NTU στα CPEs κάθε πελάτη χρησιμοποιούν διαφορετικό NEK. Η λειτουργία του NTU για το access subcell εξαρτάται από την εφαρμογή- είναι δηλαδή συγκεκριμένη ανάλογα με το εάν η NTU λειτουργεί ως ενδιάμεσος, ως επαναλήπτης ή ως HE για το access subcell.

**Εικόνα 3.5: Subcell**



Πηγή: [9]

- Όπως αναφέρθηκε, τα βασικά δομικά στοιχεία ενός access cell είναι ο HE, οι επαναλήπτες RPs και οι τερματικές μονάδες NTUs. Κάθε κόμβος μέσα σε ένα cell χρειάζεται μία μοναδική διεύθυνση [1]. Στους HE αποδίδεται ένα αναγνωριστικό που ονομάζεται SNID (Short Network Identification). Οι δυνατές τιμές του SNID μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι και 64 γειτονικά δίκτυα. Κάθε SNID ορίζει μοναδικά και απομονώνει λογικά ένα access cell από τα υπόλοιπα. Κάθε νέος κόμβος αναζητεί ένα cell με το οποίο θα συνδεθεί και χρησιμοποιεί το SNID για να διακρίνει τα γειτονικά cells. Ένας κόμβος που είναι ήδη συνδεδεμένος σε κάποιο cell χρησιμοποιεί τα SNIDs για να αναζητήσει γειτονικά cells, εφόσον με τον τρόπο αυτό μπορεί να βελτιώσει το επίπεδο συνδεσιμότητάς του με τον HE. Όταν ο σταθμός δεν μπορεί να ακούσει τον HE άμεσα, χρησιμοποιεί την ικανότητα επανάληψης των RPs και σχετίζεται με κάποιον άλλο κόμβο ως ενδιάμεσο για να συνδεθεί. Αφού τελειώσει η διαδικασία σύνδεσης, ο HE απονέμει

στον κόμβο μία διεύθυνση των 12-bit, την TEI (Terminal Entity Identification). Ο συνδυασμός των TEI και SNID είναι η διεύθυνση που χρησιμοποιεί ο κόμβος για συγχρονισμό με τους γειτονικούς του κόμβους, για μετάδοση της πληροφορίας και για σκοπούς σύνδεσης (bridging) και επανάληψης (repeating). Ο συνδυασμός αυτός είναι μοναδικός για κάθε κόμβο και του επιτρέπει να επικοινωνεί με τους γειτονικούς του κόμβους. Επειδή η διεύθυνση αυτή χρησιμοποιείται για επικοινωνία από σημείο σε σημείο, είναι το βασικό εργαλείο ταυτοποίησης για αλγορίθμους υψηλότερων στρωμάτων, όπως εκτίμηση διαύλου, πρόσβαση στο δίαυλο, γεφύρωση (bridging), δρομολόγηση (routing) και διαχείριση (management).

Η χρήση του συνδυασμού TEI και SNID αντί για τη διεύθυνση MAC κάθε κόμβου είναι περισσότερο αποτελεσματική όσον αφορά το μέγεθός της. Δηλαδή ο συνδυασμός TEI και SNID είναι μία διεύθυνση με μήκος 18 bits, ενώ η διεύθυνση MAC έχει μήκος 48 bits. Επειδή κάθε πακέτο περιλαμβάνει τουλάχιστον τη διεύθυνση πηγής και προορισμού, με τις TEI/ SNID διευθύνσεις απαιτούνται 30 bits (TEI πηγής, TEI προορισμού και SNID), ενώ με τις MAC 96 bits. Το αποτέλεσμα είναι λιγότερα 66 bits ανά πακέτο.

Το SNID αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμο και για την ανίχνευση του γειτονικού δικτύου (cell) και της δραστηριότητάς του. Τα γειτονικά δίκτυα πρέπει να συνυπάρχουν δίκαια, να επικοινωνούν και να συγχρονίζονται ενημερώνοντας το ένα το άλλο για τους χρόνους μετάδοσής τους. Επιπλέον, ένα γειτονικό cell μπορεί να είναι η επιλογή σε περίπτωση που διακοπεί κάποια σύνδεση σε ένα cell. Η επιλογή αυτή αυξάνει την ευρωστία του δικτύου σε περίπτωση που κάποιο γειτονικό δίκτυο χάσει τη συνδεσιμότητά του ή αλλάξει τοπολογία σε ένα σημείο όπου η σύνδεση δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις μίας εφαρμογής και χρειάζεται καινούργιο δρόμο μετάδοσης. Το πρώτο βήμα για τη συνύπαρξη των cells είναι η ικανότητα ανίχνευσης γειτονικών cells. Με τη χρήση των SNIDs, κάθε κόμβος είναι σε θέση να ανυχνεύσει τη δραστηριότητα στο γειτονικό cell και να ταξινομήσει κάθε μετάδοση προς το κάθε γειτονικό cell.

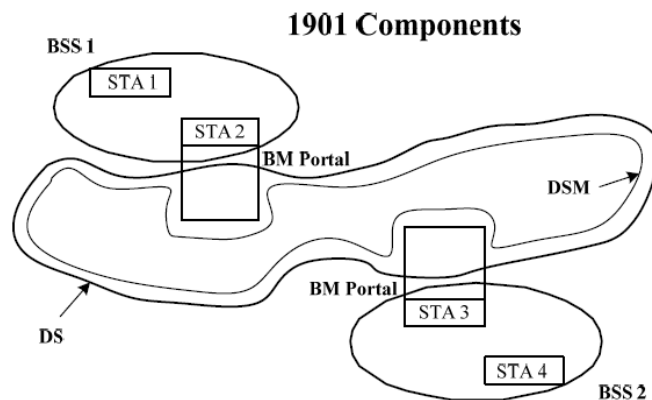
### 3.3 Στοιχεία οργάνωσης και αρχιτεκτονικής του ηλεκτρικού δικτύου- DS και ESS

- Οι περιορισμοί στο φυσικό στρώμα καθορίζουν την από σταθμό/κόμβο σε σταθμό/κόμβο απόσταση άμεσης μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχθεί. Για κάποια δίκτυα η απόσταση αυτή είναι αρκετή ώστε το δίκτυο να μπορεί να καλύψει την επιθυμητή περιοχή με τους διαθέσιμους σταθμούς/κόμβους. Για άλλα, χρειάζεται ευρύτερη κάλυψη. Υπάρχουν δύο τρόποι για να αντιμετωπιστεί αυτό: ο πρώτος είναι η χρήση επαναληπτών στο BSS (αντίστοιχα στο cell για τα δίκτυα πρόσβασης) ώστε να επεκταθεί η κάλυψή του σε ευρύτερη γεωγραφική περιοχή (Basic Service Area- BSA). Ο δεύτερος τρόπος είναι η λειτουργία με πολλά BSS (multi BSS operation). Η περιγραφή θα συνεχιστεί με όρους in-home δικτύων.
- Αντί να υπάρχουν ανεξάρτητα, τα BSS μπορούν να σχηματίσουν μία εκτεταμένη μορφή δικτύου που έχει χτιστεί με πολλά BSS. Η αρχιτεκτονική οντότητα που χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση των BSS είναι το σύστημα DS (Distribution System). Το IEEE 1901 διαχωρίζει λογικά την ηλεκτρική γραμμή από το μέσο μετάδοσης του DS (distribution system medium- DSM). Κάθε λογικό μέσο (logical medium) χρησιμοποιείται για διαφορετικούς σκοπούς από διαφορετική οντότητα της αρχιτεκτονικής. Στο πρότυπο IEEE 1901 δεν καθορίζεται ο τρόπος υλοποίησης του DS. Συνεπώς, το DS μπορεί να είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικών γραμμών που αποτελείται από ένα ή περισσότερα δίκτυα ή να υλοποιηθεί με κάποια άλλη υπάρχουσα ή καινούργια τεχνολογία. Μπορεί δηλαδή να συνδυάσει διαφορετικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων άλλων IEEE 1901 δικτύων, ενσύρματων και ασύρματων IEEE 802 τοπικών δικτύων, IEEE 1394 τοπικών δικτύων και δικτύων στα οποία η πρόσβαση γίνεται μέσω DSL, καλωδιακών ή δορυφορικών ζεύξεων. Το πρότυπο IEEE 1901 δεν θέτει περιορισμούς ως προς την υλοποίηση του DS. Ωστόσο, καθορίζει πλήρως τις απαιτούμενες υποστηριζόμενες λογικές υπηρεσίες.
- Υπάρχουν δύο κατηγορίες IEEE 1901 υπηρεσιών: οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τους σταθμούς (SS- Service Set) και οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από το DS (DSS- Distribution Service Set). Όλες οι υπηρεσίες χρησιμοποιούνται από το υπόστρωμα MAC. Οι SS είναι: πιστοποίηση (authentication), αποπιστοποίηση (deauthentication), εμπιστευτικότητα δεδομένων (data confidentiality), παράδοση MPDU (MPDU delivery),

ρύθμιση κίνησης με καθορισμό της QoS (QoS traffic scheduling), έλεγχος μετάδοσης ισχύος (TPC- transmit power control), δυναμική επιλογή συχνοτήτων (DFS- dynamic frequency selection), συγχρονισμός (synchronization). Οι DSS είναι: σύνδεση (association), αποσύνδεση (diassociation), επανασύνδεση (reassociation), διανομή (distribution), ενοποίηση (integration) και ρύθμιση κίνησης με καθορισμό της QoS (QoS traffic scheduling).

- Το DS υποστηρίζει νομαδικούς σταθμούς παρέχοντάς τους τις απαραίτητες λογικές υπηρεσίες ώστε να χειρίζονται αντιστοιχίσεις διεύθυνσης-προορισμού και απρόσκοπτη ενσωμάτωση των πολλαπλών BSS. Το DS είναι διαφανές προς τις BSS λειτουργίες των συνδεδεμένων BSS.
- Στην Εικόνα 3.6 φαίνονται δύο BSS τα οποία αποτελούνται το καθένα από δύο σταθμούς (το BSS 1 αποτελείται από τους σταθμούς STA 1 και STA 2, το BSS 2 αποτελείται από τους σταθμούς STA 3 και STA 4). Τα δύο BSS συνδέονται με το DSM σε ένα DS, το οποίο επικοινωνεί με κάθε BSS με το σταθμό BM.

**Εικόνα 3.6: Τα DS και τα BM**



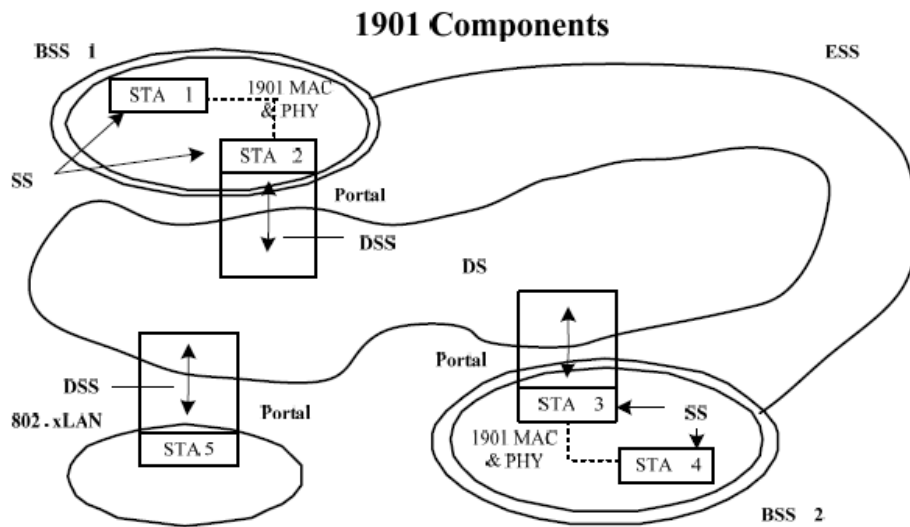
Πηγή: [9]

- Η χρήση των DS και των BSS επιτρέπει στο IEEE 1901 να ορίσει ένα ηλεκτρικό δίκτυο αυθαίρετου μεγέθους και πολυπλοκότητας. Το IEEE 1901 αναφέρεται σε αυτό ως σύνολο σταθμών εκτεταμένων υπηρεσιών (extended service set- ESS). Ένα ESS είναι η ένωση των BSS που συνδέονται με ένα ή περισσότερα DS. Το ESS δεν περιλαμβάνει το

DS (ακόμα και όταν το DS συμβαίνει να αποτελείται από ένα ή περισσότερα IEEE 1901 δίκτυα.

Η βασική ιδέα είναι ότι το ESS δίκτυο εμφανίζεται το ίδιο στο LLC στρώμα όπως θα εμφανιζόταν ένα λογικό BSS χωρίς συσχετισμούς ή απαιτήσεις πιστοποίησης. Οι σταθμοί στο ESS μπορούν να επικοινωνούν, οι νομαδικοί σταθμοί μπορούν να μετακινούνται από ένα BSS στο άλλο (μέσα στο ίδιο ESS) αδιαφανώς προς το LLC και ακόμα και οι σταθεροί σταθμοί μπορούν να αλλάζουν BM και επομένως BSS.

Εικόνα 3.7: ESS



Πηγή: [9]

- Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα το σχήμα της Εικόνας 3.7 θα γίνει σύντομη περιγραφή των SS και DSS υπηρεσιών.

- **DSS Services**

- Στο παραπάνω ESS δίκτυο, ο σταθμός STA 1 θέλει να αποστείλει ένα πλαίσιο δεδομένων στο σταθμό STA 4. Το πλαίσιο αποστέλεται από το σταθμό STA 1 και λαμβάνεται από το σταθμό STA 2 (input BM). Ο BM δίνει το πλαίσιο στην υπηρεσία διανομής του DS (**distribution DSS**). Είναι καθήκον της υπηρεσίας διανομής να παραδώσει το DS με τρόπο ώστε να φτάσει στον κατάλληλο DS προορισμό για να παραδοθεί στον παραλήπτη προορισμού. Στο παράδειγμα το



πλαίσιο παραδίδεται στο σταθμό STA 3 (output BM) και ο σταθμός STA 3 μέσω των ηλεκτρικών γραμμών αποστέλει το πλαίσιο στο σταθμό STA 4. Το πώς το πλαίσιο διανέμεται μέσα στο DS δεν καθορίζεται από το IEEE 1901 πρότυπο. Οι απαραίτητες πληροφορίες για τη διανομή παρέχονται στο DS από τις τρεις υπηρεσίες σύνδεσης (**association, deassociation, reassociation** DSS). Για να μεταδώσει το DS ένα πλαίσιο πρέπει να γνωρίζει με ποίο BM είναι ο σταθμός συνδεδεμένος. Αυτή η πληροφορία δίδεται με την υπηρεσία σύνδεσης. Η υπηρεσία αυτή είναι αρκετή για να υποστηρίξει μετάδοση πλαισίων εντός ενός BSS. Είναι απαραίτητη, ωστόσο όχι επαρκής για να υποστηρίξει φορητότητα των σταθμών από BSS σε BSS (στο ίδιο ESS). Μόλις ο σταθμός συνδεθεί στο νέο BSS απαιτείται η υπηρεσία της επανασύνδεσης. Η αποσύνδεση γίνεται για να ενημερωθεί το DS για τον τερματισμό σύνδεσης ενός σταθμού και να ακυρώσει τις πληροφορίες σύνδεσης. Η υπηρεσία της αποσύνδεσης μπορεί να ενεργοποιηθεί είτε από τον BM (μπορεί να απαιτήσει αποσύνδεση από τους σταθμούς όταν για παράδειγμα πρέπει να αποσυρθεί για αντικατάσταση ή φροντίδα) είτε από το σταθμό (όταν φεύγει από το δίκτυο). Στην περίπτωση που το DS αντιληφθεί ότι ο σταθμός προορισμού είναι σε ένα τοπικό δίκτυο με το οποίο το IEEE 1901 δίκτυο επικοινωνεί (όπως Ethernet), το σημείο «εξόδου» από το DS θα είναι μία πύλη (portal) και όχι ένας BM. Όταν υπάρχουν μηνύματα που προορίζονται για μία πύλη, η υπηρεσία ενοποίησης (**integration** DSS) είναι υπεύθυνη για να πραγματοποιήσει ό,τι χρειάζεται για να μεταδώσει το πλαίσιο στο άλλο δίκτυο (π.χ. αντιστοίχιση διευθύνσεων). Το DS με χρήση της υπηρεσίας ρύθμισης κίνησης με καθορισμό της QoS (**QoS traffic scheduling** DSS) για τη μετάδοση οποιουδήποτε πλαισίου πρέπει να λάβει υπόψη του την προτεραιότητά του ανάλογα με τις απαιτήσεις υπηρεσίας που έχει.

- **SS Services**

Για την παροχή υπηρεσιών ελέγχου των σταθμών στα IEEE 1901 δίκτυα, αντίστοιχων με αυτές που είναι εγγενείς στα ενσύρματα δίκτυα, κάθε σταθμός πρέπει να υποστηρίζει τρεις υπηρεσίες: πιστοποίησης (**authentication** SS), αποπιστοποίησης (**deauthentication** SS) και εμπιστευτικότητας δεδομένων (**data confidentiality** SS). Τα IEEE 1901 δίκτυα δεν παρέχουν μηχανισμούς

πιστοποίησης από άκρο σε άκρο (για κάθε μετάδοση πλαισίου) ή χρήστη προς χρήστη. Η υπηρεσία πιστοποίησης γίνεται αρχικά από όλους τους σταθμούς για να πιστοποιήσουν την ταυτότητά τους στους σταθμούς με τους οποίους επικοινωνούν μέσα στο BSS. Σε δίκτυα ισχυρής ασφάλειας (robust security networks- RSNs), αν δύο σταθμοί δεν μπορέσουν να εδραιώσουν ένα αμοιβαία αποδεκτό επίπεδο πιστοποίησης με τον BM ή όποιον άλλο σταθμό είναι υπεύθυνος για την πιστοποίηση, οι σταθμοί αυτοί δεν θα μπορέσουν να επικοινωνήσουν με τους άλλους σταθμούς στο BM παρά μόνο θα έχουν άδεια για αίτηση πιστοποίησης και ανάγνωση των πλαισίων φάρων από τον BM. Η αποπιστοποίηση ενεργοποιείται όταν πρόκειται να τερματιστεί η σύνδεση του σταθμού και καταστρέφει οποιαδήποτε πληροφορία σχετίζεται με το σταθμό. Για την εξασφάλιση ενός επιπέδου ασφαλείας είναι απαραίτητη η υπηρεσία εμπιστευτικότητας δεδομένων, η οποία χρησιμοποιεί κρυπτογραφικούς αλγορίθμους για να προστατέψει το περιεχόμενο των μεταδιδόμενων μηνυμάτων. Η υπηρεσία παράδοσης MPDU (**MPDU delivery SS**) είναι υπεύθυνη για λειτουργικά θέματα σχετικά με την αποστολή των πλαισίων όπως, για παράδειγμα, ο καθορισμός του ρυθμού μετάδοσης σύμφωνα και με τις ιδιότητες του φυσικού μέσου και η εκτίμηση του διαύλου που επιτρέπει τη δυναμική επιλογή μεθόδων διαμόρφωσης. Μία οντότητα ρύθμισης κίνησης σε κάθε σταθμό είναι υπεύθυνη για την υπηρεσία ρύθμισης κίνησης με καθορισμό της QoS (**QoS traffic scheduling SS**). Η οντότητα αυτή διαλέγει τα πλαίσια προς μετάδοση από τις διάφορες ουρές μετάδοσης ανάλογα με την προτεραιότητά τους όπως αυτή έχει ζητηθεί από το χρήστη (User priority- UP). Η υπηρεσία συγχρονισμού (**synchronization SS**) παρέχεται από το MAC προς υψηλότερα στρώματα ώστε αυτά να είναι σε θέση να συγχρονίσουν με ακρίβεια μετρητές σε διαφορετικούς σταθμούς, όταν αυτό χρειάζεται (π.χ. για εφαρμογές όπως η μεταφορά ροών βίντεο ή ήχου). Η υπηρεσία ελέγχου μετάδοσης ισχύος (**TPC- transmit power control SS**) υποστηρίζει λειτουργίες που είναι απαραίτητες για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς που ισχύουν για τα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος έγχυσης και για τη μείωση των παρεμβολών με εξωτερικές από το IEEE 1901 τεχνολογίες επικοινωνιών. Τέλος, η υπηρεσία δυναμικής επιλογής συχνοτήτων (**DFS-**

dynamic frequency selection SS) είναι απαραίτητη για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς που ισχύουν για τις επιτρεπόμενες συχνότητες λειτουργίας. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εύρεση από το σταθμό ενός άλλου καναλιού που τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι διαθέσιμο και έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα.



## 4. Το στρώμα MAC στο πρότυπο IEEE 1901

### 4.1 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο

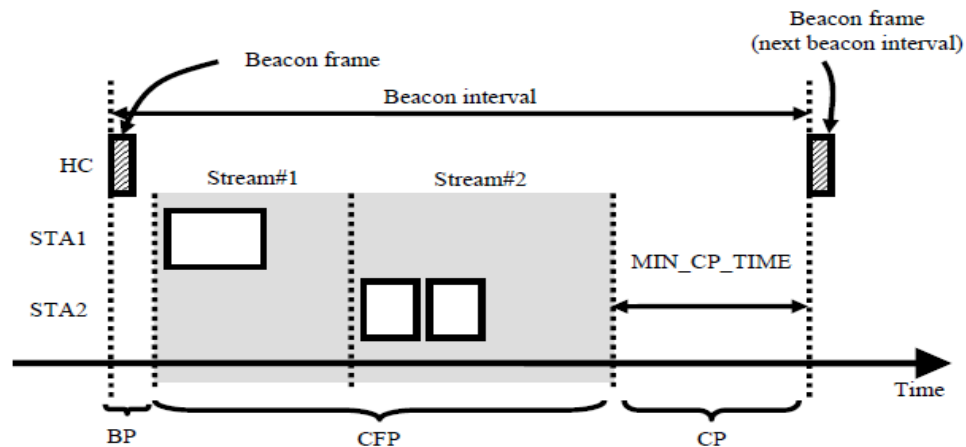
Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία ελέγχου πρόσβασης των σταθμών στο κοινό μέσο, πρώτα εντός ενός BSS και έπειτα εντός ενός access cell για να γίνει εμφανής ο διαφορετικός ρόλος του BM και του HE στη διαδικασία αυτή.

### 4.2 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο από τον BM

Η λειτουργία ελέγχου ποιότητας υπηρεσίας (QoS control function) του IEEE 1901 BM καθορίζει και ελέγχει το πρόγραμμα για την πρόσβαση στο μέσο. Χρησιμοποιώντας πλαίσια-φάρους (Beacon frames) -κεντρικά (Central Beacon) ή διαμεσολάβησης (Proxy Beacon)- ο BM γνωστοποιεί στους άλλους σταθμούς το πρόγραμμα πρόσβασης στο μέσο μέχρι την αποστολή του επόμενου Beacon frame. Αφού το BSS έχει ρυθμιστεί και έχει ξεκινήσει η λειτουργία του, η βασική διαδικασία πρόσβασης είναι μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία συγχρονισμού που αποκαλείται διάστημα φάρου (Beacon Interval). Κάθε συγχρονισμένη περίοδος αρχίζει όταν ο BM αποστέλλει ένα beacon frame. Ο BM αποστέλλει beacon frames κατά καθορισμένες περιόδους BP (beacon periods).

Κατά τη διάρκεια ενός beacon interval, υπάρχουν τρία διακριτά χρονικά διαστήματα. Το πρώτο καλείται «beacon extent» και είναι μία καθορισμένη χρονική περίοδος στην οποία ο BM πρέπει να στείλει το Beacon Frame. Η δεύτερη είναι περίοδος χωρίς ανταγωνισμό CFP (contention free period) που χρησιμοποιείται για μετάδοση από σταθμούς που χρειάζονται δεσμευμένο εύρος ζώνης σε κάθε επανάληψη του προγράμματος πρόσβασης στο μέσο. Η τρίτη είναι η περίοδος ανταγωνισμού CP (contention period) στην οποία παρέχονται υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (best effort services). Αυτές οι υπηρεσίες μπορεί να υπόκεινται σε ρυθμίσεις προτίμησης για τα μεταδιδόμενα πλαίσια. Ο BM μπορεί να εκχωρήσει πολλές περιόδους CFP ή CP σε ένα beacon interval όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1.

Εικόνα 4.1: Παράδειγμα προγράμματος πρόσβασης στο μέσο σε ένα BSS



Πηγή: [9]

Ο BM παρέχει τις πληροφορίες για το πρόγραμμα πρόσβασης στο μέσο (πχ διάρκεια των χρονικών περιόδων CP και CFP για τους διάφορους σταθμούς) χρησιμοποιώντας πλαίσια-φάρους (beacon frames).

Κάθε CFP περίοδος είναι μία περίοδος στην οποία ένας μόνο σταθμός επιτρέπεται να μεταδίδει κάθε στιγμή στο μέσο. Ο BM παρέχει τις CFP περιόδους στους σταθμούς ανάλογα με το εύρος ζώνης που χρειάζεται κάθε σταθμός στο BSS. Αφού σταλούν οι αιτήσεις των σταθμών και γίνει και η κατανομή του εύρους ζώνης, οι σταθμοί επιτρέπεται να μεταδώσουν τα δεδομένα στις περιόδους CFP σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που παρέχονται σε αυτούς. Όταν ένας σταθμός μεταδίδει στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που του παρέχεται, δεν υπάρχει ανταγωνισμός με άλλους σταθμούς για πρόσβαση στο μέσο. Αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να ελέγξει πρώτα το μέσο και να ανταγωνιστεί με άλλους σταθμούς πριν αρχίσει να μεταδίδει. Απλώς αρχίζει να μεταδίδει. Οι περίοδοι χωρίς ανταγωνισμό παρέχουν τόσες σταθερές ευκαιρίες μετάδοσης όσες επιτρέπει το μέσο μετάδοσης. Συνεπώς δεδομένα συνεχούς ροής (streaming data) όπως βίντεο, ήχος και IP τηλεφωνία (Voice over IP- VoIP) είναι καλό να μεταδίδονται στις περιόδους χωρίς ανταγωνισμό.

Κατά τις περιόδους ανταγωνισμού, ένας σταθμός αποκτά το δικαίωμα να μεταδώσει μέσα από μία διαδικασία ανταγωνισμού που είναι ένας μηχανισμός πολλαπλής πρόσβασης με αποφυγή σύγκρουσης CSMA/CA (Channel Sense Multiple Access/ Collision Avoidance). Η διαδικασία

CSMA/CA επιβάλλει ένας σταθμός να περιμένει πριν του επιτραπεί να μεταδώσει επί χρονικές περιόδους ο αριθμός των οποίων κάθε φορά ποικίλει. Συνεπώς, δεδομένα που δεν χρειάζονται παράδοση βάσει συγκεκριμένου προγράμματος, όπως δεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ υπολογιστών ή δεδομένα προς κάποιο μέσο αποθήκευσης ή προς το Internet (όπως κίνηση βέλτιστης προσπάθειας) είναι καλό να μεταδίδονται στις περιόδους ανταγωνισμού.

### 4.3 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο στα δίκτυα πρόσβασης

Στα IEEE 1901 FFT (Fast Fourier Transform) συστήματα πρόσβασης, η διαδικασία πρόσβασης στο μέσο είναι μία κατανεμημένη διαδικασία (distributed process) σε αντιδιαστολή με την συγκεντρωτική (centralized) μέθοδο κατά την οποία ο BM ήταν ο μόνος που καθόριζε το πρόγραμμα πρόσβασης στο μέσο. Η προεπιλεγμένη μέθοδος πρόσβασης στο cell χρησιμοποιεί περιόδους ανταγωνισμού όπως περιγράφηκαν προηγουμένως. Κάθε κόμβος επιτρέπεται να ανταγωνιστεί για το μέσο χρησιμοποιώντας διαφορετικές προτεραιότητες ανάλογα με τα δεδομένα που έχει προς μετάδοση. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στη στατιστική και δεν εγγυάται χρόνο μετάδοσης σε κανένα σταθμό.

Ο βασικός ρόλος του HE σε ένα access cell όσον αφορά την οργάνωση της πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης είναι η έγκριση των αιτήσεων για τις περιόδους χωρίς ανταγωνισμό. Η διαφορά μεταξύ της περιόδου χωρίς ανταγωνισμό στα BSS και της ροής χωρίς ανταγωνισμό που χρησιμοποιείται στα access cells οφείλεται στο περιβάλλον πολλαπλών βημάτων (multi-hop environment) στα access cells. Μία ροή δομείται σε ένα σύνολο περιόδων χωρίς ανταγωνισμό (CFPs) σε κάθε βήμα μεταξύ του HE και της NTU μέσω των επαναληπτών που υπάρχουν στη διαδρομή. Κάθε κόμβος στη διαδρομή διαλέγει ανεξάρτητα το κενό χρονικό διάστημα για να το χρησιμοποιήσει ως την CFP του και να συντονιστεί με τους γείτονες. Σε ένα access cell, η συμπεριφορά του HE ως προς την πρόσβαση στο μέσο είναι η ίδια με όλους τους άλλους κόμβους στο access cell: να ανταγωνιστεί για το μέσο χρησιμοποιώντας CSMA/CA και να συγχρονίσει τις CFPs του με τους γειτονικούς του κόμβους. Η πληροφορία για το πρόγραμμα πρόσβασης στο μέσο μεταδίδεται στο access cell μεταξύ των γειτονικών κόμβων του cell με «μηνύματα- φάρους» (beacon messages) τα οποία κάθε κόμβος αποστέλλει περιοδικά.

#### 4.4 Προτεραιότητες

Οι IEEE 1901 σταθμοί υποστηρίζουν 8 επίπεδα προτεραιότητας που καθορίζονται από τους χρήστες και τα οποία για την υλοποίησή τους αντιστοιχούν σε 4 στα FFT access συστήματα και σε 16 στα συστήματα κυματιδίων (Wavelet Systems) επίπεδα προτεραιότητας για κάθε πλαίσιο που μεταδίδεται στο φυσικό μέσο. Οι προτεραιότητες υποστηρίζονται σε κάθε σταθμό/κόμβο παρέχοντας διαφορετικές ουρές μετάδοσης. Το MAC σε κάθε σταθμό/κόμβο πρέπει να μεταδώσει πρώτα τα πλαίσια από τις ουρές υψηλής προτεραιότητας πριν μεταδώσει πλαίσια χαμηλότερης προτεραιότητας. Στο CSMA/CA, ο μηχανισμός ανταγωνισμού είναι ο ίδιος, ανεξάρτητα από την προτεραιότητα που έχουν τα πλαίσια. Έτσι, σε κάθε περίοδο ανταγωνισμού, κάθε MAC ανταγωνίζεται για πρόσβαση με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και, έπειτα, όταν αποκτήσει την ευκαιρία μετάδοσης, μεταδίδει πρώτα τα πλαίσια υψηλότερης προτεραιότητας. Όταν ένας σταθμός/κόμβος έχει μεγάλη κίνηση υψηλής προτεραιότητας να μεταδώσει, η κίνηση χαμηλότερης προτεραιότητας ενδεχομένως καθυστερήσει σημαντικά. Για την περιγραφή των μηχανισμών CSMA/CA και TDMA θα χρησιμοποιηθούν όροι In-Home συστημάτων στα οποία οι σταθμοί οργανώνονται σε BSS.

#### 4.5 CSMA/CA

Το βασικό πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο μέσο στις περιόδους με ανταγωνισμό (CP) είναι το CSMA/CA. Το CSMA/CA παρέχει αυτόματο διαμοιρασμό των πόρων μεταξύ σταθμών με συμβατό φυσικό στρώμα PHY μέσω της χρήσης μηχανισμού αποφυγής συγκρούσεων και μηχανισμού απόσυρσης (backoff) έπειτα από ανίχνευση ενός αδρανούς μέσου. Επιπλέον, κάθε κίνηση που προορίζεται για συγκεκριμένους σταθμούς χρησιμοποιεί θετικές επιβεβαιώσεις (positive acknowledgment- ACK frames) και προγραμματισμένη αναμετάδοση από τον αποστολέα εφόσον δεν ληφθεί θετική επιβεβαίωση λήψης.

Το CSMA/CA πρωτόκολλο είναι σχεδιασμένο να μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ πολλαπλών σταθμών που προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο μέσο ακριβώς στο χρονικό σημείο όπου είναι πιθανότερες οι συγκρούσεις. Αμέσως μόλις το μέσο γίνει αδρανές (idle) έπειτα από κάποια μετάδοση κατά την οποία ήταν απασχολημένο (busy), είναι πολύ πιθανό να συμβεί κάποια σύγκρουση. Αυτό συμβαίνει επειδή πολλοί σταθμοί μπορεί να περιμένουν να γίνει και πάλι διαθέσιμο το μέσο. Αυτή η κατάσταση καθιστά αναγκαίο ένα μηχανισμό



απόσυρσης για τυχαίο χρόνο (random backoff procedure) για να επιλυθούν οι περισσότερες αιτήσεις για την κατάληψη του μέσου.

Η ανίχνευση του μέσου CS (carrier sense) μπορεί να γίνεται τόσο με φυσικούς (physical) όσο και με εικονικούς (virtual) μηχανισμούς. Ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου επιτυγχάνεται με την ανακοίνωση της πρόθεσης των σταθμών για μετάδοση ώστε να παρεμποδιστεί η χρήση του μέσου από άλλους σταθμούς. Η ανταλλαγή πλαισίων αίτησης αποστολής RTS (request to send) και αποδοχής αποστολής CTS (clear to send) πριν από τη μετάδοση είναι ένας τρόπος διανομής της πληροφορίας για τη δέσμευση του μέσου. Τα RTS και CTS πλαίσια περιέχουν ένα πεδίο διάρκειας (duration field) το οποίο ορίζει την περίοδο για την οποία χρειάζεται να δεσμευτεί το μέσο ώστε να σταλεί ένα πλαίσιο δεδομένων και η επιβεβαίωση, εφόσον υπάρχει. Όλοι οι σταθμοί που βρίσκονται στην εμβέλεια είτε του σταθμού που μεταδίδει το RTS είτε του σταθμού που μεταδίδει το CTS πρέπει να είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται αν το μέσο είναι δεσμευμένο. Έτσι, ένας σταθμός που μπορεί να μην είναι σε θέση να λάβει δεδομένα από τον αποστολέα γνωρίζει για τη χρήση του μέσου για μετάδοση και αυτό εμποδίζει οποιαδήποτε άλλη πιθανή μετάδοση.

Ένας άλλος τρόπος διανομής της πληροφορίας για τη δέσμευση του μέσου είναι μέσω των πεδίων Duration/ID (identifier)/FL (frame length) σε πλαίσια που προορίζονται για συγκεκριμένο σταθμό. Τα πεδία αυτά περιέχουν πληροφορία περί της διάρκειας κατά την οποία το μέσο θα είναι δεσμευμένο είτε μέχρι τη λήψη της άμεσα αποστελλόμενης επιβεβαίωσης είτε στην περίπτωση σειράς θραυσμάτων, μέχρι τη λήψη της επιβεβαίωσης του επόμενου θραύσματος.

Η ανταλλαγή μηνυμάτων RTS/CTS βοηθά τόσο στην ταχεία εξαγωγή συμπεράσματος για πιθανή σύγκρουση όσο και στον έλεγχο του δρόμου μετάδοσης. Εφόσον το CTS δεν ανιχνευθεί από το σταθμό που μετέδωσε το RTS, ο σταθμός-πομπός θα επαναλάβει τη διαδικασία (αφού παρατηρήσει τους κανόνες μετάδοσης και των άλλων σταθμών) ταχύτερα σε σχέση με το αν μετέδιδε το πλαίσιο των δεδομένων και δεν ανίχνευε την επιβεβαίωση λήψης.

Στις περιπτώσεις ευρυεκπομπής (broadcast) ή πολυεκπομπής (multicast), ο μηχανισμός των RTS/CTS δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί παρά μόνο αν εφαρμοστούν δύο συγκεκριμένες επιλογές. Σε διαφορετική περίπτωση πολλοί παραλήπτες του RTS θα προσπαθήσουν να

μεταδώσουν ταυτόχρονα το CTS. Σύμφωνα με την πρώτη επιλογή, ένα πεδίο στο RTS χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι δεν αναμένεται απάντηση CTS. Αυτό επιτρέπει στο RTS να επιτελέσει τουλάχιστον μέρος της διαδικασίας ειδοποίησης. Σύμφωνα με τη δεύτερη επιλογή, επιλέγεται συγκεκριμένος σταθμός διαμεσολάβησης με δυνατότητα πολυεκπομπής (multicast proxy) και αυτός ο σταθμός απαντά με CTS.

Ο RTS/CTS μηχανισμός δεν είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθεί για κάθε πλαίσιο μετάδοσης δεδομένων. Επειδή τα πρόσθετα RTS/CTS πλαίσια επιβαρύνουν τη λειτουργία του δικτύου (add overhead efficiency), ο μηχανισμός δεν δικαιολογείται πάντα, ιδίως για μικρά πλαίσια δεδομένων. Το CSMA/CA παρέχει επιπλέον επίπεδα προτεραιότητας ανταγωνισμού για την ελαχιστοποίηση του χρόνου που πρέπει να ανταγωνιστεί η κίνηση υψηλής προτεραιότητας.

#### **4.5.1 CSMA/CA βασισμένο σε υποδοχές ανάλυσης προτεραιότητας (PRS- based prioritized CSMA/CA)**

Όταν η σημαία PriorityResolutionSignalContentionFlag στο MAC είναι ενεργή (έχει την τιμή 1), το πρωτόκολλο που εφαρμόζεται είναι το PRS-based prioritized CSMA/CA. Τότε, πριν αρχίσει η επόμενη περίοδος ανταγωνισμού, υπάρχει η περίοδος ανάλυσης προτεραιότητας (priority resolution period- PRS). Η μέθοδος αυτή αναλύεται σε αυτή την υποενότητα. Όταν η σημαία δεν είναι ενεργή (έχει την τιμή 0), δεν υπάρχει περίοδος ανάλυσης προτεραιότητας PRS και μετά την περίοδο ανταγωνισμού ακολουθεί το χρονικό διάστημα CIFS. Η μέθοδος αυτή αναλύεται στην επόμενη υποενότητα. Η σημαία PriorityResolutionSignalContentionFlag τίθεται για όλο το access cell από τον HE.

#### **Ο μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου (CS)**

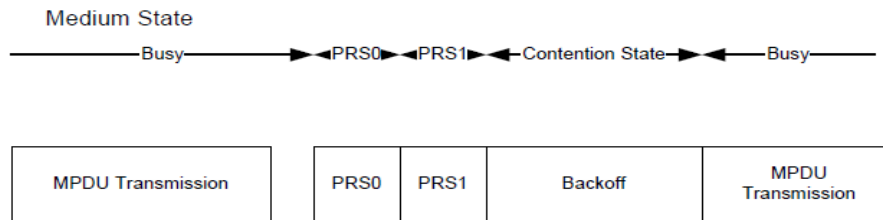
Ο μηχανισμός ανίχνευσης φυσικού στρώματος (physical carrier sense- PCS) παρέχεται από το φυσικό στρώμα κατόπιν ανίχνευσης ενός συμβόλου ανάλυσης προτεραιότητας (Priority Resolution Symbol) ή κατόπιν ανίχνευσης του προοιμίου (Preamble). Στην τελευταία περίπτωση ο μηχανισμός PCS πρέπει να λειτουργήσει επί αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να ανιχνευθούν όλες οι πληροφορίες για τον έλεγχο του πλαισίου (frame control) και να ενεργοποιηθεί ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης μέσου (virtual carrier sense- VCS) από το MAC στρώμα.

Ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης πρόσβασης VCS παρέχεται από το MAC παρακολουθώντας την εκτιμώμενη διάρκεια χρήσης του μέσου. Ο VCS ενεργοποιείται από το περιεχόμενο του

πλασίου ελέγχου (frame control) που λαμβάνει ένας σταθμός ή που μεταδίδεται έπειτα από σύγκρουση. Στις περιπτώσεις αυτές, ο VCS καταγράφει την αναμενόμενη διάρκεια κατά την οποία το μέσο θα είναι απασχολημένο (busy). Επίσης ο VCS ενεργοποιείται και όταν κάποιος σταθμός δεσμεύσει το μέσο στην περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας. Στην περίπτωση αυτή ο VCS καταγράφει την αναμενόμενη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού. Το μέσο πρέπει να θεωρείται απασχολημένο από τον VCS και όταν ο σταθμός μεταδίδει.

Στις Εικόνες 4.2, 4.3 και 4.4 απεικονίζονται τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του VCS. Στην πρώτη περίπτωση το μέσο ανιχνεύεται και χαρακτηρίζεται ως απασχολημένο κατά τη μετάδοση μιας MPDU (μονάδα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ MAC οντοτήτων χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του φυσικού στρώματος) ή έπειτα από ανίχνευσή της κατά την περίοδο ανταγωνισμού.

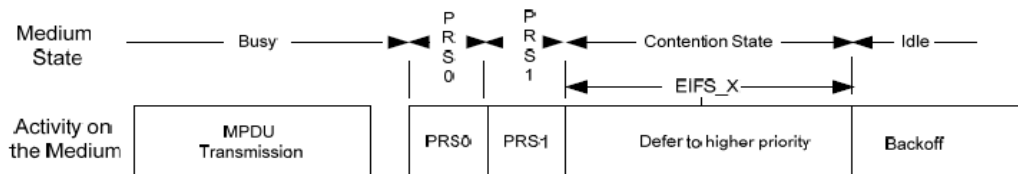
**Εικόνα 4.2: Δραστηριότητα στο μέσο όταν μεταδίδεται μία MPDU ή ανιχνεύεται κατά την περίοδο ανταγωνισμού**



Πηγή:[9]

Στη δεύτερη περίπτωση ένας σταθμός αποκλείεται από τη μετάδοση κατά την περίοδο ανάλυσης προτεραιοτήτων και δεν ανιχνεύει καμία MPDU μετάδοση κατά την περίοδο ανταγωνισμού, αφού έχει παραχωρήσει το μέσο σε μεταδόσεις υψηλότερης προτεραιότητας.

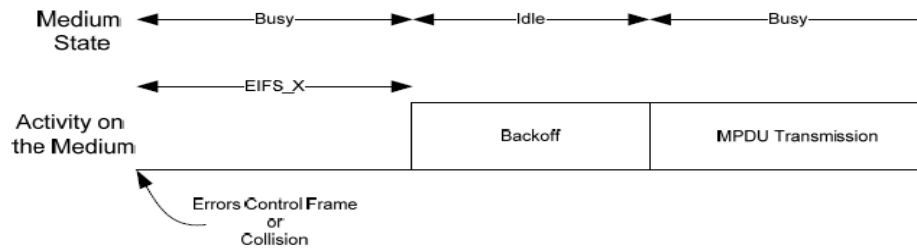
**Εικόνα 4.3: Δραστηριότητα στο μέσο όταν ένας σταθμός αποκλείεται από τη χρήση του μέσου κατά την περίοδο ανάλυσης προτεραιοτήτων**



Πηγή: [9]

Στην τρίτη περίπτωση λάθη στην MPDU ή κάποια σύγκρουση οδηγούν σε απασχολημένο μέσο και δεν γίνεται ανίχνευση για χρόνο EIFS.

**Εικόνα 4.4: Δραστηριότητα στο μέσο όταν υπάρχει λάθος στην MPDU ή κάποια σύγκρουση**



Πηγή: [9]

### ✚ VCS μετρητής

Ένας μετρητής χρόνου VCS διατηρείται από όλους τους σταθμούς για να βελτιώσει την αξιοπιστία της πρόσβασης στο μέσο κατά τη διαδικασία του CSMA/CA. Η ρύθμιση του μετρητή φαίνεται στον πίνακα της Εικόνας 4.5.

**Εικόνα 4.5: Ρύθμιση του VCS μετρητή**

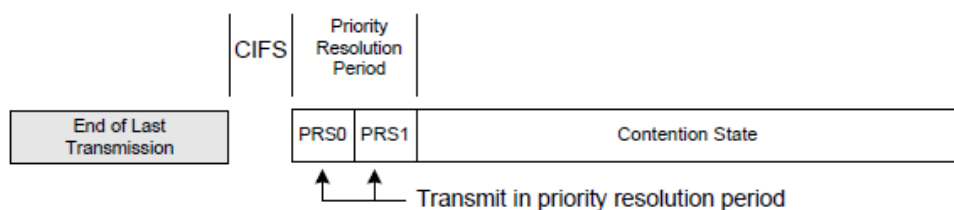
Event Type	New VCS Timer Value	Medium State when VCS Timer Expires
Collision	EIFS_X	Idle
Frame Control with bad FCCS is received	EIFS_X	Idle
Frame Control with at least one invalid field is received	EIFS_X	Idle
Reserved Frame Control is received	EIFS_X	Idle
Start-of-Frame delimiter with MPDUCnt set to 0b00 is received	$(FL \times 1.28 \mu s) + \text{DelimiterTime} + \text{CIFS}$	PRSO
Sound delimiter with MPDUCnt set to 0b00 is received	$(FL \times 1.28 \mu s) + \text{DelimiterTime} + \text{CIFS}$	PRSO
Start-of-Frame delimiter with MPDUCnt set to 0b01, 0b10, or 0b11 is received	$(FL \times 1.28 \mu s)$	Search for next MPDU in the burst
Sound delimiter with MPDUCnt set to 0b01, 0b10, or 0b11 is received	$(FL \times 1.28 \mu s)$	Search for next MPDU in the burst
SACK delimiter is received	CIFS	PRSO
RTS delimiter is received	$\text{RCG} + \text{DelimiterTime} + \text{CMG} + \text{DelimiterTime}$	Idle
CTS delimiter is received	$(\text{DUR} \times 1.28 \mu s) + \text{CIFS}$	PRSO

Πηγή: [9]

## 🚧 Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης

Όταν μία MPDU μπαίνει στην ουρά για μετάδοση, ο σταθμός χρησιμοποιεί συγκεκριμένη διαδικασία για μετάδοση η οποία θα περιγραφεί και αναλυτικά στη συνέχεια. Η πρόθεση ενός σταθμού να ανταγωνιστεί με συγκεκριμένη προτεραιότητα για να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο δηλώνεται στην περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.6.

Εικόνα 4.6: Η βασική διαδικασία πρόσβασης



Πηγή: [9]

Στο βήμα αυτό όλοι οι σταθμοί γνωρίζουν το υψηλότερο επίπεδο προτεραιότητας στο οποίο υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση που εκκρεμούν, οπότε πρέπει να αναβάλουν τη μετάδοση των δικών τους δεδομένων εφόσον είναι χαμηλότερης προτεραιότητας. Αυτή η διαδικασία καλείται ανταγωνισμός προτεραιοτήτων (priority contention). Μετά την περίοδο αυτή όλοι οι σταθμοί που έχουν να μεταδώσουν δεδομένα στην υψηλότερη προτεραιότητα που καθορίστηκε στην PRS ανταγωνίζονται για πρόσβαση κατά την περίοδο ανταγωνισμού εφαρμόζοντας και τον αλγόριθμο απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας (random backoff time).

Ο ανταγωνισμός προτεραιοτήτων επιλύεται στις υποδοχές ανάλυσης προτεραιότητας (priority resolution slots- PRS) PRS0 και PRS1. Ο πίνακας στην Εικόνα 4.7 αντιστοιχεί την προτεραιότητα πρόσβασης στο μέσο με τις υποδοχές ανάλυσης προτεραιότητας. Η υψηλότερη προτεραιότητα είναι η CA3=0b11, ενώ η χαμηλότερη η CA0=0b00. Σε κάθε υποδοχή μεταδίδεται ένα σύμβολο (priority resolution symbol) ακολουθούμενο από 5.12μsec σιγής με την ακόλουθη εξαίρεση. Εφόσον ο μηχανισμός ανίχνευσης μέσου στο φυσικό στρώμα PCS είναι ενεργοποιημένος και ανιχνευθεί σύμβολο προτεραιότητας (priority resolution symbol) σε περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας κατά την οποία ο σταθμός δεν εξέπεμψε σήμα, τότε ο σταθμός έχασε τον ανταγωνισμό προτεραιότητας και δεν πρέπει να μεταδώσει ούτε σε πιθανή επόμενη υποδοχή ανάλυσης προτεραιότητας ούτε να ανταγωνιστεί στην αμέσως επόμενη

περίοδο ανταγωνισμού για πρόσβαση στο μέσο. Μόνο οι σταθμοί που δήλωσαν στην περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας την πρόθεσή τους να μεταδώσουν και δεν αποκλείστηκαν από άλλους σταθμούς με υψηλότερη προτεραιότητα μπορούν να ανταγωνιστούν για πρόσβαση στο μέσο στην επόμενη περίοδο ανταγωνισμού σύμφωνα με τη διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας (random backoff procedure) που θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια.

**Εικόνα 4.7: Προτεραιότητα πρόσβασης στο κανάλι- Υποδοχές PRS**

Channel Access Priority	PRS0 State	PRS1 State
CA3	1	1
CA2	1	0
CA1	0	1
CA0	0	0

Πηγή: [9]

Η διαδικασία ανάλυσης προτεραιότητας πρέπει να εκτελείται ανεξάρτητα από το αν υπάρχει κάποια MPDU για μετάδοση. Όταν δεν υπάρχει MPDU στην ουρά για μετάδοση, η διαδικασία εκτελείται με υποτιθέμενη μηδενική προτεραιότητα, ώστε να διατηρηθεί η γνώση για την υψηλότερη προτεραιότητα που ανταγωνίζεται για το μέσο. Οι MPDUs που εισέρχονται στην ουρά για μετάδοση κατά το PRS0 αποστέλλουν μόνο την τιμή για το PRS1, διαφορετικά εφαρμόζουν τους κανόνες που αναφέρθηκαν νωρίτερα για πρόσβαση στο μέσο. Οι MPDUs που τίθενται στην ουρά για μετάδοση κατά το PRS1 ή κατά την περίοδο ανταγωνισμού ακολουθούν τους κανόνες πρόσβασης στο μέσο που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Πληροφορίες για την αντιστοίχιση των 8 διαφορετικών προτεραιοτήτων που καθορίζονται από την κίνηση στο χρήστη στα 4 διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας κίνησης στο IEEE 1901 κανάλι μπορούν να αναζητηθούν στο παράρτημα G του IEEE 1901 Standard. Ενδεικτικά παρατίθεται ο πίνακας στην Εικόνα 4.8 από τον οποίο προτείνεται η 4<sup>η</sup> στήλη αφού, όπως ήδη αναφέρθηκε, υπάρχουν 4 διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας στο IEEE 1901 κανάλι.

**Εικόνα 4.8: Προτεινόμενη αντιστοίχιση επιπέδων προτεραιοτήτων κίνησης χρηστών και προτεραιοτήτων κίνησης στο κανάλι**

		Number of Available Traffic Classes							
		1	2	3	4	5	6	7	8
User Priority	0 (default)	0	0	0	1	1	1	1	2
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	0	1	1	2	2	3
	4	0	1	1	2	2	3	3	4
	5	0	1	1	2	3	4	4	5
	6	0	1	2	3	4	5	5	6
	7	0	1	2	3	4	5	6	7

Πηγή: [9]

#### Η διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας (Random backoff procedure)

Για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σύγκρουσης μεταξύ κόμβων που ανταγωνίζονται, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας για να διασκορπιστούν οι χρονικές στιγμές στις οποίες σταθμοί που έχουν στις ουρές MPDUs προσπαθούν να μεταδώσουν. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τους εξής μετρητές: **BPC** (Backoff Procedure Event Counter), **BC** (Backoff Counter), **DC** (Deferral Counter), **CW** (Contention Window). Η διαδικασία περιγράφεται ακολούθως, ενώ φαίνεται σχηματικά και στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί.

Όταν ένας σταθμός προσπαθεί για πρώτη φορά να στείλει μία MPDU πρέπει να ακολουθήσει την κατωτέρω διαδικασία:

- a) Ο σταθμός πρέπει να μηδενίσει τους μετρητές BPC, BC και DC
- b) Ο σταθμός πρέπει να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό ανίχνευσης μέσου φυσικού στρώματος PCS και τον εικονικό μηχανισμό ανίχνευσης μέσου VCS για να καθορίσει την κατάσταση του μέσου ως προς τη δραστηριότητα.
  - 1) Όταν η κατάσταση του μέσου είναι «Αδρανές», ο σταθμός μπορεί να μεταδώσει την MPDU χωρίς να επιλύσει ανταγωνισμό προτεραιότητας και προχωρεί στο βήμα e
  - 2) Όταν η κατάσταση του μέσου είναι «Απασχολημένο», ο σταθμός συνεχίζει με το βήμα f. Αν ο σταθμός δεν μεταδώσει άμεσα, μόλις βρει το μέσο «Αδρανές» πρέπει να συνεχίσει από το βήμα d

- 3) Όταν η κατάσταση του μέσου είναι «PRS0» ή «PRS1» ή «Περίοδος ανταγωνισμού», ο σταθμός πρέπει να επιλύσει τον ανταγωνισμό προτεραιότητας όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα και να συνεχίσει στο βήμα c
- c) Αν ο σταθμός έχασε στη διαδικασία επίλυσης προτεραιότητας, πρέπει να θέσει τον VCS μετρητή σύμφωνα με τον πίνακα στην Εικόνα 4.5 και να γυρίσει στο βήμα b, αλλιώς πρέπει να συνεχίσει στο βήμα d
- d) Αν κάποιος από τους μετρητές BPC, BC ή DC είναι μηδέν, ο σταθμός πρέπει να θέσει τους μετρητές CW και DC ανάλογα με την τιμή του BPC και της προτεραιότητας της MPDU που βρίσκεται στην ουρά σύμφωνα με τον πίνακα στην Εικόνα 4.9, να αυξήσει τον BPC και να θέσει τον BC με μία τιμή ενός ακεραίου που τυχαία έχει επιλεγεί στο διάστημα  $[0, CW]$  ( $BC = \text{random} \leq CW$ ). Διαφορετικά πρέπει να μειώσει τους BC και DC. Σε κάθε χρονική σχισμή, αν η κατάσταση του μέσου έχει γίνει «Απασχολημένο», ο σταθμός πρέπει να πάει στο βήμα f. Διαφορετικά (1) αν ο BC δεν είναι μηδενικός, και το PCS δεν είναι ενεργό (δεν έχει ανιχνευθεί σύμβολο ανάλυσης προτεραιότητας), ο σταθμός θα πρέπει να μειώσει τον BC, ή (2) εάν  $BC=0$ , ο σταθμός θα ξεκινήσει τη μετάδοση της MPDU και θα προχωρήσει στο βήμα e

**Εικόνα 4.9: CW και DC ως συνάρτηση των BPC και Priority**

	<b>Priorities CA3 &amp; CA2</b>	<b>Priorities CA1 &amp; CA0</b>
<b>BPC = 0</b>	CW = 7.....DC = 0	CW = 7.....DC = 0
<b>BPC = 1</b>	CW = 15.....DC = 1	CW = 15...DC = 1
<b>BPC = 2</b>	CW = 15.....DC = 3	CW = 31...DC = 3
<b>BPC &gt; 2</b>	CW = 31.....DC = 15	CW = 63...DC = 15

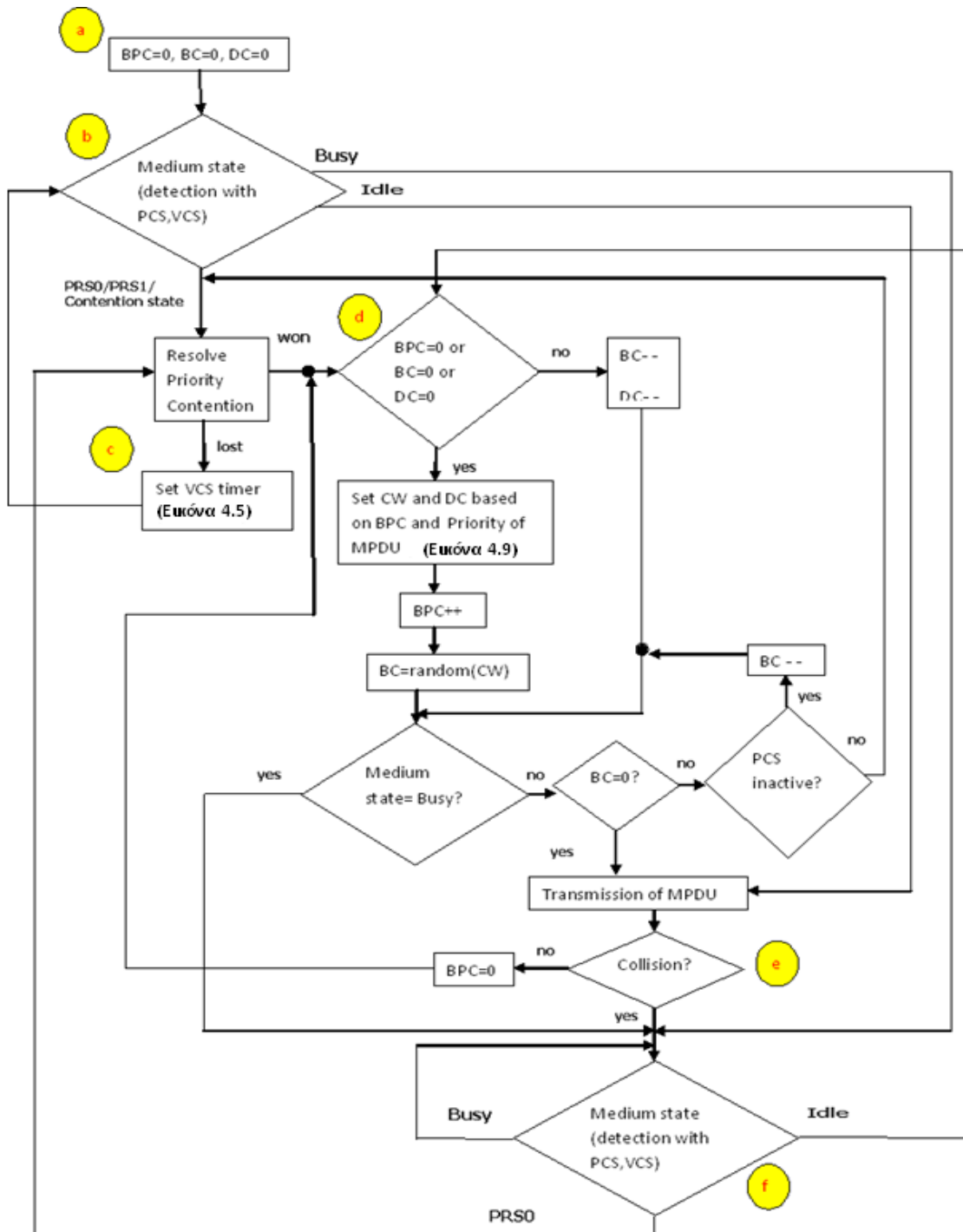
Πηγή: [9]

- e) Αφού ο σταθμός μεταδώσει την MPDU, εφόσον έχει συμβεί σύγκρουση προχωρεί στο βήμα f. Διαφορετικά η διαδικασία τυχαίας απόσυρσης έχει τελειώσει και ο μετρητής BPC τίθεται στο μηδέν
- f) Ο σταθμός πρέπει να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό ανίχνευσης μέσου φυσικού στρώματος PCS και τον εικονικό μηχανισμό ανίχνευσης μέσου VCS για να καθορίσει την κατάσταση του μέσου ως προς τη δραστηριότητα. Ενώσω το μέσο είναι «Απασχολημένο», ο σταθμός δεν πρέπει να μεταδώσει την MPDU και πρέπει να περιμένει να αλλάξει η κατάσταση του μέσου. Όταν η κατάσταση του μέσου γίνει «PRS0», ο σταθμός πρέπει να επιλύσει τον ανταγωνισμό προτεραιότητας όπως



έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα και να συνεχίσει στο βήμα c. Όταν η κατάσταση του μέσου γίνει «Αδρανές», ο σταθμός πρέπει να συνεχίσει στο βήμα d.

Εικόνα 4.10: Η διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας (Random backoff procedure)



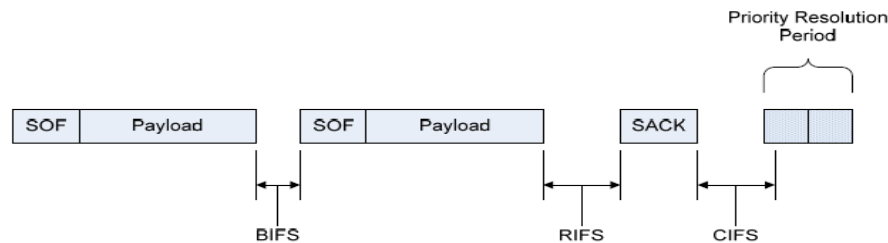
### ✚ Ανταλλαγή RTS/CTS πλαισίων

Τα πλαίσια αίτησης αποστολής RTS και αποδοχής αίτησης CTS μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους σταθμούς κατά τη διάρκεια του CSMA για να επιλυθεί το πρόβλημα του κρυμμένου σταθμού (hidden station).

### ✚ Χρονικά διαστήματα μεταξύ των πλαισίων στα συστήματα πρόσβασης

Τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των MPDUs (interframe space) είναι απαραίτητα λόγω των καθυστερήσεων και του χρόνου επεξεργασίας των μονάδων στους σταθμούς. Κατά τη διάρκεια του CSMA/CA οι σταθμοί πρέπει να θέσουν τις χρονικές ρυθμίσεις του πομπού τους έτσι ώστε η PRS0 κατάσταση να απέχει διάστημα **CIFS** (Contention Interframe Space) μετά το τέλος της προηγούμενης μετάδοσης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.11. **RIFS** είναι το χρονικό διάστημα από το τέλος μετάδοσης μίας μεγάλης MPDU μέχρι την αρχή της σχετικής απάντησης. Δύο διαδοχικές MPDU σε μία κίνηση από MPDUs (burst) πρέπει να απέχουν χρονικό διάστημα **BIFS**.

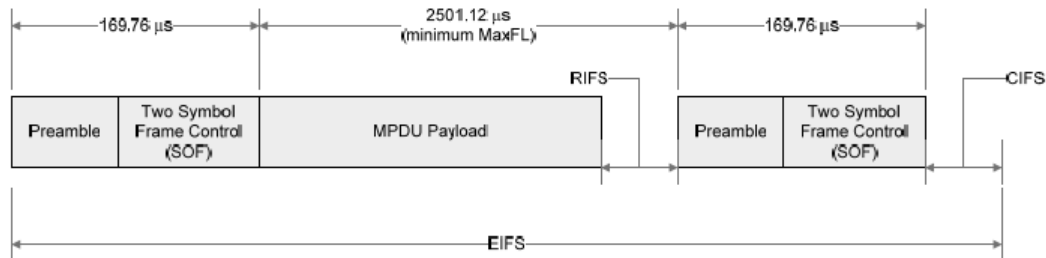
Εικόνα 4.11: Χρονικά διαστήματα μεταξύ των πλαισίων



Πηγή: [9]

Το χρονικό διάστημα EIFS (Extended Interframe Space) χρησιμοποιείται όταν ο σταθμός δεν έχει ακριβή γνώση της κατάστασης του μέσου και όταν αποκλείεται από άλλο σταθμό κατά την περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας. Η πρώτη περίπτωση μπορεί να συμβεί όταν τα λάθη στα πλαίσια που λαμβάνει (εξαιτίας θορύβου, συγκρούσεων κλπ) καθιστούν αδύνατη την αποκωδικοποίησή τους. Η δεύτερη περίπτωση συμβαίνει όταν ένας σταθμός- ανταγωνιστής έχει ανακοινώσει κατά την περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας την πρόθεσή του να στείλει κίνηση υψηλότερης προτεραιότητας.

Εικόνα 4.12: EIFS



Πηγή: [9]

#### 4.5.2 CSMA/CA με προτεραιότητες βασισμένο στα χρονικά διαστήματα μεταξύ πλαισίων (IFS-based prioritized CSMA/CA)

Τα δεδομένα με υψηλές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) (πχ υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, πολύ μικρή καθυστέρηση ή πολύ μικρή διακύμανση καθυστέρησης) τυπικά μεταδίδονται σε συγκεκριμένο εύρος που τους έχει εκχωρηθεί στις περιόδους χωρίς ανταγωνισμό. Δεδομένα και πλαίσια διαχείρισης που έχουν λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας συνήθως μεταδίδονται χρησιμοποιώντας το CSMA/CA κατά τη διάρκεια των περιόδων ανταγωνισμού. Ωστόσο, καίτοι τα πλαίσια αυτού του τύπου δεν έχουν σημαντικές απαιτήσεις, οι απαιτήσεις αυτές ποικίλουν. Έτσι, το CSMA/CA με προτεραιότητες χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την απόδοση για κάποια πλαίσια στα οποία δεν έχει εκχωρηθεί συγκεκριμένο εύρος.

#### 🚧 Ο μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου (CS)

Παρέχεται μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου από το φυσικό στρώμα (physical CS mechanism). Επίσης παρέχεται εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου από το MAC στρώμα (virtual CS mechanism). Αυτός ο μηχανισμός αναφέρεται ως NAV (Network Allocation Vector- Διάνυσμα Καταμερισμού Δικτύου). Ο όρος NAV δεν αναφέρεται στη διαδικασία καταμερισμού αλλά στην αναφορά του καταμερισμού που έχει ήδη γίνει (μέσω του CSMA), η οποία προδιορίζει για πόσο διάστημα το μέσο θα είναι απασχολημένο.

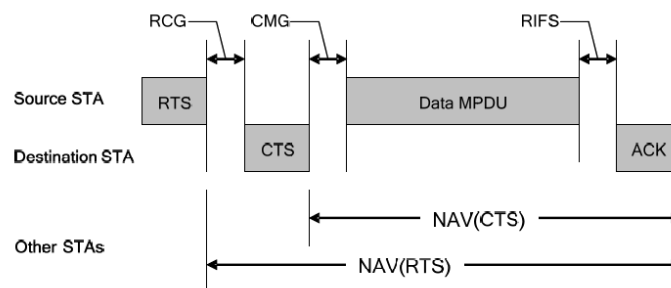
Ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης μέσου καταγράφει την περίοδο κατά την οποία το μέσο θεωρείται απασχολημένο χρησιμοποιώντας μέσα όπως η ανίχνευση του μπλοκ frame control στο πλαίσιο. Ο εικονικός μηχανισμός θεωρεί τις ακόλουθες καταστάσεις ως «απασχολημένο μέσο». Όταν ανιχνευθεί ένα frame control που δεν απαιτεί απάντηση, η διάρκεια του πλαισίου

υπολογίζεται από το πεδίο FL (frame length). Όταν ανιχνευθεί frame control που απαιτεί απάντηση, η διάρκεια του πλαισίου υπολογίζεται από το πεδίο FL (frame length) καθώς και από το RIFS και τη διάρκεια πλαισίου της επιβεβαίωσης ACK.

Το NAV διατηρεί μία πρόβλεψη της μελλοντικής κίνησης στο μέσο που βασίζεται στις πληροφορίες για τη διάρκεια που ανακοινώνονται στα RTS/CTS πλαίσια πριν από την πραγματική ανταλλαγή δεδομένων. Οι πληροφορίες για τη διάρκεια είναι επίσης διαθέσιμες στις MAC επικεφαλίδες σχεδόν όλων των πλαισίων που ανταλλάσσονται κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού.

- Ο μηχανισμός καθορισμού του NAV χρησιμοποιώντας τις τιμές των πεδίων στα μεταδιδόμενα πλαίσια είναι ο ακόλουθος: στην περίπτωση όπου μεταδίδεται ένα πλαίσιο δεδομένων ή διαχείρισης που περιμένει επιβεβαίωση, η τιμή NAV προκύπτει ίση με FL (Data frame) + RIFS + FL (ACK), ενώ, όταν δεν υπάρχει επιβεβαίωση, η τιμή NAV προκύπτει ίση με FL (Data frame).
- Ο μηχανισμός καθορισμού του NAV χρησιμοποιώντας τα RTS/CTS πλαίσια είναι ο ακόλουθος: εφόσον ο σταθμός λάβει ένα RTS ή CTS πλαίσιο ενόσω το μέσο είναι αδρανές, ο σταθμός πρέπει να θέσει μία NAV περίοδο προστασίας για την οποία η τιμή του NAV είναι ίση με το πεδίο διάρκεια (duration field) στο πλαίσιο RTS ή CTS που έλαβε. Το επόμενο σχήμα δείχνει το NAV για σταθμούς που μπορούν να λάβουν το RTS πλαίσιο, ενώ άλλοι σταθμοί (π.χ. κρυμμένοι κόμβοι) μπορούν να λάβουν μόνο το CTS πλαίσιο καθορίζοντας μικρότερο NAV. Η διάρκεια των RCG και CMG είναι καθορισμένη.

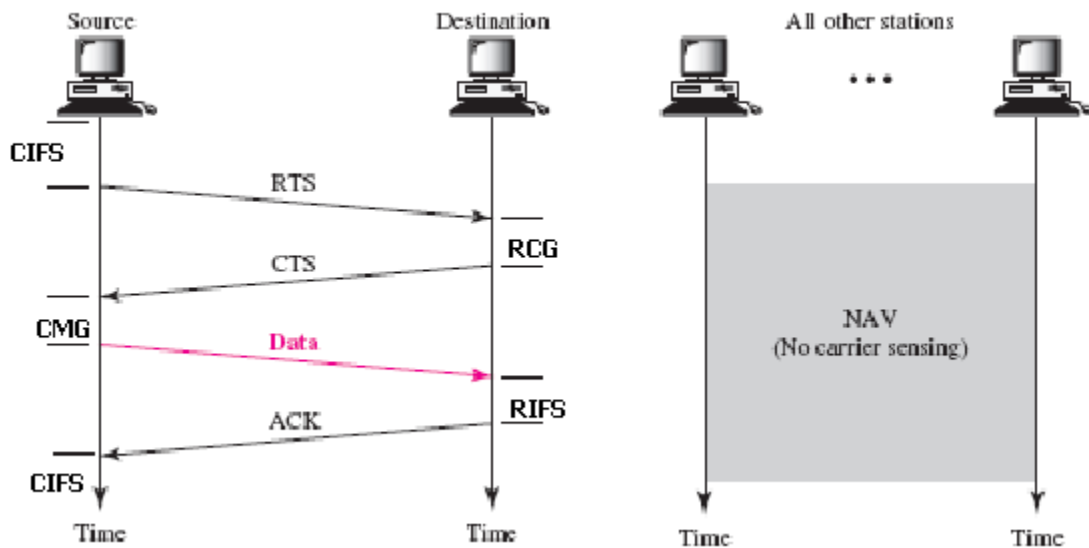
**Εικόνα 4.13: Καθορισμός του NAV από το RTS/CTS**



Πηγή: [9]

Ο μηχανισμός ανίχνευσης μέσου συνδυάζει το NAV και την κατάσταση του σταθμού που εκπέμπει με το μηχανισμό ανίχνευσης φυσικού στρώματος για να καθορίσει την κατάσταση του μέσου (απασχολημένο/αδρανές). Το NAV μπορεί να θεωρηθεί ως μετρητής ο οποίος μετρά αντίστροφα μέχρι το μηδέν με σταθερό ρυθμό. Όταν ο μετρητής έχει μηδενική τιμή, ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης μέσου δηλώνει ότι το μέσο είναι αδρανές. Όταν ο μετρητής δεν έχει μηδενική τιμή, δηλώνει ότι το μέσο είναι απασχολημένο. Το μέσο πρέπει να δηλώνεται απασχολημένο και επί όσο διάστημα εκπέμπει ο σταθμός.

Εικόνα 4.14: CMA/CA και NAV



Πηγή: [http://www.globalspec.com/RefArticleImages/1002E2581441ED3C3C876BC8F6D930F7\\_14\\_14\\_05.gif](http://www.globalspec.com/RefArticleImages/1002E2581441ED3C3C876BC8F6D930F7_14_14_05.gif)

Η εικόνα έχει ελαφρώς τροποποιηθεί.

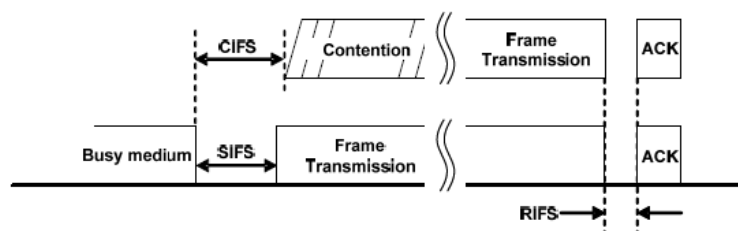
#### ✚ Χρονικά διαστήματα μεταξύ των πλαισίων

Στα MAC που υιοθετούν το IFS-based prioritized CSMA/CA υπάρχουν τρία είδη διαστημάτων μεταξύ των πλαισίων:

- CIFS (contention interframe space): σε μία περίοδο ανταγωνισμού ένας σταθμός πρέπει να περιμένει CIFS πριν ο σταθμός αρχίσει τη μετάδοση κάποιου πλαισίου

- SIFS (short interframe space): σε μία περίοδο χωρίς ανταγωνισμό, ένας σταθμός πρέπει να περιμένει SIFS αφού το μέσο γίνει αδρανές αμέσως μετά από μετάδοση που έγινε από τον ίδιο τον σταθμό πριν ο σταθμός προσπαθήσει μετάδοση κάποιου πλαισίου
- RIFS (response interframe space): ένας σταθμός που απαντά με επιβεβαίωση λήψης (ACK) σε μία μετάδοση πρέπει να περιμένει RIFS αφού το μέσο γίνει αδρανές μετά τη μετάδοση του πλαισίου (για την οποία χρειάζεται το ACK) πριν ο σταθμός να αποστείλει το ACK

Εικόνα 4.15: Χρονικά διαστήματα μεταξύ πλαισίων

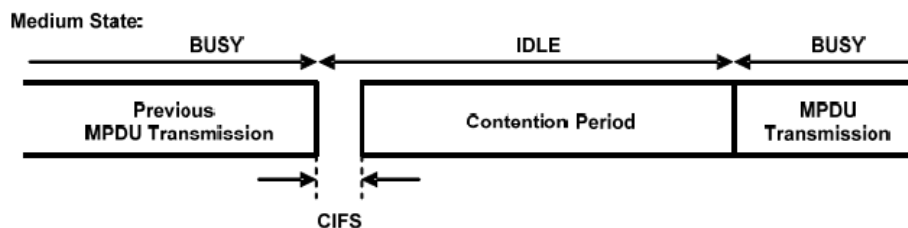


Πηγή: [9]

#### 🚦 Ο μηχανισμός πρόσβασης

Στην Εικόνα 4.16 φαίνεται ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης και κατάσταση του μέσου για το CSMA/CA. Οι σταθμοί πρέπει να αναγνωρίσουν ότι το μέσο είναι απασχολημένο στη NAV περίοδο προστασίας. Το μέσο μπαίνει στην περίοδο αδράνειας μόλις λήξει ο χρόνος NAV. Στην αρχή της περιόδου αδράνειας, όλοι οι σταθμοί πρέπει να περιμένουν χρόνο CIFS. Μετά από αυτόν, οι σταθμοί που θέλουν να μεταδώσουν ξεκινούν τον ανταγωνισμό για το μέσο.

Εικόνα 4.16: Βασικός μηχανισμός CSMA/CA



Πηγή: [9]

Κατά την περίοδο ανταγωνισμού υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που μπορούν να μειώσουν τη συχνότητα των συγκρούσεων: (1) πρόσβαση CSMA/CA (CSMA/CA access), (2) πρόσβαση CMSA/CA με έλεγχο προτεραιότητας (priority control CSMA/CA), (3) πρόσβαση DVTP (DVTP access).

(1) Η βασική πρόσβαση CSMA/CA πρέπει να ενσωματώσει την απόσυρση τυχαίας χρονικής περιόδου με χρήση του παραθύρου ανταγωνισμού CW (contention window). Κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού, κάθε σταθμός που είναι έτοιμος να μεταδώσει, πρώτα περιμένει επί ένα χρονικό διάστημα τυχαίας διάρκειας. Κατά τη διάρκεια αυτής της απόσυρσης, ο σταθμός προσπαθεί να διαβάσει κάποιο πλαίσιο στο μέσο ανιχνεύοντας το προοίμιο (preamble) του πλαισίου. Εφόσον ο σταθμός ανιχνεύσει το προοίμιο, υπολογίζει την τιμή NAV. Ο σταθμός δεν πρέπει να προσπαθήσει να μεταδώσει ξανά μέχρι να λήξει η περίοδος που υποδεικνύεται από το NAV. Εφόσον ο σταθμός δεν ανιχνεύσει πλαίσιο στο μέσο, ο σταθμός μπαίνει στην περίοδο διαιτησίας. Μόνο όταν λήξει και αυτή η περίοδος και ο σταθμός δεν έχει ανιχνεύσει πλαίσιο στο μέσο, επιτρέπεται να μεταδώσει.

Η διαδικασία βασικής πρόσβασης περιλαμβάνει επίσης παράθυρο ανταγωνισμού CW και διάρκεια πλαισίου ελέγχου FL που μεταβάλλονται με το χρόνο (δυναμικά) ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματική μετάδοση. Ο αλγόριθμος απόσυρσης τυχαίας χρονικής περιόδου περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

(2) Η πρόσβαση CMSA/CA με έλεγχο προτεραιότητας χρειάζεται δύο καταστάσεις στην περίοδο ανταγωνισμού: την κατάσταση κενού (gap state) και την κατάσταση ανταγωνισμού (contention state). Αυτές οι καταστάσεις επιτρέπουν αυστηρό έλεγχο προτεραιότητας.

(3) Η πρόσβαση DVTP (Dynamic virtual token passing) χρειάζεται δύο χρονικές περιόδους κατά την περίοδο ανταγωνισμού: την περίοδο ανταγωνισμού (contention period) και την περίοδο διαιτησίας (arbitration period). Αυτές οι δύο περίοδοι επιτρέπουν πρόσβαση χωρίς συγκρούσεις και αυστηρό έλεγχο προτεραιότητας.

Οι τρεις μέθοδοι που παρουσιάστηκαν συνοπτικά, αναλύονται με λεπτομέρειες στη συνέχεια.

### (1) Βασική πρόσβαση CSMA/CA (CSMA/CA access)

Όταν δύο ή περισσότεροι σταθμοί ξεκινούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα, ο παραλήπτης δεν μπορεί να λάβει τα πλαίσια σωστά εξαιτίας των συγκρούσεων των πλαισίων στο κοινό μέσο. Για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας συγκρούσεων, χρησιμοποιείται στο CSMA/CA μία διαδικασία απόσυρσης τυχαίου χρονικού διαστήματος (backoff procedure).

Οι σταθμοί που προσπαθούν να μεταδώσουν ένα πλαίσιο κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού πρέπει να υπακούσουν στις διαδικασίες απόσυρσης τυχαίου χρονικού διαστήματος που εφαρμόζονται στην αρχή. Όταν ένας σταθμός αρχίζει να μεταδίδει πλαίσια, οι άλλοι σταθμοί ανιχνεύουν δραστηριότητα στην ηλεκτρική γραμμή και χρησιμοποιούν μηχανισμούς ανίχνευσης μέσου για να θέσουν την κατάσταση του μέσου σε «απασχολημένο». Οι διαδικασίες απόσυρσης τυχαίου χρονικού διαστήματος ξεκινούν χρόνο CIFS μετά το τέλος της προηγούμενης μετάδοσης.

Όλοι οι σταθμοί πρέπει να έχουν τουλάχιστον τέσσερις ουρές μετάδοσης, μία για κάθε ένα από τα βασικά επίπεδα προτεραιότητας στην βασική πρόσβαση CSMA/CA. Κάθε σταθμός παρέχει έναν ανεξάρτητο μετρητή απόσυρσης τυχαίου χρονικού διαστήματος για κάθε μία από τις ουρές μετάδοσης. Κάθε μία από τις ουρές του δηλαδή, σε οποιαδήποτε στιγμή, μπορεί να έχει διαφορετικό μέτρημα της απόσυρσης τυχαίου χρονικού διαστήματος από τους σταθμούς στις άλλες ουρές.

#### ❖ Οι παράμετροι της διαδικασίας απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας

Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι: **UP** (User Priority), **INTP** (Internal Priority), **CW**(INTP) (Contention Window), **BC** (Backoff Counter), **FLL** (Frame Length Limit).

Τα στρώματα υψηλότερα από το MAC συμπληρώνουν ένα TSPEC με σκοπό να ελέγξουν τη διαχείριση της MPDU. Το TSPEC αναθέτει μία συγκεκριμένη προτεραιότητα χρήστη UP –μία από τις οκτώ τιμές- που προσδιορίζει με ποιον τρόπο θα γίνει η διαχείριση της μονάδας MPDU. Η προκαθορισμένη UP είναι 3.

Η INTP καθορίζεται σύμφωνα με τα 16 επίπεδα προτεραιότητας που υποδεικνύουν πως πρέπει να γίνει ο χειρισμός της MPDU ανάλογα και με τη δραστηριότητα που υπάρχει στο μέσο. Η



INTP αντιστοιχεί δυναμικά σε μία MPDU και σχετίζεται και με τη UP και με την κατάσταση του μέσου. Η κατάσταση του μέσου μπορεί να είναι μία από τις ακόλουθες:

- (Κατάσταση 1) Κανένας άλλος σταθμός δεν μεταδίδει δεδομένα
- (Κατάσταση 2) Τα μόνα πλαίσια δεδομένων που μεταδίδονται στο μέσο έχουν την προκαθορισμένη προτεραιότητα 3 (UP=3)
- (Κατάσταση 3) Τουλάχιστον ένα από τα πλαίσια δεδομένων με προτεραιότητα υψηλότερη από την προκαθορισμένη έχει μεταδοθεί στο μέσο

Η INTP αλλάζει δυναμικά σε κάθε περίοδο- φάρο (beacon cycle). Η τιμή της INTP ανατίθεται σύμφωνα με τον πίνακα στην Εικόνα 4.17.

**Εικόνα 4.17: INTP ως συνάρτηση των UP και της κατάστασης του μέσου**

		Medium Usage Condition		
		Condition 1	Condition 2	Condition 3
UP	7	14	13	13
	6	14	14	14
	5	14	11	10
	4	14	11	8
	3	14	8	8
	2	14	4	6
	1	14	1	0
	0	14	0	0

Πηγή: [9]

Το CW είναι η τιμή που καθορίζει την πιθανότητα μετάδοσης. Ο σταθμός θέτει το CW σε κάθε πρώτη προσπάθεια μετάδοσης ενός πλαισίου. Το CW εξαρτάται από την INTP οπότε αλλάζει και αυτό δυναμικά σε κάθε περίοδο- φάρο (beacon cycle). Η τιμή του CW τίθεται σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνας 4.18.

**Εικόνα 4.18: Σχέση μεταξύ CW και INTP**

<b>INTP</b>	<b>CW Data</b>	<b>CW Management</b>
15	3	3
14	7	7
13	11	11
12	15	15
11	19	19
10	23	23
9	27	27
8	31	31
7	35	35
6	39	39
5	47	47
4	56	56
3	66	66
2	77	77
1	89	89
0	512	102

Πηγή: [9]

Ο BC μειώνεται σε κάθε υποδοχή απόσυρσης (backoff slot). Οι σταθμοί καθορίζουν τυχαία μία τιμή μεταξύ 0 και 1 για κάθε σχισμή απόσυρσης για όλες τις ουρές μετάδοσης και αποστέλλουν το πλαίσιο στην ουρά εφόσον η τυχαία τιμή είναι μικρότερη από  $1/BC$ . Το BC τίθεται αρχικά ίσο με CW στην πρώτη προσπάθεια μετάδοσης πλαισίου.

Το μεγαλύτερο μήκος πλαισίου FLL περιορίζεται από την τιμή της INTP. Αυτό συμβαίνει επειδή η αποτελεσματικότητα μετάδοσης μπορεί να ανακτηθεί σε περιβάλλον όπου πολλές UPs υπάρχουν ταυτόχρονα. Η τιμή της FLL εξαρτάται από την INTP οπότε αλλάζει και αυτή δυναμικά σε κάθε περίοδο- φάρο (beacon cycle). Η σχέση μεταξύ τους φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

**Εικόνα 4.19: Σχέση μεταξύ FLL και INTP**

<b>INTP</b>	<b>FLL (symbol)</b>
15	—
14	589
13	589
12	589
11	589
10	589
9	589
8	389
7	389
6	389
5	389
4	389
3	389
2	389
1	389
0	389

Πηγή: [9]

### ❖ Η διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής διάρκειας

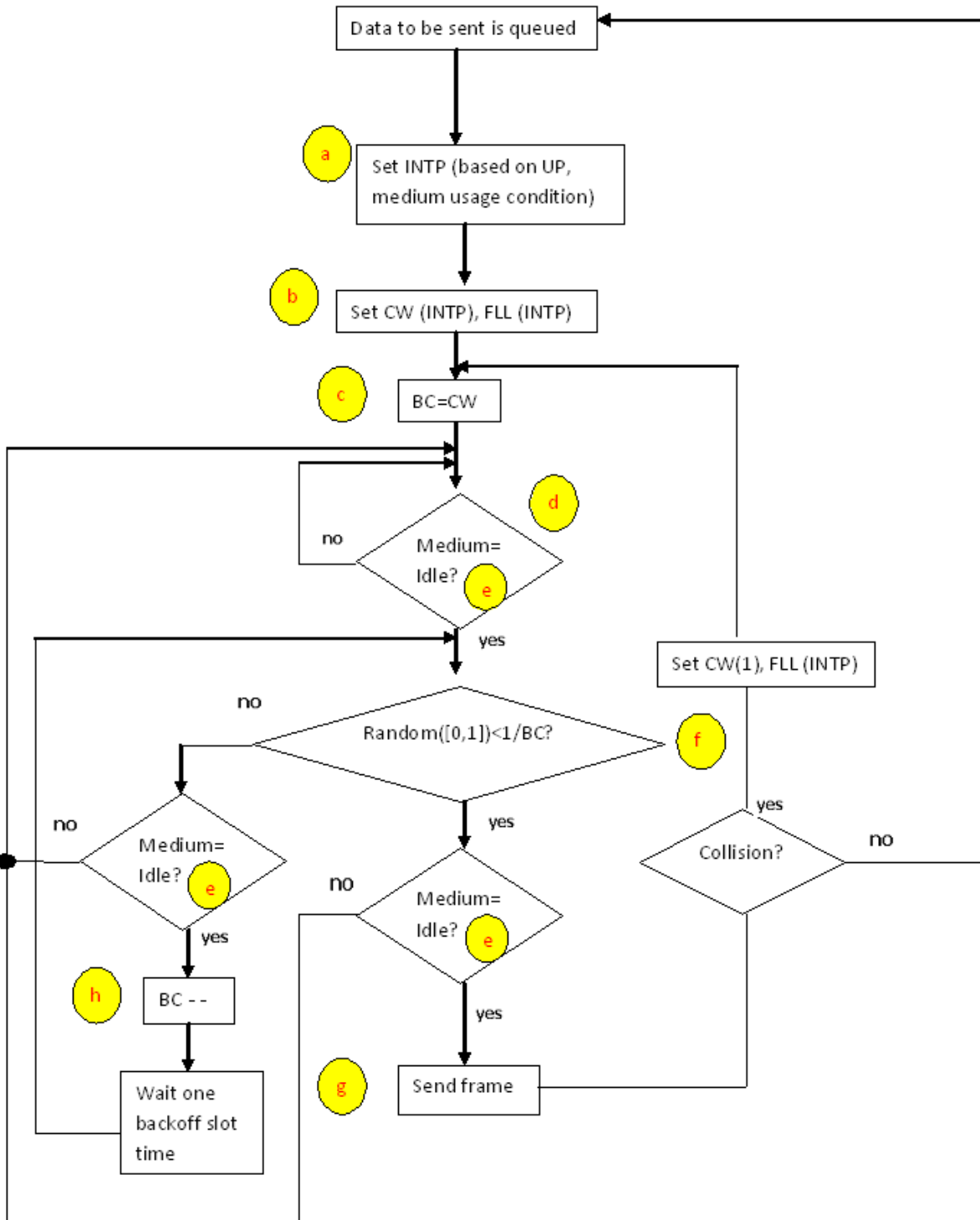
Στο στρώμα MAC, η χρονική υποδοχή (slot) πρέπει να είναι η μικρότερη χρονική μονάδα που χρησιμοποιεί το μηχανισμό ανίχνευσης μέσου φυσικού στρώματος και καθορίζει την κατάσταση του μέσου. Οι σταθμοί που μεταδίδουν πλαίσια κατά τη διάρκεια περιόδου ανταγωνισμού πρέπει να αποφασίσουν αν θα στείλουν τα πλαίσια σύμφωνα με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

- a) Αφού τα προς μετάδοση δεδομένα έχουν εισέλθει στην ουρά, ο σταθμός θέτει την INTP ανάλογα με την τιμή της UP και της κατάστασης του μέσου σύμφωνα με τον πίνακα στην Εικόνα 4.17
- b) Ο σταθμός καθορίζει τις τιμές των CW και FLL ανάλογα με την τιμή της INTP σύμφωνα με τους πίνακες στις Εικόνες 4.18 και 4.19 αντίστοιχα
- c) Ο σταθμός θέτει τον BC ίσο με CW
- d) Ο σταθμός περιμένει μέχρι το μέσο να γίνει αδρανές ώστε να αρχίσει η περίοδος ανταγωνισμού
- e) Αφού ξεκινήσει η διαδικασία απόσυρσης τυχαίου χρονικού διαστήματος στην περίοδο ανταγωνισμού, ο σταθμός χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς ανίχνευσης μέσου για να καθορίσει την κατάσταση του μέσου (απασχολημένο / αδρανές)
- f) Ο σταθμός διαλέγει μία τυχαία τιμή μεταξύ 0 και 1. Αν η τιμή είναι χαμηλότερη από  $1/BC$ , συνεχίζει στο βήμα g διαφορετικά στο βήμα h. Αν το μέσο γίνει «Απασχολημένο» κατά τη διάρκεια του βήματος f, ο σταθμός διατηρεί την τιμή του BC και επιστρέφει στο βήμα d
- g) Ο σταθμός αποστέλλει το πλαίσιο και η ουρά αποστολής επιστρέφει στην κατάσταση a
- h) Η ουρά αποστολής μειώνει τον BC, αποσύρεται για μία χρονική υποδοχή και έπειτα επιστρέφει στο βήμα f

Αν αποφασιστεί ότι το πλαίσιο που εστάλη στο βήμα g υπέστη σύγκρουση (π.χ. δεν λήφθηκε επιβεβαίωση), το CW τίθεται με την τιμή INTP-1 στο βήμα a ώστε να μειωθεί η πιθανότητα μίας άλλης σύγκρουσης και έπειτα ακολουθείται το βήμα b.

Η ανωτέρω διαδικασία φαίνεται και στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 4.20.

Εικόνα 4.20: Διαδικασία απόσυρσης τυχαίας χρονικής περιόδου με δυναμικό έλεγχο των CW και FL



### ❖ Απόφαση για προσπάθεια αποστολής

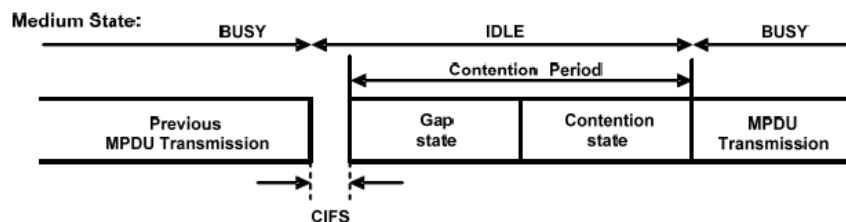
Κατά την περίοδο ανταγωνισμού, οι σταθμοί πρέπει να συγκρίνουν τον απαιτούμενο χρόνο μετάδοσης ( $T_S$ ) και τον εναπομείναντα χρόνο της περιόδου ανταγωνισμού ( $T_{CP}$ ). Εάν  $T_S > T_{CP}$ , ο σταθμός δεν πρέπει να προσπαθήσει να μεταδώσει. Ο χρόνος  $T_S$  υπολογίζεται πριν αποκτήσει ένας σταθμός την πρόσβαση στο μέσο και υπολογίζεται ως εξής:

- (Μετάδοση με επιβεβαίωση λήψης):  $T_S = BC \times \text{SLOT\_TIME} + \text{PDU\_Time} + \text{RIFS} + \text{ACK\_Time} + \text{CIFS}$
- (Μετάδοση χωρίς επιβεβαίωση λήψης):  $T_S = BC \times \text{SLOT\_TIME} + \text{PDU\_Time} + \text{CIFS}$

#### (2) Πρόσβαση CMA/CA με έλεγχο προτεραιότητας (priority control CSMA/CA)

Για την εύκολη επίτευξη της ποιότητας υπηρεσίας, ο μηχανισμός ελέγχου προτεραιότητας παρέχεται στη βάση της CSMA αρχιτεκτονικής. Ο μηχανισμός ελέγχου προτεραιότητας έχει δύο καταστάσεις στην περίοδο ανταγωνισμού, την κατάσταση κενού (gap state) και την κατάσταση ανταγωνισμού (contention state) και διαχωρίζει εντελώς τις ευκαιρίες μετάδοσης μεταξύ των υψηλότερων προτεραιοτήτων (UP=6 και 7) και των άλλων προτεραιοτήτων. Χρησιμοποιώντας την κατάσταση κενού, οι υψηλότερες προτεραιότητες μπορούν να ανταγωνιστούν χωρίς τις χαμηλότερες, επειδή ακριβώς τα δεδομένα χαμηλότερης προτεραιότητας αναμένουν μέχρι το τέλος της περιόδου κενού και δεν συμμετέχουν στον ανταγωνισμό με το μηχανισμό απόσυρσης. Η διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 4.21.

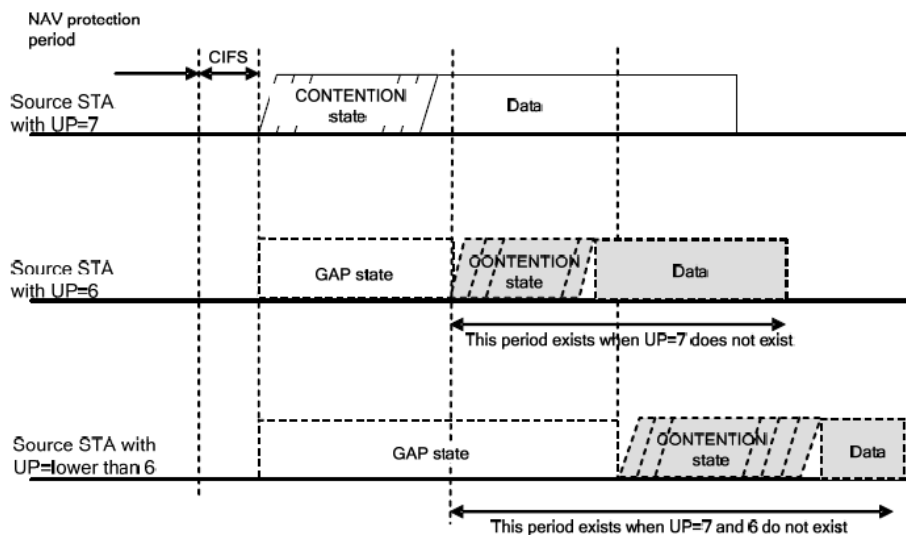
**Εικόνα 4.21: Κατάσταση του μέσου στο CMA/CA με έλεγχο προτεραιότητας**



Πηγή: [9]

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.22, πλαίσια δεδομένων με UP=7 ξεκινούν να ανταγωνίζονται αμέσως μετά το CIFS. Από την άλλη πλευρά, πλαίσια με UP=6 ή UP χαμηλότερη από 6 ξεκινούν μετά την κενή περίοδο που ακολουθεί το CIFS. Αυτό σημαίνει ότι μόνο πλαίσια με UP=7 μπορούν να ανταγωνιστούν για να μεταδώσουν δεδομένα στην κενή περίοδο χαμηλότερων προτεραιοτήτων. Στο σχήμα της Εικόνας 4.22 το πλαίσιο δεδομένων με UP=7 κερδίζει τον ανταγωνισμό και μεταδίδεται, οπότε οι άλλοι σταθμοί θεωρούν το μέσο «Απασχολημένο». Αν δεν υπήρχε πλαίσιο με UP=7, οι σταθμοί που είχαν πλαίσια με UP=6 περιμένουν μέχρι να τελειώσει το διάστημα κενού. Στην περίπτωση αυτή σταθμοί με UP χαμηλότερη από 6 ακόμα περιμένουν να τελειώσει το κενό διάστημα.

**Εικόνα 4.22: Η διαδικασία ελέγχου προτεραιότητας**



Πηγή: [9]

Η περίοδος αναμονής (το διάστημα κενού) καθορίζεται από το SLOT\_TIME. Η περίοδος αναμονής αλλάζει δυναμικά σε σχέση με την UP των δεδομένων και την UP κατάσταση του μέσου. Η UP κατάσταση του μέσου μπορεί να είναι μία από τις τέσσερις που φαίνονται στον πίνακα στην Εικόνα 4.23 και τα χρονικά διαστήματα αναμονής φαίνονται στον πίνακα στην Εικόνα 4.24.

Εξαιρουμένης της κενής περιόδου, η διαδικασία ανταγωνισμού και ο καθορισμός των παραμέτρων είναι τα ίδια όπως στη βασική πρόσβαση CSMA/CA.

Εικόνα 4.23: UP κατάσταση μέσου

	UP Detected the Frame Both in the Medium and in Its Own STA's Internal Queue		
	UP = 7	UP = 6	UP = Lower than 6
UP Condition 1	Present	Present	N/A
UP Condition 2	Present	Absent	N/A
UP Condition 3	Absent	Present	N/A
UP Condition 4	Absent	Absent	N/A

Πηγή: [9]

Εικόνα 4.24: Καθορισμός διαστήματος αναμονής (Μονάδα: χρονική σχισμή- Slot time)

		Medium UP Condition			
		UP Condition 1	UP Condition 2	UP Condition 3	UP Condition 4
UP	7	0	0	N/A	N/A
	6	7	N/A	0	N/A
	5-0	19	9	7	0

Πηγή: [9]

#### ❖ Ανταλλαγή RTS/CTS

Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη στα συστήματα πρόσβασης. Ένας σταθμός που πρόκειται να μεταδώσει πλαίσιο δεδομένων ή διαχείρισης μπορεί να χρησιμοποιήσει RTS/CTS πλαίσια για να αποφύγει συγκρούσεις με πλαίσια που προέρχονται από κρυμμένους σταθμούς (hidden stations). Ο σταθμός 2 είναι κρυμμένος για το σταθμό 1 όταν οι μεταδόσεις του σταθμού 2 δεν μπορούν να ανιχνευθούν από το σταθμό 1. Ας σημειωθεί ότι ο σταθμός 2 μπορεί να είναι κρυμμένος για το σταθμό 1, ενώ την ίδια στιγμή ο σταθμός 1 να μην είναι κρυμμένος για το σταθμό 2.

Ένας σταθμός μπορεί να μεταδώσει ένα RTS πλαίσιο προς τον παραλήπτη σταθμό αμέσως μετά την περίοδο ανταγωνισμού. Όταν ο παραλήπτης σταθμός λάβει το RTS πλαίσιο, πρέπει να στείλει πίσω ένα CTS πλαίσιο στο σταθμό που έστειλε το RTS μετά το τέλος του RTS και μίας RCG περιόδου (χρονική διάρκεια μεταξύ RTS και CTS). Επειδή οι σταθμοί που ανιχνεύουν το RTS ή το CTS πλαίσιο πρέπει να αναβάλουν τη μετάδοση του πλαισίου τους για διάρκεια που καθορίζεται από το πεδίο διάρκειας (duration field) στα RTS/CTS πλαίσια, ο σταθμός-πομπός μπορεί να αποτρέψει τους κρυμμένους κόμβους από τη μετάδοση κάποιου πλαισίου την ίδια στιγμή.

Ο RTS/CTS μηχανισμός μπορεί να μην είναι κατάλληλος για MPDUs πολυεκπομπής (multicast) ή ευρυεκπομπής (broadcast) γιατί υπάρχουν πολλοί σταθμοί- παραλήπτες για το RTS και επομένως δυνητικά πολλοί σταθμοί- πομποί του CTS ως απάντηση. Ο μηχανισμός RTS/CTS δεν χρειάζεται να χρησιμοποιείται σε κάθε μετάδοση δεδομένων. Επειδή η ανταλλαγή των πρόσθετων RTS/CTS πλαισίων επιβαρύνει τη διαδικασία επικοινωνίας, ο μηχανισμός μπορεί να μην είναι πάντα κατάλληλος για κάθε περίπτωση.

### (3) Πρόσβαση DVTP (DVTP access)

Ο μηχανισμός DVTP (Dynamic Virtual Token Passing) είναι ένας προαιρετικός μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο που βασίζεται στην ανίχνευση του μέσου και στην τεχνική ανταλλαγής σκυτάλης.

Κάθε σταθμός, συμπεριλαμβανομένου και του BM/HE, μπορεί να μεταδίδει πλαίσια σε διαφορετικές χρονικές στιγμές όταν χρησιμοποιείται το DVTP. Έτσι όλοι οι σταθμοί σε ένα BSS/Cell μπορούν να μεταδίδουν πλαίσια χωρίς συγκρούσεις. Μόνο όταν όλοι οι σταθμοί στο BSS/Cell έχουν τη δυνατότητα για DVTP μπορεί ο BM/HE να δηλώσει ότι όλοι οι σταθμοί θα χρησιμοποιούν το DVTP. Ο BM/HE ενημερώνει όλους τους σταθμούς για την αλλαγή στέλνοντας την πληροφορία DVTP EIB με πλαίσια φάρους τα οποία μόλις λάβουν οι σταθμοί πρέπει να αλλάξουν αμέσως την κατάστασή τους.

#### ❖ Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης

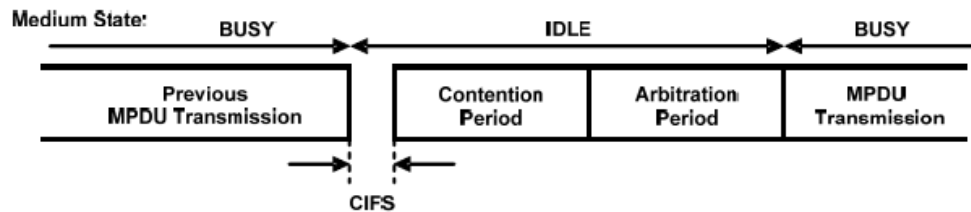
Το DVTP χρησιμοποιεί τον εικονικό μηχανισμό ανίχνευσης μέσου (VCS) για να ανιχνεύσει μία MPDU. Ο εικονικός μηχανισμός αυτός παρέχεται από το MAC στρώμα υπολογίζοντας και καταγράφοντας την αναμενόμενη διάρκεια χρήσης του διαύλου με χρήση του πεδίου FL του πλαισίου που λήφθηκε ή κατόπιν σύγκρουσης. Στις περιπτώσεις αυτές, ο μηχανισμός καταγράφει την περίοδο όπου το μέσο θα είναι απασχολημένο. Το μέσο πρέπει να θεωρηθεί απασχολημένο και όταν μεταδίδει ο σταθμός.

Ο μηχανισμός πρόσβασης στο DVTP φαίνεται στην Εικόνα 4.25. Το μέσο θεωρείται αδρανές μόλις λήξει ο χρόνος NAV. Στην αρχή της περιόδου αδράνειας οι σταθμοί πρέπει να αναμείνουν



επί χρονικό διάστημα CIFS. Μετά από αυτό, οι σταθμοί που θέλουν να μεταδώσουν εισέρχονται στην περίοδο ανταγωνισμού.

Εικόνα 4.25: Ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης στο DVTP

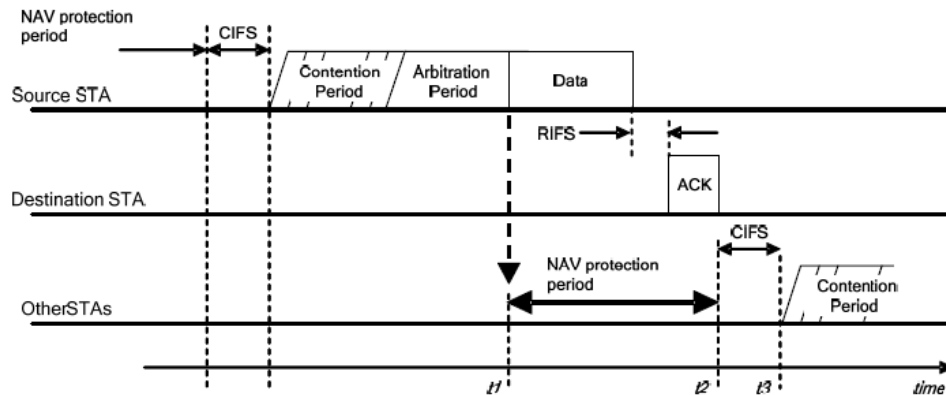


Πηγή: [9]

- Η περίοδος ανταγωνισμού (contention period) καθορίζεται έτσι ώστε να μειώσει τη συχνότητα των συγκρούσεων. Καίτοι το DVTP παρέχει πρόσβαση στο μέσο με τις λιγότερες συγκρούσεις όταν δεν υπάρχουν γειτονικά BSS/Cells, συγκρούσεις μπορεί να συμβούν εξαιτίας της έλλειψης ανίχνευσης από τους άλλους σταθμούς. Όταν υπάρχουν γειτονικά BSS/Cells, θα συμβούν συγκρούσεις. Κατά την περίοδο ανταγωνισμού, κάθε σταθμός αποσύρεται για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και ψάχνει να βρει κάποιο πλαίσιο ανιχνεύοντας το προοίμιο του πλαισίου. Εφόσον ο σταθμός ανιχνεύσει πλαίσιο κατά την περίοδο ανταγωνισμού, υπολογίζει το NAV και δεν μπορεί να μεταδώσει πλαίσια μέχρι να λήξει. Αν ο σταθμός δεν ανιχνεύσει πλαίσια, ο σταθμός εισέρχεται στην περίοδο διαιτησίας.
- Η περίοδος διαιτησίας (arbitration period) χρησιμοποιείται για τη διαιτησία μεταξύ των σταθμών σύμφωνα με το STID (Station ID- ταυτότητα του σταθμού) και την προτεραιότητα του πλαισίου που κάθε σταθμός θέλει να μεταδώσει. Κάθε σταθμός που έχει STID αποκτά δικαίωμα πρόσβασης στο μέσο. Η πρόσβαση στο μέσο γίνεται σύμφωνα με την προτεραιότητα των προς μετάδοση πλαισίων και για πλαίσια ίδιας προτεραιότητας γίνεται με τη σειρά σύμφωνα με την τιμή του STID που έχει ο σταθμός. Πλαίσια υψηλότερης προτεραιότητας μπορούν να μεταδοθούν νωρίτερα από τη σειρά που έχει αποφασιστεί σύμφωνα με το STID. Κατά τη διάρκεια της περιόδου διαιτησίας, κάθε σταθμός ψάχνει να βρει κάποιο πλαίσιο ανιχνεύοντας το προοίμιο του πλαισίου. Αν ο σταθμός ανιχνεύσει πλαίσιο κατά τη διάρκεια της περιόδου διαιτησίας, υπολογίζει το

NAV και αποσύρεται μέχρι να λήξει ο χρόνος. Αν ο σταθμός δεν ανιχνεύσει πλαίσια, μπορεί να μεταδώσει.

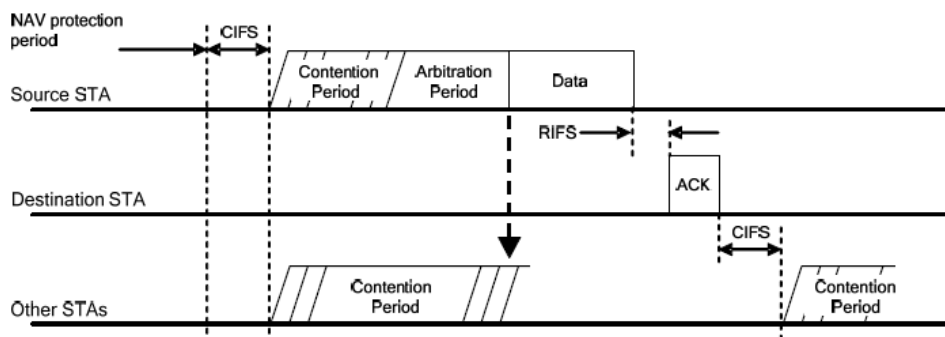
**Εικόνα 4.26: Υπολογισμός του NAV**



Πηγή: [9]

Ένας σταθμός που δέχεται ένα πλαίσιο που προορίζεται μόνο για αυτόν πρέπει να στείλει πίσω μία επιβεβαίωση λήψης. Η επιβεβαίωση περιέχει το αποτέλεσμα λήψης καθενός από τα υποπλαίσια του πλαισίου. Ο σταθμός-δέκτης πρέπει να στείλει επιβεβαίωση ακόμα και όταν όλα τα υποπλαίσια είναι άκυρα λόγω λαθών (αποτέλεσμα από FCCS- frame control check sequence). Έλλειψη απάντησης- επιβεβαίωσης σημαίνει ότι το πεδίο ελέγχου (frame control- FC) δεν λήφθηκε σωστά από το σταθμό-πομπό ή ότι ο σταθμός-πομπός δεν μπορεί να λάβει την επιβεβαίωση. Ο σταθμός-πομπός μπορεί να διακρίνει τα δύο λάθη μεταξύ τους.

**Εικόνα 4.27: Διαδικασία επιβεβαίωσης λήψης**



Πηγή: [9]

## 4.6 TDMA

Κατά τη διάρκεια των περιόδων χωρίς ανταγωνισμό, οι IEEE 1901 σταθμοί χρησιμοποιούν αποκλειστικά TDMA για να ελέγξουν την πρόσβαση στο μέσο. Ο μηχανισμός TDMA εκχωρεί συγκεκριμένο εύρος σε κάθε σύνδεση, όχι σε μεμονωμένους σταθμούς. Το TDMA παρέχει τα μέσα με τα οποία ένας σταθμός μπορεί να εκχωρήσει χρόνο σε κάθε σύνδεση. Ο BM/HE δημιουργεί ένα πρόγραμμα πρόσβασης σύμφωνα με τις αιτήσεις για εύρος από τους σταθμούς και ενημερώνει όλους τους υπόλοιπους σταθμούς με χρήση πλαισίων- φάρων (beacon frames). Το πώς θα προγραμματιστεί το εύρος για κάθε σύνδεση δεν προσδιορίζεται στο πρότυπο IEEE 1901.

Ο BM/HE μπορεί να εκχωρήσει κάποιο χρονικό περιθώριο στις συνδέσεις πέρα από το χρόνο για αποστολή δεδομένων που εκχωρεί σε αυτές. Καίτοι η εκχώρηση χρονικού περιθωρίου ποικίλει ανάλογα με την υλοποίηση, η περίοδος ανταγωνισμού δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από MIN\_CP\_TIME. Για τον υπολογισμό του χρονικού περιθωρίου, είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά ο όγκος των δεδομένων που βρίσκονται στην ουρά της σύνδεσης. Αυτό το χρονικό περιθώριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναμετάδοση πλαισίων ή και για να εξυπηρετήσει προσωρινή αύξηση των δεδομένων μετάδοσης για ροές μεταβλητού ρυθμού (VBR- variable bit-rate).

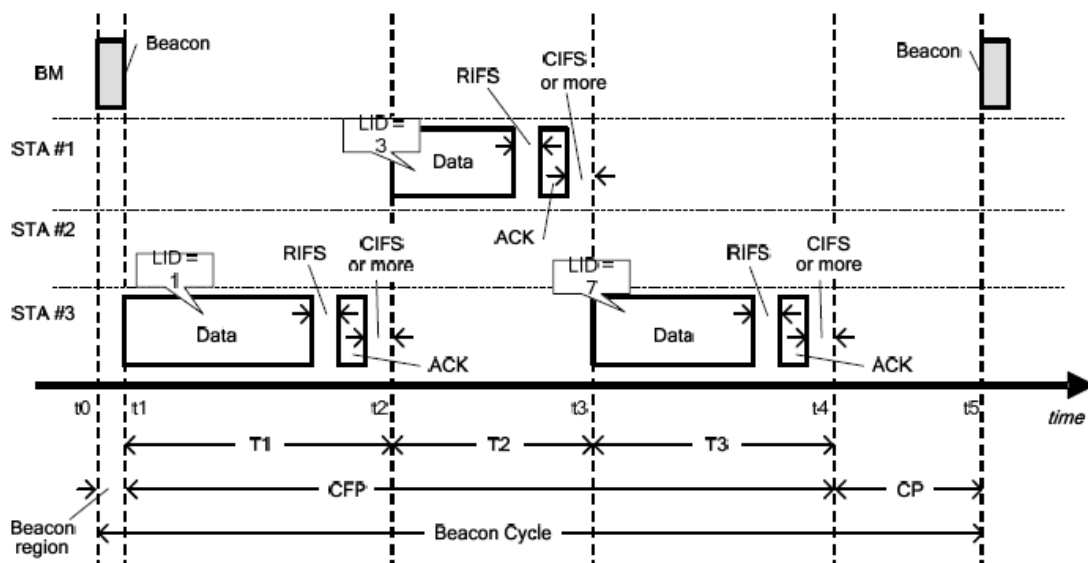
### Ενημέρωση για το πρόγραμμα πρόσβασης

Όλοι οι σταθμοί στο BSS/Cell πρέπει να συμμορφωθούν με το πρόγραμμα πρόσβασης που περιέχεται στο beacon frame που μεταδίδεται από τον BM/HE κατά τη διάρκεια ενός κύκλου-φάρου (beacon cycle). Τα πλαίσια- φάροι (beacon frames) περιέχουν μία εγγραφή που αποτελείται από την ταυτότητα της σύνδεσης (link ID) και το χρόνο που έχει ανατεθεί στις προγραμματισμένες συνδέσεις (allocated time). Ένας σταθμός επιβεβαιώνοντας τη δική του ταυτότητα με αυτή στο beacon frame μπορεί να μεταδώσει πλαίσια μέσα στο χρονικό διάστημα που του έχει ανατεθεί όπως αυτό καθορίζεται στις πληροφορίες προγράμματος του beacon frame.

Μετά τη λήψη του beacon frame, η σύνδεση που είναι η πρώτη προγραμματισμένη στο beacon frame μπορεί να χρησιμοποιήσει αποκλειστικά την ηλεκτρική γραμμή για χρονικό διάστημα το οποίο τελειώνει στο πεδίο End Time της πρώτης καταχώρισης στο πρόγραμμα πρόσβασης και το

οποίο αρχίζει μετά το τέλος της περιόδου- φάρου BP (beacon period). Η σύνδεση στην οποία εκχωρείται εύρος από το ν-στο πεδίο στο πρόγραμμα πρόσβασης μπορεί να χρησιμοποιήσει αποκλειστικά το μέσο για χρονικό διάστημα το οποίο αρχίζει από την τιμή χρόνου στο πεδίο End Time της (ν-1)-στης καταχώρισης στο πρόγραμμα πρόσβασης μέχρι την τιμή χρόνου στο πεδίο End Time της ν-στης καταχώρισης στο πρόγραμμα πρόσβασης. Ένας σταθμός στον οποίον έχει εκχωρηθεί εύρος από το beacon frame μπορεί να μεταδώσει πλαίσια μία ή περισσότερες φορές στο χρόνο που του έχει εκχωρηθεί. Ας σημειωθεί ότι ο χρόνος που εκχωρείται από τον BM/HE περιλαμβάνει και το χρόνο για επιβεβαίωση λήψης, το CIFS και το RIFS, οπότε το μέγεθος των προς αποστολή δεδομένων πρέπει να αποφασιστεί λαμβάνοντας και αυτά υπόψη.

**Εικόνα 4.28: Προγραμματισμένη μετάδοση**



Πηγή: [9]

Στο παράδειγμα της Εικόνας 4.28, το δίκτυο αποτελείται από ένα BM και τρεις σταθμούς (STA #1, #2, #3). Το beacon frame ενημερώνει τους σταθμούς για τρεις καταχωρίσεις του προγράμματος πρόσβασης. Στην πρώτη καταχώριση, κατά τη χρονική στιγμή  $t_1$  το μέσο ανατίθεται στη σύνδεση στην οποία ο STA #3 είναι ο σταθμός-πομπός. Η ταυτότητα αυτής της σύνδεσης είναι LID=1 (link ID). Στη δεύτερη καταχώριση, κατά τη χρονική στιγμή  $t_2$  το μέσο ανατίθεται στη δεύτερη σύνδεση. Ο σταθμός-πομπός για τη δεύτερη σύνδεση είναι ο STA #1 και η ταυτότητα της δεύτερης σύνδεσης είναι LID=3. Στην τρίτη καταχώριση, κατά τη χρονική

στιγμή t3 το μέσο ανατίθεται στην τρίτη σύνδεση. Ο σταθμός-πομπός για την τρίτη σύνδεση είναι ο STA #3 και η ταυτότητα της δεύτερης σύνδεσης είναι LID=7.

Ο STA #3 αρχίζει να μεταδίδει δεδομένα που αντιστοιχούν στην πρώτη σύνδεση (LID=1) τη χρονική στιγμή t1. Αφού τελειώσει η αποστολή δεδομένων, ο σταθμός- παραλήπτης στην πρώτη σύνδεση μπορεί να μεταδώσει το πλαίσιο επιβεβαίωσης. Ο σταθμός- παραλήπτης πρέπει να περιμένει RIFS ή περισσότερο πριν μεταδώσει το ACK μετά το τέλος της μετάδοσης των δεδομένων από τον STA #3. Η μετάδοση του ACK πρέπει να έχει τελειώσει CIFS ή πριν από τη χρονική στιγμή t2.

Ο STA #1 αρχίζει να μεταδίδει δεδομένα που αντιστοιχούν στη δεύτερη σύνδεση (LID=3) τη χρονική στιγμή t2. Αφού τελειώσει η αποστολή δεδομένων, ο σταθμός- παραλήπτης στη δεύτερη σύνδεση μπορεί να μεταδώσει το πλαίσιο επιβεβαίωσης. Ο σταθμός- παραλήπτης πρέπει να περιμένει RIFS ή περισσότερο πριν μεταδώσει το ACK μετά το τέλος της μετάδοσης των δεδομένων από τον STA #1. Η μετάδοση του ACK πρέπει να έχει τελειώσει CIFS ή πριν από τη χρονική στιγμή t3.

Ο STA #3 αρχίζει να μεταδίδει δεδομένα που αντιστοιχούν στην τρίτη σύνδεση (LID=7) τη χρονική στιγμή t3. Αφού τελειώσει η αποστολή δεδομένων, ο σταθμός- παραλήπτης στην τρίτη σύνδεση μπορεί να μεταδώσει το πλαίσιο επιβεβαίωσης. Ο σταθμός- παραλήπτης πρέπει να περιμένει RIFS ή περισσότερο πριν μεταδώσει το ACK μετά το τέλος της μετάδοσης των δεδομένων από τον STA #3. Η μετάδοση του ACK πρέπει να έχει τελειώσει CIFS ή πριν από τη χρονική στιγμή t4. Η χρονική στιγμή t4 σημαίνει, επίσης, το τέλος της περιόδου χωρίς ανταγωνισμό του τρέχοντος beacon cycle.

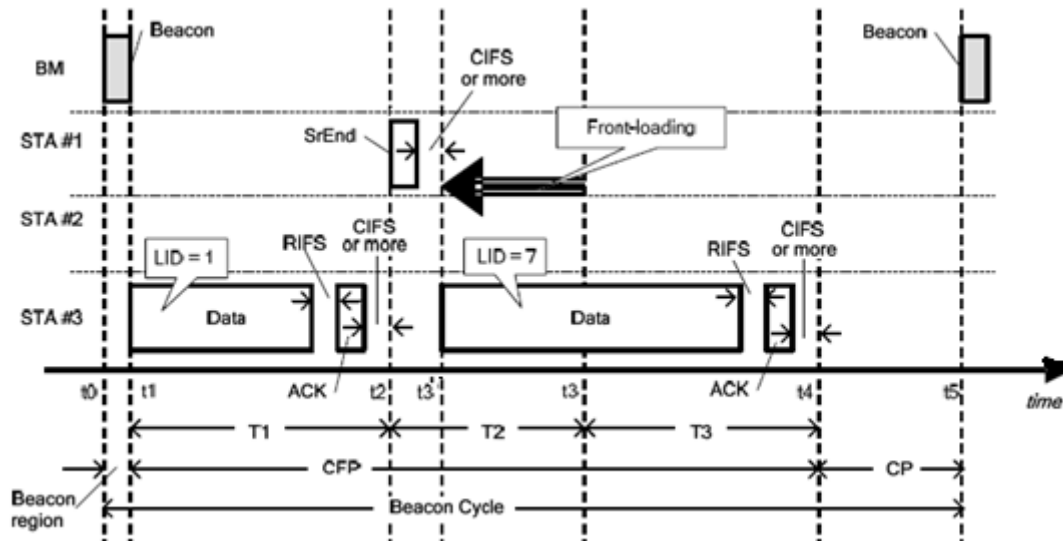
Το υπόλοιπο της beacon period (από την t4 μέχρι την t5) είναι η περίοδος ανταγωνισμού αυτού του beacon cycle. Κάθε σταθμός μπορεί να μεταδώσει πλαίσια σύμφωνα με τον CSMA/CA (ή τον DVTP) μηχανισμό.

## 🚦 Αλλαγή του προγράμματος πρόσβασης

Κατά τη διάρκεια της περιόδου χωρίς ανταγωνισμό, εφόσον μία μετάδοση πλαισίου που γίνεται στον χρόνο που έχει ανατεθεί στη σύνδεση τελειώσει πριν από τον προγραμματισμένο χρόνο, η επόμενη προγραμματισμένη μετάδοση μπορεί να ξεκινήσει πριν από τον χρόνο έναρξης που έχει καθοριστεί στο beacon frame. Αν ένας σταθμός τελειώσει τη μετάδοση του πλαισίου πριν από τον προγραμματισμένο χρόνο, ο σταθμός μπορεί να εκπέμψει ένα πλαίσιο «Τέλος Ροής» (Stream End) για να ενημερώσει τους υπόλοιπους σταθμούς στο BSS/Cell ότι τελείωσε η μετάδοση πλαισίου. Το stream end πλαίσιο μεταδίδεται με ευρυεκπομπή. Ο σταθμός που έχει την επόμενη προγραμματισμένη μετάδοση μπορεί να μεταδώσει πλαίσια που έχουν το δικό του LID νωρίτερα από τον προγραμματισμένο χρόνο έναρξης μετάδοσης αφού προηγουμένως αναμείνει επί CIFS ή περισσότερο. Ο δεύτερος σταθμός μπορεί να χρησιμοποιήσει το μέσο αποκλειστικά μέχρι το δικό του προγραμματισμένο τέλος χρόνου.

Ας σημειωθεί ότι μερικές φορές ο πρώτος σταθμός ίσως να μη μπορεί να μεταδώσει το Stream End (π.χ. ο χρόνος που απομένει δεν είναι αρκετός για να εκπεμφθεί ένα πλαίσιο μετά την εκπομπή του Stream End πλαισίου).

Εικόνα 4.29: Διαδικασία Schedule front loading



Πηγή: [9]

Στο παράδειγμα της Εικόνας 4.29, το δίκτυο αποτελείται από τον BM και τρεις σταθμούς (STA #1, #2, #3). Ο BM μεταδίδει τα beacon frames όπως στο προηγούμενο παράδειγμα.

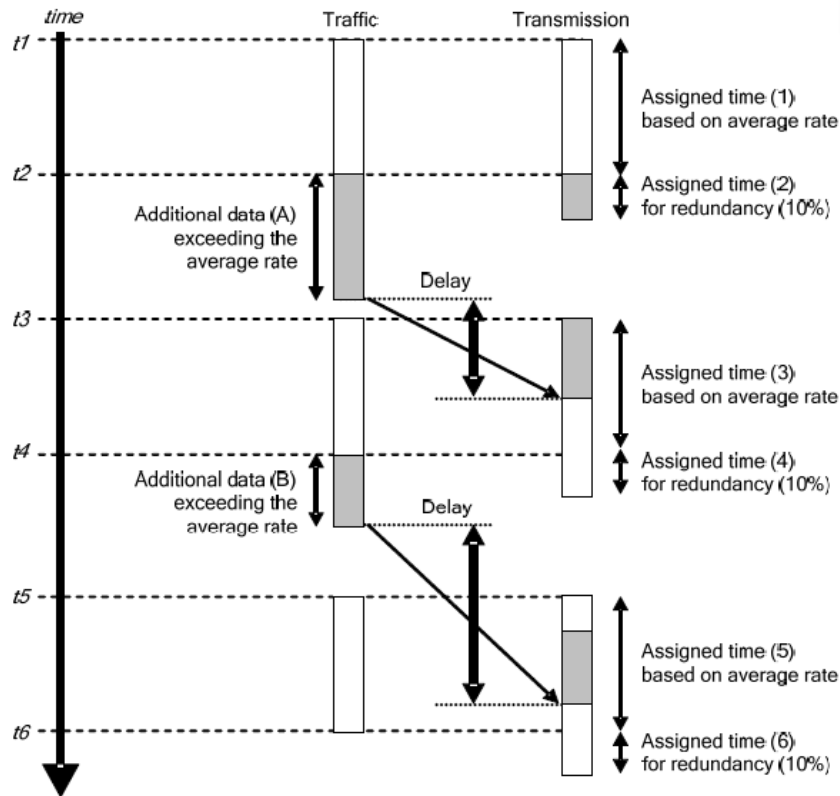
Ο STA #3 αρχίζει να μεταδίδει δεδομένα που αντιστοιχούν στην πρώτη σύνδεση (LID=1) τη χρονική στιγμή t1. Αφού τελειώσει η αποστολή δεδομένων, ο σταθμός- παραλήπτης στην πρώτη σύνδεση μπορεί να μεταδώσει το πλαίσιο επιβεβαίωσης. Ο σταθμός- παραλήπτης πρέπει να περιμένει RIFS ή περισσότερο πριν μεταδώσει το ACK μετά το τέλος της μετάδοσης των δεδομένων από τον STA #3. Η μετάδοση του ACK πρέπει να έχει τελειώσει CIFS ή πριν από τη χρονική στιγμή t2. Ο STA #1 δεν έχει πλαίσια να μεταδώσει τη χρονική στιγμή t2, οπότε εκπέμπει ένα Stream End πλαίσιο. Ο STA #3 ανιχνεύει το Stream End πλαίσιο που εκπέμφθηκε από τον STA #1 και ξεκινά να μεταδίδει πλαίσια που αφορούν την τρίτη σύνδεση (LID=7) τη χρονική στιγμή t3'. Η χρονική στιγμή t3' είναι CIFS ή περισσότερο από τη στιγμή όπου το Stream End λήφθηκε από όλους.

#### Δυναμική εκχώρηση χρόνου για πρόσβαση στο μέσο χωρίς ανταγωνισμό

Για να παρέχει πρόσβαση στο μέσο χωρίς ανταγωνισμό, ο BM/HE αποστέλλει ένα πρόγραμμα πρόσβασης σε κάθε σταθμό με χρήση beacon frames. Με ένα πρόγραμμα το οποίο εκχωρεί σταθερά χρονικά διαστήματα βασισμένο στο μέσο ρυθμό μετάδοσης, το εκχωρημένο εύρος που δεν χρησιμοποιείται δεν μπορεί να περιλάβει αλλαγές στην κίνηση που προέρχονται από πηγές μεταβλητής ροής bit VBR (variable bit-rate) ή μία αύξηση στο εύρος σε μία προσπάθεια αναμετάδοσης όταν έχει συμβεί κάποιο λάθος. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καθυστερήσεις, ακόμα και σε πλαίσια που μεταδίδονται σε περιόδους χωρίς ανταγωνισμό. Αν οι αντίστοιχοι ενδιάμεσοι χώροι αποθήκευσης (buffers) δεν μπορούν να απορροφήσουν τέτοιες καθυστερήσεις, προκαλούνται απώλειες πακέτων, που μειώνουν περαιτέρω την απόδοση του δικτύου.

Στην Εικόνα 4.30 φαίνεται ένα παράδειγμα σταθερής εκχώρησης που βασίζεται στον μέσο ρυθμό μετάδοσης. Ο BM/HE αντιστοιχίζει ένα πρόσθετο χρονικό διάστημα για κάθε σύνδεση, το οποίο καλείται εκχωρούμενος πλεονάζων χρόνος (assign redundancy time). Ο συνήθης σχεδιασμός BM/HE περιλαμβάνει εκχωρούμενο πλεονάζοντα χρόνο ίσο με 10% του χρόνου που έχει εκχωρηθεί στη ζεύξη. Αυτό έχει υπολογισθεί από το μέσο ρυθμό μετάδοσης κίνησης.

Εικόνα 4.30: Σταθερή εκχώρηση



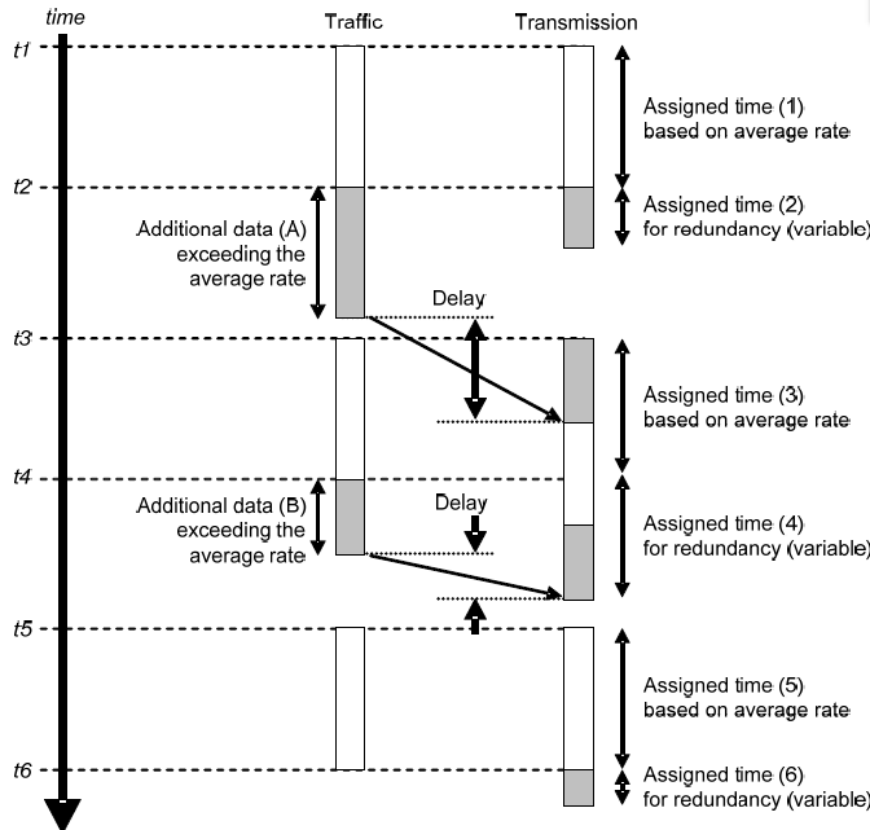
Πηγή: [9]

Στην Εικόνα 4.30, η VBR πηγή παράγει πρόσθετα δεδομένα (A) που υπερβαίνουν τα αναμενόμενα. Ωστόσο, ο πρόσθετος χρόνος δεν είναι επαρκής για να μεταδώσει τα δεδομένα (A) με αποτέλεσμα ένα μέρος των (A) να μεταδοθεί στην επόμενη χρονική περίοδο που έχει εκχωρηθεί σε άλλο σταθμό. Έτσι, τα επόμενα πρόσθετα δεδομένα (B) καθυστερούν ακόμα περισσότερο.

Έξυπνη πρόσβαση χωρίς ανταγωνισμό μπορεί να ελαττώσει ή να εξαλείψει την καθυστέρηση μειώνοντας ή αυξάνοντας τον εκχωρούμενο πλεονάζοντα χρόνο δυναμικά ανάλογα με την κίνηση. Αυτός ο μηχανισμός διορθώνει τις ελλείψεις και θέτει υπό έλεγχο τις καθυστερήσεις παρέχοντας επικοινωνίες με σταθερή απόδοση.



Εικόνα 4.31: Δυναμική εκχώρηση



Πηγή: [9]

Στην Εικόνα 4.31 εφαρμόζεται ο μηχανισμός δυναμικής εκχώρησης. Η καθυστέρηση των πρόσθετων δεδομένων (A) στη δυναμική εκχώρηση είναι ακριβώς ίδια με αυτή στη σταθερή εκχώρηση. Ωστόσο, η καθυστέρηση των πρόσθετων δεδομένων (B) μειώνεται αισθητά σε σύγκριση με αυτή της σταθερής εκχώρησης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο εκχωρούμενος πλεονάζων χρόνος αυξήθηκε σύμφωνα με τα πρόσθετα δεδομένα (A).



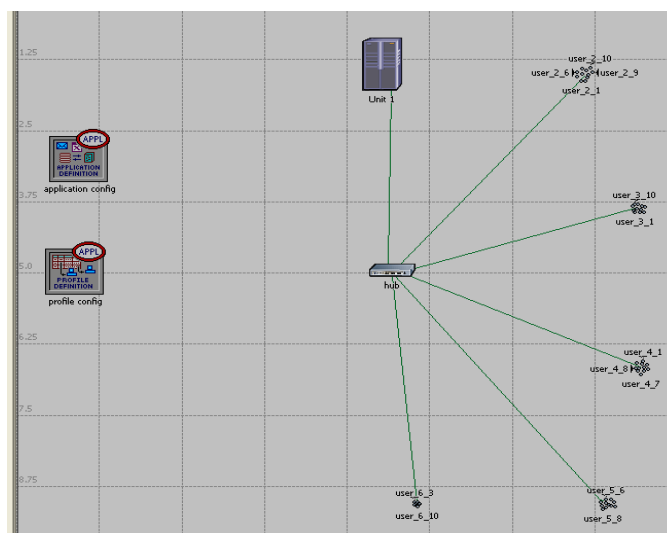
## 5. Προσομοίωση token-based δικτύου BPL και Αποτελέσματα προσομοίωσης

### 5.1 Το μοντέλο του δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ενός δικτύου BPL για διαφορετικά σενάρια. Το δίκτυο BPL αποτελείται από BPL μονάδες που συνδέονται όλες με γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου σε ένα κεντρικό άξονα (hub). Από τη σκοπιά ενός στρώματος υψηλότερου επιπέδου από το φυσικό (π.χ. MAC στρώμα), το δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα λογικό σύστημα διαύλου (bus), το οποίο συνδέει ένα αριθμό κόμβων με έναν σταθμό βάσης, τον HE, που παρέχει την επικοινωνία με το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και λειτουργεί ως server.

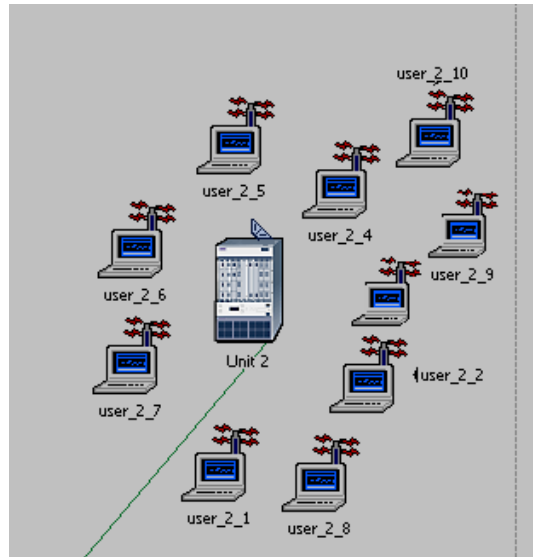
Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται η τοπολογία του δικτύου της προσομοίωσης: η **Unit1** είναι ο HE σταθμός βάσης- server που συνδέεται με το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και από τον οποίο περνάει όλη η κίνηση από και προς τους χρήστες του BPL δικτύου και οι **BPL Units** (φαίνονται καθαρότερα στην Εικόνα 5.2) συνδέονται με το κεντρικό **hub** με **ευρυζωνικές συνδέσεις** (πράσινες γραμμές). Για την υλοποίηση των ευρυζωνικών συνδέσεων χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση fddi συνδέσεις, οι οποίες έχουν ρυθμιστεί ώστε να προσομοιώνουν τον BLP δίαυλο (χαμηλό downlink και uplink rate ώστε να προσομοιώνουν το δυσμενές BPL κανάλι). Οι οντότητες για **application configuration** και **profile configuration** που φαίνονται αριστερά χρησιμεύουν για την περιγραφή του προφίλ της κίνησης του δικτύου. Ο ρόλος τους θα γίνει κατανοητός αργότερα, όταν γίνει η βασική περιγραφή του προγράμματος.

Εικόνα 5.1: Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης



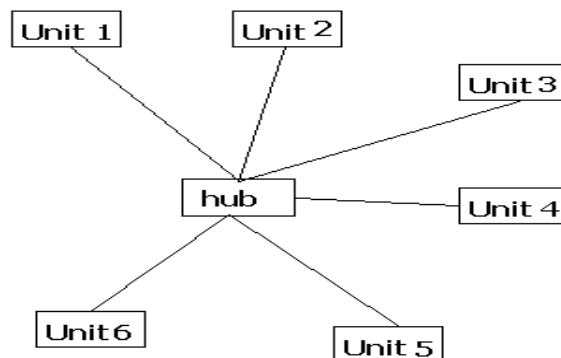
Οι χρήστες του BPL δικτύου στην προσομοίωση συνδέονται ασύρματα στις BPL μονάδες και η κίνηση στο δίκτυο αφορά τη μεταφορά αρχείων από τον server προς τους χρήστες (όχι από χρήστη σε χρήστη ή από χρήστη προς server) με βάση το ftp πρωτόκολλο.

**Εικόνα 5.2: Ασύρματη σύνδεση χρηστών σε BPL μονάδα**

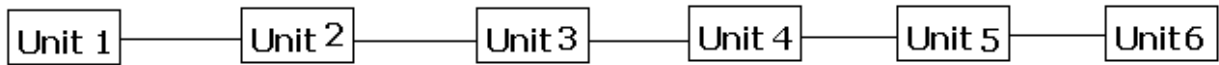


Το MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται είναι βασισμένο στη χρήση σκυτάλης (token-based). Η σκυτάλη πηγαίνει από BPL μονάδα σε BPL μονάδα και κάθε BPL μονάδα την δίνει στη γειτονική της μονάδα. Για το λόγο αυτό η τοπολογία αστέρα που φαίνεται στην Εικόνα 5.3 (hub) μπορεί να προσομοιώνει την τοπολογία BPL διαύλου που φαίνεται στην Εικόνα 5.4 (bus).

**Εικόνα 5.3: Τοπολογία αστέρα προσομοίωσης**

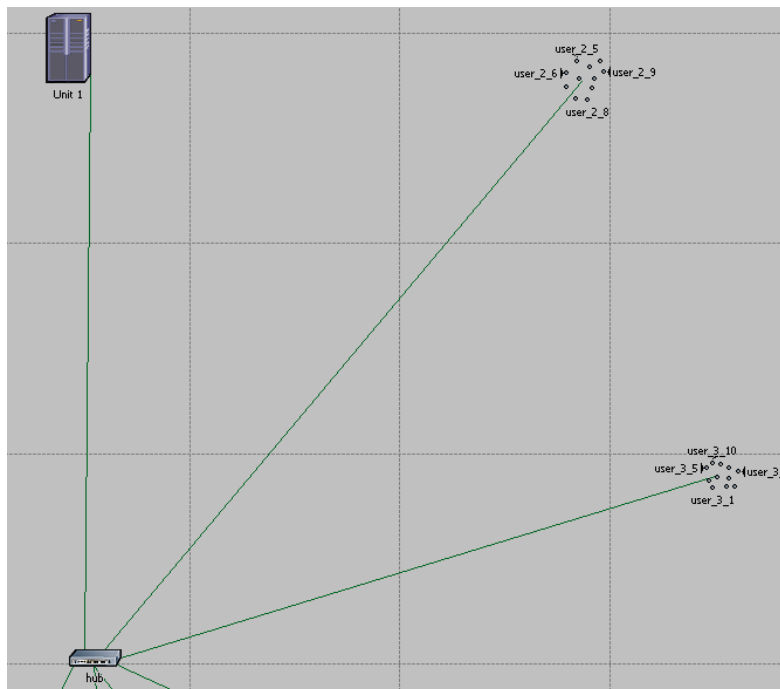


Εικόνα 5.4: Τοπολογία διαύλου BPL δικτύων



Το token-based πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιείται προσομοιώνει μία ειδική περίπτωση χρήσης του TDMA στις περιόδους χωρίς ανταγωνισμό όπως περιγράφεται στο πρότυπο IEEE 1901. Όσο κάθε σταθμός διατηρεί τη σκυτάλη, μπορεί να μεταδώσει τα δεδομένα που έχει, άλλως αναμένει να έρθει πάλι η σειρά του. Αποτελεί ειδική περίπτωση του TDMA που περιγράφεται στο πρότυπο, διότι το πρόγραμμα για την πρόσβαση στο μέσο ουσιαστικά είναι προκαθορισμένο, αφού η σκυτάλη θα περάσει σειριακά από όλους τους σταθμούς. Επομένως, δεν καθορίζει στην πραγματικότητα ο HE το πρόγραμμα πρόσβασης στο μέσο και επιπλέον δεν υπάρχει ευελιξία για αλλαγή του προγράμματος (fixed scheduling). Ωστόσο, η μετάδοση με σκυτάλη είναι μία από τις κλασικές μεθόδους υλοποίησης του TDMA με αρκετό ενδιαφέρον για μελέτη.

Εικόνα 5.5: Σύνδεση μονάδων με το κεντρικό Hub στο δίκτυο της προσομοίωσης



Το BPL δίκτυο εξυπηρετεί δύο βασικές ανάγκες: ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων και λειτουργία έξυπνου δικτύου. Για τη λειτουργία έξυπνου δικτύου τα πακέτα που διακινούνται στο δίκτυο είναι πολύ λιγότερα σε πλήθος και μικρότερα, ιδιαίτερα σε σύγκριση με τα πακέτα που ανταλλάσσονται για ευρυζωνική επικοινωνία. Η κύρια κατεύθυνση μετάδοσης των πακέτων αυτών είναι από τους κόμβους προς κάποιο κεντρικό σταθμό (uplink). Η κίνηση αυτή μπορεί να εξηγηρηθεί και από ζεύξη χαμηλής ταχύτητας (narrowband link). Επειδή στο μοντέλο των προσομοιώσεων το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη της ευρυζωνικής μετάδοσης δεδομένων, η κατεύθυνση κίνησης που ενδιαφέρει κυρίως είναι προς τους χρήστες (downlink). Λόγω του ότι τα δεδομένα στην uplink ζεύξη είναι πολύ λιγότερα σε σχέση με τα δεδομένα στην downlink ζεύξη, θεωρείται αμελητέα η uplink κίνηση. Για τη δημιουργία downlink κίνησης χρησιμοποιείται στην προσομοίωση η ftp μεταφορά ενός αρχείου μεγάλου μεγέθους ώστε να υπάρχει συνεχώς κίνηση στο δίκτυο και να μελετηθεί η λειτουργία του σε κατάσταση πλησίον συμφόρησης.

Ενδιαφέρον στις προσομοιώσεις παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου με μεταβολή παραμέτρων όπως το πλήθος των χρηστών σε κάθε κόμβο, το πλήθος των BPL μονάδων, ο χρόνος που κάθε σταθμός διατηρεί τη σκυτάλη, η κατανομή των χρηστών στο δίκτυο, η παρουσία μία πολύ κακής ζεύξης και η θέση της στο δίκτυο. Το βασικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδοσης του δικτύου είναι η ρυθμαπόδοση του TCP πρωτοκόλλου (TCP throughput), η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των bits που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο και μετράται ανά BPL μονάδα.

Όπως αναφέρθηκε οι χρήστες συνδέονται ασύρματα στις BPL μονάδες. Οι ασύρματες αυτές ζεύξεις, που είναι το τελευταίο βήμα μετάδοσης (last hop wireless links), χαρακτηρίζονται από υψηλό σηματοθορυβικό λόγο και επομένως χαμηλό ποσοστό απωλειών. Έτσι, η τελευταία αυτή ζεύξη δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του TCP. Συνεπώς για τις προσομοιώσεις γίνεται η παραδοχή ότι η ασύρματη ζεύξη δεν έχει άμεση επίδραση στις μετρήσεις και μελετάται μόνο το πώς η μετάδοση μέσω των γραμμών MT επηρεάζει το TCP. Επιπλέον, αξ σημειωθεί ότι οι χρήστες που συνδέονται στον HE (πρώτη BPL μονάδα) δε λαμβάνονται υπόψη, καθώς η μεταφορά δεδομένων προς αυτούς δεν εξυπηρετείται από το BPL δίκτυο αλλά γίνεται απευθείας ασύρματα.

## 5.2 Το πρόγραμμα OPNET των προσομοιώσεων

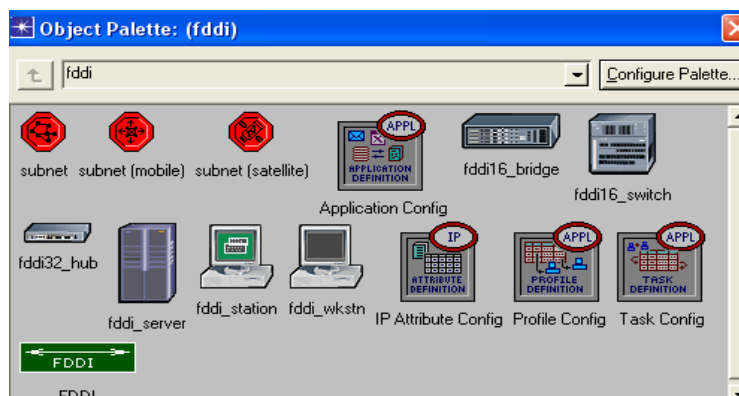
Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι το OPNET 11.0. Το OPNET 11.0 είναι ένας δικτυακός προσομοιωτής που δίνει μεγάλες δυνατότητες στον χρήστη για υλοποίηση δικτύων και τεχνολογιών. Παράλληλα ο προσομοιωτής έχει ενσωματωμένες ήδη βασικές γνωστές τεχνολογίες (π.χ. FDDI, IP, TCP).

Η δημιουργία ενός δικτύου γίνεται σε τρία επίπεδα:

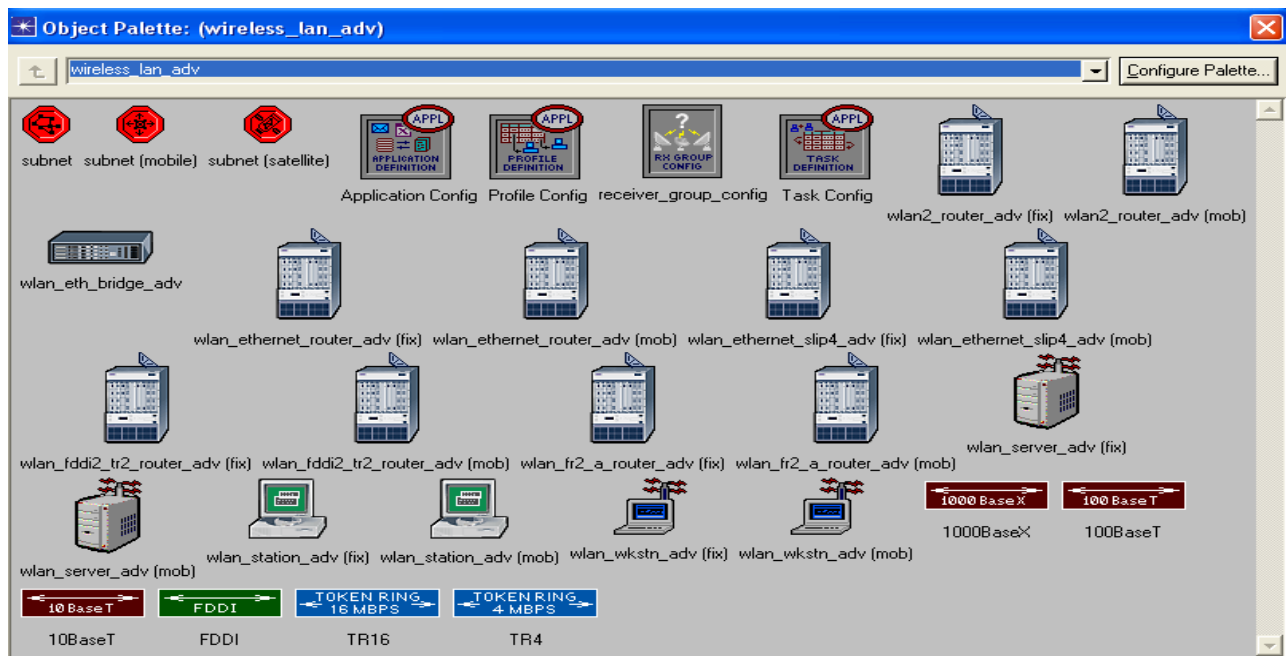
- Δημιουργία δικτύου (με χρήση του Project Editor)
- Δημιουργία κόμβων (με χρήση του Node Editor)
- Δημιουργία διαδικασιών (με χρήση του Process Editor)

Στο επίπεδο δικτύου βρίσκεται ο χώρος όπου ο χρήστης θα ορίσει την τοπολογία του δικτύου. Ο χρήστης αρχικά ορίζει το μέγεθος της επιφάνειας εργασίας στην οποία θα φαίνεται το δίκτυο, την εμβέλεια του δικτύου (από ολόκληρη περιοχή στον παγκόσμιο χάρτη μέχρι και γραφείο) και τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια, έχει στη διάθεσή του παλέτες με τα αντικείμενα (servers, nodes, links κλπ) των διαφόρων τεχνολογιών, οπότε και δημιουργεί την τοπολογία του συγκεκριμένου δικτύου που προσομοιώνεται. Κάθε αντικείμενο έχει πολλές παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν κατάλληλα από το χρήστη. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να φορτώσει σε συγκριμένο αντικείμενο μοντέλο κόμβου το οποίο ο ίδιος έχει δημιουργήσει στο επόμενο επίπεδο που περιγράφεται, στο επίπεδο κόμβων, με χρήση του Node Editor. Στις Εικόνες 5.6, 6.7 και 5.8 φαίνονται η παλέτα του fddi με τα διαθέσιμα αντικείμενα της, η εξελεγχόμενη παλέτα των ασυρμάτων δικτύων και η τοπολογία σε επίπεδο δικτύου του BPL δικτύου των προσομοιώσεων.

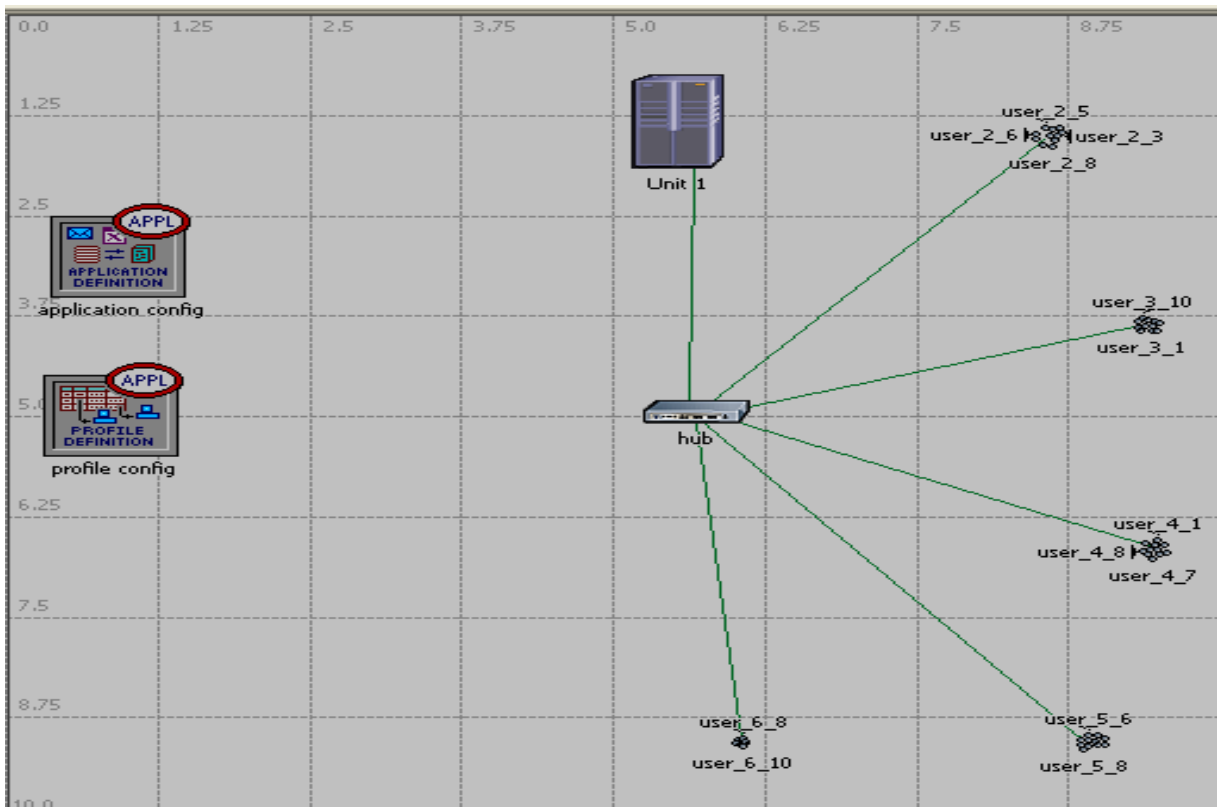
Εικόνα 5.6: Opnet Fddi Palette



Εικόνα 5.7: Opnet Wireless LAN Advanced Palette



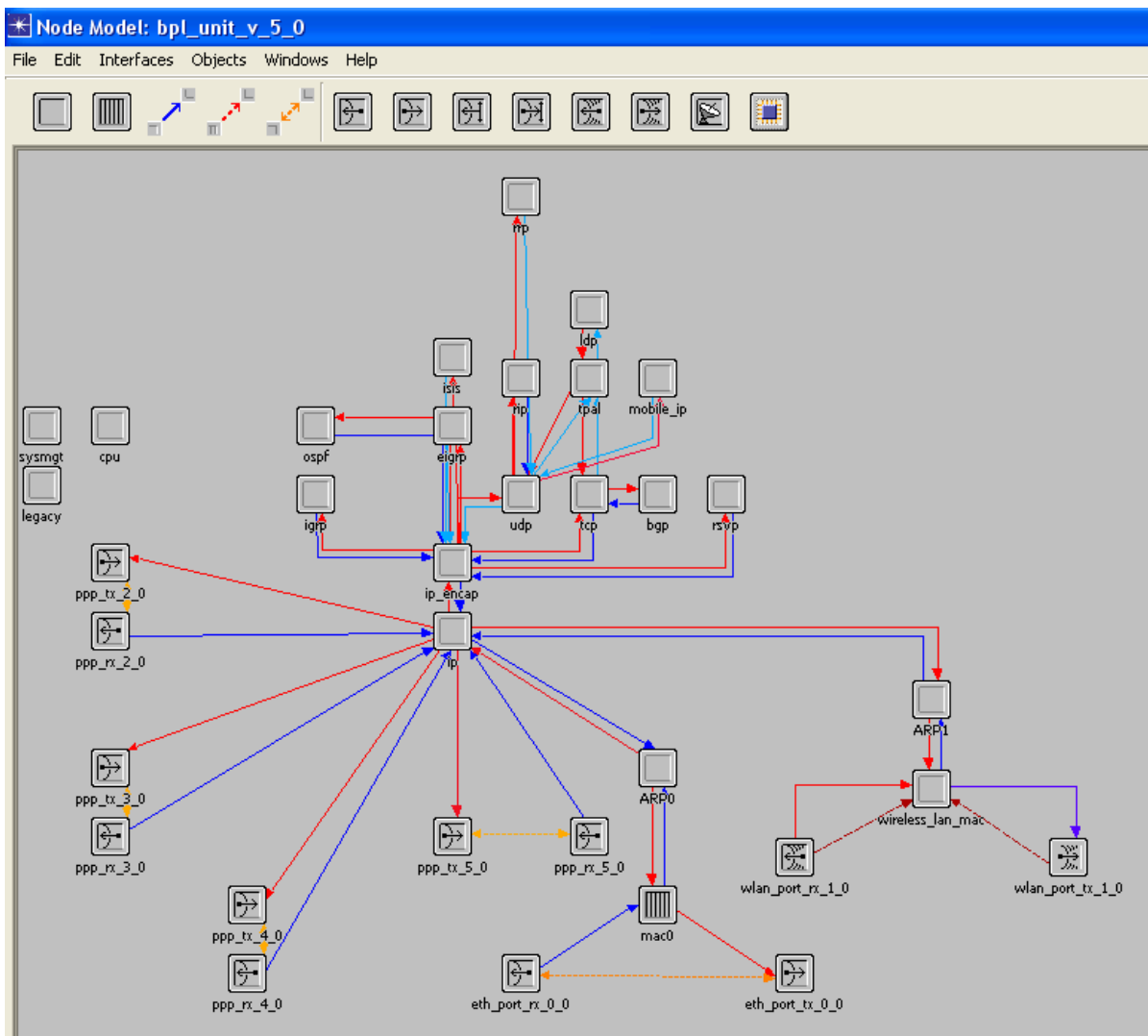
Εικόνα 5.8: Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης





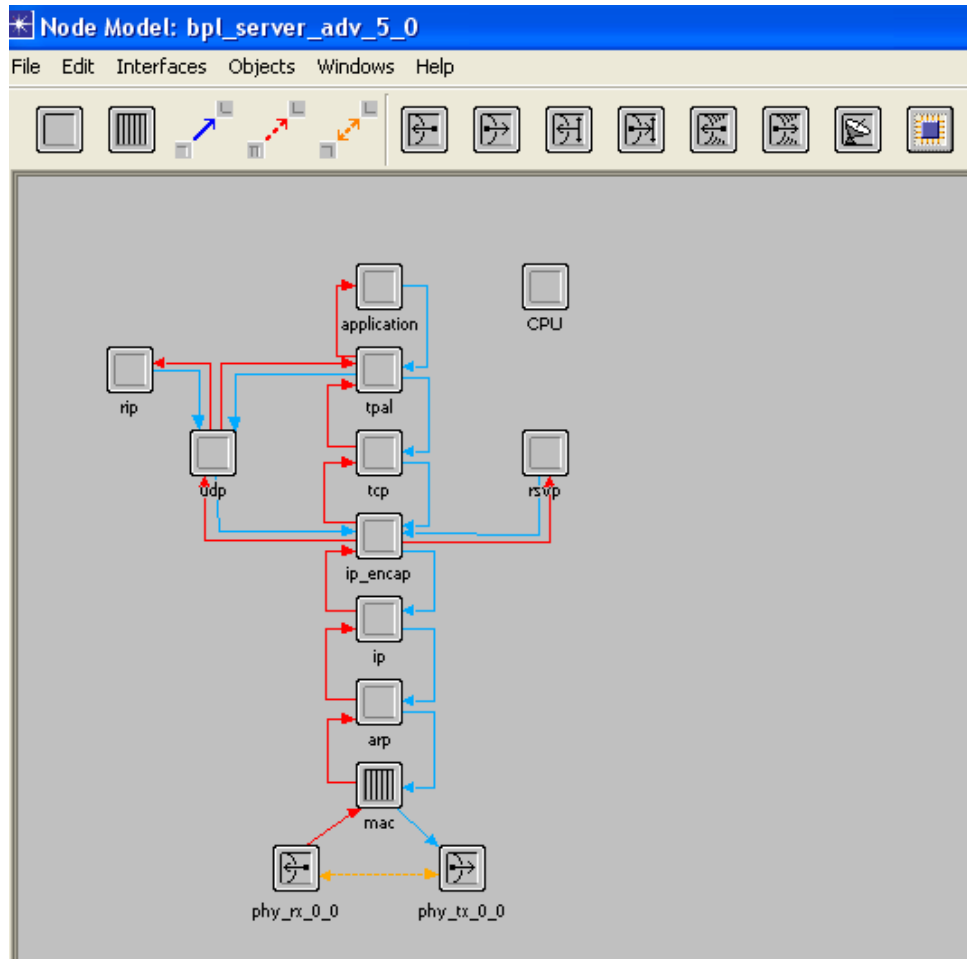
Πίσω από κάθε αντικείμενο βρίσκεται το επίπεδο κόμβων. Στο επίπεδο αυτό, περιγράφεται το μοντέλο κάθε αντικειμένου το οποίο μπορεί να αποτελείται από ένα απλό επεξεργαστή (processor) μέχρι μία σειρά πρωτοκόλλων που υποστηρίζει ο κόμβος συνδεδεμένα κατάλληλα μεταξύ τους. Ο ρόλος αυτού του επιπέδου είναι να καθορίσει μοντέλα αντικειμένων τα οποία αποτελούνται από μονάδες, καθεμία από τις οποίες επιτελεί κάποιες λειτουργίες που ορίζονται στο τρίτο επίπεδο, το επίπεδο διαδικασιών, με χρήση του Process Editor. Ως παράδειγμα παρατίθεται πρώτο στην Εικόνα 5.9 το μοντέλο κόμβου που αντιστοιχεί σε μία BPL μονάδα. Εύκολα διακρίνεται ότι έχει και ενσύρματη και ασύρματη διεπαφή. Η ενσύρματη αφορά στη σύνδεση της μονάδας με το ηλεκτρικό δίκτυο και η ασύρματη στην επικοινωνία της με τους χρήστες.

Εικόνα 5.9: Ornet Node Model για BPL μονάδα



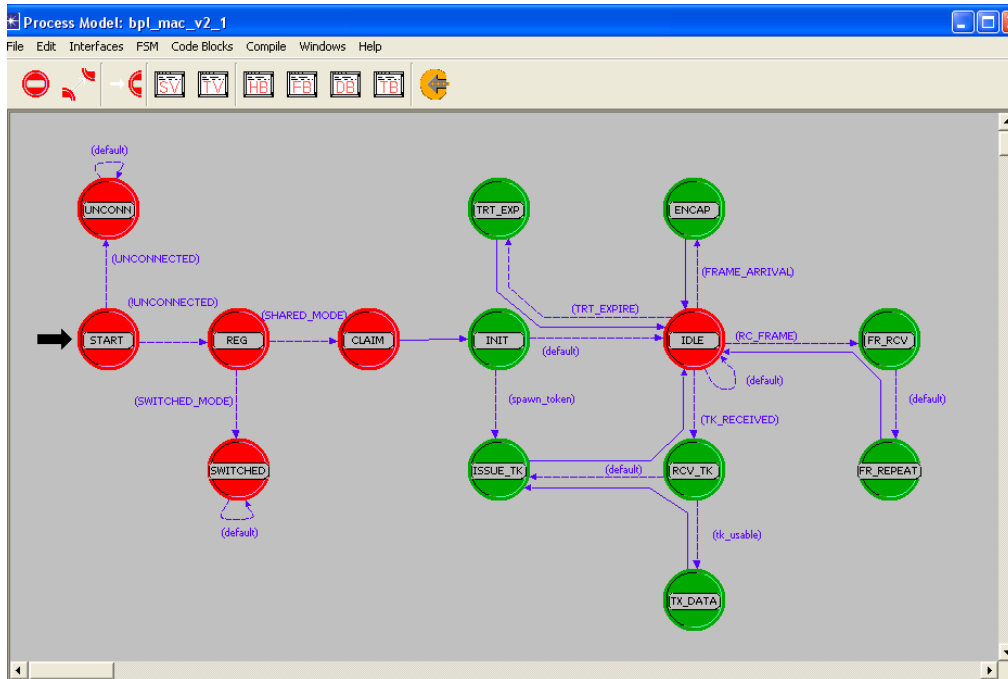
Στην Εικόνα 5.10 φαίνεται το μοντέλο κόμβου που αντιστοιχεί στον BPL server (HE). Εδώ υπάρχει μόνο ενσύρματη διεπαφή. Η CPU έχει σχέση με την κίνηση που κυκλοφορεί στο δίκτυο.

Εικόνα 5.10: Opnet Node Model για BPL server



Το τελευταίο επίπεδο είναι το επίπεδο διαδικασιών στο οποίο ορίζονται όλες οι λειτουργίες των μονάδων του επιπέδου κόμβων. Είναι ουσιαστικά διαγράμματα καταστάσεων οι μεταβάσεις στα οποία συμβαίνουν όταν προκληθεί κάποιο γεγονός (event) στο σύστημα (π.χ. άφιξη ενός πακέτου). Στην Εικόνα 5.11 φαίνεται το διάγραμμα καταστάσεων για το MAC πρωτόκολλο της BPL μονάδας. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει για κάθε κατάσταση κώδικα που εκτελείται όταν εισέρχεται ο κόμβος στην κατάσταση αυτή, κώδικα που υλοποιείται όταν εξέρχεται από την κατάσταση αυτή και κώδικα που υλοποιείται κατά τη μετάβαση. Παράδειγμα κώδικα φαίνεται στην Εικόνα 5.12.

Εικόνα 5.11: Opnet Process Model για MAC στη BPL μονάδα



Εικόνα 5.12: Κώδικας εξόδου από μία κατάσταση στο MAC της BPL μονάδας

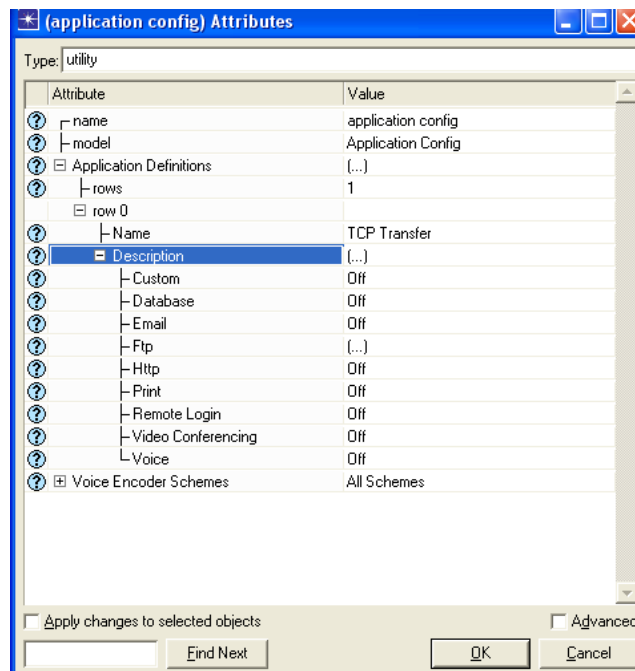
```

bpl_mac_v2_1 : IDLE : Exit Execs
File Edit Options

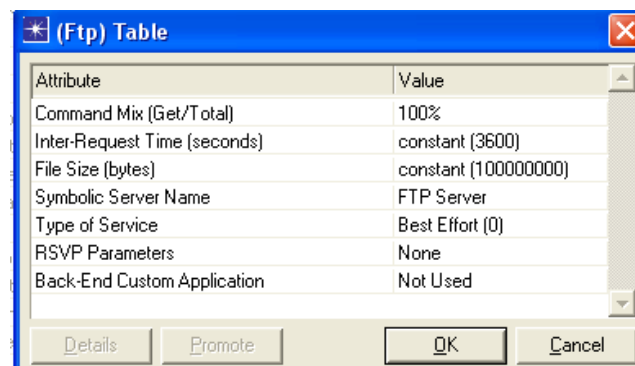
1  /* Determine if a trace is activated for the FDDI model. */
2  tk_trace_on = op_prg_odb_ltrace_active ("fddi_tk");
3
4  /* Determine this event's information. */
5  intrpt_type = op_intrpt_type ();
6  if (intrpt_type == OPC_INTRPT_STRM)
7  {
8      intrpt_strm = op_intrpt_strm ();
9  }
10 else
11 {
12     intrpt_code = op_intrpt_code ();
13 }
14
15 /* Trap packets arriving from physical layer so that their
16 /* FC field can be extracted before evaluating conditions. */
17 if (intrpt_type == OPC_INTRPT_STRM && intrpt_strm != strm_from_higher_layer && intrpt_
18 {
19     /* Acquire the arriving packet. */
20     pkptr = op_pk_get (FDDI_PHY_STRM_IN);
21     if (pkptr == OPC_NIL)
22     {
23         fddi_mac_warn (
24             "Current event seems to be a packet arrival from the physical layer,"
25             "but no packet is available in the input stream.", OPC_NIL);
26         phy_arrival = 0;
27     }
28     else
29     {
30         /* Determine the type of packet by
31         /* extracting the frame control field. */
32         if (op_pk_nfd_get (pkptr, "fc", &frame_control) == OPC_COMPCODE_FAILURE)
33         {
34             fddi_mac_warn (
35                 "Unable to determine type of packet arriving from physical layer.",
36                 "Discarding packet and resuming.", OPC_NIL);
37             op_pk_destroy (pkptr);
38             phy_arrival = 0;
39         }
40         else
41         {
42             /* Physical layer arrival flag is set. */
43             phy_arrival = 1;
44         }
45     }
46 }
47 else
48 {
49     /* The interrupt is not due to a physical layer arrival. */
50     phy_arrival = 0;
51 }
52
53 /* If the interrupt is a remote interrupt with specified code, it signifies
54 /* the reinsertion of the token into the ring after an idle period. This only
55 /* occurs if the token acceleration mechanism is active.
56 if (intrpt_type == OPC_INTRPT_REMOTE && intrpt_code == FDDIC_TK_INJECT)
    
```

Μέσω των οντοτήτων application configuration και profile configuration μπορεί να ρυθμιστεί η κίνηση που κινείται στο δίκτυο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.13 στην προσομοίωση έχει δημιουργηθεί μία εφαρμογή που αφορά ftp κίνηση τα χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στην Εικόνα 5.14. Το μέγεθος πακέτου αποστολής είναι αρκετά μεγάλο ώστε να υπάρχει διαρκώς κίνηση στο δίκτυο και κίνηση μόνο προς την κατεύθυνση των χρηστών (command mix 100%).

**Εικόνα 5.13: Application Configuration**



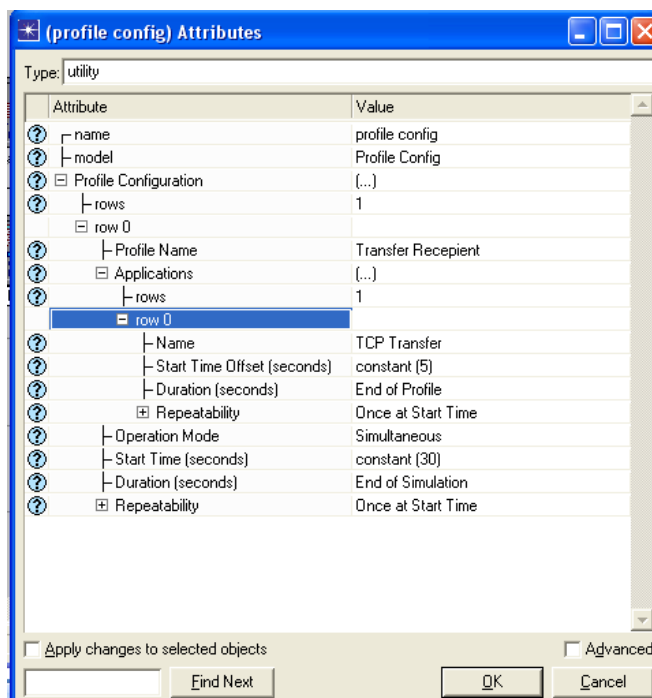
**Εικόνα 5.14: Χαρακτηριστικά FTP κίνησης**



Η ftp εφαρμογή που περιγράφηκε ανήκει στο προφίλ κίνησης που φαίνεται στην Εικόνα 5.15, στην οποία παρουσιάζονται και τα χαρακτηριστικά του προφίλ (χρονικό διάστημα από την

έναρξη της προσομοίωσης για την έναρξη του προφίλ, επαναληπτικότητα του προφίλ, χρόνος μεταξύ των επαναλήψεων του προφίλ, χρονικό διάστημα από την έναρξη του προφίλ για την έναρξη των εφαρμογών του προφίλ, επαναληπτικότητα των εφαρμογών του προφίλ, χρόνος μεταξύ των επαναλήψεων των εφαρμογών κλπ).

**Εικόνα 5.15: Profile Configuration**



### 5.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων βασικού μοντέλου

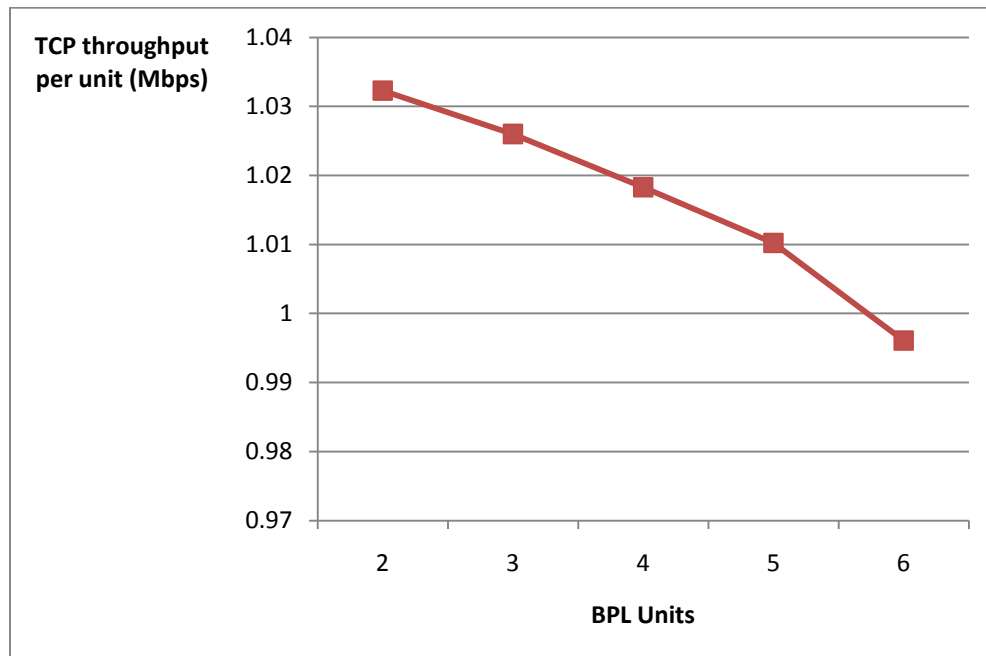
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του βασικού σεναρίου του δικτύου. Στο σενάριο αυτό το δίκτυο αποτελείται από 6 όμοιες BPL μονάδες με 10 χρήστες έκαστη, ο χρόνος που διατηρεί κάθε σταθμός τη σκυτάλη είναι 0.01 sec και η κίνηση που μεταφέρεται αφορά στη μεταφορά αρχείων με το FTP πρωτόκολλο όντας η ίδια σε κάθε μονάδα (command mix=100%, inter-request time=constant(3600), file size(bytes)=constant(10000000)) όπως προαναφέρθηκε στην περιγραφή του προσομοιωτή). Οι ζεύξεις που συνδέουν τις μονάδες με το κεντρικό Hub είναι ίδιες και έχουν χωρητικότητα περίπου 41 Mbps (uplink και downlink). Το μοντέλο αυτό χρησιμεύει ως αναφορά, όταν στην επόμενη ενότητα θα μεταβάλλονται κάποιες από τις παραμέτρους οι οποίες στο βασικό σενάριο είναι ίδιες για όλες τις μονάδες.

Η ρυθμαπόδοση TCP για κάθε μονάδα BPL φαίνεται στο διάγραμμα στην Εικόνα 5.16. Η ρυθμαπόδοση μειώνεται σταδιακά όσο η μονάδα απομακρύνεται από τον HE. Ωστόσο, η μείωση

αυτή δεν γίνεται αναλογικά με την απόσταση του κόμβου από τον HE, όπως θα ήταν αναμενόμενο γιατί από τον κάθε σταθμό περνάει και η κίνηση όλων των επόμενων. Παρατηρείται μία στενωπός επίδοσης (bottleneck) στην πρώτη BPL μονάδα η οποία καθορίζει και την επίδοση των επόμενων μονάδων. Το bottleneck αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η κατανομή του χρόνου κατά τον οποίο κάθε σταθμός διατηρεί τη σκυτάλη THT (token holding time) δεν είναι δίκαιη και δεν ευνοεί τους κόμβους (BPL μονάδες) που βρίσκονται πλησιέστερα στον HE. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κόμβοι που βρίσκονται πλησιέστερα στον HE πρέπει να εξυπηρετήσουν και να μεταδώσουν την κίνηση και των κόμβων που ακολουθούν. Επομένως σε μία δίκαιη κατανομή του χρόνου κατά τον οποίο διατηρεί κάθε κόμβος τη σκυτάλη, οι κόμβοι που βρίσκονται πλησιέστερα στον HE θα χρειάζονται μεγαλύτερο THT (το ζήτημα αυτό αναπτύσσεται με λεπτομέρεια στο [3]).

**Εικόνα 5.16: TCP throughput per Unit- Basic Model**

Unit	2	3	4	5	6
per user/per unit (bps)	108241.9	107584.1	106774.6	105929.8	104447.1
per unit (bps)	1082419	1075841	1067746	1059298	1044471
per unit (Mbps)	1.032275	1.026002	1.018281	1.010225	0.996085



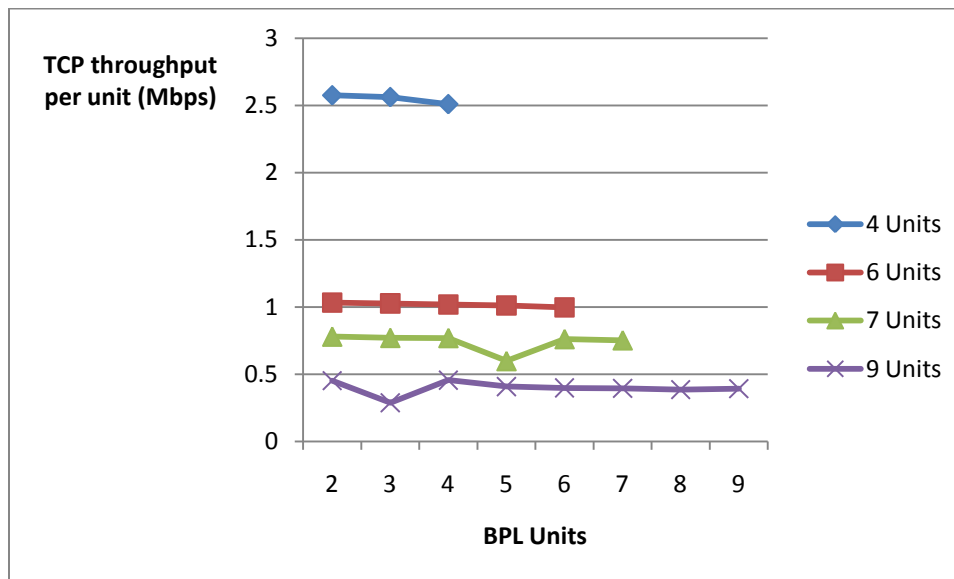
## 5.4 Σύγκριση σεναρίων

### 5.4.1 Μεταβλητό πλήθος μονάδων

Τυπικά η δομή ενός cell σε μία γραμμή MT περιλαμβάνει 6-8 μονάδες. Για να γίνει εμφανής όμως η διαφορά στην απόδοση σε σχέση με τον αριθμό των BPL μονάδων στο δίκτυο, μελετώνται συγκριτικά 3 διαφορετικά σενάρια στα οποία το δίκτυο αποτελείται από 6, 7 και 8 κόμβους αντίστοιχα.

Εικόνα 5.17: TCP throughput per Unit- Μεταβλητός αριθμός μονάδων

	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6	unit 7	unit 8	unit 9
4 units	2.574204	2.560995	2.508337					
6 units	1.032275	1.026002	1.018281	1.010225	0.996085			
7 units	0.77997	0.770496	0.769253	0.597956	0.761438	0.752362		
9 units	0.451218	0.28658	0.455054	0.407579	0.397725	0.394346	0.385502	0.391941



Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των BPL μονάδων στο cell, η TCP ρυθμαπόδοση μειώνεται σημαντικά. Αυτό είναι άμεσο αποτέλεσμα της μετάδοσης με σκυτάλη, αφού όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν τόσο λιγότερος χρόνος μετάδοσης θα αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο αυξάνοντας την επιθυμία για διεκδίκηση του μέσου σε κάθε κόμβο. Οι κόμβοι που είναι απομακρυσμένοι από τον HE είναι αυτοί που επηρεάζονται περισσότερο, αφού η αντίστοιχη από

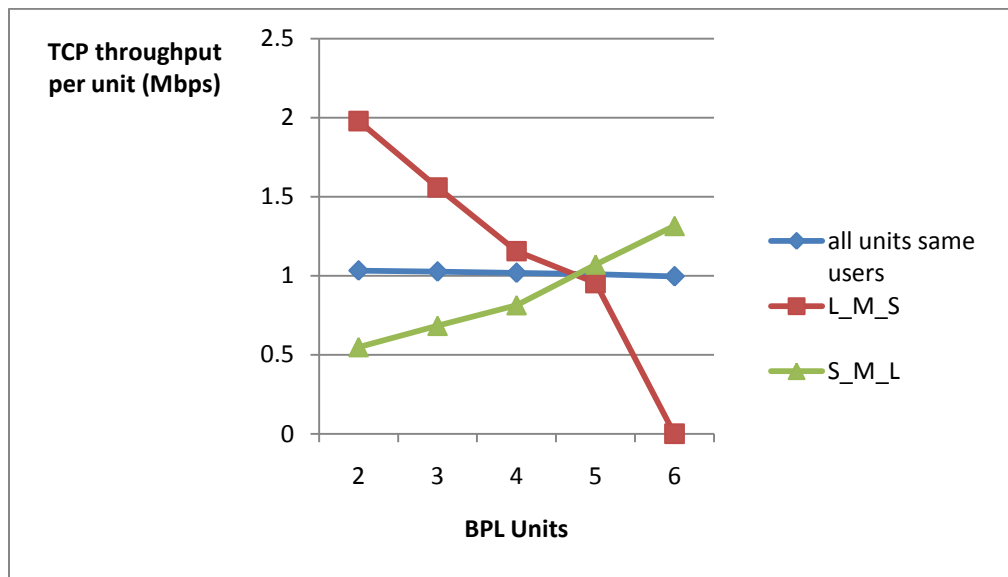
άκρο σε άκρο μετάδοση ενός πακέτου TCP απαιτεί μετάδοση και από όλους τους ενδιάμεσους κόμβους.

#### 5.4.2 Μεταβλητός αριθμός χρηστών- Κατανομή χρηστών στο cell

Στην ενότητα αυτή μελετώνται συγκριτικά 3 σενάρια στα οποία παρατηρείται διαφορετική κατανομή χρηστών στο δίκτυο. Το πρώτο σενάριο είναι το βασικό, στο οποίο όλοι οι κόμβοι εξυπηρετούν το ίδιο πλήθος χρηστών (same users). Στο δεύτερο σενάριο οι πρώτες μονάδες εξυπηρετούν πολλούς χρήστες, οι ενδιάμεσες μονάδες λίγο λιγότερους και οι τελευταίες λίγους (L\_M\_S). Στο τρίτο σενάριο οι πρώτες μονάδες εξυπηρετούν λίγους χρήστες, οι ενδιάμεσες λίγο περισσότερους και οι τελευταίες πολλούς. Στην Εικόνα 5.18 φαίνεται η ρυθμαπόδοση που μετρήθηκε για τα τρία σενάρια στο δίκτυο.

Εικόνα 5.18: TCP throughput per Unit- Κατανομή χρηστών στο cell

Unit	2	3	4	5	6
same users	1.032275	1.026002	1.018281	1.010225	0.996085
L_M_S	1.978075	1.558239	1.154686	0.953671	2.24E-05
S_M_L	0.547878	0.682755	0.813293	1.070523	1.314887



Όπως είναι λογικό παρατηρείται ότι για το βασικό σενάριο η ρυθμαπόδοση είναι περίπου ίδια για όλες τις μονάδες. Όταν πολλοί χρήστες εξυπηρετούνται από τις πρώτες BPL μονάδες, αυτές



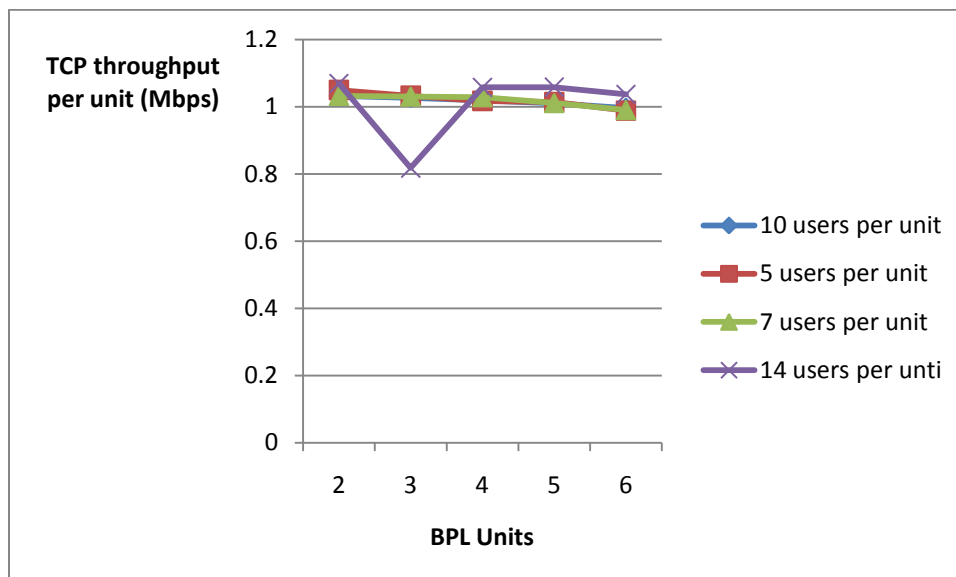
παρουσιάζουν μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση σε σύγκριση με τις τελευταίες. Και αντίστροφα όταν οι πολλοί χρήστες εξυπηρετούνται από τις τελευταίες BPL μονάδες, αυτές παρουσιάζουν μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση σε σύγκριση με τις πρώτες. Αξίζει να σημειωθεί, όμως, ότι η ρυθμαπόδοση που παρουσιάζουν οι τελευταίες BPL μονάδες όταν εξυπηρετούν τους πολλούς χρήστες είναι μικρότερη από τη ρυθμαπόδοση που παρουσιάζουν οι πρώτες BPL μονάδες όταν εξυπηρετούν τους πολλούς χρήστες και αυτό συμβαίνει λόγω της θέσης των BPL μονάδων με την αυξημένη κίνηση στο δίκτυο.

### 5.4.3 Αριθμός χρηστών ανά μονάδα (ίδιος σε όλες τις μονάδες)

Στην ενότητα αυτή μελετάται η συμπεριφορά του δικτύου σε σχέση με τον αριθμό χρηστών που εξυπηρετεί κάθε μονάδα. Όλες οι μονάδες εξυπηρετούν τον ίδιο αριθμό χρηστών. Τα σενάρια αφορούν σε αριθμό χρηστών 5, 7, 10 και 14. Οι τιμές της ρυθμαπόδοσης που μετρήθηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.19.

**Εικόνα 5.19: TCP throughput per Unit- Μεταβλητός αριθμός χρηστών ανά μονάδα**

Unit	2	3	4	5	6
14 users per unit	1.069273	0.817344	1.057177	1.058087	1.036573
10 users per unit	1.032275	1.026002	1.018281	1.010225	0.996085
7 users per unit	1.032303	1.029979	1.028135	1.010693	0.989988
5 users per unit	1.049499	1.032354	1.017166	1.013417	0.988316



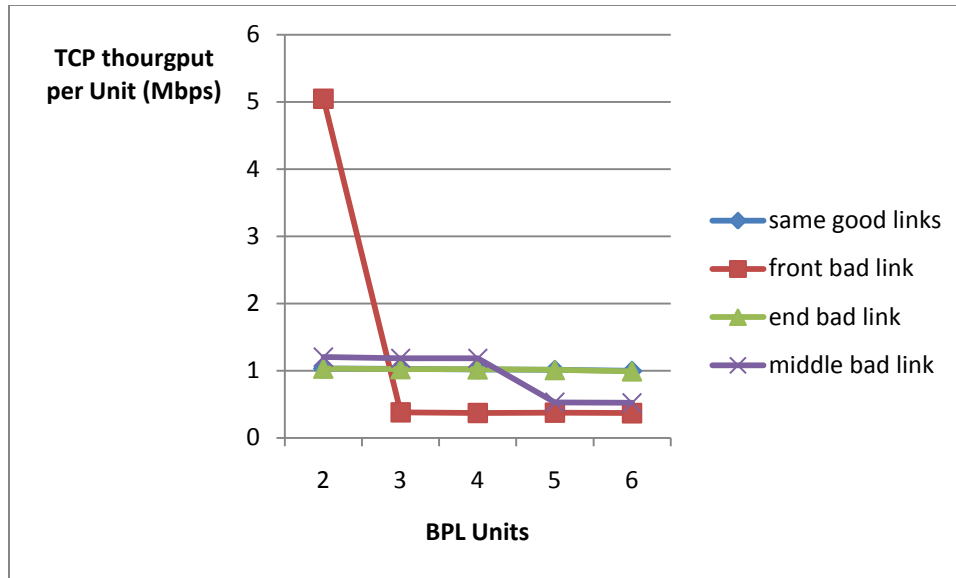
Σε σύγκριση με το σενάριο στο οποίο κάθε μονάδα εξυπηρετεί 14 χρήστες, τα προηγούμενα 3 σενάρια εμφανίζονται να έχουν ίδια συμπεριφορά. Για τα 3 αυτά σενάρια, η ίδια συμπεριφορά που παρατηρείται οφείλεται στο γεγονός ότι το TCP throughput μετράται ανά μονάδα και όχι ανά χρήστη. Στο επίπεδο μέτρησης ανά χρήστη είναι λογικό να αναμένεται μικρότερη ρυθμαπόδοση όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των χρηστών. Ωστόσο, επειδή οι μετρήσεις γίνονται ανά μονάδα, όσο το πλήθος των χρηστών δεν είναι υπέρμετρα μεγάλο, οι αντίστοιχες BPL μονάδες επιτυγχάνουν να εξυπηρετήσουν όλους τους χρήστες με την ίδια ρυθμαπόδοση εξασφαλίζοντας ίδιο επίπεδο χρησιμοποίησης και ικανοποίησης απαίτησης υπηρεσιών. Αξιοσημείωτη είναι η συμπεριφορά της ρυθμαπόδοσης στο σενάριο όπου οι χρήστες έχουν αυξηθεί σε 14, όπου και παρατηρείται απότομη μείωση του TCP throughput στην τρίτη BPL μονάδα. Μία πιθανή λογική εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι ότι επειδή έχει αυξηθεί σημαντικά η κίνηση ανά μονάδα (αφού εξυπηρετούνται περισσότεροι χρήστες), διαισθητικά αναμένεται μεγαλύτερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Έτσι για κάποια πακέτα της δεύτερης μονάδας δεν προλαβαίνει να σταλεί επιβεβαίωση απάντησης πριν τη λήξη του προκαθορισμένου χρόνου (time expire) και επομένως τα πακέτα δε θεωρούνται σταλθέντα. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί και σε οποιαδήποτε από τις άλλες μονάδες.

#### 5.4.4 Τοποθεσία κακής ζεύξης στο cell

Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση της ύπαρξης μίας κακής ζεύξης στο cell ανάλογα με τη θέση της μέσα σε αυτό. Συγκεκριμένα υλοποιούνται 3 σενάρια στα οποία η κακή ζεύξη βρίσκεται στην αρχή (μεταξύ δεύτερης μονάδας και hub), στο τέλος (μεταξύ τελευταίας μονάδας και hub) και ενδιάμεσα (μεταξύ τέταρτης μονάδας και hub).

**Εικόνα 5.20: TCP throughput per Unit- Τοποθεσία κακής ζεύξης στο cell**

Units	2	3	4	5	6
same good links	1.032275	1.026002	1.018281	1.010225	0.996085
front bad link	5.04539	0.377742	0.36943	0.373305	0.367455
end bad link	1.030966	1.023971	1.019717	1.010321	0.990339
middle bad link	1.200743	1.183505	1.183654	0.528724	0.51988



Παρατηρείται εύκολα ότι οι επόμενες ζεύξεις που ακολουθούν την κακή ζεύξη χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλό TCP throughput. Έτσι, στο σενάριο όπου η κακή ζεύξη είναι στην αρχή, η ρυθμαπόδοση μετά την τρίτη μονάδα είναι πολύ χαμηλή. Στο σενάριο όπου η κακή ζεύξη είναι ενδιάμεσα (σύνδεση τέταρτης μονάδας και Hub), η ρυθμαπόδοση μειώνεται μετά την τέταρτη μονάδα. Στο σενάριο όπου η κακή ζεύξη είναι η τελευταία, δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στη ρυθμαπόδοση σε σχέση με το βασικό σενάριο, αφού η κακή ζεύξη δεν επηρεάζει τελικά καμία μονάδα. Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι η ρυθμαπόδοση στην πρώτη μονάδα στο σενάριο όπου η κακή ζεύξη είναι μπροστά στο cell είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη ρυθμαπόδοση της πρώτης μονάδας στα άλλα σενάρια. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η κίνηση φθάνει στην πρώτη μονάδα αλλά επειδή δεν μπορεί να προωθηθεί λόγω της κακής ζεύξης μένει τελικά στην πρώτη μονάδα όσο το επιτρέπει η χωρητικότητα της γραμμής και οι μονάδες αποθήκευσης της πρώτης μονάδας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί σημαντικά η ρυθμαπόδοσή της, δεδομένου ότι το TCP πρωτόκολλο έχει μηχανισμούς για έλεγχο συμφόρησης και αφού δεν υπάρχει μεγάλη κίνηση από τις υπόλοιπες μονάδες δίνει το περιθώριο για αύξηση της κίνησης στην πρώτη μονάδα (μεγαλύτερο TCP παράθυρο).

## **Επίλογος**

Στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκαν τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης για δίκτυα τεχνολογίας BPL σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1901 το οποίο εκδόθηκε το Δεκέμβριο 2010. Η μελέτη και παρουσίαση του προτύπου μπορεί να αποτελέσει βάση για ερευνητική εργασία και προσομοίωση μοντέλων συμπεριφοράς BPL δικτύων. Στο τελευταίο μέρος της διπλωματικής εργασίας, όπου προσομοιώνεται η λειτουργία token-based δικτύου, λαμβάνονται αποτελέσματα για μία ειδική περίπτωση TDMA λειτουργίας δικτύου σύμφωνα με το πρότυπο. Το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα χρήσιμο για μελέτη περιπτώσεων και σύγκριση σεναρίων με μεταβολή παραμέτρων δικτύου όπως αυτές που εξετάζονται στη διπλωματική αυτή ή διαφορετικές.

## Βιβλιογραφία

- [1] Goldfisher, S., Tanabe, S., 2010. IEEE 1901 access system: An overview of its uniqueness and motivation. *IEEE Communications Magazine* 48(10), 150-157.
- [2] Sarafi, A. M., Tsiropoulos, G. I., Cottis, P. G., 2009. Hybrid wireless-broadband over power lines: A promising broadband solution in rural areas. *IEEE Communications Magazine*, 47(11), 140-147.
- [3] Sarafi, A.M., Drougas, A.E., Cottis, P.G., Optimizing TCP performance in Medium Voltage-Broadband over Power Line networks. A Cross-layer resource allocation approach. Forthcoming.
- [4] Amirshahi, P., Navidpour, S. M., & Kavehrad, M. (2006). Performance analysis of uncoded and coded OFDM broadband transmission over low voltage power-line channels with impulsive noise. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(4), 1927-1934.
- [5] C. W. Gellings, & K. George, “Broadband over Powerline 2004: Technology and Prospects”, EPRI White Paper, 2004, [Online]. Available:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=726199>
- [6] NTIA, “Potential Interference from Broadband over Power Line (BPL) Systems to Federal Government Radio Communications at 1.7-80 MHz Phase 1 Study Vol. I”, NTIA Rep. 04-413, Apr. 2004, [Online]. Available:  
[http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/FinalReportAdobe/NTIA\\_BPL\\_Report\\_04-413\\_Volume\\_I.pdf](http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/FinalReportAdobe/NTIA_BPL_Report_04-413_Volume_I.pdf)
- [7] NTIA, “Potential Interference from Broadband over Power Line (BPL) Systems to Federal Government Radio Communications at 1.7-80 MHz Phase 1 Study Vol. II”, NTIA Rep. 04-413, Apr. 2004, [Online]. Available:  
[http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/FinalReportAdobe/NTIA\\_BPL\\_Report\\_04-413\\_Volume\\_II.pdf](http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/FinalReportAdobe/NTIA_BPL_Report_04-413_Volume_II.pdf)
- [8] Λαζαρόπουλος, Α., 2010. Ευρυζωνική Μετάδοση Σημάτων μέσω Γραμμών Μέσης Τάσης: Μοντέλα Διάδοσης- Χωρητικότητα. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [9] IEEE Communications Society, 2010. IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications. IEEE Std 1901, New York.
- [10] G. Held, 2006. Understanding Broadband over Power Line Boca Raton, Auerbach Publications, FL, USA.

- [11] H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert, 2004. Broadband Powerline Communications Networks: Network Design, Wiley, Chichester, West Sussex, UK.
- [12] X. Carcelle, 2006. Power Line Communications In Practice, Artech House, Boston|London.
- [13] Tanenbaum A.S., 2000. Δίκτυα Υπολογιστών (3η έκδοση). Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [14] Κωττής Π., Αράπογλου Π. (2011). Ασύρματες Επικοινωνίες. Τζιόλα, Αθήνα.
- [15] Σημειώσεις μαθήματος «Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες», Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα 2006 [Online]. Available:  
<http://www.scribd.com/doc/50242380/86/%CE%A3%CF%8D%CE%B3%CE%BA%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-DSSS-FHSS>
- [16] Drougas, A.E., Cottis, P.G., TCP performance in Medium Voltage Broadband over Power Lines Networks. Mimeo.