



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου Πρόσβασης στο  
Μέσο σε Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών  
Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

**ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Β. ΑΔΑΜΗ**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &  
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2002)

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009





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

Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου Πρόσβασης στο  
Μέσο σε Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών  
Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Β. ΑΔΑΜΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &  
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2002)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Φίλιππος Κωνσταντίνου  
Χρήστος Καψάλης  
Παναγιώτης Κωττής

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2009

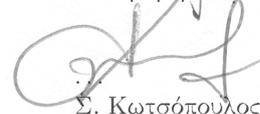
  
Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

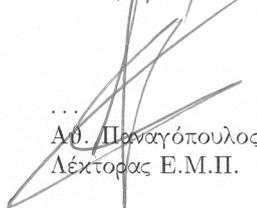
  
...  
Χ. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

  
...  
Π. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

  
Αθ. Κανάτας  
Αν. Καθηγητής  
Παν. Πειραιά

  
...  
Γ. Καμπούρανης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

  
...  
Σ. Κωτσόπουλος  
Καθηγητής  
Παν. Πατρών

  
...  
Αθ. Παναγόπουλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

.....  
**Αθανάσιος Β. Αδάμης**

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

Copyright © Αθανάσιος Β. Αδάμης, 2009

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.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη και η μελέτη επίδοσης πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος κατανεμημένης αρχιτεκτονικής. Μετά από μια σύντομη παρουσίαση του γνωστικού αντικειμένου των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών και της τεχνολογίας Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, τροποποιείται η Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου (DCF) ώστε η λειτουργία της, σαν πρωτόκολλο υποστρώματος MAC, να καταστεί αποδοτική στο διακοπτόμενο περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος. Η υλοποίηση των τροποποιήσεων πραγματοποιείται τόσο σε προσομοιωτή δικτύου για την επικύρωση της ορθής λειτουργίας του πρωτοκόλλου, όσο και στη γλώσσα SDL προκειμένου αυτές να προδιαγραφούν σαφώς. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται αναλυτικό μοντέλο επίδοσης της τροποποιημένης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου (iDCF), με το οποίο μελετάται η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων στην επίδοσή της και το οποίο αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη εφικτότητας ρεαλιστικών σεναρίων Δεξαμενής Φάσματος. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις εμπλουτισμού της λειτουργίας της iDCF, όπως η μείωση παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο με μεθόδους του υποστρώματος MAC και η απόκτηση δυναμικού Κοινού Καναλιού Ελέγχου για το Δευτερεύον δίκτυο.



## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to implement and evaluate the performance of a medium access control protocol for a Dynamic Spectrum Access distributed network. First, Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access Technology are briefly introduced. Then, the Distributed Control Function is appropriately modified and the resulted iDCF forms a robust MAC protocol for the intermittent Spectrum Pooling environment. In order for the modifications to be explicitly defined, they are also presented in an SDL system implementation of iDCF. Next, a mathematic Performance analysis of iDCF is presented, with which its performance is evaluated under the effect of various parameters and which provides the researchers with a useful tool to perform feasibility studies of realistic Dynamic Spectrum Access use cases. Finally, certain studies that boost iDCF performance are presented, such as MAC methods to reduce interference caused to the Primary network and a Dynamic Common Control Channel acquisition method.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής, ανάμεσα στα πολύ έντονα συναισθήματα χαράς αισθάνομαι μια ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους, που, ο καθένας από τη σκοπιά του, συνεισέφεραν και συμπαραστάθηκαν σε αυτή τη δύσκολη προσπάθειά μου.

Ξεκινώ με τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Φίλιππο Κωνσταντίνου, Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος πάντα είχε τον τρόπο να με ενθαρρύνει και να μου προσδίδει ενθουσιασμό για τη συνέχεια. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε τόσο στην ερευνητική μου προσπάθεια, όσο και στα πρώτα βήματα της σταδιοδρομίας μου.

Ευχαριστώ επίσης όλους του συναδέλφους υποψήφιους διδάκτορες και τα μέλη του εργαστηρίου κινητών ραδιοεπικοινωνιών του Ε.Μ.Π. για την άριστη συνεργασία που είχαμε στα 7 χρόνια της παρουσίας μου στο χώρο αυτό. Ιδιαίτερα θέλω να σταθώ στους συνοδοιπόρους Βασίλη Μήλα και Κώστα Μαλιάτσο για τις φιλικές και χρήσιμες ερευνητικές συζητήσεις μας και στους φίλους Αντώνη Γκότση, Θανάση Μαρούση, Κώστα Κακόγιαννη και Νίκο Μπούζη. Ο δρόμος θα ήταν πολύ δυσκολότερος χωρίς την ενθάρρυνση και τη συμπαράσταση από αυτούς οποτεδήποτε χρειάστηκε.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Βασίλη, τη μητέρα μου Ειρήνη και την αδερφή μου Βίκη για την αγάπη τους και τη διαρκή και ανεξάντλητη στήριξή τους. Σε ένα μεγάλο ποσοστό, η ολοκλήρωση του δύσκολου αυτού εγχειρήματός μου, οφείλεται σε αυτούς.

*Αθανάσιος Αδάμης  
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009*



στη Μαρίνα

Ό,τι σκεπάζει ο ουρανός κι όπου ο ήλιος λιάζει,...



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος</b>	<b>5</b>
2.1	Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών	5
2.1.1	Πομποδέκτες Ορισμένοι από Λογισμικό	7
2.1.1.1	Το ιδανικό SDR	8
2.1.1.2	Το υλοποιήσιμο SDR	9
2.1.1.3	Επίπεδα υλοποίησης SDR	10
2.1.2	Γνωστική διαδικασία	12
2.1.3	Αρχιτεκτονική αναφοράς	13
2.1.4	Γνωστικός Κύκλος	15
2.2	Τεχνολογία Δυναμικής Χρήσης Φάσματος	16
2.2.1	Τρέχουσες πολιτικές κατανομής φάσματος	16
2.2.1.1	Χάρτης κατανομής συχνοτήτων ITU-R	17
2.2.1.2	Διαδικασία ανάθεσης συχνοτήτων	17
2.2.1.3	Υποχρησιμοποίηση του φάσματος	19
2.2.2	Δυναμική Χρήση Φάσματος	20
2.2.2.1	Ταξινόμηση πολιτικών Δυναμικής Χρήσης Φάσματος	21
2.2.2.1.1	Μοντέλο Δυναμικής Αποκλειστικής Χρήσης	21
2.2.2.1.2	Μοντέλο Ανοιχτής Χρήσης Φάσματος	22
2.2.2.1.3	Μοντέλο Ιεραρχικής Χρήσης	22
2.2.2.2	Αρχιτεκτονική δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος	22
2.2.3	Συναφείς λειτουργίες Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών	23
2.2.3.1	Ανίχνευση φασματικών οπών	24
2.2.3.1.1	Ανίχνευση πομπών (Μη-συνεργατική ανίχνευση)	25
2.2.3.1.2	Συνεργατική Ανίχνευση	26
2.2.3.1.3	Θερμοκρασία Παρεμβολής	28
2.2.3.1.4	Μετρητικά Επίδοσης Ανίχνευσης Φάσματος	29
2.2.3.2	Διαχείριση φάσματος	29
2.2.3.2.1	Ανάλυση Φάσματος	30

2.2.3.2.2	Απόφαση Επιλογής Φάσματος.....	31
2.2.3.3	Κινητικότητα φάσματος .....	31
2.2.3.4	Έλεγχος πρόσβασης στο φάσμα .....	32
2.2.3.4.1	Αρχιτεκτονική.....	32
2.2.3.4.2	Συμπεριφορά Κατανομής Φασματικών Οπών. ....	32
2.2.3.4.3	Τεχνική μετάδοσης.....	33
2.3	Το περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος .....	34
2.3.1	Το φυσικό στρώμα.....	36
2.3.1.1	Διαμόρφωση OFDM μονής ζώνης .....	36
2.3.1.2	Άλλες μέθοδοι διαμόρφωσης .....	37
2.3.2	Απαιτήσεις στο υπόστρωμα MAC.....	38
2.3.2.1	Η διακοπτόμενη λειτουργία .....	38
2.3.2.2	Η περίοδος διακοπής .....	40
2.3.2.3	Η διάρκεια διακοπής .....	41
2.3.2.4	Ο ρυθμός μετάδοσης .....	42
2.3.2.5	Ισοζύγιο ρυθμού μετάδοσης - Ενεργού Χρόνου.....	43
<b>3</b>	<b>Το Διακοπτόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο</b>	<b>45</b>
3.1	Η Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου του προτύπου IEEE 802.11 .....	45
3.1.1	Ακολουθία Ανταλλαγής Πλαισίων.....	46
3.1.2	Διαδικασία ανταγωνισμού και υποχώρησης .....	46
3.1.3	Χρόνοι αναμονής και επαναμεταδόσεις.....	47
3.1.4	Ανίχνευση φέροντος .....	47
3.1.5	Διαστήματα σιγής .....	48
3.2	Η DCF σαν πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο σε δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.....	50
3.3	Το διακοπτόμενο πρωτόκολλο υποστρώματος MAC για κατανεμημένα Δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος .....	52
3.4	Η Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο - iDCF	53
3.4.1	Σχήμα πρόσβασης και υποχρεωτική χρήση τριπλής χειραψίας .....	53
3.4.2	Μεταδόσεις και Δυναμικός Τεμαχισμός Πλαισίων Δεδομένων .....	53
3.4.3	Χρονισμοί διαστημάτων σιγής και χρονοσχισμών πρωτοκόλλου .....	56
3.4.3.1	SIFS .....	57
3.4.3.2	Χρονοσχισμές πρωτοκόλλου.....	58
3.4.3.3	DIFS .....	59
3.4.3.4	EIFS.....	60
3.4.4	Διακοπτόμενος Μηχανισμός Υποχώρησης .....	61
3.4.5	Δυναμικός Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος.....	64
3.5	Η Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο ..	69

<b>4</b>	<b>Υλοποίηση iDCF στη Γλώσσα SDL</b>	<b>75</b>
4.1	Γενική περιγραφή υλοποίησης του πρωτοκόλλου .....	75
4.2	Περιγραφή υλοποίησης ανά μονάδα SDL .....	76
4.2.1	Μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου .....	78
4.2.1.1	Διεργασία Rx_Coordination .....	79
4.2.1.2	Διεργασία Tx_Coordination .....	80
4.2.2	Μονάδα Μετάδοσης .....	93
4.2.2.1	Διεργασίες Data_Pump και Backoff_Procedure .....	93
4.2.3	Μονάδα Λήψης .....	95
4.2.3.1	Διεργασία Validate_MPDU .....	95
4.2.3.2	Διεργασία Filter_MPDU .....	95
4.2.3.3	Διεργασία Defragment .....	96
4.2.3.4	Διεργασία Channel_State .....	96
4.2.4	Υλοποίηση σε SDL της Λειτουργίας Κατανεμημένου Συγχρονισμού στη μονάδα Ελέγχου iDCF .....	106
4.2.4.1	Η Υπηρεσία Synchronization .....	106
4.3	Ο Προσομοιωτής του Δευτερεύοντος δικτύου .....	110
<b>5</b>	<b>Αναλυτικό Μοντέλο Επίδοσης της iDCF</b>	<b>115</b>
5.1	Μοντέλα Μαρκοβιανών αλυσίδων .....	115
5.2	Αναλυτικό μοντέλο επίδοσης iDCF για συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης κορεσμού .....	117
5.2.1	Η Μαρκοβιανή αλυσίδα .....	117
5.2.2	Χρονική διάρκεια χρονοθυρίδων Μαρκοβιανής αλυσίδας .....	120
5.2.2.1	Αναμενόμενη διάρκεια επιτυχούς χρονοθυρίδας .....	121
5.2.2.1.1	Διάρκεια πλαισίου rts .....	121
5.2.2.1.2	Διάρκεια διαστημάτων σιγής .....	121
5.2.2.1.3	Διάρκεια πλαισίων απόκρισης cts και ack .....	122
5.2.2.1.4	Διάρκεια πλαισίου δεδομένων .....	122
5.2.2.2	Αναμενόμενη διάρκεια ανεπιτυχούς χρονοθυρίδας .....	129
5.2.2.3	Αναμενόμενη διάρκεια ανενεργής χρονοθυρίδας .....	129
5.2.3	Το Throughput κορεσμού της iDCF .....	131
5.3	Αναλυτικό μοντέλο επίδοσης για συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης μη-κορεσμού .....	132
5.3.1	Η Μαρκοβιανή αλυσίδα .....	133
5.3.2	Το Throughput μη-κορεσμού της iDCF .....	136
5.3.3	Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου .....	136
5.3.4	Πιθανότητα απώλειας πακέτου .....	138
5.4	Απόδειξη χρησιμότητας της τροποποίησης του μηχανισμού υποχώρησης .....	139

<b>6</b>	<b>Μελέτη Επίδοσης της iDCF</b>	<b>145</b>
6.1	Η παράμετρος $L_{\min}$ .....	147
6.1.1	Επιλογή εύρους $L_{\min}$ - ευνοϊκής υποπερίπτωσης της DFS .....	149
6.1.2	Εύρεση βέλτιστης τιμής $L_{\min}$ .....	150
6.1.3	Κέρδος από βελτιστοποίηση με την παράμετρο $L_{\min}$ .....	153
6.2	Η διάρκεια διακοπής $\tau$ .....	155
6.3	Η περίοδος διακοπής $T$ .....	158
6.4	Το μέγεθος ωφέλιμου φόρτου μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων $L_P$ .....	162
6.5	Ο ρυθμός μετάδοσης $R$ .....	166
6.6	Ρυθμός μετάδοσης $R$ και Ενεργός Χρόνος $T - \tau$ .....	167
<b>7</b>	<b>Μελέτες Εμπλουτισμού της iDCF</b>	<b>171</b>
7.1	Μείωση παρεμβολής προς Πρωτεύον δίκτυο με μεθόδους υποστρώματος MAC .....	171
7.1.1	Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο .....	171
7.1.2	Χρήσης τριπλής χειραψίας - μηχανισμού rts /cts .....	173
7.1.2.1	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	173
7.1.2.2	Ισοζύγιο Throughput - Παρεμβολής και Βέλτιστη τιμή περιόδου $T$ .....	177
7.1.2.3	Υποχρεωτική χρήση τριπλής χειραψίας στην iDCF .....	178
7.1.3	Μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων .....	179
7.1.3.1	Υλοποίηση Μηχανισμού 3SCS στο Φυσικό Στρώμα .....	181
7.1.3.2	Αξιοποίηση Μηχανισμού 3SCS στο υπόστρωμα MAC .....	183
7.1.3.3	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων .....	185
7.2	Προσαρμογές παραθύρου ανταγωνισμού .....	188
7.3	Διακοπτόμενος Κατανεμημένος Έλεγχος Πρόσβασης με Διαίρεση Χρονοσχισμής .....	189
7.3.1	Λειτουργία παρακολούθησης χρονοσχισμής .....	191
7.3.2	Λειτουργία αρχικοποίησης χρονομετρητή υποχώρησης .....	192
7.3.3	Θεωρητικό όριο επίδοσης DSDMA .....	192
7.3.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	194
7.4	Προσάρτηση Σε Πρωτεύον δίκτυο - εφαρμογή σε δίκτυο GSM .....	195
7.4.1	Ζώνη Σηματοδοσίας και Ελέγχου και Ζώνη Δεδομένων .....	196
7.4.2	Σενάριο προσάρτησης σε δίκτυο GSM .....	196
7.4.3	Υλοποίηση iDCF με προσάρτηση στο δίκτυο GSM .....	198
7.4.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	199
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>201</b>
8.1	Καινοτομίες της Διατριβής .....	203
8.2	Προτάσεις επέκτασης .....	203

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>204</b>
--------------------	------------

Α' Προσέγγιση του $E[n_F(x)]$	205
Β' Υπολογισμός Ολοκληρώματος $G(i, y)$	207
Γ' Εύρεση Οριακών Πιθανοτήτων Μαρκοβιανής Αλυσίδας Kim	209
Βιβλιογραφία	211
Συντμήσεις	221
Βιογραφικό Σημείωμα	225
Δημοσιεύσεις του συγγραφέα	227



# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Ιδανική αρχιτεκτονική SDR .....	9
2.2	Υλοποιήσιμη βασική αρχιτεκτονική SDR .....	10
2.3	Επίπεδα υλοποίησης SDR. Σχήμα από τη διατριβή του J.Mitola .....	11
2.4	Μοντέλο αρχιτεκτονικής Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών. Σχήμα από <a href="http://www.sdrforum.org">www.sdrforum.org</a> [1] .....	14
2.5	Γνωστικός Κύκλος .....	15
2.6	Κατηγοριοποίηση ερευνητικών προσεγγίσεων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος ...	21
2.7	Αρχιτεκτονική δικτύων Δυναμικής - Ιεραρχικής Χρήσης Φάσματος .....	23
2.8	Γνωστικός Κύκλος στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος .....	24
2.9	Σχηματική αναπαράσταση φασματικών οπών .....	25
2.10	Φαινόμενο κρυμμένου τερματικού κατά την ανίχνευση φασματικών οπών .....	27
2.11	Κατηγοριοποίηση τεχνικών ελέγχου πρόσβασης στο φάσμα σε δίκτυα DSA ...	32
2.12	Παράδειγμα Διανύσματος Φασματικής Διαθεσιμότητας σε Δεξαμενή Φάσματος	35
2.13	Η Διακοπτόμενη λειτουργία στο περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος .....	39
2.14	Καμπύλη ισοζυγίου Ενεργού Χρόνου και ρυθμού μετάδοσης και τάσεις μεταφοράς της .....	43
3.1	Η Διαδικασία Υποχώρησης στην DCF .....	47
3.2	Ο Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος στην DCF .....	49
3.3	Τα διαστήματα σιγής στη DCF .....	49
3.4	Η διασύνδεση της iDCF με τις μονάδες φυσικού στρώματος και τον ανιχνευτή φάσματος .....	52
3.5	Παραδείγματα μετάδοσης δεδομένων και Δυναμικού Τεμαχισμού (1) .....	54
3.6	Παραδείγματα μετάδοσης δεδομένων και Δυναμικού Τεμαχισμού (2) .....	55
3.7	Οι επιτελούμενες λειτουργίες εντός των διαστημάτων σιγής και των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου και χρονοισμοί τους .....	56
3.8	Διακοπή διαστήματος SIFS σε χρόνο επεξεργασίας $M1$ .....	58
3.9	Διακοπή διαστήματος SIFS στο χρόνο μεταγωγής του πομποδέκτη .....	58
3.10	Διακοπή διαστήματος DIFS στο χρόνο αποτίμησης κατάστασης του μέσου της δεύτερης εν σειρά χρονοσχισμής πρωτοκόλλου .....	60

3.11 Διακοπή διαστήματος EIFS στο χρόνο αναμονής μετάδοσης του πλαισίου ack και αυξημένος ρυθμός μετάδοσης $R'$ μετά το πέρας της ανίχνευσης φασματικών οπών .....	61
3.12 Παραδείγματα διαδικασίας υποχώρησης κοντά το σημείο διακοπής .....	62
3.13 Παραδείγματα θέσης του μετρητή NAV στο διακοπόμενο πρωτόκολλο .....	68
3.14 Η μορφή του πλαισίου SYNC .....	71
3.15 Παράδειγμα λειτουργίας κόμβων κατά τη χρονοθυρίδα SYNC .....	72
4.1 Το SDL σύστημα iDefStation .....	77
4.2 Οι ορισμοί νέων τύπων μεταβλητών, μεταβλητών και σταθερών SDL .....	82
4.3 Η SDL μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου .....	83
4.4 Η SDL διεργασία Rx_Coordination .....	84
4.5 Η SDL ρουτίνα υπολογισμού χρόνου επέκτασης των διαστημάτων σιγής .....	85
4.6 Η SDL ρουτίνα απόφασης του σημείου εκκίνησης της μετάδοσης πλαισίων επιβεβαίωσης .....	86
4.7 Η SDL διεργασία Tx_Coordination (1/3) .....	87
4.8 Η SDL διεργασία Tx_Coordination (2/3) .....	88
4.9 Η SDL διεργασία Tx_Coordination (3/3) .....	89
4.10 Η SDL ρουτίνα απόφασης και εκτέλεσης του δυναμικού τεμαχισμού πλαισίων δεδομένων .....	90
4.11 Η SDL ρουτίνα αχύρωσης του δυναμικού τεμαχισμού .....	91
4.12 Η SDL ρουτίνα αρχικοποίησης και θέσης του χρόνου αναμονής πλαισίων επιβεβαίωσης .....	92
4.13 Το διάγραμμα SDL της μονάδας Μετάδοσης .....	94
4.14 Το διάγραμμα SDL της μονάδας Λήψης .....	99
4.15 Το διάγραμμα SDL της διεργασίας Channel_State (1/3) .....	100
4.16 Το διάγραμμα SDL της διεργασίας Channel_State (2/3) .....	101
4.17 Το διάγραμμα SDL της διεργασίας Channel_State (3/3) .....	102
4.18 Το διάγραμμα SDL της ρουτίνας iDefSetIfs .....	103
4.19 Το διάγραμμα SDL της ρουτίνας iDefSetNav .....	104
4.20 Το διάγραμμα SDL της ρουτίνας iDefSetSlot .....	105
4.21 Το διάγραμμα SDL της υπηρεσίας Synchronization (1/2) .....	108
4.22 Το διάγραμμα SDL της υπηρεσίας Synchronization (2/2) .....	109
4.23 Η αρχιτεκτονική του προσομοιωτή δικτύου .....	111
4.24 Η εσωτερική αρχιτεκτονική ενός κόμβου του δικτύου / Γνωστικού Τερματικού Δευτερεύοντος Συστήματος, όπως εξήχθη από το περιβάλλον λογισμικού προσομοιώσεων (OPNET) .....	112
4.25 Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων πρωτοκόλλου MAC (iDCF) του Γνωστικού Τερματικού Δευτερεύοντος Συστήματος, όπως εξήχθη από το περιβάλλον λογισμικού προσομοιώσεων (OPNET) .....	113

5.1	Η Μαρκοβιανή αλυσίδα του Bianchi .....	118
5.2	Μορφές της DFS στην κλίμακα του χρόνου .....	124
5.3	Υπολογισμός συνολικής διάρκειας ανενεργού χρόνου μετά το διάστημα σιγής DIFS .....	130
5.4	Η Μαρκοβιανή αλυσίδα της Kim .....	133
5.5	Παραδείγματα διαδικασίας υποχώρησης κοντά το σημείο διακοπής - 2 .....	141
5.6	$P_s$ για την iDCF και $P'_s$ για την ευθεία υλοποίηση της DCF σαν συνάρτηση της περιόδου $T$ , σταθερό $\tau = 200 \mu s$ και διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης. ..	142
6.1	Throughput κορεσμού σε συνάρτηση της παραμέτρου $L_{\min}$ για τέσσερις τιμές περιόδου $T$ . $L_P = 16 \text{ kb}$ , $R = 3.2 \text{ Mbps}$ , $n = 30$ , $\tau = 0.2 \text{ ms}$ . .....	148
6.2	Τιμή της παραμέτρου $L_{\min}$ που βελτιστοποιεί το Throughput της iDCF , συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης για διαφορετικές περιόδους $T$ .....	152
6.3	Κέρδος από τη χρήση του βήματος 1 του αλγορίθμου, επιλογής διαστήματος τιμής για την παράμετρο $L_{\min}$ . $L_P = 8196 \text{ b}$ , $n = 30$ , $\tau = 200 \mu s$ .....	154
6.4	Κέρδος από τη χρήση του βήματος 2 του αλγορίθμου, επιλογής τιμής για την παράμετρο $L_{\min}$ από το ευνοϊκότερο διάστημα. $L_P = 8196 \text{ b}$ , $n = 30$ , $\tau = 200 \mu s$ .....	155
6.5	Throughput συναρτήσει του ποσοστού ενεργού χρόνου επί της διάρκειας της περιόδου, για διαφορετικές τιμές διάρκειας περιόδου .....	156
6.6	Μέση καθυστέρηση πλαισίου <i>HoL</i> συναρτήσει του ποσοστού ενεργού χρόνου επί της διάρκειας της περιόδου, για διαφορετικές τιμές διάρκειας περιόδου .....	157
6.7	Επίδραση στο Throughput κορεσμού της μεταβολής της περιόδου διακοπής και της διάρκειας διακοπής κατά το ίδιο ποσοστό, ώστε το ποσοστό ενεργού χρόνου επί της περιόδου να παραμένει σταθερό .....	158
6.8	Throughput κορεσμού συναρτήσει της περιόδου διακοπών $T$ για σταθερή διάρκεια $\tau$ και διαφορετικές τιμές του ωφέλιμου φόρτου $L_P$ . .....	159
6.9	Throughput συναρτήσει της περιόδου διακοπών για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. ....	160
6.10	Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου <i>HoL</i> συναρτήσει της περιόδου διακοπών για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. ....	161
6.11	Throughput κορεσμού συναρτήσει του μεγέθους του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων, για διάφορες τιμές της περιόδου $T$ . .....	162
6.12	Οικογένεια καμπυλών Throughput για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης, και για $T = 3 \text{ ms}$ .....	164
6.13	Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου <i>HoL</i> συναρτήσει του μεγέθους του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων $L_P$ για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης και περιόδου. ....	166
6.14	Throughput κορεσμού της iDCF συναρτήσει του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης $R$ για διαφορετικές τιμές της περιόδου $T$ . ....	167

6.15	Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης $R$ και της περιόδου $T$ . . . . .	168
6.16	Throughput συναρτήσει της διάρκειας του ενεργού χρόνου και του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης για $T = 1$ ms. . . . .	169
6.17	Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει της διάρκειας του ενεργού χρόνου και του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης για $T = 1$ ms. . . . .	170
7.1	Άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη μέσα στον ενεργό χρόνο και σχετικά μεγέθη. Η γκριζα περιοχή είναι η περιοχή στην οποία οι μεταδόσεις του Δευτερεύοντος συστήματος συνεισφέρουν στο <i>ITR</i> . . . . .	172
7.2	Throughput κορεσμού συναρτήσει του μεγέθους πλαισίου δεδομένων για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF . . . . .	174
7.3	$\Pi$ . . . . .	175
7.4	Throughput κορεσμού συναρτήσει του αριθμού των ανταγωνιζόμενων τερματικών για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF . . . . .	176
7.5	Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει του αριθμού των ανταγωνιζόμενων τερματικών για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF . . . . .	177
7.6	Throughput κορεσμού συναρτήσει της περιόδου $T$ για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF . . . . .	178
7.7	Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει της περιόδου $T$ για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF . . . . .	179
7.8	Throughput συναρτήσει της περιόδου $T$ για διαφορετικές τιμές του ρυθμού άφιξης Πρωτευόντων χρηστών . . . . .	180
7.9	Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου συγχρονισμού . . . . .	181
7.10	Ιστόγραμμα κατανομών της εξόδου του συγχρονιστή με σήματα εισόδου από Πρωτεύον και Δευτερεύον σύστημα, για χρήση από το μηχανισμό 3SCS . . . . .	182
7.11	Περιπτώσεις άμεσης εκκίνησης της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών μετά την ένδειξη PRLBUSY. . . . .	184
7.12	Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει του ρυθμού αφίξεων Πρωτευόντων χρηστών για τις τρεις εκδοχές της iDCF . . . . .	185
7.13	Throughput συναρτήσει της περιόδου διαδικασιών ανίχνευσης για τις τρεις εκδοχές της iDCF . . . . .	186
7.14	Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει της περιόδου διαδικασιών ανίχνευσης για τις τρεις εκδοχές της iDCF . . . . .	187
7.15	Κανονικοποιημένο Throughput της iDCF με αλγόριθμο επιλογής CW αυτόν του 802.11, για τρεις διαφορετικές αρχικές τιμές CW . . . . .	189
7.16	Κανονικοποιημένο Throughput της iDCF με τον προσθετικό αλγόριθμο επιλογής CW, για τέσσερα διαφορετικά ζεύγη τιμών των παραμέτρων $\omega$ και $\delta$ . . . . .	190

7.17	Κανονικοποιημένο Throughput της iDCF με τον πολλαπλασιαστικό αλγόριθμο επιλογής CW, για τέσσερα διαφορετικά ζεύγη τιμών των παραμέτρων $\delta$ και αρχικής τιμής CW .....	190
7.18	Λειτουργία Παρακολούθησης Χρονοσχισμών, παράδειγμα αρίθμησης χρονοσχισμών για το τερματικό STA4, χρονομετρητές υποχώρησης για κάθε τερματικό. ....	192
7.19	Η αλγοριθμική δομή της λειτουργίας αρχικοποίησης του χρονομετρητή υποχώρησης .....	193
7.20	Throughput DSDMA σε σύγκριση με της iDCF σαν συνάρτηση του πλήθους $N$ των ενεργών τερματικών .....	194
7.21	Διάρκεια φάσης σταθεροποίησης του πρωτοκόλλου DSDMA συναρτήσει του πλήθους των τερματικών .....	195
7.22	Προσάρτηση ενός Γνωστικού Συστήματος Ραδιοεπικοινωνιών στην SCB για μετάδοση σηματοδοσίας και ελέγχου και στην DTB για μετάδοση δεδομένων .	197
7.23	Προτεραιότητα της μετάδοσης δεδομένων έναντι της φασματικής ανίχνευσης στη ζώνη SCB.....	198
7.24	Throughput κατά την προσάρτηση στο σύστημα GSM σαν συνάρτηση της διαθεσιμότητας της ζώνης δεδομένων DTB .....	200
7.25	Throughput κατά την προσάρτηση στο σύστημα GSM σαν συνάρτηση της διαθεσιμότητας της ζώνης σηματοδοσίας και ελέγχου SCB .....	200



# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Ανάθεση συχνοτήτων κινητών και προσωπικών επικοινωνιών 2ης και 3ης γενεάς	18
3.1	Περιεχόμενα πεδίου DurationID ανάλογα με τον τύπου του πακέτου και το πεδίο More Fragment. ....	65
3.2	Ο υπολογισμός και η θέση του μετρητή NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος της iDCF κατά τη λήψη του πλαισίου rts. ....	66
3.3	Ο υπολογισμός και η θέση του μετρητή NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος της iDCF κατά τη λήψη του πλαισίου cts. ....	66
3.4	Ο υπολογισμός και η θέση του μετρητή NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος της iDCF κατά τη λήψη του πλαισίου data με moreFrag=1. ....	66
4.1	Η διεργασίες της iDCF και ποιες τροποποιήσεις υλοποιούνται σε κάθε μία ....	78
4.2	Νέες παράμετροι iDCF που αφορούν τη Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού ....	106
5.1	Τιμές των παραμέτρων $n_T$ και $\lambda$ των περιπτώσεων μορφής της DFS ....	127
6.1	Παράμετροι εισόδου αναλυτικού μοντέλου και προσομοιωτή ....	146



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ολοένα αυξανόμενη εξάπλωση των συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών. Κοινός παρονομαστής όλων των συστημάτων αυτών είναι η χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων 30kHz έως 300GHz. Η χρήση αυτή επιτηρείται και συντονίζεται τόσο από παγκόσμιους οργανισμούς τηλεπικοινωνιών (ITU) όσο και από τοπικούς σε επίπεδο ηπείρων (FCC) ή αρμόδιες αρχές σε επίπεδο κρατών. Η έως σήμερα κατανομή του φάσματος είναι στατική με την έννοια ότι συγκεκριμένες υπηρεσίες επικοινωνιών επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος. Η στατική αυτή πολιτική που υφίσταται από τα πρώτα χρόνια της ευρείας χρήσης των ραδιοεπικοινωνιών έχει συντελέσει στην περιορισμένη διαθεσιμότητα του φάσματος για νέες υπηρεσίες.

Τα έως τώρα αποτελέσματα μετρήσεων φασματικής χρησιμοποίησης καταδεικνύουν ότι, παρ' όλη τη φαινομενική περιορισμένη διαθεσιμότητά του, το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιείται σποραδικά. Η χρήση του είναι συγκεντρωμένη σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων και μεγάλο ποσοστό του παραμένει αχρησιμοποίητο για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στην πραγματικότητα, επομένως, το πρόβλημα δεν είναι η έλλειψη φάσματος, αλλά η υποχρησιμοποίησή του. Αυτή προέρχεται από τις στατικές πολιτικές που οδηγούν στον κατακερματισμό και στους αυστηρούς περιορισμούς χρήσης του.

Η ιδέα των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών (Cognitive Radios), που προέκυψαν από την επαναπρογραμματισιμότητα και την ευελιξία στο φυσικό επίπεδο των Πομποδεκτών Ορισμένων από Λογισμικό (Software Defined Radios - SDR), υπόσχεται να δώσει λύση στο πρόβλημα αυτό της υποχρησιμοποίησης του φάσματος, ανοίγοντας το δρόμο για την υλοποίηση δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Τα δίκτυα αυτά πρωταρχικό στόχο έχουν τη βέλτιστη χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται η τεχνολογία των δικτύων αυτών, προτείνεται και αναπτύσσεται ένα πρωτόκολλο του υποστρώματος Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο για δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος και μελετάται η επίδρασή του, εξετάζοντας την επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων λειτουργίας του.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της ιδέας των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών και της τεχνολογίας Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Μαζί γίνεται μια προ-

σπάθεια ταξινόμησης των ποικίλων ερευνητικών προσεγγίσεων και παρουσίασης των ερευνητικών προκλήσεων που έχουν ανακύψει από την τεχνολογία αυτή. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το συγκεκριμένο σενάριο Δεξαμενής Φάσματος με το οποίο η συγκεκριμένη διατριβή προσεγγίζει ερευνητικά τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει αρχικά μια σύντομη περιγραφή της Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου (DCF), του βασικού πρωτοκόλλου υποστρώματος MAC του προτύπου IEEE 802.11. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκεκριμένες τροποποιήσεις που έγιναν στη DCF με σκοπό την υλοποίηση της iDCF, ενός πρωτοκόλλου MAC ικανού να λειτουργήσει στο απαιτητικό περιβάλλον της Δεξαμενής Φάσματος με διακοπτόμενο τρόπο. Η επιλογή της DCF και της τροποποίησής της για την υλοποίηση ενός πρωτοκόλλου MAC για δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, είχε σαν κίνητρο την ευρεία εξάπλωση του προτύπου IEEE 802.11 παγκοσμίως και την εκτενή αναφορά στη DCF, σαν τμήμα του πρωτοκόλλου MAC, από πάμπολλες ερευνητικές εργασίες στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

Η παραπάνω περιγραφή της ανάπτυξης της iDCF συμπληρώνεται στο κεφάλαιο 4 με την παράθεση της υλοποίησής της στην περιγραφική γλώσσα προγραμματισμού SDL. Η SDL είναι μια γλώσσα κατάλληλη για να προδιαγράψει πρωτόκολλα συστημάτων τηλεπικοινωνιών και που χρησιμοποιείται παγκοσμίως από διεθνείς οργανισμούς. Η υλοποίηση αυτή έχει σαν στόχο το σαφέστερο ορισμό των τροποποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη DCF και μπορεί να οδηγήσει άμεσα στην υλοποίηση ενός πρωτοτύπου. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο προσομοιωτής δικτύου, που υλοποιήθηκε προκειμένου να επικυρώσει τη λειτουργία της iDCF και να βοηθήσει στη μελέτη επίδοσής της.

Στο κεφάλαιο 5 δίνεται το αναλυτικό μοντέλο, που αναπτύχθηκε για τη μελέτη επίδοσης της iDCF. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε Μαρκοβιανές αλυσίδες οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μελέτη της DCF. Με αναλυτικό τρόπο υπολογίζονται οι προσδοκώμενες τιμές χρονικής διάρκειας των χρονοθυρίδων που βρίσκονται μεταξύ διαδοχικών μεταβάσεων της αλυσίδας, ώστε να συμπεριληφθεί ο διακοπτόμενος τρόπος λειτουργίας της iDCF. Το αναλυτικό μοντέλο, που παρουσιάζεται, επικυρώνεται με την παράλληλη παράθεση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων. Η επιτυχία του το καθιστά ένα χρήσιμο εργαλείο για τη γρήγορη μελέτη της επίδοσης της iDCF ως προς την επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων, καθώς και για μελέτες εφικτότητας ρεαλιστικών σεναρίων. Η μελέτη επίδοσης της iDCF βρίσκεται στο κεφάλαιο 6, όπου εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την αποδοτική λειτουργία της. Μια καινούργια παράμετρος λειτουργίας της iDCF χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της επίδοσής της. Η βελτιστοποίηση αυτή είναι εύκολα υλοποιήσιμη τοπικά στα τερματικά του δικτύου, με την υλοποίηση αλγορίθμου που παρουσιάζεται στην αρχή του κεφαλαίου.

Το κεφάλαιο 7 περιέχει μελέτες - προτάσεις εμπλουτισμού της λειτουργίας της iDCF στο περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Παρουσιάζονται μέθοδοι στο MAC για τη μείωση της παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο, το οποίο συνυπάρχει φασματικά με το δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα οφέλη ενός μηχανισμού φέροντος ανίχνευσης τριών καταστάσεων ως προς τη μείωση της παρεμβολής. Επίσης, διαπιστώνεται η βελτίωση της επίδοσης από προσαρμογές του αλγορίθμου επιλογής παραθύρου ανταγωνισμού

## *Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή*

του πρωτοκόλλου και προτείνεται ένα σχήμα κατανεμημένου ελέγχου με διαίρεση χρονοσχισμής. Τέλος παρουσιάζεται η ιδέα της προσάρτησης σε Πρωτεύον δίκτυο για την επίλυση του προβλήματος εύρεσης κοινού καναλιού, από το οποίο πάσχουν τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 8 όπου συνοψίζονται τα αποτελέσματα και οι καινοτομίες της διατριβής και δίνονται οι κατευθύνσεις για την επέκταση της έρευνας στο ίδιο αντικείμενο.

□



## Κεφάλαιο 2

# Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το τεχνολογικό υπόβαθρο στο οποίο κινείται η παρούσα διατριβή. Μέσα από την περιγραφή αυτή γίνονται κατανοητά τα κίνητρα και τα επιτεύγματα της διατριβής και ο αναγνώστης αποκτά μια ιδέα του γνωστικού αντικειμένου των δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, γνωρίζοντας παράλληλα τις τεχνολογικές προκλήσεις που προκύπτουν κατά την υλοποίησή τους. Αρχικά περιγράφονται τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών όπως αυτά γίνονται εφικτά από τους Πομποδέκτες Ορισμένους από Λογισμικό με την εισαγωγή λειτουργιών ανίχνευσης, μάθησης, λήψης απόφασης και δράσης. Κατόπιν γίνεται μια εισαγωγή στην Τεχνολογία Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, που υπόσχεται να δώσει λύση στο πρόβλημα της υποχρησιμοποίησης του Φάσματος, το οποίο οφείλεται στις τρέχουσες στατικές πολιτικές αδειοδοτήσεων των φασματικών ζωνών. Τέλος, παρουσιάζεται το περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος, η ερευνητική προσέγγιση της Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, στην οποία στηρίζεται η διατριβή.

### 2.1 Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών

Ο όρος *Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών* αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως *Cognitive Radio*. Λόγω των διαφορετικών νοημάτων που μπορεί να περιέχει αυτός ο όρος έχουν προταθεί από ρυθμιστικές αρχές και ερευνητικούς φορείς πολλοί διαφορετικοί ορισμοί για το τί είναι ένα Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών. Στο [2] αναφέρεται ο ορισμός από την FCC ως:

Το Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών είναι ένα σύστημα που μπορεί να αλλάζει τις παραμέτρους εκπομπής του αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί και να μαθαίνει από αυτό.

## Κεφάλαιο 2. Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος

Ο ορισμός που δόθηκε από τον Haykin, σε ένα από τα πλέον διάσημα άρθρα για τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών [3], περιγράφει το τεχνολογικό υπόβαθρο ενός τέτοιου συστήματος:

Το Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών είναι ένα έξυπνο σύστημα που είναι ενήμερο για το περιβάλλον του. Χρησιμοποιεί μεθοδολογίες κατανόησης για να μάθει από το περιβάλλον και να προσαρμόζει τις εσωτερικές του καταστάσεις σε στατιστικές διακυμάνσεις των εισερχομένων διεγέρσεων RF, πραγματοποιώντας τις αντίστοιχες αλλαγές σε συγκεκριμένες λειτουργικές παραμέτρους (π.χ. εκπεμπόμενη ισχύς, φέρουσα συχνότητα, σχήμα διαμόρφωσης) σε πραγματικό χρόνο, έχοντας δύο κυρίαρχους στόχους:

- Υψηλής αξιοπιστίας επικοινωνία οποτεδήποτε και οπουδήποτε απαιτείται,
- Αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος.

Στο Software Defined Radio Forum [1] ο ορισμός που έχει δοθεί είναι επί του παρόντος υπό μελέτη και περιλαμβάνει μόνο ένα ελάχιστο σετ απαιτήσεων με σκοπό να επιτρέψει τη μετέπειτα εξέλιξή του σε έναν πληρέστερο ορισμό:

Ένα Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών είναι ένας πομποδέκτης ορισμένος από λογισμικό (SDR - Software Defined Radio), ο οποίος εξελίσσει την ιδιότητά του να είναι χωρικά και αναφορικά με το ασύρματο περιβάλλον ενήμερος, με την ικανότητά του να προσαρμόζει αυτόνομα στο περιβάλλον του τη φέρουσα συχνότητα, την ισχύ και τη διαμόρφωση.

Από όλους τους παραπάνω ορισμούς μπορούν να εξαχθούν δύο βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών:

**Γνωστική ιδιότητα** Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται και να μαθαίνει από αυτό.

**Ιδιότητα αλλαγής παραμέτρων** Η ιδιότητα αλλαγής των παραμέτρων ή επαναπρογραμματισμού του φυσικού επιπέδου δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης της γνωστικής ιδιότητας με την ικανότητα επαναπροσδιορισμού του σχήματος εκπομπής με βάση το περιβάλλον.

Η έννοια της αντίληψης εδώ αναφέρεται στη λήψη οποιασδήποτε πληροφορίας που μπορεί να είναι χρήσιμη για την επιλογή των παραμέτρων της επικοινωνίας. Ο όρος περιβάλλον περιέχει το ασύρματο περιβάλλον, την φυσική τοποθεσία, τις ανάγκες επικοινωνίας του χρήστη καθώς και οποιοσδήποτε εσωτερικές παραμέτρους λειτουργίας του τερματικού όπως η εναπομείνουσα ενέργεια του συσσωρευτή. Αυτή η ικανότητα της αντίληψης δεν αναφέρεται σε μια απλή παρακολούθηση, για παράδειγμα της λαμβανόμενης ισχύος σε μια ζώνη συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Η αντίληψη αναφέρεται σε πολυπλοκότερες τεχνικές παρακολούθησης

και μάθησης χρονικών και χωρικών διακυμάνσεων κάποιας παραμέτρου του περιβάλλοντος, με σκοπό την πρόβλεψη και την παροχή καλύτερης υπηρεσίας.

Η ιδέα των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών αρχικά προτάθηκε στη διατριβή του J. Mitola [4], η οποία εστίασε στη γλώσσα αναπαράστασης της γνώσης των ραδιοσυστημάτων (RKRL - Radio Knowledge Representation Language), με την οποία ένα ραδιοσύστημα μπορεί να έχει γνώση και να κατανοεί το ασύρματο περιβάλλον, την εσωτερική του λειτουργία και να διαπραγματεύεται - επιχειρηματολογεί γι αυτά.

Τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών λοιπόν, αξιοποιούν και συμπληρώνουν την ικανότητα των Πομποδεκτών Ορισμένων από Λογισμικό να εκπέμπουν και να λαμβάνουν σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες και τεχνικές μετάδοσης, προσθέτοντας λειτουργίες αντίληψης του περιβάλλοντος και μάθησης, οι οποίες εξαπλώνονται και στα υψηλότερα στρώματα του μοντέλου διαστρωμάτωσης των δικτύων. Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η τεχνολογία των Πομποδεκτών Ορισμένων από Λογισμικό.

### 2.1.1 Πομποδέκτες Ορισμένοι από Λογισμικό

Οι Πομποδέκτες Ορισμένοι από Λογισμικό αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Software Defined Radio ή απλά SDR. Το SDR, όπως ορίζεται από τον J. Mitola III [4], είναι ένα ραδιοσύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργήσει, μέσω λογισμικού, σε σημαντικό εύρος ραδιοσυχνοτήτων και να χρησιμοποιήσει πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες και πρωτόκολλα (air interfaces). Για το ιδανικό SDR αυτό το εύρος περιλαμβάνει το συνολικό εύρος των RF συχνοτήτων όλων των ασύρματων διεπαφών που μπορούν να εξυπηρετήσουν το χρήστη. Προκειμένου να το επιτύχουν αυτό, τα SDR θα πρέπει να είναι:

‘Ευέλικτες αρχιτεκτονικές πομποδεκτών, ελεγχόμενες και προγραμματιζόμενες από λογισμικό.’

Ή πιο αναλυτικά [5]:

Πομποδέκτες όπου τα ακόλουθα στοιχεία ορίζονται μέσω λογισμικού:

1. Ζώνη συχνότητας και εύρος ζώνης ασύρματου καναλιού,
2. Διαμόρφωση και σχήματα κωδικοποίησης,
3. Άλλες παράμετροι φυσικού στρώματος όπως είδος/ορισμός ισοσταθμιστή, τύπος φίλτρου σχηματισμού παλμού,
4. Πρωτόκολλα πρόσβασης,
5. Εφαρμογές χρηστών.

Αυτές οι παράμετροι μπορούν να υιοθετηθούν ή να μεταβληθούν από τον παροχέα υπηρεσιών, το διαχειριστή του δικτύου, αλλά και από το τερματικό του χρήστη για την καλύτερη παροχή υπηρεσίας. Έτσι μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι το SDR είναι μια ανερχόμενη τεχνολογία, που στοχεύει στην κατασκευή ευέλικτων ραδιοσυστημάτων, πολλαπλών υπηρεσιών

και προτύπων, πολλαπλών ζωνών λειτουργίας και σχημάτων χρησιμοποίησης πόρων, επαναπρογραμματίσιμων και προσαρμοζόμενων μέσω λογισμικού. Η ανάπτυξη συστημάτων SDR εμπεριέχει την επίτευξη δυο βασικών στόχων [6]:

1. Τη μετακίνηση του συνόρου ανάμεσα στον αναλογικό και τον ψηφιακό κόσμο όσο το δυνατό πιο κοντά στη ραδιοσυχνότητα (στην κεραία), τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, υιοθετώντας ευρυζωνική αναλογική / ψηφιακή (ADC) και ψηφιακή / αναλογική (DAC) μετατροπή κοντά στην κεραία.
2. Την αντικατάσταση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συγκεκριμένης εφαρμογής (Application Specific Integrated Circuits, ASIC) με ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος (Digital Signal Processors, DSP), ώστε να επιτευχθεί ο ορισμός της πλειοψηφίας των ράδιο - λειτουργιών σε λογισμικό.

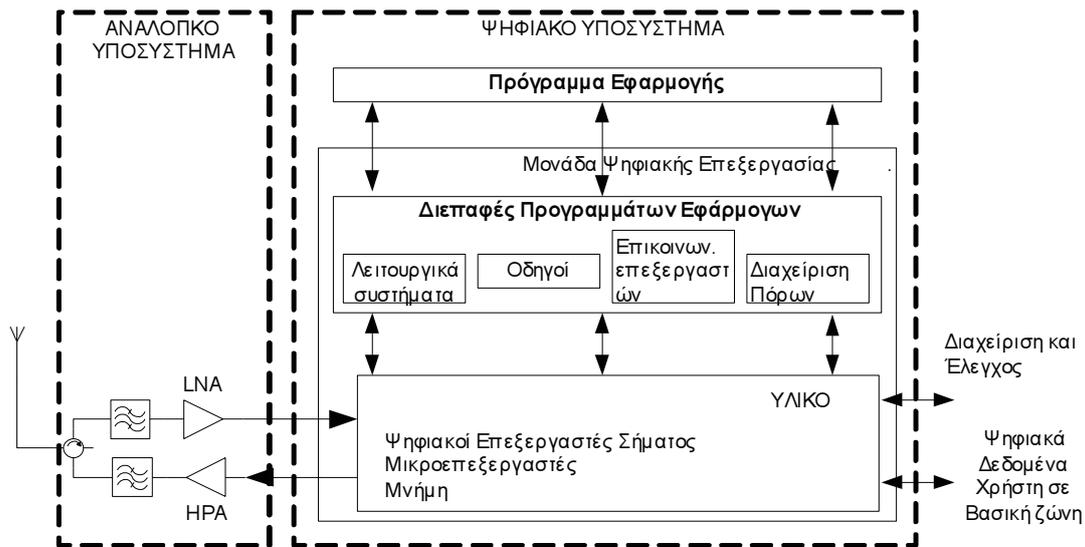
Ο πρώτος στόχος επεκτείνει την προσπάθεια που έγινε τα τελευταία χρόνια για την επέκταση του ψηφιακού υποσυστήματος στην IF βαθμίδα και τελικό στόχο έχει ένα συνολικά ψηφιακό πομποδέκτη. Ο δεύτερος στόχος ανοίγει το δρόμο προς δύο κατευθύνσεις. Πρώτον, τον ορισμό μέσω λογισμικού σχημάτων βασικής ζώνης όπως διαμόρφωση, ισοστάθμιση, κωδικοποίηση και μορφοποίηση παλμών και δεύτερον, τη δυνατότητα υλοποίησης, μέσω επαναπρογραμματισμού, των τεμαχικών πολλαπλών προτύπων και υπηρεσιών.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ήδη μερικά πρωτότυπα σταθμών βάσης GSM και UMTS χρησιμοποιούν DSP, τουλάχιστον για τις λειτουργίες βασικής ζώνης. Σε αυτές τις περιπτώσεις όμως η ενσωμάτωση DSP δε σημαίνει αυτόματα και εφαρμογή SDR τεχνολογίας καθώς το λογισμικό είναι προκαθορισμένο, περιορισμένο για την εκάστοτε συγκεκριμένη ασύρματη διεπαφή και δεν επαναπροσδιορίζεται αυτόνομα.

#### 2.1.1.1 Το ιδανικό SDR

Οι παραδοσιακοί πομποδέκτες, που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, στηρίζονται στο παραδοσιακό υπέρ - ετερόδυνο σχήμα, όπου οι RF και IF βαθμίδες είναι εξολοκλήρου αναλογικές. Το μοναδικό ψηφιακό τμήμα του συστήματος εμφανίζεται στη βαθμίδα βασικής ζώνης, που μάλιστα συνήθως υλοποιείται σε ASIC.

Στον αντίποδα της παραπάνω αρχιτεκτονικής βρίσκεται η ιδανική μορφή SDR [4], στην οποία ο πομποδέκτης έχει εξαιρετικά μειωμένη αναλογική βαθμίδα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1. Οι αναλογικές λειτουργίες είναι περιορισμένες σε αυτές που δεν μπορούν να αντικατασταθούν ψηφιακά. Αυτές είναι: η κεραία, η βαθμίδα φίλτρου RF μετωπιαίου άκρου, ο συνδυαστής (RF combiner) και οι βαθμίδες ενίσχυσης είτε για εκπομπή (ενίσχυση ισχύος) είτε για λήψη (ενίσχυση χαμηλού θορύβου). Η αρχιτεκτονική αυτή έχει την τάση να τοποθετήσει τη βαθμίδα μετατροπής ADC (και DAC) όσο πιο κοντά στην κεραία γίνεται. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, η ADC (DAC) βαθμίδα βρίσκεται αμέσως μετά (πριν) τη βαθμίδα ενίσχυσης, ώστε η διεύδυση του λογισμικού να επεκτείνεται σε όλες της βαθμίδες επεξεργασίας του σήματος, σε μια απόλυτα επαναπρογραμματιζόμενη πλατφόρμα.



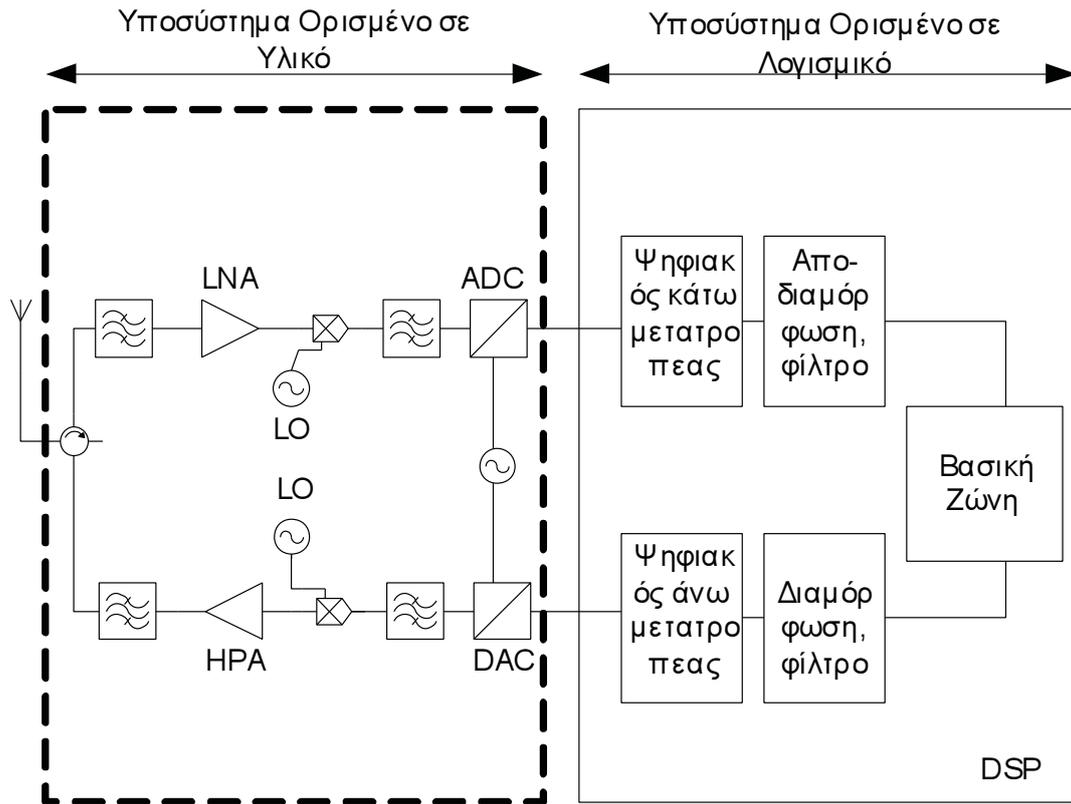
Σχήμα 2.1: Ιδανική αρχιτεκτονική SDR

Το λογισμικό στην ιδανική αρχιτεκτονική είναι δομημένο ώστε το υλικό να είναι απολύτως διαχωρισμένο από τα προγράμματα εφαρμογών. Ένα ενδιάμεσο στρώμα (middleware) επιτυγχάνει αυτή την λειτουργικότητα, περιβάλλοντας τα στοιχεία του υλικού σαν αντικείμενα και παρέχοντας τις κατάλληλες διεπαφές για την επικοινωνία και τον έλεγχο τους. Το middleware περιέχει το λειτουργικό σύστημα, τους οδηγούς υλικού και λοιπό λογισμικό που δεν αφορά τις εφαρμογές. Η ενοποίηση του στρώματος middleware για το σύνολο του διαθέσιμου υλικού αποτελεί στόχο των εταιριών υλικού, που θα οδηγήσει μελλοντικά και στην προτυποποίηση του SDR.

Η παραπάνω αρχιτεκτονική είναι, ωστόσο, ιδανική και μη υλοποιήσιμη. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα υλοποίησής της είναι η προώθηση της βαθμίδας μετατροπής από Αναλογικό σε Ψηφιακό και αντίστροφα τόσο κοντά στη συχνότητα RF. Τόσο οι ADC όσο και οι DAC εισάγουν περιορισμούς στο εύρος ζώνης και στο δυναμικό εύρος ισχύος (dynamic range), με αποτέλεσμα τέτοιες δομές ιδανικής αρχιτεκτονικής SDR να είναι εμπορικά εφικτές μόνο για HF, VHF ασύρματα συστήματα. Ένα επίσης σημαντικό πρόβλημα της υλοποίησης τέτοιων αρχιτεκτονικών, για συστήματα νέας γενιάς κινητών ραδιοεπικοινωνιών, είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μοναδική RF βαθμίδα καθώς είναι αδύνατη η κατασκευή κεραιών και ενισχυτών χαμηλού θορύβου εύρους από λίγα MHz έως αρκετά GHz.

### 2.1.1.2 Το υλοποιήσιμο SDR

Η ιδανική αρχιτεκτονική SDR είναι χρήσιμη ως σημείο αναφοράς. Το ερώτημα που προκύπτει για το πώς μπορεί να γεφυρωθεί το κενό μεταξύ του ιδανικού SDR και των παραδοσιακών HDR (Hardware Defined Radio), ώστε να εξακολουθούμε να αναφερόμαστε σε επαναπρογραμματιζόμενους πομποδέκτες, μπορεί να απαντηθεί με την υλοποιήσιμη αρχιτεκτονική του σχήματος 2.2. Η αρχιτεκτονική αυτή πλησιάζει τον ιδανικό στόχο και με βάση τη σημερινή τεχνολογία μπορεί και έχει κατασκευαστεί.



Σχήμα 2.2: Υλοποιήσιμη βασική αρχιτεκτονική SDR

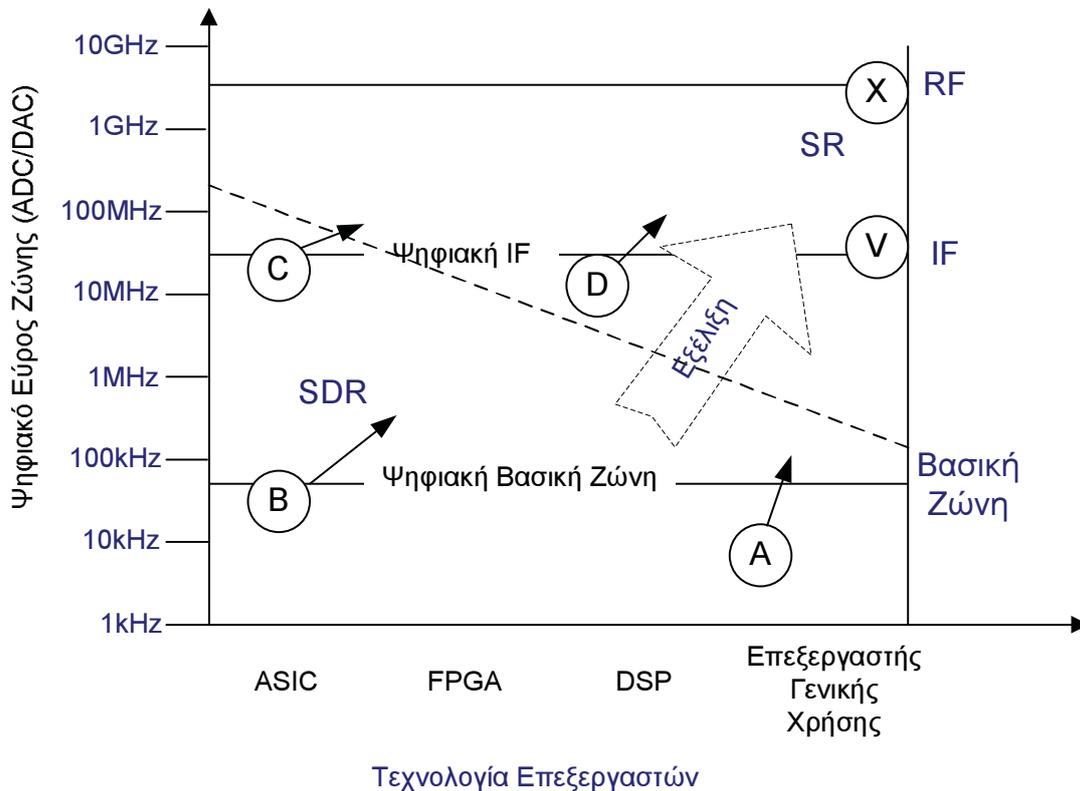
Στην αρχιτεκτονική αυτή αποφεύγεται η απευθείας ψηφιοποίηση του RF σήματος με την εισαγωγή μιας ή περισσότερων αναλογικών IF βαθμίδων. Όμως, αντί να μεταφέρονται μεμονωμένα κανάλια μιας ασύρματης διεπαφής στη βασική ζώνη, μεταφέρεται ολόκληρη η ζώνη (ή μέρος της) στην IF βαθμίδα, που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή στον ADC. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα να παρεμβαίνει με λογισμικό στη διαδικασία διαυλοποίησης και να ελέγχει / παρακολουθεί την κατάσταση στη ζώνη συνολικά.

Το ορισμένο από λογισμικό ψηφιακό υποσύστημα αποτελείται από την ψηφιακή μετατροπή συχνότητας (κάτω ή πάνω) και από την ψηφιακή επεξεργασία βασικής ζώνης.

### 2.1.1.3 Επίπεδα υλοποίησης SDR

Συνοπτικά, μπορούμε να παραθέσουμε την εξής ορολογία γύρω από το SDR που συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία:

1. *Software Radio*: Οι τηλεπικοινωνιακές λειτουργίες ενός πομποδέκτη είναι ολόκληρες υλοποιημένες σε λογισμικό σε κατάλληλο επεξεργαστή [Mitola, 1995].
2. *Software Defined Radio*: Λέγονται επίσης και *Programmable Digital Radio*. Μία ενδιάμεση υλοποίηση στο δρόμο προς την εξέλιξη προς τα Software Radios [Tuttlebee, 2002].



Σχήμα 2.3: Επίπεδα υλοποίησης SDR. Σχήμα από τη διατριβή του J.Mitola

3. *Composite Radio*: Σύστημα πολλαπλών και προεγκατεστημένων ασύρματων διεπαφών που αλληλοσυμπληρώνονται προς βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης του δικτύου και των πόρων [Demestichas et al., 2004].
4. *Reconfigurable Radio*: Υλοποίηση ενός τερματικού που επαναπρογραμματίζεται μέσω ανίχνευσης υπάρχουσών δικτύων, εναλλαγής μεταξύ πολλαπλών ασύρματων διεπαφών και φόρτωσης λογισμικού σε πραγματικό χρόνο. [Mehta et al. 2001].

Υποθέτουμε ότι ένα σύστημα SDR λειτουργεί στις ζώνες των κινητών, δορυφορικών και προσωπικών επικοινωνιών μεταξύ 400 και 2400 MHz και λαμβάνει σήματα με ισχείς που βρίσκονται εντός δυναμικού εύρους 60 dB.

Ένα ιδανικό SDR σύστημα ή ένα Software Radio θα πρέπει να ψηφιοποιεί 2.5 GHz εύρος RF συχνοτήτων, δειγματοληπτώντας με ρυθμό 6 εκατομμύρια δείγματα το δευτερόλεπτο με τουλάχιστον 60 dB δυναμικού εύρους ισχύος, με τον αυτόματο ελεγκτή κέρδους σε λειτουργία. Ο συνδυασμός αυτών των δύο προδιαγραφών και μόνο είναι ήδη πολύ απαιτητικός. Μετατροπείς σήματος (ADC, DAC) που λειτουργούν στα 6 Gsp/s δεν επιτυγχάνουν ούτε το απαιτούμενο δυναμικό εύρος ισχύος και ούτε έχουν τη φασματική καθαρότητα που απαιτείται για την υλοποίηση ενός ιδανικού SDR.

Χρησιμοποιώντας σημερινή τεχνολογία, θα πρέπει να συμβιβαστούν οι απαιτήσεις δειγματοληψίας με τις προδιαγραφές υπάρχοντων μετατροπέων. Ένα SDR, για παράδειγμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει ένα γρήγορα συντονιζόμενο συνθέτη συχνοτήτων (synthesizer)

για να μεταπηδά στη συχνότητα και να δίνει στιγμιαίο εύρος βασικής ζώνης 10 MHz από ένα συνολικό εύρος RF 200MHz, χρησιμοποιώντας ADC των 20 Msps και ζωνοπερατή δειγματοληψία. Το αντίστοιχο Software Radio θα ψηφιοποιούσε απευθείας τα 200 MHz εύρους ζώνης με ζωνοπερατή δειγματοληψία ρυθμού 400 Msps. Το στιγμιαίο εύρος βασική ζώνης θα ήταν τότε προγραμματίσιμο σε λογισμικό και από μερικά Hz έως 200MHz, χωρίς να περιορίζεται από το φράγμα των 10 MHz [4].

Ο βαθμός ευελιξίας που προσφέρεται στο φυσικό επίπεδο από την τεχνολογία SDR βρίσκεται σε άμεση συνάφεια με τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών, όπως περιγράφεται και στην επόμενη παράγραφο. Ένα εμπορικά υλοποιήσιμο SDR μπορεί να υλοποιηθεί σαν ένα μίγμα από ASIC, FPGA, DSP και μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού. Διάφορες παράμετροι των ASIC μπορεί να είναι προγραμματίσιμες μέσω λογισμικού [7]. Ένα ιδανικό όμως SDR δεν έχει ASIC. Αντίθετα, υλοποιεί όλες τις μετατροπές από RF σε IF και σε βασική ζώνη, όλα τα φίλτρα, την διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση και όλες τις σχετικές λειτουργίες σε λογισμικό και μόνο.

Τα επίπεδα υλοποίησης σαν συνάρτηση του ψηφιακού εύρους βασικής ζώνης και της δυνατότητας προγραμματισμού του Υλικού δίνονται στο σχήμα 2.3. Τα σημεία υλοποίησης A έως D του σχήματος είναι υπαρκτά σύγχρονα SDR. Το σημείο X είναι το ιδανικό Software Radio με ψηφιακή πρόσβαση στις RF συχνότητες και όλες του τις λειτουργίες υλοποιημένες σε μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού. Υλοποιήσεις σαν και αυτή είναι ανέφικτες μεσοπρόθεσμα. Υλοποιήσεις που έχουν γίνει έως τώρα έχουν μεγάλους περιορισμούς σε εύρος ζώνης και δυναμικό εύρος ισχύος [8]. Τα γνωστικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών ωστόσο, στοχεύουν σε υλοποιήσεις για κινητές επικοινωνίες 4ης Γενιάς και πέραν αυτής (beyond 4G), στις οποίες τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα επεξεργασίας και μετατροπής σήματος θα έχουν αρχίσει να προσεγγίζουν το Software Radio.

### 2.1.2 Γνωστική διαδικασία

Δεν υπάρχει επίσημα ένας κοινά αποδεκτός ορισμός για το τί σημαίνει ο όρος γνωστικός όταν αναφέρεται στα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών. Ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών μπορούν να χαρακτηριστούν ως γνωστικές, όπως αποφάσεις οδηγούμενες από αντικειμενικούς στόχους (goal-driven decisions) ή και προδραστικές προσαρμογές (proactive adaptation), δηλαδή προσαρμογές του συστήματος που διεγέρθηκαν με σκοπό την πρόληψη ενός φαινομένου και όχι εξαιτίας του ίδιου του φαινομένου. Η γνωστική διαδικασία ταυτίζεται επίσης με τον όρο *μάθηση μηχανής* (machine learning), ο οποίος ορίζεται με την ευρεία έννοια στο βιβλίο [9] σαν οποιοσδήποτε αλγόριθμος που βελτιώνει την επίδοσή του μέσω εμπειρίας, αποκτούμενης σε παρελθούσα χρονική περίοδο, χωρίς να υπάρχει ολοκληρωμένη πληροφορία για το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί. Αυτός ο ορισμός καλύπτει πολλά διαφορετικά είδη τεχνητής νοημοσύνης, αλγορίθμους αποφάσεων, αλγορίθμους προσαρμογής, δίνοντας έτσι στα γνωστικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών ένα ευρύ φάσμα από πιθανούς αλγορίθμους μάθησης.

Η γνωστική διαδικασία υπάρχει ώστε να συμπληρώνει τους αλγορίθμους αποφάσεων, δια-

τηρώντας σε κάποια μορφή μνήμης τις παραμέτρους προηγούμενων αποφάσεων μαζί με παραμέτρους του προβλήματος και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αποφάσεις αυτές. Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων μιας προηγούμενης απόφασης χρειάζεται ένας βρόχος ανάδρασης που θα μετράει την επιτυχία ως προς την επίτευξη των στόχων. Το σύνολο αυτό διατηρείται στη μνήμη του συστήματος ώστε όταν το σύστημα βρεθεί σε παρόμοιες καταστάσεις να αποφευχθούν τυχόν λάθη και να υπάρχει ένα σημείο εκκίνησης για την επερχόμενη απόφαση.

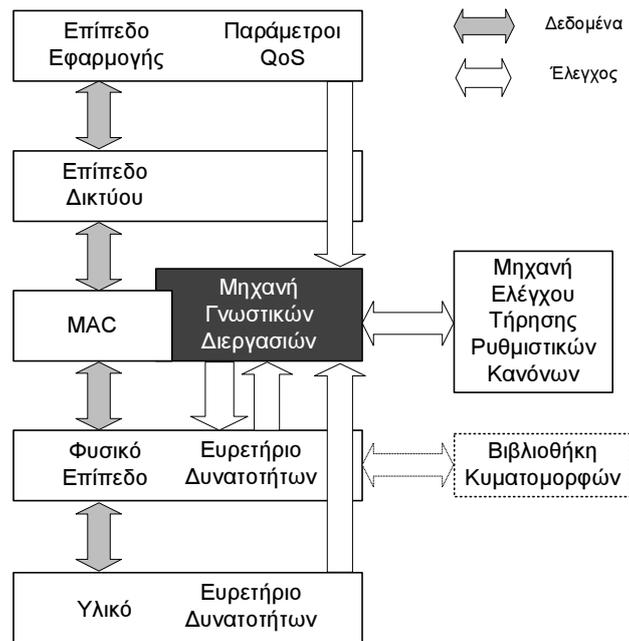
Η επίδοση των αποφάσεων της γνωστικής διαδικασίας στην επίτευξη αντικειμενικών στόχων εξαρτάται από το τί ποσοστό της πληροφορίας της κατάστασης του συστήματος έχει στη διάθεσή της. Αν η γνωστική διαδικασία έχει στη διάθεσή της το σύνολο της πληροφορίας της κατάστασης του συστήματος, τότε οι αποφάσεις που λαμβάνονται θα πρέπει να είναι τουλάχιστον το ίδιο καλές αν όχι καλύτερες με αποφάσεις που θα λαμβάνονταν με πλήρη άγνοια της κατάστασης του συστήματος. Για ένα μεγάλο σύστημα, όπως είναι ένα ολόκληρο δίκτυο γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών και για την επίτευξη αντικειμενικών στόχων του δικτύου, η πλήρης γνώση της κατάστασης του συστήματος είναι αδύνατη. Συχνά υπάρχει μεγάλο κόστος και επιβάρυνση για την μεταφορά ολόκληρης της πληροφορίας αυτής σε οντότητες του συστήματος που τη χρειάζονται, κάτι το οποίο σημαίνει ότι αποφάσεις θα πρέπει να ληφθούν με ένα ποσοστό μόνο της συνολικής πληροφορίας κατάστασης του δικτύου [10].

Για τη μείωση του όγκου της προς επεξεργασία και προς μεταφορά πληροφορίας, η οποία απαιτείται για τη λήψη μιας απόφασης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο φίλτρο. Το φιλτράρισμα εδώ νοείται σαν μια διαδικασία περιορισμού μετρήσεων και παρατηρήσεων που μπορεί να θεωρηθούν μη σχετικές με το προς επίλυση πρόβλημα. Οι κανόνες φιλτραρίσματος μπορεί να παραχθούν κατά το σχεδιασμό του συστήματος, αλλά μπορεί να παράγονται και δυναμικά σε πραγματικό χρόνο καθώς κατά την εξέλιξη της γνωστικής διαδικασίας και την απόκτηση όλο και περισσότερης εμπειρίας, ορισμένες παράμετροι και ορισμένα παρατηρούμενα μεγέθη μπορεί να φανεί ότι δεν είναι σημαντικά για την λήψη μιας απόφασης και για την επιτυχία της. Επίσης η ευαισθησία ορισμένων παραμέτρων για τη γνωστική διαδικασία μπορεί να καθοριστεί δυναμικά και έτσι οι συγκεκριμένες τιμές να μετρώνται - μεταφέρονται - αποθηκεύονται με διαφορετική ακρίβεια, καταλαμβάνοντας και διαφορετικό όγκο στη μνήμη.

Το κόστος στην επίδοση ενός καταναμεμένου γνωστικού συστήματος, το οποίο λαμβάνει αποφάσεις με πληροφορία κατάστασης λιγότερη από την συνολική, αναφέρεται διεθνώς ως το *κόστος της άγνοιας (price of ignorance)*. Άλλα ζητήματα που μπορεί να προκύψουν σε γνωστικά συστήματα που λειτουργούν με μειωμένη πληροφορία κατάστασης, όπως για παράδειγμα το όφελος λόγω μειωμένης μεταφοράς δεδομένων ελέγχου, είναι διαφορετικά ζητήματα που προφανώς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό.

### 2.1.3 Αρχιτεκτονική αναφοράς

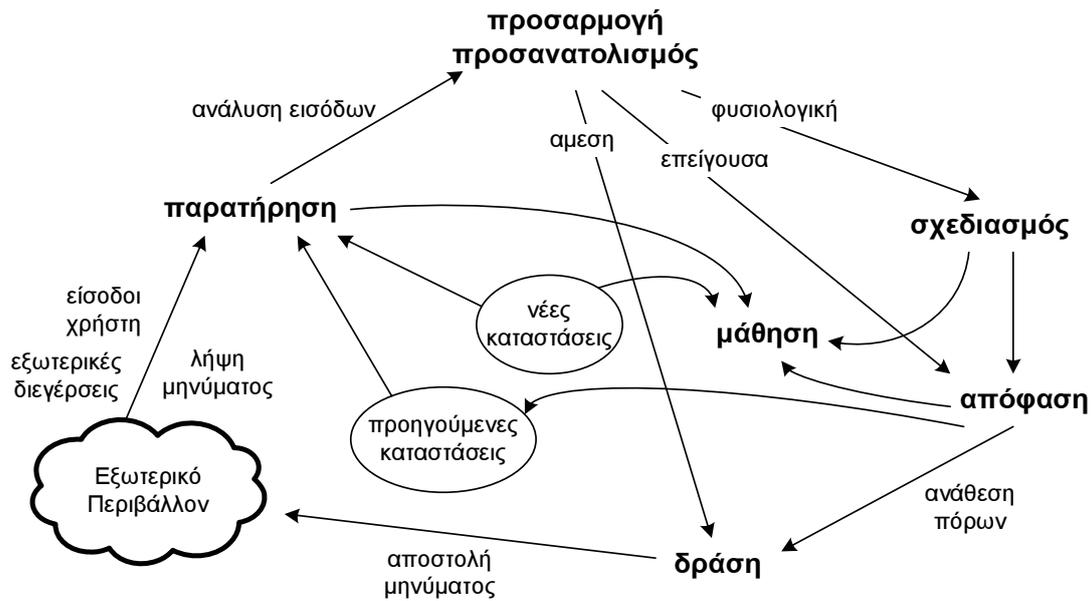
Επειδή τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών λειτουργούν σε πολλές διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων με πολλά διαφορετικά σχήματα μετάδοσης, η τεχνολογία φυσικού στρώματος



Σχήμα 2.4: Μοντέλο αρχιτεκτονικής Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών. Σχήμα από [www.sdrforum.org](http://www.sdrforum.org) [1]

στην οποία βασίζονται είναι το SDR. Ο ορισμός μιας αρχιτεκτονικής για τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών, εκτός από το παραπάνω κοινά αποδεκτό γεγονός, δεν μπορεί να έχει τίποτε άλλο αυστηρά καθορισμένο. Έτσι, σε ένα αρκετά αφαιρετικό επίπεδο, η αρχιτεκτονική ενός Γνωστικού Συστήματος Ραδιοεπικοινωνιών περιέχει δύο υποσυστήματα: (α) μια μονάδα για τις γνωστικές διαδικασίες, η οποία λαμβάνει αποφάσεις βάσει αρκετών εισόδων που δέχεται και (β) μια ευέλικτη μονάδα φυσικού στρώματος, της οποίας η επαναπρογραμματισιμότητα δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να λειτουργεί σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων. Το SDR Forum έχει προτείνει την αρχιτεκτονική του σχήματος 2.4, μια θεμελιώδη αρχιτεκτονική βασισμένη στην αρχιτεκτονική διαστρωμάτωσης των δικτύων.

Στην αρχιτεκτονική αυτή, το SDR είναι η βάση του συστήματος. Η μηχανή γνωστικών διεργασιών είναι ακριβώς επάνω από το φυσικό επίπεδο, δέχεται εισόδους από αυτό και το ελέγχει. Επιπλέον, δέχεται εισόδους από τα υψηλότερα επίπεδα, όπως το επίπεδο εφαρμογής και από το εξωτερικό περιβάλλον του χρήστη. Στο σχήμα, η λογική τοποθέτηση της μηχανής γνωστικών διεργασιών στο επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC - Medium Access Control) υποδηλώνει εννοιολογικά ότι η βασική λειτουργία της μηχανής αυτής είναι η αντιστοίχιση απαιτήσεων από το επίπεδο εφαρμογής σε εντολές προσαρμογής προς το φυσικό επίπεδο. Μία μηχανή ελέγχου τήρησης κανονισμών/νομοθεσίας/πολιτικών βρίσκεται σε άμεση συνεργασία με την μηχανή γνωστικών διεργασιών, παρακολουθώντας και ελέγχοντας πιθανόν παραβιάσεις των ρυθμιστικών κανόνων, που αφορούν την κατανομή του φάσματος στην περιοχή στην οποία δρα το σύστημα.



Σχήμα 2.5: Γνωστικός Κύκλος

#### 2.1.4 Γνωστικός Κύκλος

Για να είναι ένα Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών ικανό να υλοποιήσει αυτόνομα δίκτυα θα πρέπει να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του. Συμπεριλαμβάνοντας μηχανισμούς μάθησης μηχανής μαζί με μηχανισμούς εκτίμησης του περιβάλλοντος και προσαρμογής σε αυτό, ο Γνωστικός Κύκλος περιγράφει τις βασικές αρχές αυτής της αλληλεπίδρασης. Ο Γνωστικός Κύκλος ή *Cognition Cycle*, σχήμα 2.5, παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1999 από τον J.Mitola στο άρθρο [11].

Διεγέρσεις από το περιβάλλον εισέρχονται στο Γνωστικό Κύκλο και δρομολογούνται κατάλληλα προς την εμφάνιση της κατάλληλης απόκρισης. Το γνωστικό τερματικό αναλύει τις εξωτερικές διεγέρσεις για να προσκομίσει τις παραμέτρους και τα δεδομένα που είναι συναφή προς τη λειτουργία που επιθυμεί να εκτελέσει. Για παράδειγμα θα μπορούσε να αναλύσει τις συντεταγμένες από τον GPS δέκτη μαζί με τις μετρούμενες τιμές από τον αισθητήρα φωτός και θερμοκρασίας για να προσδιορίσει αν βρίσκεται μέσα ή έξω από ένα κτίριο. Αυτού του είδους η επεξεργασία συμβαίνει κατά τη φάση παρατήρησης. Εισερχόμενα και εξερχόμενα μηνύματα συμπεριλαμβανομένων και των εισόδων του χρήστη αναλύονται προς αναζήτηση εννοιών συναφών με την παροχή υπηρεσίας.

Το γνωστικό τερματικό προσαρμόζεται καθορίζοντας προτεραιότητες στις εισερχόμενες διεγέρσεις. Αν υπάρχει κάποια αστοχία στην παροχή ισχύος του συστήματος (απόθεμα μπαταρίας), η φάση προσαρμογής-προσανατολισμού δρα άμεσα για την αποθήκευση δεδομένων προς μία επιτυχή επανεκκίνηση του συστήματος και για να τερματίσει το σύστημα. Η απώλεια σήματος από όλα τα διαθέσιμα ραδιοδίκτυα, λόγω π.χ. της εισόδου σε ένα κτίριο, μπορεί να οδηγήσει σε επείγοντα βήματα για την αποκατάσταση της σύνδεσης, όπως την αναζήτηση δικτύων εσωτερικού χώρου. Αυτό γίνεται μέσω της διαδρομής επείγουσα του κύκλου.

Τα περισσότερα από τα συμβάντα δεν απαιτούν τέτοιες χρονικά ευαίσθητες αντιδράσεις και

δρομολογούνται μέσω της διαδρομής Σχεδιασμός-Απόφαση-Δράση. Η φάση Σχεδιασμού περιλαμβάνει τη δημιουργία πλάνων. Η φάση Απόφασης επιλέγει μεταξύ των υποψηφίων πλάνων και μπορεί να επιλέξει να ενημερώσει το χρήστη για κάτι που θα πράξει, ή που συνέβη, ή να αναβάλλει την ενημέρωση για αργότερα αν κάτι σημαντικότερο λαμβάνει χώρα. Η φάση Δράσης αποτελείται από την ανάθεση υπολογιστικών πόρων και ραδιοπόρων στο προσαρμοζόμενο υποσύστημα (SDR) για την εκκίνηση διεργασιών επικοινωνίας.

Η μάθηση είναι μία λειτουργία επεξεργασίας παρατηρήσεων και αποφάσεων. Προηγούμενες και τρέχουσες καταστάσεις του συστήματος συγκρίνονται με βάση τα αποτελέσματα που είχαν στην παροχή υπηρεσίας και τις προσδοκίες, με σκοπό τη μάθηση της αποτελεσματικότητας συγκεκριμένων αποφάσεων. Εφόσον η αφομοίωση γνώσης με αλγορίθμους μάθησης μηχανής μπορεί να είναι υπολογιστικά επίπονη διαδικασία, τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών διαθέτουν κατάσταση ύπνου στην οποία προσπίπτουν όταν παραμένουν ανενεργά για σχετικά μεγάλες χρονικές περιόδους. Κατά τις περιόδους αυτές τα γνωστικά τερματικά μπορούν να εκτελούν τους αλγορίθμους μάθησης, χωρίς όμως να απέχουν από τη δυνατότητα παροχής υπηρεσίας στους χρήστες όποτε ανακύψει ανάγκη. Κατά την κατάσταση αφύπνισης, η λήψη μιας εξωτερικής διέγερσης οδηγεί σε έναν νέο κύκλο γνωστικής διαδικασίας.

## 2.2 Τεχνολογία Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

Μία από τις κυρίαρχες εφαρμογές των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών είναι το ότι καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη της τεχνολογίας Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Λόγω της έμφυτης ιδιότητάς τους να είναι ενήμερα για το ασύρματο περιβάλλον, τμήμα του οποίου είναι και το φάσμα, υπόσχονται με την τεχνολογία αυτή να δώσουν λύση στο πρόβλημα της υποχρησιμοποίησης των φασματικών πόρων. Εδώ παρουσιάζεται η ιδέα της Δυναμικής Χρήσης Φάσματος σαν μια άμεση εφαρμογή των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών, αφού πρώτα γίνει μια σύντομη παρουσίαση της σημερινής κατάστασης κατανομής του φάσματος και του προβλήματος της υποχρησιμοποίησής του.

### 2.2.1 Τρέχουσες πολιτικές κατανομής φάσματος

Από την πρώτη ραδιοφωνική εκπομπή του Guglielmo Marconi, το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων αναδείχθηκε σε πολύτιμο πόρο, στον οποίο στηρίζεται κάθε σύστημα ασύρματων επικοινωνιών. Με τα χρόνια η χρήση του έχει αυξηθεί σημαντικά και σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως από ποικίλες τεχνολογίες για πολλές διαφορετικές εναέριες, επίγειες, θαλάσσιες και διαστημικές υπηρεσίες. Το σύνολο αυτών των υπηρεσιών έχει πολλαπλά κοινωνικά οφέλη, αλλά έχει καταστήσει και αναγκαία την ύπαρξη μηχανισμών διαχείρισης και κατανομής του φάσματος. Οι μηχανισμοί αυτοί θα πρέπει να εξασφαλίζουν την αποδοτική χρήση του, ώστε να μεγιστοποιείται το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών και των παρόχων υπηρεσιών.

Τα σημερινά δίκτυα τηλεπικοινωνιών διοικούνται από μια στατική, όπως λέμε, πολιτική ανάθεσης συχνοτήτων. Φασματικές περιοχές ανατίθενται σε συγκεκριμένες υπηρεσίες και

## Κεφάλαιο 2. Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος

αυτές διαμοιράζονται παραπέρα με κατάλληλες άδειες χρήσης στους διάφορους παρόχους που προσφέρουν τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Αυτές οι φασματικές ζώνες είναι αυστηρά καθορισμένες, νομικά προστατευμένες, και ανήκουν αποκλειστικά στο συγκεκριμένο πάροχο υπηρεσίας για όσο διαρκεί η άδεια χρήσης που του έχει δοθεί.

Ο συντονισμός της χρήσης συχνοτήτων γίνεται από κυβερνητικές και παγκόσμιες ρυθμιστικές αρχές και οι άδειες για χρήση φασματικών περιοχών δίνονται στους παρόχους κινητών/ασύρματων υπηρεσιών για μεγάλα χρονικά διαστήματα, για μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και για αποκλειστική χρήση από αυτούς.

### 2.2.1.1 Χάρτης κατανομής συχνοτήτων ITU-R

Ο Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών της Παγκόσμιας Ένωσης Τηλεπικοινωνιών ITU-R έχει καθορίσει τον πίνακα ανάθεσης φασματικών ζωνών σε συγκεκριμένες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν ραδιοεκπομπές [12]. Η τελική ανάθεση συχνοτήτων σε συγκεκριμένες υπηρεσίες και για κάθε χώρα γίνεται από τον αρμόδιο κρατικό φορέα με κάποιον βαθμό ευελιξίας, καθότι για πολλές υπηρεσίες έχει καθοριστεί παραπάνω από μια ζώνη συχνοτήτων. Έτσι σε κάθε χώρα δίνεται η δυνατότητα να πάρει την τελική απόφαση για το ποια υπηρεσία θα λειτουργήσει σε ποια/ποιες περιοχές συχνοτήτων.

Ο Πίνακας Ανάθεσης Συχνοτήτων της ITU-R έχει χωριστεί σε 3 μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, η πρώτη από τις οποίες καλύπτει την Ευρώπη, την Αφρική και ένα μικρό τμήμα της Ασίας. Στον πίνακα αυτό, με μορφή υποσημειώσεων αναφέρονται και συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες για ορισμένες χώρες.

Κάποια ζώνη συχνοτήτων είναι πολύ συχνό να ανατίθεται σε περισσότερες από μία υπηρεσίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις επίσης οι υπηρεσίες που συνυπάρχουν σε μία ζώνη χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τις πρωτεύουσες και τις δευτερεύουσες. Ο χαρακτηρισμός αυτός σχετίζεται με κάποιου είδους προτεραιότητας σε περίπτωση συνύπαρξης και ορίζεται ως εξής:

- Η δευτερεύουσα υπηρεσία δε θα πρέπει να προκαλεί σε καμία περίπτωση παρεμβολή σε κάποια πρωτεύουσα που προϋπάρχει ή που πρόκειται να εγκατασταθεί.
- Η δευτερεύουσα υπηρεσία δεν μπορεί να απαιτήσει προστασία από παρεμβολή από οποιαδήποτε άλλη πρωτεύουσα υπηρεσία με την οποία μοιράζεται κάποια φασματική ζώνη ή πρόκειται να μοιραστεί.
- Η δευτερεύουσα υπηρεσία μπορεί να απαιτήσει προστασία από παρεμβολή από άλλες δευτερεύουσες υπηρεσίες, στις οποίες ανατέθηκε ζώνη συχνοτήτων και οι οποίες εγκαταστάθηκαν σε μεταγενέστερη ημερομηνία από την εν λόγω υπηρεσία.

### 2.2.1.2 Διαδικασία ανάθεσης συχνοτήτων

Με βάση τον πίνακα ανάθεσης συχνοτήτων της ITU-R, οργανισμοί τυποποίησης και ερευνητικοί φορείς σχεδιάζουν τα πρωτόκολλα των ασύρματων τεχνολογιών πρόσβασης και οι

## Κεφάλαιο 2. Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος

κατασκευαστές εξοπλισμών τα υλοποιούν. Σε κάθε χώρα η αρμόδια τοπική αρχή αναλαμβάνει την τελική ανάθεση συχνοτήτων στις διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης και στους διαφορετικούς παρόχους της υπηρεσίας. Πριν από κάθε προσπάθεια ανάθεσης συχνοτήτων γίνονται εκτενείς μελέτες ομοδιαλυτικής παρεμβολής και παρεμβολής γειτονικού διαύλου, έτσι ώστε να μπορούν να συνυπάρξουν τόσο χωρικά όσο και φασματικά συστήματα όμοιας ή διαφορετικής τεχνολογίας.

Αρκετές φορές μάλιστα, όπως συμβαίνει στη διαδικασία ανάθεσης συχνοτήτων για τα δορυφορικά συστήματα, θα πρέπει να ακολουθηθεί μία μακροχρόνια διαδικασία αρκετών βημάτων [13], που αρχίζει με τη δημοσίευση της πρόθεσης χρήσης κάποιας συχνότητας, συνεχίζει με μελέτες συντονισμού με τα υπάρχοντα συστήματα και καταλήγει με την τελική απόφαση της ανάθεσης.

Συμπερασματικά λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία ανάθεσης συχνοτήτων είναι αργή κι όχι ικανή να αντεπεξέλθει στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες. Σαν παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η διαδικασία ανάθεσης ζωνών συχνοτήτων για τις κινητές επικοινωνίες 3ης γενεάς, κατά την οποία οι ζώνες αυτές έπρεπε να ανατεθούν περισσότερο από 10 χρόνια πριν την έναρξη λειτουργίας των συστημάτων 3ης γενεάς, όταν ακόμα δεν ήταν ξεκάθαρο το τί θα ήταν η 3η γενεά [14].

Ενδεικτικά παραθέτουμε τον πίνακα 2.1 ανάθεσης συχνοτήτων για συστήματα προσωπικών και κινητών επικοινωνιών όπως αυτός διαμορφώθηκε τα τελευταία χρόνια της ευρείας εξάπλωσης των συστημάτων αυτών.

**Πίνακας 2.1:** Ανάθεση συχνοτήτων κινητών και προσωπικών επικοινωνιών 2ης και 3ης γενεάς

Τεχνολογία Πρόσβασης	Ζώνη		Τεχνολογία Πρόσβασης	Ζώνη	
	Από	Έως		Από	Έως
GSM850	869	894	WCDMA 3GPP/FDD 2	1930	1990
	824	849		1850	1910
GSM900	935	960	WCDMA 3GPP/FDD 3	1805	1880
	890	915		1710	1785
E-GSM	925	960	WCDMA 3GPP/TDD 1	2010	2025
	880	915		1900	1920
R-GSM	921	960	WCDMA 3GPP/TDD 2	1930	1990
	876	915		1850	1910
GSM1800	1805	1880	WCDMA 3GPP/TDD 3	1910	1930
	1710	1785		1830	1850
GSM1900	1930	1990	CT2	864	868
	1850	1910	DECT	944	948
WCDMA 3GPP/FDD 1	2110	2170			
	1920	1980			

Με βάση τον πίνακα 2.1 η κάθε υπηρεσία - τεχνολογία πρόσβασης έχει δικαίωμα να εκπέμπει μόνο στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων, την οποία απαγορεύεται να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία.

### 2.2.1.3 Υποχρησιμοποίηση του φάσματος

Παρόλο που η παραπάνω παγιωμένη πολιτική στατικών αδειοδοτήσεων υπηρέτησε γενικά τις ασύρματες επικοινωνίες άριστα στο παρελθόν, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για πρόσβαση στο φάσμα από ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών, χωρίς να υπάρχει η αντίστοιχη προσφορά, κάτι το οποίο θέτει υπό αμφισβήτηση τη μέχρι τώρα πολιτική των στατικών αδειοδοτήσεων φάσματος. Η τελευταία έχει αρκετά μειονεκτήματα.

Πρώτο της μειονέκτημα είναι η λογική πως σε διαφορετικές υπηρεσίες θα πρέπει να ανατίθενται διαφορετικές φασματικές περιοχές δεν ισχύει πλέον με τις σύγχρονες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης. Οι διαφορετικές βιομηχανίες ασύρματων τεχνολογιών, που ήταν στο παρελθόν διακριτές, αρχίζουν πλέον να συγχλίνουν και τα σύνορα διαχωρισμού των υπηρεσιών που παρέχονται με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών δεν είναι πλέον ξεκάθαρα. Ακόμα μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ των διαφορετικών υπηρεσιών αναμένεται με δίκτυα κορμού να συνενώνουν διαφορετικά συστήματα μαζί σχηματίζοντας σύνθετα δίκτυα, για τη βελτίωση της παρεχόμενης υπηρεσίας. Ως αποτέλεσμα, παλαιότεροι ρυθμιστικοί μηχανισμοί που μελετούσαν ξεχωριστά διαφορετικές υπηρεσίες σαν ξεχωριστές τεχνολογίες πρόσβασης δεν είναι πλέον κατάλληλοι, ούτε εφαρμόσιμοι. Επιπρόσθετα, έχει αποδειχτεί πως στατικές και μακροπρόθεσμες άδειες χρήσης φάσματος για χρήση από μία μόνο τεχνολογία πρόσβασης παρεμποδίζουν τις καινοτομίες και τις ερευνητικές προσπάθειες, εφόσον οι νέες τεχνολογίες κινούνται πιο γρήγορα από τις διαδικασίες αδειοδότησης.

Ένα δεύτερο μειονέκτημα της τρέχουσας πολιτικής αδειοδότησης είναι το ότι από αυτήν πηγάζει η υπο-χρησιμοποίηση του φάσματος τη στιγμή που υπάρχει έντονα η ανάγκη για νέες ελεύθερες φασματικές ζώνες. Τα περισσότερα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα υπόκεινται σε χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, κάτι το οποίο στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών μεταφράζεται σε μεταβολές του βαθμού χρησιμοποίησης του φάσματος. Για το λόγο αυτό μπορεί το φάσμα μιας υπηρεσίας να παραμένει αχρησιμοποίητο κάποια χρονική στιγμή σε κάποιο γεωγραφικό σημείο, τη στιγμή που σε μια άλλη υπηρεσία την ίδια χρονική στιγμή και στο ίδιο γεωγραφικό σημείο να υπάρχει έλλειψη φάσματος με συνέπεια παραδείγματος χάριν να απορρίπτονται κλήσεις.

Αποτέλεσμα αυτής της παγιωμένης πολιτικής είναι ένα μεγάλο μέρος τους φάσματος να χρησιμοποιείται σποραδικά ή και σπάνια. Η χρήση του φάσματος είναι συγκεντρωμένη σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, ενώ σημαντικό τμήμα του παραμένει αχρησιμοποίητο όπως δείχνουν πολλά αποτελέσματα μετρήσεων. Στο [15] αναφέρεται ότι η μέση φασματική χρησιμοποίηση ανέρχεται μόλις στο 10% . Σύμφωνα με την Αμερικανική Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC), χρονικές και γεωγραφικές διακυμάνσεις του βαθμού χρησιμοποίησης του αδειοδοτημένου φάσματος κυμαίνονται μεταξύ 15% και 85% [16].

Δεδομένης της υψηλής οικονομικής αξίας του ραδιο-φάσματος και της σημασίας της αποδοτικής χρησιμοποίησής του, είναι εμφανές ότι η κατασπατάλησή του πρέπει να αποφεύγεται. Η παγιωμένη στατική πολιτική πρέπει να αναβαθμιστεί στις σύγχρονες ανάγκες και να υιοθετήσει την ιδέα της Δυναμικής Χρήσης Φάσματος (Dynamic Spectrum Access - DSA) ή της

πολιτικής ανοιχτής πρόσβασης στο φάσμα Open Spectrum Access.

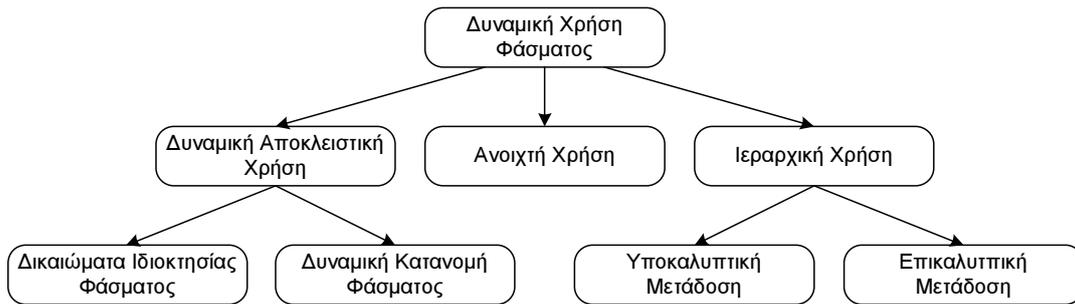
### 2.2.2 Δυναμική Χρήση Φάσματος

Η Δυναμική Χρήση Φάσματος (Δ.Χ.Φ. - Dynamic Spectrum Access (DSA)) σαν ιδέα έχει ξεκινήσει από την δυναμική κατανομή καναλιών στην περίπτωση ενός δικτύου μιας και μόνο τεχνολογίας πρόσβασης. Στην περίπτωση ενός κυφελωτού δικτύου κινητών επικοινωνιών η ιδέα της δυναμικής κατανομής καναλιών δίνει λύση σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε κάποια κυψέλη, με δανεισμό καναλιών, ή αλλιώς εύρους ζώνης, από γειτονικές κυψέλες μέχρι να υποχωρήσει η αυξημένη ζήτηση. Στην περίπτωση αυτή, όμως, το εύρος ζώνης που 'δανείζεται' είναι ήδη αδειοδοτημένο στη συγκεκριμένη υπηρεσία και στο συγκεκριμένο σύστημα. Αντίθετα, η Δυναμική Χρήση Φάσματος δεν προϋποθέτει καμία ρυθμιστική διαδικασία αδειοδότησης να έχει γίνει εκ των προτέρων. Σαν ορισμό μπορούμε να πούμε ότι:

*Τα DSA δίκτυα διαχειρίζονται και προσπελαύνουν το φάσμα αυτόνομα, με σκοπό τη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων στόχων ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας αλλά και του βαθμού χρησιμοποίησης του φάσματος.*

Τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, εν γένει δίκτυα Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών, θα προσφέρουν υψηλό εύρος ζώνης στους κινητούς χρήστες μέσω ετερογενών αρχιτεκτονικών τεχνολογιών πρόσβασης και τεχνικών δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα. Η μη αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος μπορεί να βελτιωθεί μέσω ευκαιριακής πρόσβασης σε φασματικές περιοχές που έχουν αδειοδοτηθεί σε άλλους χρήστες-υπηρεσίες, με την προϋπόθεση ότι δεν θα προκαλείται παρεμβολή σε αυτούς. Ο παραπάνω τρόπος πρόσβασης στο φάσμα είναι αυτό που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως opportunistic spectrum access και έχει δείξει ότι είναι ικανός να βελτιώσει κατά πολύ τη χρησιμοποίηση του φάσματος. Η υλοποίηση των δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος κρύβει πολλές ερευνητικές προκλήσεις λόγω του μεγάλου εύρους φάσματος που αυτά θα πρέπει να είναι ικανά να προσπελάσουν, αλλά και λόγω των απαιτήσεων ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Τα τεμαχικά θα πρέπει επίσης να παρέχουν αυτές τις υπηρεσίες διατηρώντας τη συνδεσιμότητά τους με το δίκτυο καθώς θα κινούνται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, στις οποίες η διαθεσιμότητα του φάσματος μπορεί να ποικίλει σημαντικά.

Το ενδιαφέρον για την καινούργια τεχνολογία Δυναμικής Χρήσης Φάσματος έχει ήδη αρχίσει να περνά από την ερευνητική κοινότητα και προς τους αρμόδιους φορείς συντονισμού του ραδιο-φάσματος [14]. Η ITU-R έχει αναγνωρίσει την ανάγκη για βελτίωση της πολιτικής διαχείρισης φάσματος προς κατευθύνσεις που θα οδηγήσουν σε υψηλότερους βαθμούς χρησιμοποίησής του. Αλλά και σε εθνικό επίπεδο η Βρετανική κυβέρνηση έχει υποστηρίξει ότι θα πρέπει οι κάτοχοι του φάσματος να έχουν τη δυνατότητα να 'δανείζονται' σε τρίτους και για προσωρινή χρήση το φάσμα που έχει αδειοδοτηθεί σε αυτούς. Η Αμερικάνικη επιτροπή επικοινωνιών (FCC) έχει προχωρήσει περισσότερο, αναγνωρίζοντας την υποχρεσιμοποίηση



Σχήμα 2.6: Κατηγοριοποίηση ερευνητικών προσεγγίσεων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

του φάσματος και τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν οι κενές περιοχές με τεχνικές ευκαιριακής πρόσβασης.

Η τεχνολογία Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών είναι η τεχνολογία-κλειδί που επιτρέπει την αυτόνομη χρήση του φάσματος με δυναμικό τρόπο, καθότι έμφυτα έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται στο περιβάλλον της, σημαντικό μέρος του οποίου είναι και το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.

### 2.2.2.1 Ταξινόμηση πολιτικών Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ένας πολύ γενικός ορισμός ο οποίος δείχνει το γενικό σκοπό λειτουργίας των δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Πίσω από αυτόν βρίσκονται πολλές διαφορετικές τεχνολογικές ερευνητικές προσεγγίσεις που όλες έχουν τον ίδιο σκοπό: την αυτόνομη πρόσβαση στο ραδιο-φάσμα με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησής του. Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν [17] όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6.

**2.2.2.1.1 Μοντέλο Δυναμικής Αποκλειστικής Χρήσης.** Το μοντέλο αυτό διατηρεί τη βασική δομή της τρέχουσας πολιτικής κατανομής φάσματος: οι φασματικές ζώνες αδειοδοτούνται σε υπηρεσίες για αποκλειστική χρήση από αυτές. Η κύρια ιδέα όμως είναι να εισαχθεί ευελιξία για να βελτιωθεί η χρησιμοποίηση του φάσματος. Η πρώτη από τις υποκατηγορίες που βρίσκονται κάτω από το μοντέλο Δυναμικής Αποκλειστικής Χρήσης, το μοντέλο Δικαιωμάτων Ιδιοκτησίας του Φάσματος (Spectrum Property Rights), επιτρέπει τη βελτιστοποίηση χρησιμοποίησης του φάσματος μέσω των νόμων της αγοράς και του εμπορίου [18], εφόσον επιτρέπει στους ιδιοκτήτες φασματικών περιοχών να ενοικιάζουν και να πωλούν δυναμικά φασματικές ζώνες σε άλλους παρόχους υπηρεσίας, οι οποίοι ενδέχεται να χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες. Η δεύτερη υποκατηγορία αφορά τη γνωστή Δυναμική Κατανομή Φάσματος (Dynamic Spectrum Allocation) από την οποία όπως αναφέρθηκε προέκυψε και η όλη ιδέα της Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Η Δυναμική Κατανομή Φάσματος [14] σκοπεύει στο να εκμεταλλευτεί τη χωρική και χρονική στατιστική κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης διαφορετικών υπηρεσιών. Ωστόσο, και οι δύο αυτές προσεγγίσεις δεν μπορούν να εξαφανίσουν τα φασματικά κενά που οφείλονται στην εκρηκτική φύση της τηλεπικοινωνιακής

κίνησης.

**2.2.2.1.2 Μοντέλο Ανοιχτής Χρήσης Φάσματος.** Το μοντέλο αυτό υιοθετεί την ανοιχτή, μη-αδειοδοτημένη χρήση του φάσματος από τους χρήστες. Συνήγορος αυτής της ιδέας είναι η επιτυχία που έχουν τα ασύρματα τοπικά δίκτυα που λειτουργούν στη μη αδειοδοτημένη ISM ζώνη συχνοτήτων. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν προταθεί τόσο κεντρικές [19] όσο και κατανεμημένες [20], [21] αρχιτεκτονικές δικτύου, με σκοπό να ερευνήσουν τις τεχνολογικές προκλήσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο μοντέλο διαχείρισης φάσματος.

**2.2.2.1.3 Μοντέλο Ιεραρχικής Χρήσης.** Το Μοντέλο Ιεραρχικής Χρήσης του φάσματος υιοθετεί μία ιεραρχική δομή προσπέλασης στο φάσμα με Πρωτεύοντες και Δευτερεύοντες χρήστες, πρωτοεμφανίστηκε από τον Mitola με τον όρο *Δεξαμενή Φάσματος* (Spectrum Pooling) στο [22] και αποτελεί το κύριο αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος DARPA XG. Η βασική ιδέα είναι να επιτραπεί η χρήση αδειοδοτημένου φάσματος σε Δευτερεύοντες χρήστες, με τον περιορισμό οι παρεμβολές που θα προκαλούν προς τους Πρωτεύοντες χρήστες να μην υπερβαίνουν κάποιο κατώφλι.

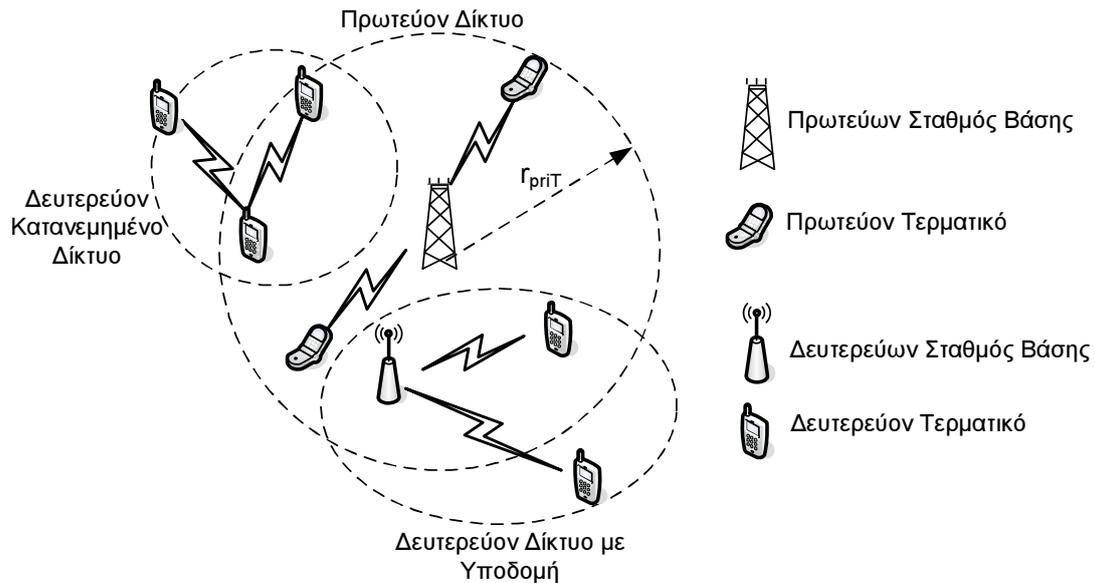
Το μοντέλο Ιεραρχικής Χρήσης είναι αυτό με το οποίο ασχολείται η παρούσα διατριβή, όσον αφορά τα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο σε περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, περιγράφεται αναλυτικότερα στη συνέχεια (βλ. § 2.3) και χωρίζεται περαιτέρω, όπως θα δούμε στην παράγραφο 2.2.3.4.3, σε δύο κατηγορίες: Επικαλυπτική πρόσβαση και Υποκαλυπτική πρόσβαση ανάλογα με την τεχνική μετάδοσης που χρησιμοποιείται.

### 2.2.2.2 Αρχιτεκτονική δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

Πριν περάσουμε στις λειτουργίες που πρέπει να υλοποιηθούν στα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών ώστε αυτά να μπορούν να υλοποιήσουν δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, ας δούμε πρώτα την αρχιτεκτονική και την ονοματολογία που διέπει τα δίκτυα αυτά. Η ονοματολογία που περιγράφεται στη συνέχεια αντιστοιχεί στο μοντέλο δικτύων Ιεραρχικής Χρήσης Φάσματος, στα οποία επιτρέπεται σε Δευτερεύοντα συστήματα η χρήση φάσματος, το οποίο είναι αδειοδοτημένο σε Πρωτεύοντα συστήματα, υπό συγκεκριμένους όμως περιορισμούς.

Στο σχήμα 2.7 μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής.

- Το υπάρχον δίκτυο το οποίο έχει άδεια να λειτουργεί και να εκπέμπει σε συγκεκριμένες στατικές ζώνες συχνοτήτων και το οποίο μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε δίκτυο 2ης, 3ης γενεάς κινητών επικοινωνιών ή ένα δίκτυο οποιασδήποτε υπηρεσίας ευρείας ή μη εκπομπής. Το δίκτυο αυτό αναφέρεται ως *Πρωτεύον δίκτυο* και πρέπει να λειτουργεί ανεμπόδιστα και χωρίς τεχνολογικές τροποποιήσεις. Στο σχήμα 2.7 το Πρωτεύον δίκτυο παρουσιάζεται σαν ένα σύστημα με σταθμό βάσης ο οποίος έχει ακτίνα ραδιοκάλυψης  $r_{priT}$ .



Σχήμα 2.7: Αρχιτεκτονική δικτύων Δυναμικής - Ιεραρχικής Χρήσης Φάσματος

- Το δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος το οποίο επιτρέπεται να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε φασματική περιοχή με τον περιορισμό να μη δημιουργήσει πρόβλημα στο Πρωτεύον δίκτυο - κάτοχο της εκάστοτε φασματικής ζώνης στην οποία λειτουργεί. Το δίκτυο αυτό αναφέρεται ως Δευτερεύον δίκτυο και είναι υπεύθυνο για την τήρηση του παραπάνω περιορισμού. Τα Δευτερεύοντα δίκτυα αναφέρονται στο εξής και ως δίκτυα DSA ή δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

### 2.2.3 Συναφείς λειτουργίες Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών

Η γνωστική ιδιότητα των Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών, όπως είδαμε στην παράγραφο 2.1.2, καθιστά δυνατή την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο ώστε το τερματικό να καθορίζει συγκεκριμένες παραμέτρους επικοινωνίας και να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του. Για την περίπτωση κατά την οποία η γνωστική ιδιότητα εφαρμόζεται στη λειτουργία του συστήματος σε περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, οι λειτουργίες του γνωστικού κύκλου που έχουν περιγραφεί στο σχήμα 2.5 συγκεκριμενοποιούνται σε αυτές του σχήματος 2.8 οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Οι τεχνικές Δυναμικής Χρήσης Φάσματος επιτρέπουν στα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών να εντοπίζουν και να χρησιμοποιούν το καλύτερο διαθέσιμο κανάλι. Οι νέες λειτουργίες που θα πρέπει να υλοποιηθούν στη στοίβα των πρωτοκόλλων του δικτύου, οι οποίες δεν υπήρχαν στα έως τώρα παραδοσιακά συστήματα, είναι:

**Ανίχνευση Φάσματος.** Μέτρηση φάσματος και ανάλυση προς αναγνώριση τμημάτων διαθέσιμου φάσματος (φασματικών οπών), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να προκληθεί παρεμβολή στις υπάρχουσες αδειοδοτημένες εκπομπές. Ανίχνευση φασματικών ζωνών που χρησιμοποιούνται από τους Πρωτεύοντες χρήστες.



Σχήμα 2.8: Γνωστικός Κύκλος στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

**Διαχείριση Φάσματος.** Αναγνώριση του καλύτερου διαθέσιμου φάσματος που καλύπτει τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη του δικτύου Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

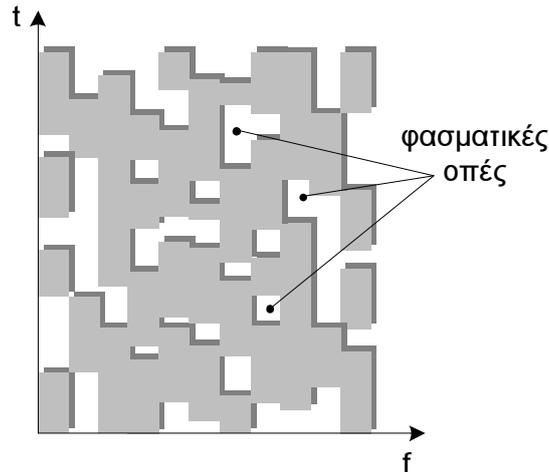
**Κινητικότητα Φάσματος.** Διατήρηση σύνδεσης/συνόδου και παροχής υπηρεσίας κατά τη μετάβαση σε διαφορετική φασματική περιοχή. Η μετάβαση αυτή μπορεί να γίνει είτε λόγω ανίχνευσης καλύτερου διαθέσιμου φάσματος είτε λόγω ανίχνευσης δραστηριότητας Πρωτεύοντος χρήστη στο τρέχον κανάλι που χρησιμοποιείται.

**Πολλαπλή πρόσβαση Φάσματος.** Συντονισμός της πρόσβασης των τερματικών του Δευτερεύοντος δικτύου στο φάσμα. Προγραμματισμός της πρόσβασης και κατανομή του διαθέσιμου φάσματος.

Οι παραπάνω λειτουργίες επιτρέπουν την ανάπτυξη πρωτοκόλλων επικοινωνίας που θα είναι ενήμερα για το φάσμα, στο οποίο θα λειτουργούν, και θα προσαρμόζονται σε αυτό. Η Δυναμική Χρήση Φάσματος έρχεται σε αντίθεση με τα συμβατικά πρωτόκολλα επικοινωνιών, τα οποία είναι σχεδιασμένα για δίκτυα με προκαθορισμένη και στατική φασματική ζώνη λειτουργίας, τα οποία έχουν και την αποκλειστικότητα της πρόσβασης σε αυτήν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται κάθε μία από τις παραπάνω λειτουργίες. Η παρουσίασή τους είναι αρκετά συνοπτική καθώς κάθε μία από αυτές αποτελεί ένα ή περισσότερα μεγάλα πεδία έρευνας και θα ήταν εκτός του αντικείμενου του παρόντος η εκτενέστερη αναφορά.

### 2.2.3.1 Ανίχνευση φασματικών οπών

Μία σημαντική απαίτηση στα δίκτυα DSA είναι η ανίχνευση των φασματικών κενών ή οπών, spectrum holes ή white spaces όπως αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και όπως πρώτο-αναφέρθηκαν στο άρθρο [3]. Τα φασματικά αυτά κενά απεικονίζονται στο σχήμα 2.9 σαν λευκές περιοχές. Οι γκριζες περιοχές αναπαριστούν εκπομπές από το Πρωτεύον δίκτυο. Οι Φασματικές οπές είναι περιοχές του φάσματος συγκεκριμένων συχνοτικών ορίων που παραμένουν αχρησιμοποίητες για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Τόσο οι συχνότητες που



Σχήμα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση φασματικών οπών

παραμένουν ανενεργές όσο και η χρονική διάρκεια και θέση τους είναι άγνωστες και θα πρέπει να ανιχνευτούν από το Δευτερεύον δίκτυο την ώρα που εμφανίζονται.

Ο πιο αποδοτικός τρόπος ανίχνευσης φασματικών οπών θα ήταν η ανίχνευση των Πρωτεύοντων δεκτών οι οποίοι λαμβάνουν δεδομένα και βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια  $r_{secT}$  του δευτερεύοντος τερματικού που εκτελεί την ανίχνευση, επειδή ακριβώς εκεί προκαλείται η παρεμβολή προς το Πρωτεύον σύστημα. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, είναι εξαιρετικά δύσκολη η ανίχνευση της ύπαρξης δεκτών και ο μόνος τρόπος θα ήταν η διαρροή ενέργειας από τον τοπικό ταλαντωτή του Πρωτεύοντος δέκτη προς την κεραία του, κάτι που όμως θα σήμαινε εξαιρετικά μικρή ακτίνα ανίχνευσης [23]. Έτσι οι πρόσφατες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην ανίχνευση πομπών χωρίς ωστόσο να έχουν αποκλειστεί και άλλες μέθοδοι. Οι τεχνικές ανίχνευσης φάσματος χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι:

**2.2.3.1.1 Ανίχνευση πομπών (Μη-συνεργατική ανίχνευση).** Το γνωστικό ραδιοσύστημα πρέπει να ξεχωρίσει ποιες είναι οι φασματικές περιοχές που δε χρησιμοποιούνται τη χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η ανίχνευση. Δηλαδή πρέπει να έχει την ικανότητα να ανιχνεύσει σήματα από τους πομπούς του Πρωτεύοντος δικτύου. Η ανίχνευση, λοιπόν, αυτή βασίζεται στην τοπική παρατήρηση. Οι τεχνικές ανίχνευσης πομπών είναι κατά κύριο λόγο τρεις:

- **Ανιχνευτής προσαρμοσμένου φίλτρου.** Όταν υπάρχει ικανοποιητική πληροφορία για το εκπεμπόμενο σήμα του Πρωτεύοντος χρήστη, τότε ο βέλτιστος ανιχνευτής είναι το προσαρμοσμένο φίλτρο, εφόσον μεγιστοποιεί το σηματοθρομβικό λόγο. Ενώ η ανίχνευση αυτού του είδους είναι αρκετά γρήγορη επεξεργαστικά και με μεγάλες πιθανότητες επιτυχίας, έχει το μειονέκτημα ότι προϋποθέτει εκ των προτέρων γνώση για το είδος του εκπεμπόμενου σήματος (διαμόρφωση, μορφή παλμού, μορφή πακέτου). Έτσι, αν η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη ή ακριβής, η συγκεκριμένη μέθοδος δρα ανεπαρκώς.
- **Ανιχνευτής ιδιότητας κυκλο-στατικότητας** Γενικά, τα διαμορφωμένα σήμα-

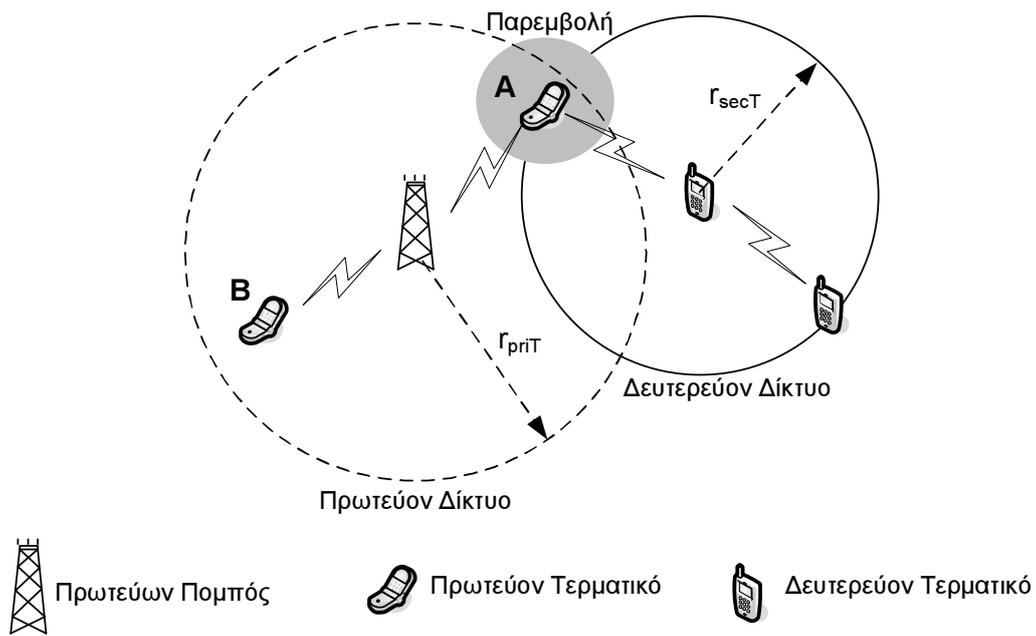
τα που εμπεριέχουν ημιτονικά φέροντα, σειρές παλμών, επαναλαμβανόμενους κώδικες διασποράς και ακολουθίες μεταπήδησης συχνότητας ή προθέματα κυκλικής επέκτασης, έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό μία έμφυτη περιοδικότητα. Τα σήματα αυτά, σε αντίθεση με το λευκό θόρυβο, χαρακτηρίζονται από κυκλο-στατικότητα εφόσον υπάρχει περιοδικότητα στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης [24]. Ο Ανιχνευτής ιδιότητας κυκλο-στατικότητας χρησιμοποιεί μία συνάρτηση αυτοσυσχέτισης για να ξεχωρίζει την ενέργεια των διαμορφωμένων σημάτων από αυτήν του λευκού θορύβου. Έτσι, ο ανιχνευτής αυτός συμπεριφέρεται πιο αποδοτικά από τον απλό ανιχνευτή ενέργειας, έχοντας την ικανότητα να διακρίνει την ενέργεια ενός υπαρκτού διαμορφωμένου σήματος από αυτήν του λευκού θορύβου. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η υλοποίησή του είναι πολύπλοκη υπολογιστικά και η ανίχνευση χρονοβόρα, καθότι απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι παρατήρησης ώστε να συμπεριληφθούν αρκετά δείγματα [25], [26], [27].

- **Ανιχνευτής ενέργειας.** Ένας απλός ανιχνευτής ενέργειας ολοκληρώνει το τετράγωνο των δειγμάτων του λαμβανόμενου σήματος μετά από ένα ζωνοπερατό φίλτρο εύρους  $W$  για μια περίοδο παρατήρησης  $T$ . Το αποτέλεσμα συγκρίνεται με κάποιο κατώφλι  $\lambda$  και στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερο δίνει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη σήματος στο συγκεκριμένο εύρος του φίλτρου. Ο Ανιχνευτής ενέργειας απαιτεί υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο από τον Ανιχνευτή της ιδιότητας κυκλο-στατικότητας για να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά είναι σαφώς απλούστερος στην υλοποίηση και με λιγότερες απαιτήσεις σε επεξεργασία.

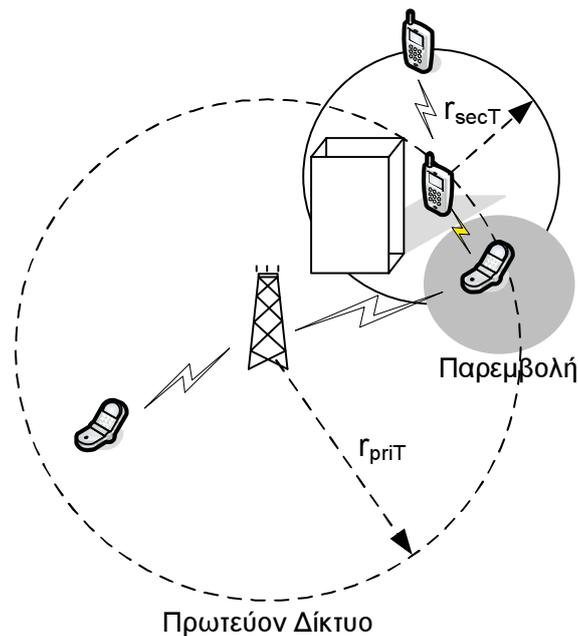
**2.2.3.1.2 Συνεργατική Ανίχνευση.** Η βασική αιτία για την οποία χρησιμοποιείται ανίχνευση πομπών είναι γιατί, όπως είδαμε, η ανίχνευση Πρωτεύοντων δεκτών πρέπει να πραγματοποιείται σε πολύ μικρή απόσταση από αυτούς και επειδή η θέση τους είναι άγνωστη στα τερματικά του Δευτερεύοντος δικτύου. Έτσι, η ανίχνευση θα πρέπει να βασιστεί αποκλειστικά σε ασθενή σήματα που προέρχονται από τους Πρωτεύοντες Πομπούς.

Με την ανίχνευση πομπών όμως, το Δευτερεύον δίκτυο δεν μπορεί να αποφύγει την παρεμβολή προς το Πρωτεύον, λόγω του φαινομένου του κρυμμένου τερματικού, παραδείγματα του οποίου φαίνονται στο σχήμα 2.10. Στην περίπτωση του σχήματος 2.10(α'), λόγω της ακτίνας ανίχνευσης του Δευτερεύοντος τερματικού  $r_{\text{secT}}$ , η ύπαρξη εκπομπής δεν ανιχνεύεται από το Πρωτεύον δίκτυο κι έτσι προκαλείται παρεμβολή σε υπάρχον Πρωτεύων δέκτη, ο οποίος είναι μέσα στην εμβέλεια του Δευτερεύοντος τερματικού. Το παράδειγμα αυτό αφορά την αβεβαιότητα ύπαρξης δεκτών καθότι αν δεν υπήρχε ο πρωτεύων δέκτης Α αλλά μόνο ο Β δε θα δημιουργείτο πρόβλημα. Παρόμοιο πρόβλημα μπορεί να δημιουργείται και λόγω του φαινομένου σκίασης ή των διαλείψεων, και αφορά την αβεβαιότητα ύπαρξης πομπών, όπως στο σχήμα 2.10(β'). Ως συνέπεια, η χρήση της πληροφορίας ανίχνευσης από άλλα τερματικά του Δευτερεύοντος δικτύου είναι απαραίτητη.

Στην περίπτωση της μη - συνεργατικής ανίχνευσης, που είδαμε παραπάνω, τα Δευτερεύοντα τερματικά ανιχνεύουν σήματα Πρωτεύοντων εκπομπών ανεξάρτητα μέσω των τοπικών πα-



(α') Δημιουργία κρυμμένου τερματικού λόγω εμβέλειας



(β') Δημιουργία κρυμμένου τερματικού λόγω σκίασης

Σχήμα 2.10: Φαινόμενο κρυμμένου τερματικού κατά την ανίχνευση φασματικών οπών

ρατηρήσεων - μετρήσεων που εκτελούν. Η συνεργατική ανίχνευση είναι μέθοδος φασματικής ανίχνευσης όπου η πληροφορία από πολλά Δευτερεύοντα τερματικά συνδυάζεται, προκειμένου το αποτέλεσμα να είναι πιο ασφαλές. Η συνεργατική ανίχνευση μπορεί να υλοποιηθεί είτε σε

κεντρική αρχιτεκτονική δικτύου είτε σε κατανεμημένη. Σε κεντρική αρχιτεκτονική ο σταθμός βάσης του Δευτερεύοντος δικτύου αναλαμβάνει και το ρόλο να συγκεντρώσει τα τοπικά αποτελέσματα της ανίχνευσης από τα διασκορπισμένα τερματικά, στη συνέχεια να καταλήξει στο ποια είναι τα φασματικά κενά και τελικά να τα διοχετεύσει στα τερματικά προκειμένου να τα εκμεταλλευθούν. Σε κατανεμημένες λύσεις τα τερματικά θα πρέπει να ανταλλάξουν τοπικά τέτοιες πληροφορίες και να προκύψουν τοπικά αποτελέσματα χρήσης φασματικών οπών. Ένας κατανεμημένος τρόπος ανταλλαγής των αποτελεσμάτων φασματικής ανίχνευσης και συμφωνίας σε αυτά ονομάζεται Boosting Protocol και παρουσιάζεται στο [28].

Η συνεργατική ανίχνευση είναι και θεωρητικά πιο ακριβής εφόσον ελαχιστοποιείται η αβεβαιότητα ύπαρξης Πρωτευόντων σημάτων, η οποία προκύπτει λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης, του φαινομένου σκίασης που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.10(β') και γενικά των διαλείψεων του ασύρματου καναλιού, που είναι η κύρια αιτία για την οποία η μη-συνεργατική ανίχνευση δεν είναι ακριβής [29] [30].

Για τις κεντρικές αρχιτεκτονικές ανίχνευσης φάσματος έχει προταθεί και η χρήση ενός ξεχωριστού, αυτόνομου, επικουρικού δικτύου αισθητήρων με κεντρικό ελεγκτή που θα έχει το ρόλο να ενημερώνει το Δευτερεύον δίκτυο για τα φασματικά κενά, τοποθετώντας έτσι τη λειτουργία ανίχνευσης που πρέπει να επιτελείται σε ξεχωριστές οντότητες.

Παρόλο που οι συνεργατικές τεχνικές ανίχνευσης φάσματος παρέχουν πιο ακριβή αποτελέσματα στην ανεύρεση φασματικών κενών, έχουν το σημαντικό μειονέκτημα ότι χρειάζονται επιπλέον λειτουργίες, όπως τη συγχέντρωση τοπικών παρατηρήσεων και την επανεκπομπή του τελικού αποτελέσματος, κάτι που δημιουργεί πρόσθετο φόρτο στο δίκτυο.

**2.2.3.1.3 Θερμοκρασία Παρεμβολής.** Τυπικά, τα επίπεδα παρεμβολής που προκαλεί μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη σε μια άλλη ρυθμίζονται στους πομπούς. Αυτό σημαίνει ότι η παρεμβολή μπορεί να ελεγχθεί στους πομπούς μέσω της ακτινοβολούμενης ισχύος, της μάσκας εκπομπής καθώς και της θέσης τους. Σχετικά πρόσφατα, λόγω του ότι η παρεμβολή είναι φαινόμενο που συμβαίνει στους δέκτες και παρόλο που η αντιμετώπισή της γίνεται έως σήμερα στους πομπούς, έχει οριστεί ένα νέο μοντέλο για τη μέτρησή της, το οποίο ονομάζεται *θερμοκρασία παρεμβολής* [3]. Το μοντέλο αυτό υιοθετήθηκε και από την αμερικανική FCC η οποία το 2003 πρότεινε τη χρήση του για τη βελτίωση της διαχείρισης του φάσματος.

Το μοντέλο *θερμοκρασίας παρεμβολής* δείχνει έναν δέκτη σχεδιασμένο να λειτουργεί σε έως μια μέγιστη απόσταση από τον πομπό, στην οποία η λαμβανόμενη ισχύς πλησιάζει το επίπεδο του θορύβου. Το επίπεδο αναφοράς του θορύβου ανεβαίνει καθώς υπάρχουν και άλλα παρεμβάλλοντα σήματα μέσα στην περιοχή κάλυψης. Το μοντέλο *θερμοκρασίας παρεμβολής* χειρίζεται την παρεμβολή στο δέκτη μέσω του ορίου *θερμοκρασίας παρεμβολής*, το οποίο αναπαριστά το επίπεδο παρεμβολής που ο δέκτης μπορεί να ανεχτεί. Με άλλα λόγια, το μοντέλο *θερμοκρασίας παρεμβολής* δίνει τη συνολική ενέργεια από πολλαπλές πηγές εκπομπής και θέτει ένα μέγιστο όριο το οποίο πρέπει να τηρείται. Στο [31] η *θερμοκρασία παρεμβολής*

$T_I$  δίνεται ως:

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(f_c, B)}{kB}, \quad (2.1)$$

όπου  $P_I(f_c, B)$  η ισχύς παρεμβολής σε Watt στη φέρουσα συχνότητα  $f_c$ , ληφθείσα σε εύρος ζώνης  $B$  μετρημένο σε Hz και  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/°K.

Επομένως, όσο οι χρήστες ενός Δευτερεύοντος δικτύου χρησιμοποιούν κάποια φασματική περιοχή και δεν υπερβαίνουν το παραπάνω όριο με τις εκπομπές τους, μπορούν να χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη φασματική περιοχή, η οποία θα ανιχνεύεται με τον τρόπο αυτό ως φασματικό κενό, αλλά με συγκεκριμένους περιορισμούς. Η Ανίχνευση φασματικών οπών βασισμένη στην θερμοκρασία παρεμβολής είναι αρκετά δύσκολη, ωστόσο, να υλοποιηθεί. Η δυσκολία αυτή έγκειται στο ότι χρειάζεται γνώση για τη θέση και τα τρέχοντα επίπεδα παρεμβολής που δέχονται οι Πρωτεύοντες δέκτες, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί αν υπάρχει περιθώριο για επιπλέον παρεμβολή στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή και άρα αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

**2.2.3.1.4 Μετρητικά Επίδοσης Ανίχνευσης Φάσματος.** Όλες οι παραπάνω μέθοδοι ανίχνευσης φασματικών οπών είναι στο επίκεντρο ερευνητικών προσπαθειών βελτίωσής τους. Ως μέτρα επίδοσης των μεθόδων ανίχνευσης φασματικών οπών έχουν κυριαρχήσει δύο μεγέθη. Το πρώτο είναι η πιθανότητα ανίχνευσης ενός Πρωτεύοντος σήματος δεδομένου ότι το σήμα υπάρχει. Το δεύτερο είναι η πιθανότητα λανθασμένης ανίχνευσης Πρωτεύοντος σήματος ή εσφαλμένου συναγερμού (false alarm), όπως έχει επικρατήσει να λέγεται. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού αναφέρεται στην πιθανότητα να εκτιμηθεί ότι υπάρχει Πρωτεύουσα εκπομπή δεδομένου ότι δεν υπάρχει στην πραγματικότητα.

Γενικά μια μέθοδος ανίχνευσης είναι επιθυμητό να επιτυγχάνει μεγάλη πιθανότητα ανίχνευσης και μικρή πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού. Μικρή πιθανότητα ανίχνευσης σημαίνει υψηλά επίπεδα ανεπιθύμητων παρεμβολών από το Δευτερεύον σύστημα προς το Πρωτεύον, κάτι που πρέπει να αποφεύγεται. Μεγάλη πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού σημαίνει ότι πολλές ευκαιρίες - φασματικές οπές δε χρησιμοποιούνται επειδή εκτιμάται ότι εκεί υπάρχει εκπομπή από το Πρωτεύον δίκτυο, άρα οδηγεί σε χαμηλή χρησιμοποίηση του φάσματος.

Τέλος, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό αλγορίθμων ανίχνευσης φασματικών οπών είναι και η περίοδος που πρέπει να εκτελείται η διαδικασία αυτή. Η χρησιμοποίηση του φάσματος από το Πρωτεύον δίκτυο δεν είναι σταθερή με το χρόνο. Έτσι θα πρέπει περιοδικά να ανιχνεύονται τα τρέχοντα φασματικά κενά που είναι προς χρησιμοποίηση. Το πόσο συχνά θα εκτελείται φασματική ανίχνευση εξετάζεται αναλυτικότερα στη συνέχεια στην παράγραφο 2.3.2.2.

### 2.2.3.2 Διαχείριση φάσματος

Στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος οι φασματικές οπές προς χρησιμοποίηση είναι απλωμένες σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, το οποίο περιλαμβάνει τόσο αδειοδοτημένες περιοχές σε διάφορες υπηρεσίες όσο και μη αδειοδοτημένες όπως η ISM ζώνη (Industrial Scientific

and Medical Band). Οι φασματικές οπές έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά τόσο λόγω του χρονομεταβλητού και συχνοεπιλεκτικού ασύρματου διαύλου, όσο και αυτής καθεαυτής της κεντρικής τους συχνότητας και του εύρους το οποίο έχουν.

Τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος θα πρέπει ανάμεσα από αυτά τα φασματικά κενά ποικίλων χαρακτηριστικών να επιλέξουν τα καλύτερα δυνατά, που θα καλύπτουν τις εκάστοτε ανάγκες ποιότητας υπηρεσίας. Στα δίκτυα αυτά, χρειάζονται νέες λειτουργίες διαχείρισης φάσματος, προκειμένου να είναι υλοποιήσιμη αυτή η δυνατότητα. Οι λειτουργίες αυτές είναι η *ανάλυση φάσματος* και η *απόφαση φάσματος*, οι οποίες πρέπει να επιτελούνται τόσο στο φυσικό στρώμα του επιπέδου αναφοράς OSI όσο και σε υψηλότερα επίπεδα επιβάλλοντας, έτσι μια διαστρωματική σχεδίαση στα δίκτυα (cross-layer design).

**2.2.3.2.1 Ανάλυση Φάσματος.** Τα φασματικά κενά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, τα οποία τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών μπορούν να ποσοτικοποιήσουν. Αυτό, στη συνέχεια, θα αξιοποιηθεί κατά την επιλογή της καταλληλότερης ζώνης για τις ανάγκες του χρήστη.

Κάθε φασματική οπή χαρακτηρίζεται όχι μόνο από το χρονομεταβλητό ασύρματο δίαυλο αλλά και από τη δραστηριότητα των Πρωτευόντων τερματικών και από το εύρος και την κεντρική της συχνότητα. Στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος η 'ποιότητα' ενός συγκεκριμένου φασματικού κενού μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις εξής παραμέτρους:

**Παρεμβολή.** Ορισμένες φασματικές οπές είναι περισσότερο συνωστισμένες από άλλες λόγω της έντονης παρουσίας Πρωτευόντων εκπομπών σε αυτές. Από αυτήν την παράμετρο και τα επιτρεπτά επίπεδα παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο μπορεί να εκτιμηθεί η επιτρεπόμενη εκπεμπόμενη ισχύς στα συγκεκριμένα φασματικά κενά.

**Απώλειες διαδρομής.** Από την κεντρική συχνότητα του φασματικού κενού μπορεί να εκτιμηθούν οι απώλειες διαδρομής εκπεμπόμενου σήματος για το Δευτερεύον δίκτυο και σε συνδυασμό με την επιτρεπόμενη ισχύ μπορεί να εκτιμηθεί η εμβέλεια της εκπομπής.

**Σφαλματα ασύρματης ζεύξης.** Ανάλογα με την επιλογή διαμόρφωσης, το είδος διαλείψεων του ασύρματου καναλιού και την εκπεμπόμενη ισχύ, ο ρυθμός σφαλμάτων της ασύρματης ζεύξης αλλάζει.

**Καθυστέρηση Επιπέδου Ζεύξης.** Λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών του φυσικού επιπέδου σε κάθε φασματική οπή, το οποίο εισάγει διαφορετικό ρυθμό σφαλμάτων και ρυθμό απώλειας πακέτων, μπορεί να επιλεγούν και διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Τα διαφορετικά αυτά πρωτόκολλα μπορεί να εμπεριέχουν διαφορετικούς αλγορίθμους επανεκπομπής πακέτων και να εισάγουν διαφορετική μέση καθυστέρηση στη μετάδοση.

**Χρόνος Κατοχής.** Η δραστηριότητες των Πρωτευόντων δικτύων μπορεί να ποικίλλουν σε διαφορετικές φασματικές ζώνες, καθότι μπορεί αυτές να εξυπηρετούν διαφορετικές υπηρεσίες με εντελώς διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

## Κεφάλαιο 2. Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος

Τα διαφορετικά αυτά στατιστικά έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικούς μέσους χρόνους κατοχής ενός φασματικού κενού από το Δευτερεύον δίκτυο. Δεδομένου ότι όταν εμφανίζονται Πρωτεύοντες χρήστες σε κάποιο φασματικό κενό τότε το Δευτερεύον δίκτυο δεν έχει πλέον δικαίωμα πρόσβασης σε αυτό, ο χρόνος κατοχής για ένα φασματικό κενό δείχνει το πόσο χρόνο κατά μέσο όρο μπορεί το Δευτερεύον δίκτυο να χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο φασματικό κενό.

**2.2.3.2.2 Απόφαση Επιλογής Φάσματος.** Όταν θα έχει ολοκληρωθεί ο χαρακτηρισμός όλων των διαθέσιμων φασματικών οπών, με ποσοτικοποίηση των παραπάνω παραμέτρων, θα πρέπει να επιλεγούν οι κατάλληλες, για την τρέχουσα εκπομπή, λαμβάνοντας υπόψη της απαιτήσεις ποιότητας. Έτσι, η λειτουργία της απόφασης θα πρέπει να είναι ενήμερη για τα χαρακτηριστικά της κάθε φασματικής οπής, τις τρέχουσες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του χρήστη και με βάση κάποιο αλγόριθμο απόφασης να μπορεί να επιλέξει τις κατάλληλες φασματικές οπές για χρήση. Οι αλγόριθμοι αυτοί θα βασίζονται όχι μόνο σε στιγμιαίες παρατηρήσεις αλλά και σε παλαιότερες, αξιοποιώντας έτσι την δυνατότητα μάθησης που έχουν τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών.

### 2.2.3.3 Κινητικότητα φάσματος

Τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος σκοπεύουν στο να χρησιμοποιούν κάθε φορά το καλύτερο διαθέσιμο κανάλι. Η κινητικότητα φάσματος αναφέρεται στη λειτουργία κατά την οποία ένα τερματικό του δικτύου αλλάζει τη συχνότητα λειτουργίας του.

Η κινητικότητα φάσματος λαμβάνει δράση όταν οι παράμετροι ποιότητας του τρέχοντος φασματικού κενού δεν είναι πλέον επιθυμητές ή όταν ανιχνευτεί δραστηριότητα από το Πρωτεύον δίκτυο. Ένα νέο είδος διαπομπής πρέπει να υλοποιηθεί στα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών, η διαπομπή στο φάσμα. Τα πρωτόκολλα των διαφορετικών επιπέδων του δικτύου θα πρέπει να προσαρμόζονται στις παραμέτρους του καναλιού της νέας φασματικής ζώνης που θα χρησιμοποιηθεί.

Ο διαχειριστικός σκοπός της λειτουργίας κινητικότητας φάσματος είναι η διασφάλιση της ομαλής και της γρήγορης διαπομπής σε διαφορετικές φασματικές οπές, τέτοιες ώστε η παρεχόμενη υπηρεσία να υποστεί όσο το δυνατόν λιγότερη υποβάθμιση στην ποιότητα. Με άλλα λόγια θα πρέπει η διαδικασία διαπομπής να είναι όσο το δυνατόν πιο διάφανη στα υψηλότερα στρώματα του δικτύου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι πολύ σημαντικό η λειτουργία κινητικότητας φάσματος να ενημερώνεται εκ των προτέρων για το είδος και τη διάρκεια της διαπομπής, από τη λειτουργία απόφασης επιλογής φάσματος. Η ενημέρωση αυτή δίνει το χρόνο ώστε να μπορέσουν τα πρωτόκολλα να αναπροσαρμοστούν στις καινούργιες παραμέτρους μετάδοσης και ταυτόχρονα να διατηρήσουν τη σύνδεση.

Η διαδικασία διαπομπής, τέλος, μπορεί να γίνει περισσότερο διάφανη προς τα υψηλότερα στρώματα αν το συγκεκριμένο τερματικό χρησιμοποιεί πολλαπλά φασματικά κενά για εκπομπή, και αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης πολλαπλών φασματικών κενών. Καθώς η



Σχήμα 2.11: Κατηγοριοποίηση τεχνικών ελέγχου πρόσβασης στο φάσμα σε δίκτυα DSA

διαδικασία διαπομπής πραγματοποιείται για ένα συγκεκριμένο φασματικό κενό η σύνδεση και η μεταφορά δεδομένων μπορεί να πραγματοποιείται από τα υπόλοιπα συντελώντας έτσι στην ομαλή διαπομπή.

#### 2.2.3.4 Έλεγχος πρόσβασης στο φάσμα

Στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος μια από τις κύριες ερευνητικές προκλήσεις είναι ο έλεγχος πρόσβασης σε αυτό. Ο Έλεγχος πρόσβασης μπορεί να θεωρηθεί όμοιος με τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο (υπόστρωμα MAC), που έχει ερευνηθεί κατά κόρον για τα συμβατικά υπάρχοντα δίκτυα. Ωστόσο, όπως θα φανεί και από αυτήν την παράγραφο, υπάρχουν ουσιώδεις διαφορές στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Η συνύπαρξη με Πρωτεύοντες χρήστες και το μεγάλο ανομοιογενές εύρος ζώνης, στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν τα γνωστικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών, είναι δύο από τις κύριες και ειδοποιούς διαφορές.

Οι τεχνικές ελέγχου πρόσβασης στο φάσμα στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους, τη συμπεριφορά κατανομής των διαθέσιμων φασματικών οπών και την τεχνική μετάδοσης. Η κατηγοριοποίηση αυτή δίνεται και στο σχήμα 2.11 και περιγράφεται στα επόμενα εδάφια.

**2.2.3.4.1 Αρχιτεκτονική.** Η πρώτη κατηγοριοποίηση των τεχνικών ελέγχου πρόσβασης στο φάσμα σχετίζεται με την αρχιτεκτονική του δικτύου και έχει ως εξής:

**Κεντρικός Έλεγχος Πρόσβασης.** Σε αυτήν την κατηγορία μία κεντρική οντότητα ελέγχει τις διαδικασίες κατανομής και πρόσβασης στο φάσμα [32], [19], [33]. Η αρχιτεκτονική αυτή συνήθως συμπληρώνεται από συνεργατική λειτουργία ανίχνευσης φάσματος.

**Κατανεμημένος Έλεγχος Πρόσβασης.** Ο Κατανεμημένος έλεγχος [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40] χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή η ανάπτυξη ενός δικτύου με κεντρικό ελεγκτή. Στις περιπτώσεις αυτές η κατανομή του φάσματος και ο έλεγχος πρόσβασης γίνεται τοπικά σε κάθε κόμβο του δικτύου και βασίζεται σε τοπικές παρατηρήσεις.

**2.2.3.4.2 Συμπεριφορά Κατανομής Φασματικών Οπών.** Ο έλεγχος πρόσβασης στο φάσμα χωρίζεται επίσης ανάλογα με τη συμπεριφορά της κατανομής των φασματικών κενών σε:

**Συνεργατική Κατανομή.** Οι τεχνικές αυτές λαμβάνουν υπόψη τους το αποτέλεσμα, διυμενές ή όχι, που θα έχει η εκπομπή σε ένα φασματικό κενό στους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Παρόλο που όλες οι τεχνικές κεντρικού ελέγχου πρόσβασης είναι και συνεργατικές, υπάρχουν και κατανεμημένες [32], [34], [35], [36], [38] τεχνικές ελέγχου πρόσβασης που είναι και συνεργατικές. Βασική προϋπόθεση για να μπορέσουν να αναπτυχθούν τέτοιες τεχνικές είναι η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των χρηστών ή μεταξύ των χρηστών και του κεντρικού ελεγκτή, κάτι που εισάγει επιπλέον φόρτο στο δίκτυο.

**Μη συνεργατική Κατανομή.** Σε αντίθεση με τις συνεργατικές τεχνικές, οι μη - συνεργατικές, που ονομάζονται και εγωιστικές, [37], [39], [40], λαμβάνουν υπόψη τους μόνο το συγκεκριμένο τερματικό στο οποίο εφαρμόζονται. Παρόλο που οι μη συνεργατικές τεχνικές μπορεί να οδηγήσουν σε υποχρησιμοποίηση των φασματικών πόρων, οι ελάχιστες απαιτήσεις για ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου μεταξύ των κόμβων του δικτύου οδηγούν στο να προτιμώνται σε κάποιες περιπτώσεις.

Οι δύο παραπάνω τεχνικές έχουν συγκριθεί για το βαθμό χρησιμοποίησης, το Throughput και τη δικαιοσύνη που επιτυγχάνουν. Γενικά έχει αποδειχθεί [41], [42] ότι οι συνεργατικές τεχνικές υπερτερούν έναντι των εγωιστικών και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να προσεγγίζουν τους βέλτιστους στόχους. Ωστόσο οι παραδοχές που έχουν γίνει σε αυτές τις εργασίες είναι ισχυρές και σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι πρακτικές. Για να μπορέσει, π.χ., να αποδειχτεί η προσέγγιση στους βέλτιστους στόχους με συνεργατικές τεχνικές στο [41], έχει γίνει η παραδοχή ότι όλοι οι χρήστες του Δευτερεύοντος δικτύου γνωρίζουν ακριβώς τη θέση και την ισχύ εκπομπής των Πρωτεύοντων χρηστών ώστε να μπορούν να υπολογίζουν την παρεμβολή που προκαλούν σε αυτούς.

**2.2.3.4.3 Τεχνική μετάδοσης.** Μία τελευταία κατηγοριοποίηση των τεχνικών πρόσβασης στο φάσμα γίνεται με βάση την τεχνολογία μετάδοσης της πληροφορίας στα φασματικά κενά. Δύο είναι οι κυρίαρχες τάσεις:

**Επικαλυπτική Μετάδοση.** Είναι ο τρόπος μετάδοσης (overlay access) κατά τον οποίο οι χρήστες του δευτερεύοντος δικτύου Δυναμικής Χρήσης Φάσματος προσπελαύνουν περιοχές του φάσματος που παραμένουν αχρησιμοποίητες από το Πρωτεύον δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό η παρεμβολή προς το Πρωτεύον δίκτυο ελαχιστοποιείται. [32], [34], [36], [37], [38], [39], [40].

**Υποκαλυπτική Μετάδοση.** Κατά την υποκαλυπτική μετάδοση (underlay access) αξιοποιούνται τεχνικές διασποράς φάσματος που έχουν αναπτυχθεί για κυψελωτά δίκτυα. Τα τερματικά του δικτύου Δυναμικής Χρήσης Φάσματος εκπέμπουν κατά τρόπο τέτοιο, ώστε η εκπεμπόμενη ισχύς σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος να βρίσκεται στα επίπεδα του θορύβου για τα τερματικά του Πρωτεύοντος δικτύου. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με τις τεχνικές overlay [35].

Η επίδοση που έχει η επικαλυπτική και η υποκαλυπτική μετάδοση έχει μελετηθεί θεωρητικά [20]. Αποδεικνύεται πως η επιλογή της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας είναι η βέλτιστη όταν η παρεμβολή μεταξύ των χρηστών είναι υψηλή. Σε αυτήν τη περίπτωση θα πρέπει να προτιμάται η επικαλυπτική μετάδοση.

Επίσης έχει μελετηθεί [43] η επίδραση του Δευτερεύοντος δικτύου στο Πρωτεύον σε όρους παρεμβολής και πιθανότητας διακοπής (outage probability) για επικαλυπτική, υποκαλυπτική και μία υβριδική μετάδοση. Η υβριδική αυτή μετάδοση αναφέρεται σε μετάδοση με διασπορά φάσματος (υποκαλυπτική) αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιεί και φίλτρα εγκοπής στις συχνότητες όπου ανιχνεύεται μετάδοση από Πρωτεύοντες χρήστες. Όμοια με άλλες ερευνητικές εργασίες, όταν υπάρχει η υπόθεση της τέλει γνώσης του συστήματος, η επικαλυπτική μετάδοση υπερτερεί της υποκαλυπτικής σε όρους πιθανότητας διακοπής, αλλά όταν στην τελευταία ενσωματώνεται και η αποφυγή παρεμβολής, δημιουργώντας το υβριδικό σχήμα, τότε επιτυγχάνεται ακόμα μικρότερη πιθανότητα διακοπής.

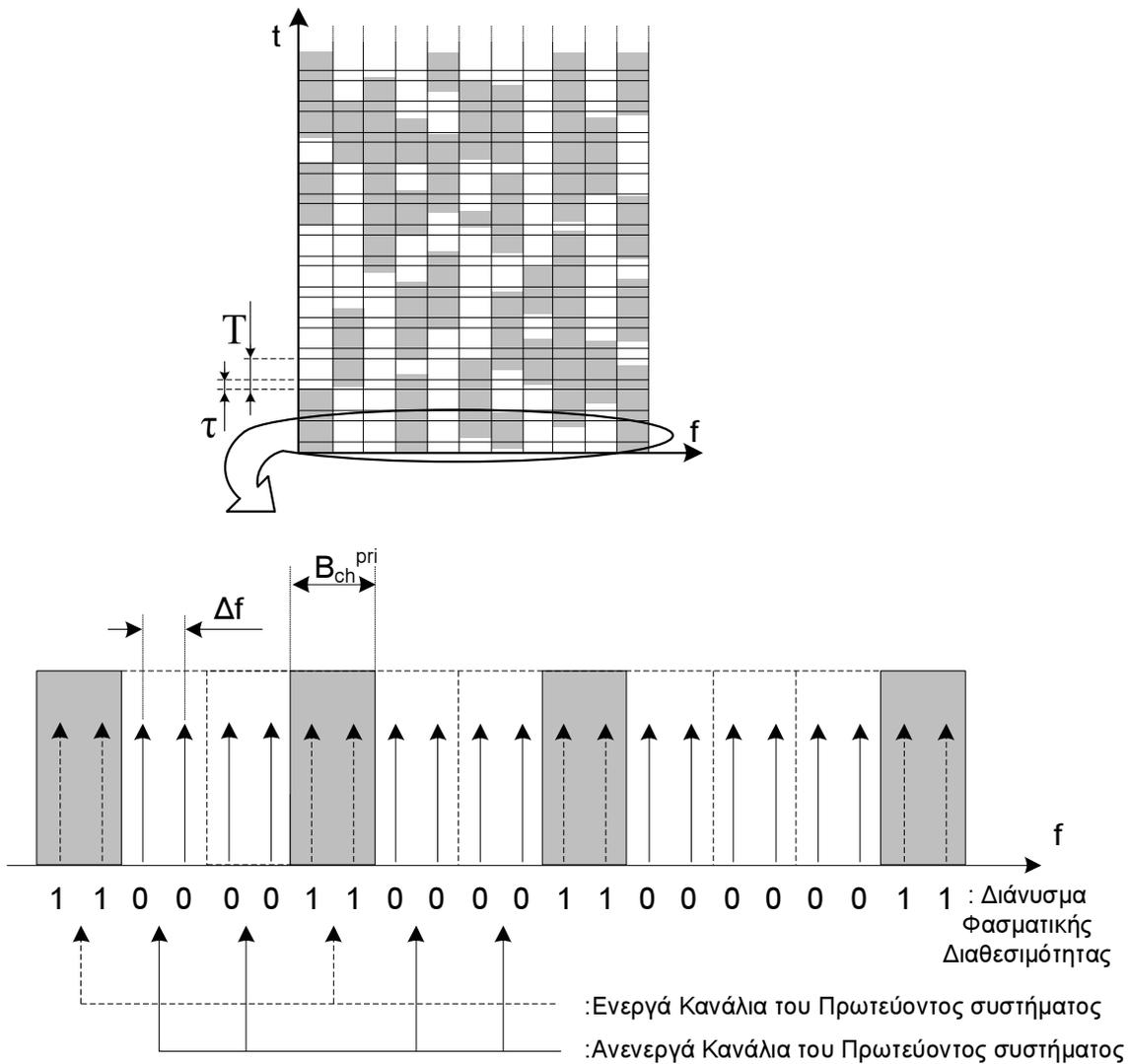
### 2.3 Το περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος

Πολλά είναι τα διαφορετικά σενάρια εφαρμογής των δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, τα οποία εκτείνονται σε όλες τις κατηγορίες που περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.2.2.1. Στην παρούσα διατριβή, η Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου πρόσβασης στο μέσο αναπτύχθηκε για κατανεμημένα Δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος Ιεραρχικής χρήσης.

Στο σενάριο που εξετάζεται, το Πρωτεύον δίκτυο ή τα Πρωτεύοντα δίκτυα (όταν η φασματική ζώνη, στην οποία το Δευτερεύον δίκτυο λειτουργεί, εκτείνεται σε περισσότερες της μιας αδειοδοτημένες φασματικές ζώνες) χρησιμοποιούν κάποιο γενικό και ακαθόριστο συνδυασμό πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου και συχνότητας. Με το συνδυασμό αυτό δημιουργούνται φασματικές οπές στο δισδιάστατο χώρο χρόνου-συχνότητας, όπως αυτές που απεικονίζονται στο σχήμα 2.9.

Πολλές ερευνητικές προσπάθειες ασχολούνται με το σενάριο που περιγράφεται παραπάνω, ακολουθώντας κεντρικές αρχιτεκτονικές Δευτερεύοντος δικτύου και επίσης επιστρατεύουν διακίνηση πληροφορίας φασματικής διαθεσιμότητας με το Πρωτεύον Δίκτυο. Παρόλο που οι κεντρικές αρχιτεκτονικές, σε σύγκριση με τις κατανεμημένες, παρουσιάζουν σαφή πλεονεκτήματα και βελτιωμένες επιδόσεις στην επίτευξη των στόχων ενός Δευτερεύοντος συστήματος, η μελέτη κατανεμημένων Δευτερεύοντων δικτύων μπορεί να οδηγήσει στην υλοποίηση πραγματικά αυτόνομων δικτύων με χαμηλό κόστος για πλήθος εφαρμογές [44]. Η παρούσα Διατριβή παρουσιάζει ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για Δευτερεύον δίκτυο κατανεμημένη αρχιτεκτονικής.

Εφόσον δεν υπάρχει ανταλλαγή πληροφορίας με το Πρωτεύον δίκτυο, το Δευτερεύον δίκτυο θα πρέπει να ανιχνεύει αυτόνομα τις φασματικές οπές που υπάρχουν σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό πραγματοποιείται με περιοδικές διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών. Η πληροφορία που εξάγεται από την ανίχνευση διακινείται μεταξύ των τερματικών με τη μορφή του Διανύσματος Φασματικής Διαθεσιμότητας. Το διάνυσμα αυτό είναι δυαδικό και αναπα-



Σχήμα 2.12: Παράδειγμα Διανύσματος Φασματικής Διαθεσιμότητας σε Δεξαμενή Φάσματος

ριστά με μονάδες τα κανάλια εκείνα της φασματικής ζώνης που είναι κατειλημμένα από το Πρωτεύον σύστημα και με μηδενικά τα ανενεργά. Με βάση το Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας το φυσικό στρώμα αναπροσαρμόζεται και παρέχει ένα σταθερό ρυθμό μετάδοσης προς τα ανώτερα στρώματα, μέχρι την επόμενη διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών.

Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η περιοδική διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών, το Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας που προέκυψε από μια διαδικασία ανίχνευσης και η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση συγκεκριμένων υποφερρόντων σε ένα παράδειγμα όπου το προσαρμοζόμενο φυσικό στρώμα χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM. Στην παράγραφο 2.3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες ερευνητικές προσεγγίσεις προσαρμοζόμενου φυσικού στρώματος σε περιβάλλον δεξαμενής φάσματος επικαλυπτικής μετάδοσης.

### 2.3.1 Το φυσικό στρώμα

Όπως είδαμε, τα τερματικά Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών ανιχνεύουν το ραδιοφάσμα ώστε να αναγνωρίζουν τις υπάρχουσες εκπομπές από το Πρωτεύον σύστημα και τους διαθέσιμους ραδιο-πόρους. Το επόμενο βήμα, που πραγματοποιείται στο φυσικό στρώμα, είναι η σύνθεση και μορφοποίηση της κυματομορφής, που θα χρησιμοποιούν για τις εκπομπές τους. Η τεχνολογία Πομποδεκτών Ορισμένων από Λογισμικό επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο της μορφής της εκπεμπόμενης κυματομορφής. Ορισμένα σχήματα διαμόρφωσης, που προσφέρουν προσαρμοστική σύνθεση κυματομορφής και που μελετώνται στην επикаλυπτική μετάδοση, παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 2.3.1.1 Διαμόρφωση OFDM μονής ζώνης

Η διαμόρφωση OFDM παρέχει ευελιξία λόγω της εύκολης αναπροσαρμογής του φασματικού προφίλ του σήματος. Με απλή απενεργοποίηση ενός συνόλου από υποφέροντα η κυματομορφή μπορεί να αναπροσαρμοστεί για να ταιριάζει στο διαθέσιμο προς χρήση ραδιο-φάσμα. Αν υποτεθεί ότι είναι γνωστή η απαιτούμενη φασματική μάσκα για την εκπομπή, τότε η ρύθμιση της κυματομορφής με απενεργοποίηση των απαιτούμενων υποφερόντων είναι σχετικά απλή διαδικασία. Ένα παράδειγμα δίνεται και στο σχήμα 2.12 στο περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος, όπου το εκπεμπόμενο σήμα έχει προσαρμοστεί στο τρέχον Διάλυμα Φασματικής Διαθεσιμότητας.

Οι κύριες παράμετροι που μπορούν να προσαρμόζονται για την κάλυψη των απαιτήσεων εκπομπής είναι ο αριθμός των υποφερόντων, η ισχύς των υποφερόντων και τα φίλτρα μορφοποίησης των παλμών που θα χρησιμοποιηθούν. Η αύξηση του αριθμού των υποφερόντων σε μια δεδομένη φασματική ζώνη απαιτεί, φυσικά, αύξηση της πολυπλοκότητας και ειδικές συνθήκες στο ασύρματο κανάλι διάδοσης. Η ισχύς των υποφερόντων μπορεί να δώσει κατάλληλη φασματική απόκριση στην κυματομορφή, π.χ. ο περιορισμός της παρεμβολής σε γειτονικά συστήματα/κανάλια OFDM μπορεί να γίνει με ανάλογη μείωση της ισχύος των υποφερόντων που βρίσκονται στα άκρα της ζώνης. Τέλος, σπουδαίο ρόλο δύναται να παίξει η κατάλληλη επιλογή φίλτρων μορφοποίησης παλμών που μπορούν να μειώσουν την προκαλούμενη παρεμβολή και, παράλληλα, να αυξήσουν τη φασματική αξιοποίηση της διαθέσιμης ζώνης.

Σε ένα σύστημα OFDM μονής ζώνης ο πομπός και ο δέκτης αντιμετωπίζουν το όλο σύστημα σαν ένα μοναδικό σύστημα OFDM. Ολόκληρη η φασματική ζώνη καλύπτεται από ισαπέχοντα υποφέροντα και ανάλογα με το Διάλυμα Φασματικής Διαθεσιμότητας ορισμένα σύνολα υποφερόντων απενεργοποιούνται. Ένα μεγάλο πρόβλημα σε αυτού του είδους το προσαρμοζόμενο φυσικό στρώμα είναι οι μεγάλοι πλευρικοί λοβοί του OFDM φάσματος, οι οποίοι προκαλούν παρεμβολή στο γειτονικό Πρωτεύον σύστημα. Ορισμένες μέθοδοι μείωσης της προκαλούμενης παρεμβολής είναι:

- Η απενεργοποίηση μιας ομάδας υποφερόντων στην άμεσα γειτονική φασματική περιοχή προς τις πρωτεύουσες εκπομπές.
- Η χρήση δυναμικών φίλτρων ή δυναμικών παραθύρων στο πεδίο του χρόνου.

- Ο κατάλληλος χειρισμός των υποφερόντων για ενεργή ακύρωση της προκαλούμενης παρεμβολής, με αποστολή ξεχωριστών υποφερόντων ακύρωσης.
- Η κατάλληλη στάθμιση των υποφερόντων πληροφορίας με πολλαπλασιασμό τους με ένα διάνυσμα βαρών προς μείωση της ισχύος των πλευρικών λοβών του σήματος.

### 2.3.1.2 Άλλες μέθοδοι διαμόρφωσης

Μία άλλη αποδοτική μέθοδος διαμόρφωσης για τη σύνθεση της κυματομορφής που αξιοποιεί αποδοτικά το Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας είναι η διαμόρφωση OFDM πολλαπλών ζωνών, η οποία μειώνει δραστικά τις παρεμβολές με τον αποκλεισμό εκείνων των φασματικών υπο-ζωνών, που χρησιμοποιούνται έντονα από το Πρωτεύον σύστημα. Η έννοια των πολλαπλών ζωνών εδώ διαφέρει από τη λογική του προτύπου 802.15.31 καθώς δεν είναι απαραίτητη η περιοδική χρησιμοποίηση της κάθε υπο-ζώνης.

Επίσης, έχει προταθεί η διαμόρφωση με χρήση Διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων DWT (Discrete Wavelet Transform) [45]. Ο μετασχηματισμός wavelet πραγματοποιεί αποσύνθεση ενός σήματος ενδιαφέροντος σε διαδοχικούς υπο-χώρους σήματος με τη χρήση μιας κυματομορφής βάσης. Τα κυματίδια είναι κυματομορφές με επιθυμητά χαρακτηριστικά συγκέντρωσης της ενέργειας τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας. Για αυτόν το λόγο αποτελούν επιλογή διαμόρφωσης για τα Γνωστικά Συστήματα Επικοινωνιών. Παράλληλα, διατηρούν ιδιότητες ορθογωνιότητας για τα διάφορα υπό-κανάλια που ορίζονται με τρόπο ανάλογο με αυτόν της OFDM διαμόρφωσης.

Ο μετασχηματισμός wavelet απαιτεί σοβαρή υπολογιστική δύναμη. Ο αλγόριθμος του Mallat χρησιμοποιείται για την μείωση του υπολογιστικού βάρους, ενώ παράλληλα δίνει φυσική υπόσταση στη πραγματοποιούμενη διαυλοποίηση με τη χρήση του μετασχηματισμού. Χωρίς να επεκταθούμε στο μαθηματικό σκέλος, απλά αναφέρουμε πως με βάση τον αλγόριθμο, για ένα συγκεκριμένο wavelet ορίζονται δυο ψηφιακά φίλτρα (ζεύγος συμπληρωματικό - ένα βαθυπερατό και ένα υψιπερατό). Με την πραγματοποίηση φιλτραρίσματος και αύξησης/μείωσης του ρυθμού επεξεργασίας κατά την εκπομπή/λήψη, προκύπτουν οι μετασχηματισμοί wavelet του σήματος για διάφορες αναλύσεις  $m$  στο πεδίο της συχνότητας. Όπως είναι προφανές, η αδυναμία αυτού του τύπου διαμόρφωσης είναι η υπολογιστική πολυπλοκότητα καθώς περιλαμβάνει φιλτράρισμα σε κάθε βαθμίδα ανάλυσης/σύνθεσης. Ουσιαστική μείωση της πολυπλοκότητας μπορεί να γίνει με την χρήση πολυφασικών δομών φίλτρων καθώς και φίλτρων ημίσειας ζώνης (half band) που ελαττώνουν δραστικότερα στο μισό την απαιτούμενη πολυπλοκότητα. Παρόλα αυτά, η χρήση wavelets με επιθυμητά – για τα Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών – φασματικά χαρακτηριστικά θα προκαλέσει ραγδαία αύξηση στους απαιτούμενους πολλαπλασιασμούς.

Τέλος, μια εναλλακτική επιλογή σε σχέση με το δυαδικό δένδρο της διαμόρφωσης wavelet είναι η Διαμόρφωση Ορθογωνικής Πολυπλεξίας με Δένδρο Παρεμβολών ITOM - Interpolated Tree Orthogonal Multiplexing, ή αλλιώς με Δένδρο Αυξανόμενου Ρυθμού επεξεργασίας [46]. Βασίζεται στην παρατήρηση ότι στον μετασχηματισμό wavelet τα φίλτρα χρησιμοποιούνται

για να πραγματοποιήσουν τόσο την μορφοποίηση του παλμού όσο και τη διαδικασία αύξησης ρυθμού. Στην ITOM εκδοχή, η μορφοποίηση των παλμών δεδομένων πραγματοποιείται έξω από τη συστοιχία φίλτρων με τη χρήση παραδοσιακών φίλτρων μορφοποίησης (πχ φίλτρα Nyquist) και παραδίδεται το μορφοποιημένο σήμα στο δένδρο για την άνω μετατροπή του, την τοποθέτηση του στο φάσμα και την προστασία του από φαινόμενα αναδίπλωσης (aliasing). Με τη μέθοδο αυτή δεν απαιτείται όλοι οι χρήστες (ή όλα τα υπο-κανάλια ενός χρήστη) να χρησιμοποιούν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης. Είναι δυνατό λοιπόν σε μια τέτοια δομή να εισέρχονται και να πολυπλέκονται σήματα διαφορετικών ρυθμών από ένα μεγάλο εύρος ζωνών.

Με βάση τα παραπάνω, δυο είναι εν γένη τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης: 1) η χρήση των φίλτρων μορφοποίησης επιτρέπει την καλύτερη συγκέντρωση ενέργειας στη συχνότητα ελαττώνοντας σημαντικά τις εκτός ζώνης εκπομπές και 2) παρέχεται ένα ακόμη δυναμικό χαρακτηριστικό στο σύστημα, η χρήση δηλαδή διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης στα διάφορα υπο-κανάλια. Και σε αυτήν την περίπτωση το βασικό πρόβλημα έγκειται στην υπολογιστική πολυπλοκότητα που παραμένει στα ίδια επίπεδα με αυτά της DWT διαμόρφωσης. Παρότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση με χρήση διαφορετικών ρυθμών και της ακύρωσης σταδίων στο δένδρο, η εξωτερική χρήση φίλτρων μορφοποίησης ισοσταθμίζει τη διαφορά.

### 2.3.2 Απαιτήσεις στο υποστρώμα MAC

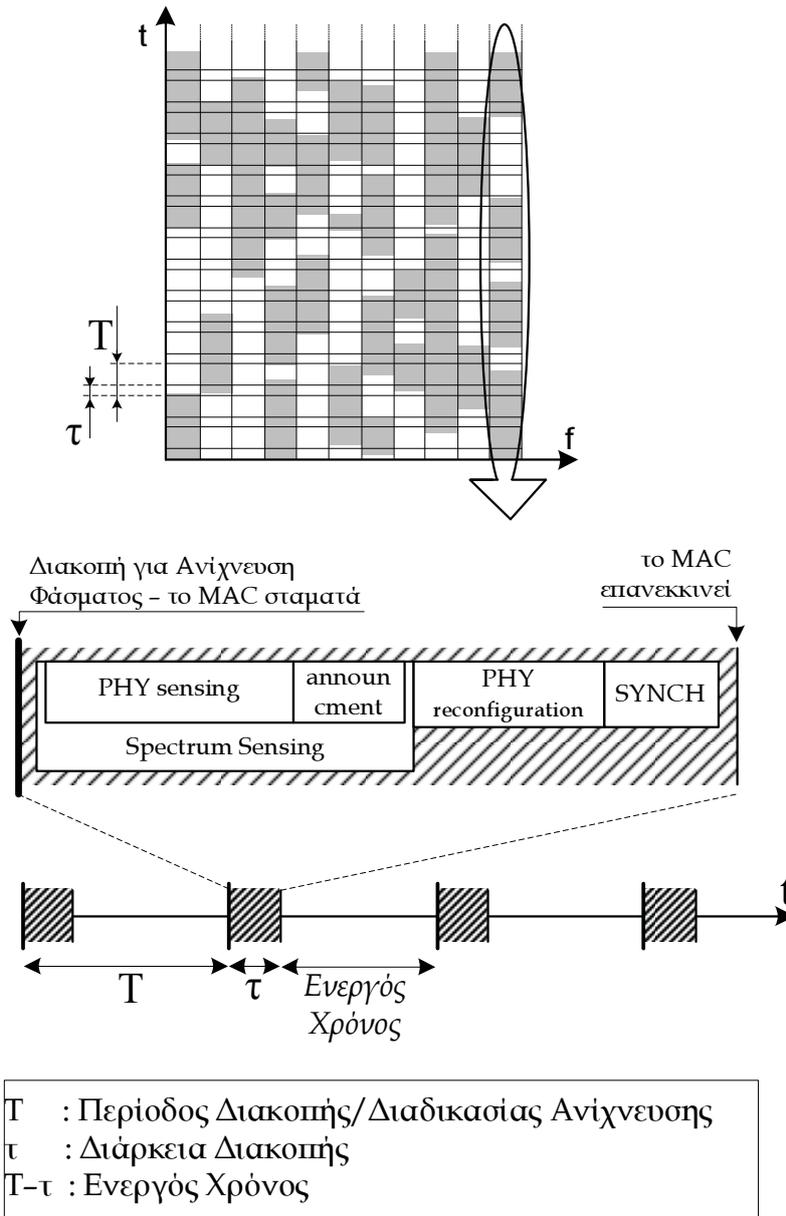
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ένα τερματικό Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών, το οποίο λειτουργεί σε ένα περιβάλλον Ιεραρχικής Χρήσης φάσματος, θα πρέπει να ελέγχει περιοδικά τη διαθεσιμότητα του υποκείμενου φάσματος προς χρήση. Αυτό γίνεται με την περιοδική εκτέλεση ανίχνευσης φασματικών οπών, η οποία έχει τη συνέπεια η λειτουργία του υποστρώματος MAC στο χρόνο να είναι διακοπτόμενη.

#### 2.3.2.1 Η διακοπτόμενη λειτουργία

Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.13, η λειτουργία του υποστρώματος MAC διακόπτεται περιοδικά από τις διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών. Αυτές εναλλάσσονται με τις χρονικές περιόδους στις οποίες το τερματικό πραγματοποιεί μεταδόσεις.

Η περίοδος διακοπής της κανονικής λειτουργίας του υποστρώματος MAC ή η περίοδος ανίχνευσης φασματικών οπών συμβολίζεται με  $T$ . Η διάρκεια της διακοπής ή η διάρκεια της ανίχνευσης φασματικών οπών συμβολίζεται με  $\tau$ . Η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών διακοπών κατά την οποία το υποστρώμα βρίσκεται στην κανονική του λειτουργία επιχειρώντας μεταδόσεις καλείται *Ενεργός Χρόνος*.

Είναι πολύ σημαντικό οι διακοπές στη λειτουργία του MAC να πραγματοποιούνται την ίδια χρονική στιγμή σε όλα τα συμμετέχοντα τερματικά του δικτύου, ώστε η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών να πραγματοποιείται ταυτόχρονα σε όλο το δίκτυο. Αυτό εξασφαλίζει ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας όλα τα τερματικά θα έχουν σταματήσει τις μεταδόσεις και κατά συνέπεια τα σήματα (ή η ενέργεια) που ανιχνεύονται θα ανήκουν σε μεταδόσεις του Πρωτεύοντος συστήματος. Στην αντίθετη περίπτωση ο αλγόριθμος ανίχνευσης δε θα είναι σε



Σχήμα 2.13: Η Διακοπόμενη λειτουργία στο περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος

θέση να διαχωρίσει τις μεταδόσεις του Πρωτεύοντος από τις μεταδόσεις του Δευτερεύοντος συστήματος, με συνέπεια το αποτέλεσμα της ανίχνευσης, ως προς τις υπάρχουσες φασματικές οπές, να μην είναι αληθές. Ο συγχρονισμός αυτός των διακοπών του υποστρώματος MAC είναι πολύ κρίσιμος και δύσκολο να επιτευχθεί σε ένα καταναμημένο δίκτυο όπως αυτό που μελετάμε, γι αυτό προτείνουμε και αναπτύσσουμε μια νέα Λειτουργία Καταναμημένου Συγχρονισμού. Η διαδικασία συγχρονισμού που προτείνεται, παρέχεται από το MAC, εκτελείται μέσα στη διάρκεια της διακοπής, όπως περιγράφεται παρακάτω, και παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

### 2.3.2.2 Η περίοδος διακοπής

Η τιμή της Περιόδου Διακοπής είναι παράμετρος που εμφανίζεται αποκλειστικά στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος Ιεραρχικής Χρήσης και η επιλογή της είναι κρίσιμη ως προς την επίδοση του συστήματος.

Η τιμή της παραμέτρου  $T$  εξαρτάται πρωτίστως από το υποκείμενο Πρωτεύον σύστημα, το οποίο λειτουργεί στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή που χρησιμοποιεί και το Δευτερεύον σύστημα. Οι στατιστικές ιδιότητες κατάληψης του φάσματος από το Πρωτεύον σύστημα και η χρονική συνοχή κατάληψης του φάσματος καθορίζουν την τιμή που θα έχει η παράμετρος  $T$ . Γενικά ισχύει ότι μεγάλη τιμή της Περιόδου Ανίχνευσης Φασματικών Οπών οδηγεί σε υψηλά επίπεδα παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο. Από την άλλη, μικρές τιμές της περιόδου έχουν σαν συνέπεια τη χαμηλή επίδοση του Δευτερεύοντος συστήματος, επειδή με συχνή εκτέλεση της διαδικασίας ανίχνευσης εισάγεται υψηλός επιπρόσθετος φόρτος και καταλαμβάνεται μεγάλο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του δικτύου. Η περιοδική διαδικασία ανίχνευσης θα πρέπει να γίνεται όσο συχνά επιβάλλεται από το υποκείμενο Πρωτεύον σύστημα, ώστε το Δευτερεύον δίκτυο να ανταποκρίνεται στους σχεδιαστικούς του στόχους [47] και να σέβεται τα κριτήρια παρεμβολών που θέτει το Πρωτεύον Σύστημα.

Μεταξύ διαφορετικών προτεινόμενων σεναρίων η τιμή της παραμέτρου  $T$  παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Παραδείγματος χάρη στο πρότυπο IEEE 802.22 [48], [49] και στην εργασία [50] προτείνεται για μέγιστη τιμή της παραμέτρου τα 30 min για επικαλυπτική Δευτερεύουσα χρήση τηλεοπτικού φάσματος. Στην εργασία [37] προτείνεται η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών να επαναλαμβάνεται κάθε 577  $\mu$ s για Δευτερεύουσα χρήση φάσματος αδειοδοτημένου σε Πρωτεύον σύστημα GSM, δηλαδή τιμή περιόδου ίση με τη χρονοθυρίδα του Πρωτεύοντος Συστήματος.

Σε αρκετές ερευνητικές προσεγγίσεις [51] έχει προταθεί ότι η τιμή της παραμέτρου  $T$  θα πρέπει να τίθεται για κάθε φασματική ζώνη από την εκάστοτε ρυθμιστική αρχή. Σε ένα υποθετικό σενάριο όπου θα επιτρέπεται η Δευτερεύουσα χρήση του φάσματος, ανάλογα με το ποια αδειοδοτημένα Πρωτεύοντα συστήματα χρησιμοποιούν την κάθε ζώνη και με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών, η ρυθμιστική αρχή θα ορίζει την τιμή της παραμέτρου στην κάθε ζώνη.

Στην εργασία [52] παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της δυναμικής επιλογής τιμής της παραμέτρου  $T$ . Από πραγματικές μετρήσεις φασματικής χρησιμοποίησης συγκεκριμένων Πρωτεύοντων συστημάτων εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στα στατιστικά μεγέθη φασματικής χρησιμοποίησης, ανάλογα με το Πρωτεύον σύστημα αλλά και ανάλογα με την ώρα λειτουργίας του συστήματος. Έτσι καθώς το Δευτερεύον σύστημα μεταπηδά πολλές φορές σε διαφορετικές ζώνες λειτουργίας, αλλά και λειτουργεί σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, είναι επιθυμητό η τιμή της Περιόδου Διακοπής να επανατίθεται δυναμικά, προσαρμοζόμενη στα μεταβλητά αυτά χαρακτηριστικά.

Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της τιμής της παραμέτρου περιόδου διακοπής έχουν και οι αλγόριθμοι μάθησης που υπεισέρχονται στους αλγορίθμους ανίχνευσης. Μέσω της γνωστικής

διαδικασίας και της μάθησης είναι δυνατό να χαλαρώσουν οι περιορισμοί για συχνή εκτέλεση διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, οι οποίες τίθενται από τις ανοχές σε παρεμβολή των Πρωτεύοντων συστημάτων. Έτσι, καθώς προχωρά η διαδικασία μάθησης και τα τεμαχικά αναγνωρίζουν τα χαρακτηριστικά της φασματικής κατάληψης του Πρωτεύοντος συστήματος [53], είναι δυνατόν να πραγματοποιούν διαδικασίες ανίχνευσης λιγότερο συχνά, μειώνοντας την τιμή της παραμέτρου  $T$ , και αυξάνοντας έτσι την επίδοσή τους. Η γνώση αυτή μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να χαθεί αν αλλάξουν φασματική ζώνη λειτουργίας, ή συμβεί κάποια απότομη μεταβολή στο Πρωτεύον σύστημα, οπότε τα τεμαχικά του Δευτερεύοντος δικτύου θα πυκνώσουν ξανά τις διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών.

Από όλα τα παραπάνω, είναι ξεκάθαρο πώς ένα πρωτόκολλο του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για δίκτυα Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος θα πρέπει να είναι ικανό να δουλεύει αποδοτικά σε ένα μεγάλο εύρος τιμών της παραμέτρου  $T$ .

### 2.3.2.3 Η διάρκεια διακοπής

Η διακοπή μέσα στην οποία λαμβάνει χώρα η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών έχει συνολική διάρκεια  $\tau$ . Μέσα σε αυτήν πραγματοποιούνται τα εξής (βλ. σχήμα 2.13):

- Η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Στην αρχή της διακοπής εκτελείται ο αλγόριθμος ανίχνευσης φασματικών οπών που έχει επιλεγθεί. Αυτό πραγματοποιείται ανεξάρτητα σε κάθε τεμαχικό ή συντονισμένα στο δίκτυο σε περίπτωση που υλοποιείται συνεργατική ανίχνευση.
- Ανακοίνωση και συμφωνία των φασματικών οπών προς χρησιμοποίηση. Οποιαδήποτε κι αν είναι η μέθοδος ανίχνευσης φασματικών οπών, το εξαγόμενο Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας θα πρέπει στο τέλος της διαδικασίας να είναι κοινό για όλα τα μέλη του δικτύου Δυναμικής Χρήση Φάσματος. Σε αντίθετη περίπτωση δε θα υπάρχει κοινό κανάλι επικοινωνίας. Στο χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να υλοποιείται οποιοδήποτε πρωτόκολλο, όπως λ.χ. το Boosting [28].
- Προσαρμογή του φυσικού στρώματος. Μετά την απόκτηση ενός κοινού διανύσματος φασματικής διαθεσιμότητας το φυσικό στρώμα επαναπρογραμματίζεται ώστε να ανταποκρίνεται στις διαθέσιμες φασματικές οπές που περιγράφονται από αυτό.

Μετά το τέλος των παραπάνω ενεργειών υπάρχει ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ των μελών του δικτύου, το οποίο πρέπει να διαμοιραστούν προκειμένου να παρέχουν υπηρεσία. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση του καναλιού ισχύει καθ'όλη τη διάρκεια του ενεργού χρόνου, έως την επόμενη διακοπή, οπότε και θα εκτελεστεί εκ νέου διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών.

Στο σενάριο το οποίο εξετάζουμε, και που περιγράφεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο (βλ. §3.3), θεωρούμε ότι εντός της χρονικής διάρκειας διακοπής  $\tau$  τα τεμαχικά εκτελούν και τον αλγόριθμο συγχρονισμού επιπέδου MAC ακριβώς μετά την απόκτηση ενός κοινού καναλιού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.13.

## Κεφάλαιο 2. Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών και Δυναμική Χρήση Φάσματος

Η τιμή  $\tau$  της διάρκειας διακοπής εξαρτάται από όλες τις διακριτές λειτουργίες που περιγράφηκαν προηγουμένως. Πρωταρχικό ρόλο έχει ο αλγόριθμος της ανίχνευσης φασματικών οπών. Η διάρκεια ανίχνευσης συνδέεται άμεσα με την επίδοση του ανιχνευτή. Το πόσο καλή πιθανότητα ανίχνευσης επιτυγχάνει ο ανιχνευτής συνδέεται με τη σειρά του με το πόση παρεμβολή προκαλείται στο Πρωτεύον δίκτυο. Επομένως, διαφορετικά Πρωτεύοντα συστήματα, τα οποία έχουν διαφορετική ανοχή στις παρεμβολές, απαιτούν διαφορετικές επιδόσεις από τους ανιχνευτές φάσματος ενός Δευτερεύοντος δικτύου. Αυτό, για δεδομένο αλγόριθμο ανίχνευσης, μεταφράζεται σε διαφορετικές χρονικές διάρκειες ανίχνευσης.

Η διάρκεια  $\tau$  μπορεί, επίσης, να επηρεάζεται από το συνολικό εύρος ζώνης που ανιχνεύεται, σε περίπτωση που αυτό έχει χωριστεί σε υπο-ζώνες οι οποίες ανιχνεύονται σειριακά. Οι αλγόριθμοι μάθησης επηρεάζουν και τη διάρκεια της διακοπής στο σενάριο αυτό της σειριακής ανίχνευσης. Καθώς εξελίσσεται η διαδικασία, ορισμένες υπο-ζώνες μπορεί να μη χρειάζεται να ανιχνεύονται το ίδιο ταχτικά με άλλες επομένως σε κάποιες περιόδους η τιμή  $\tau$  μπορεί να είναι μειωμένη.

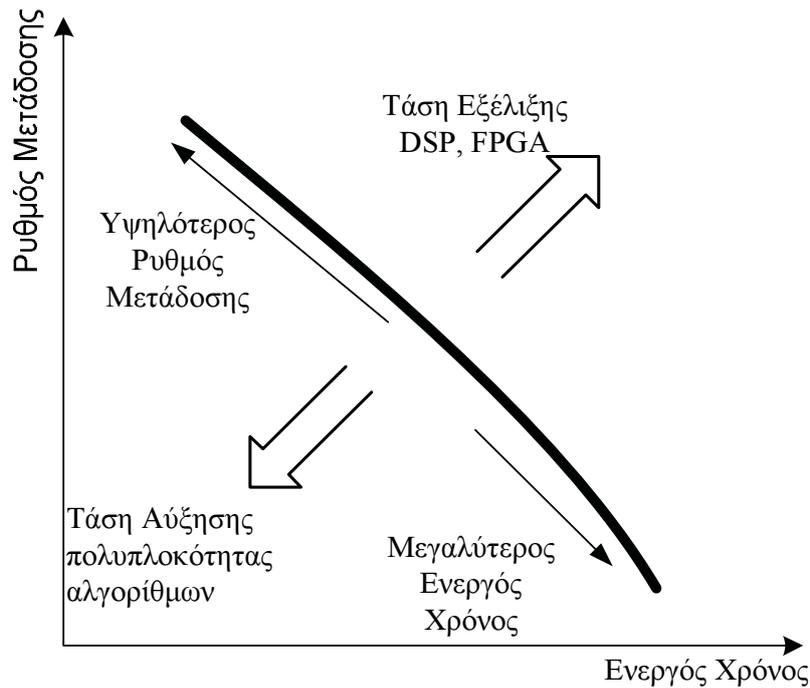
Τέλος, σημαντικό ρόλο στη διάρκεια της διακοπής έχει ο τρόπος με τον οποίο το Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας διακινείται και οριστικοποιείται σε όλα τα τερματικά του δικτύου. Η διαδικασία αυτή της αποστολής των μετρήσεων, της επεξεργασίας τους και της ανακοίνωσης του αποτελέσματος χρειάζεται κάποιο χρόνο, ο οποίος εξαρτάται από το πρωτόκολλο που ακολουθείται ή/και από την ταχύτητα μετάδοσης στον κοινό δίαυλο που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό. Π.χ. το πρωτόκολλο Boosting [28] επιτυγχάνει πολύ μικρό χρονικό πρόσθετο φόρτο γι' αυτή τη διαδικασία επειδή πραγματοποιείται ολόκληρη από το φυσικό στρώμα.

Από την κυμαινόμενη διάρκεια που μπορεί να έχει, λοιπόν, η διάρκεια διακοπής, είναι φανερό πως ένα πρωτόκολλο του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για δίκτυα Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος θα πρέπει να είναι ικανό να δουλεύει αποδοτικά σε ένα μεγάλο εύρος τιμών και της παραμέτρου  $\tau$ .

### 2.3.2.4 Ο ρυθμός μετάδοσης

Εξαιτίας της κυμαινόμενης διαθεσιμότητας των φασματικών οπών, ο παρεχόμενος ρυθμός μετάδοσης από το φυσικό στρώμα προς το υπόστρωμα MAC είναι επίσης κυμαινόμενος. Σε περίπτωση που το φυσικό στρώμα είναι βασισμένο σε OFDM η μεταβολή της διαθεσιμότητας των φασματικών οπών μεταφράζεται σε μεταβολή του αριθμού των υποφερώντων του συστήματος.

Οι αλλαγές αυτές στον παρεχόμενο ρυθμό μετάδοσης μπορεί να είναι τόσο συχνές όσο καθορίζεται από την περίοδο ανίχνευσης φασματικών οπών  $T$ . Στην περίπτωση που η διαθεσιμότητα αλλάζει ραγδαία, μπορεί σε κάθε νέο ενεργό χρόνο να προκύπτει διαφορετικός ρυθμός μετάδοσης από τον τελευταίο χρησιμοποιηθέντα. Ένα πρωτόκολλο του υποστρώματος MAC για δίκτυα Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος θα πρέπει να μεταχειρίζεται τη γρήγορα μεταβαλλόμενη φύση του ρυθμού μετάδοσης αποδοτικά και διάφανα προς τα ανώτερα στρώματα και την παροχή υπηρεσίας.



Σχήμα 2.14: Καμπύλη ισοζυγίου Ενεργού Χρόνου και ρυθμού μετάδοσης και τάσεις μεταφοράς της

### 2.3.2.5 Ισοζύγιο ρυθμού μετάδοσης - Ενεργού Χρόνου

Στην περίπτωση της σειριακής ανίχνευσης διαδοχικών φασματικών υπο-ζωνών, που αναφέρθηκε παραπάνω, και όταν έχει επιβληθεί η τιμή της περιόδου  $T$  από το υποκείμενο Πρωτεύον σύστημα, προκύπτει ένα θεμελιώδες ισοζύγιο μεταξύ ενεργού χρόνου και ρυθμού μετάδοσης. Η διάρκεια της ανίχνευσης της συνολικής ζώνης κι επομένως η διάρκεια της διακοπής  $\tau$  μεγαλώνει όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης προς ανίχνευση. Από την άλλη μεριά, υψηλότερο εύρος ζώνης της Δεξαμενής Φάσματος παρέχει στατιστικά περισσότερες φασματικές οπές κι επομένως υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Έτσι, για δεδομένη την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου φασματικής ανίχνευσης και δεδομένο το υλικό επεξεργασίας (DSP, FPGA), προκύπτει μια χαρακτηριστική καμπύλη όπως αυτή του σχήματος 2.14, η οποία αναπαριστά αυτό το ισοζύγιο.

Όσο πιο χρονοβόρος είναι ο αλγόριθμος ανίχνευσης, τόσο η καμπύλη μετατοπίζεται προς μικρότερους ενεργούς χρόνους για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης ή προς μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης για τον ίδιο ενεργό χρόνο. Όσο αυξάνει η ταχύτητα επεξεργασίας του υλικού των τερματικών, η καμπύλη κινείται προς υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για σταθερό ενεργό χρόνο ή μεγαλύτερους ενεργούς χρόνους για σταθερό ρυθμό μετάδοσης.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο MAC που αναπτύξαμε πώς θα μπορούσε ένα τέτοιο ισοζύγιο να βοηθήσει στην επιλογή του καλύτερου δυνατού σημείου λειτουργίας στην παραπάνω καμπύλη ισοζυγίου, προκειμένου να μεγιστοποιείται το Throughput του Δευτερεύοντος δικτύου.

□



## Κεφάλαιο 3

# Το Διακοπτόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο

Το διακοπτόμενο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, για δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος με επικαλυπτική μετάδοση, βασίζεται στη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου (DCF) του προτύπου IEEE 802.11. Αυτή τροποποιήθηκε κατάλληλα για να καταστεί δυνατή και να είναι αποδοτική η ένταξή της στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο. Η τροποποιημένη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου (iDCF) ανταποκρίνεται στις νέες απαιτήσεις που επιβάλλει το περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος επικαλυπτικής μετάδοσης στα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, όπως αυτές περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2 (βλ. §2.3.2).

### 3.1 Η Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου του προτύπου IEEE 802.11

Η Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου - DCF είναι το βασικό πρωτόκολλο του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο του προτύπου IEEE 802.11. Η επιτυχής διάδοση του προτύπου στα ασύρματα τοπικά δίκτυα, αλλά και η εκτενείς αναφορές για τη χρησιμοποίησή του σε δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, χωρίς όμως να έχουν προταθεί τροποποιήσεις σε αυτό (βλ. §3.2), ήταν αυτά που μας ώθησαν στο να τροποποιήσουμε τη DCF, υλοποιώντας το διακοπτόμενο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για κατανεμημένα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, επικαλυπτικής μετάδοσης.

Η DCF επιτρέπει τον αυτόματο διαμοιρασμό του κοινού διαύλου μεταξύ των κόμβων του δικτύου, μέσω της χρήσης σχήματος πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και μηχανισμό αποφυγής συγκρούσεων (CSMA/CA) με υποχώρηση τυχαίου χρόνου, μετά την αποτίμηση του μέσου ως κατειλημμένου. Η συνοπτική περιγραφή των λειτουργιών, που επιτελούνται στην DCF, που ακολουθεί, έχει σαν στόχο να καταστήσει σαφέστερη την αναλυτική περιγραφή των τροποποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

### 3.1.1 Ακολουθία Ανταλλαγής Πλαισίων

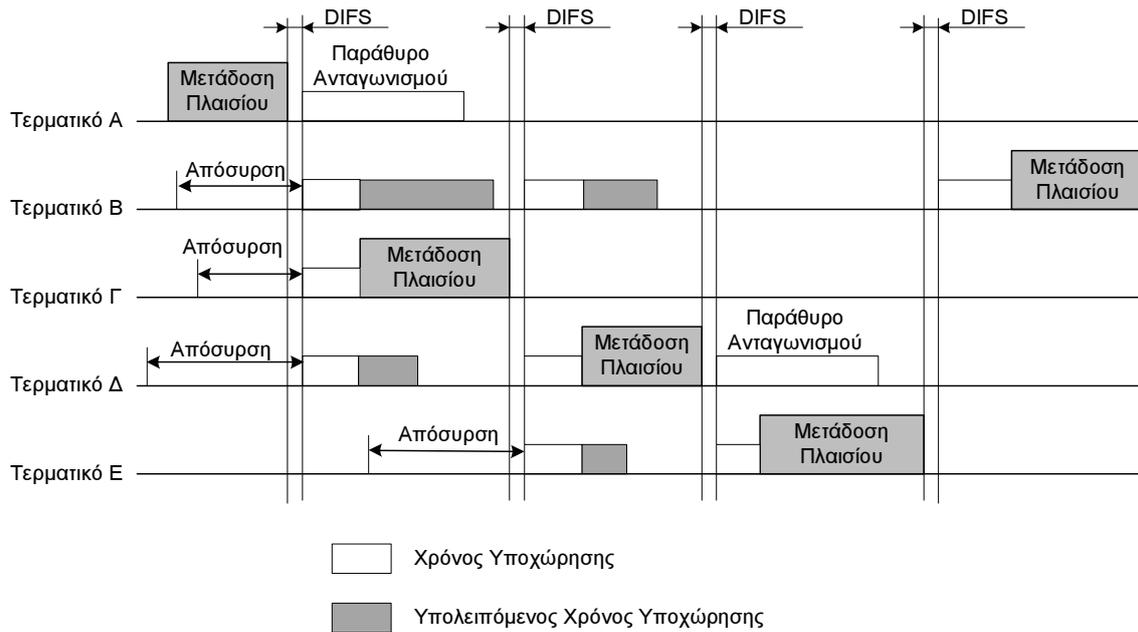
Ο βασικός σκοπός της DCF είναι να παρέχει τις λειτουργίες εκείνες που θα επιτρέψουν την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των τερματικών ενός κατανεμημένου δικτύου, στο οποίο δεν υπάρχει κεντρικός σταθμός ο οποίος να συντονίζει την πρόσβαση στο δίαυλο. Η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιείται με μια ορισμένη ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων μεταξύ του τερματικού Πηγή και του τερματικού Προορισμός. Όλες οι μεταδόσεις πλαισίων δεδομένων συνοδεύονται από θετικές επιβεβαιώσεις για την ορθή λήψη τους, με μεταδόσεις πλαισίων ack. Η μετάδοση πλαισίων δεδομένων είναι προαιρετικό να έπεται των μεταδόσεων των πλαισίων rts (request to send) και cts (clear to send) από το τερματικό Πηγή και το τερματικό Προορισμός, αντίστοιχα. Η χρησιμότητα του μηχανισμού ανταλλαγής πλαισίων rts/cts είναι πολλαπλή. Έτσι, η μετάδοση των δεδομένων στη DCF γίνεται μέσω της ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων FES - (frame exchange sequence) που περιγράφεται από την παράσταση:

$$\text{FES: } \{ \text{rts} - \text{cts} - \} [ \text{DFrag} - \text{ack} - ] \text{DLast} - \text{ack} \quad (3.1)$$

Το σύμβολο '-' στην ανωτέρω παράσταση αναπαριστά το διάστημα σιγής SIFS το οποίο περιγράφεται παρακάτω. Το πλαίσιο DFrag συμβολίζει τη μετάδοση τεμαχίου πλαισίου δεδομένων το οποίο δεν είναι το τελευταίο για τη μεταδιδόμενη SDU. Το πλαίσιο DLast αναπαριστά τη μετάδοση του τελευταίου ή του μοναδικού πλαισίου δεδομένων για τη μεταδιδόμενη SDU. Η μετάδοση των πλαισίων rts/cts περιβάλλεται από άγκιστρα, τα οποία συμβολίζουν το προαιρετικό της ανταλλαγής των πλαισίων αυτών. Η μετάδοση των ενδιάμεσων πλαισίων με τις επιβεβαιώσεις τους περιβάλλεται από αγκύλες, οι οποίες συμβολίζουν ότι η παράσταση που εσωκλείεται μπορεί να επαναληφθεί αυθαίρετο αριθμό φορών ή καθόλου, ανάλογα με το αν έχει γίνει τεμαχισμός της μεταδιδόμενης SDU και το πόσα τεμάχια την αποτελούν.

### 3.1.2 Διαδικασία ανταγωνισμού και υποχώρησης

Τα τερματικά του δικτύου, που επιθυμούν να αποστείλουν δεδομένα, ακολουθούν τη διαδικασία ανταγωνισμού που ορίζει η DCF, προκειμένου να αποκτήσουν δικαίωμα πρόσβασης στο μέσο και να εκκινήσουν μια FES ως τερματικά Πηγή. Η διαδικασία ανταγωνισμού εμπεριέχει την ανίχνευση του μέσου ως ανενεργού για διάστημα DIFS και έπειτα την έναρξη της διαδικασίας υποχώρησης. Το διάστημα σιγής DIFS περιγράφεται παρακάτω. Η διαδικασία υποχώρησης έγκειται στην αρχικοποίηση του μετρητή υποχώρησης σε μία τυχαία αθέρα τιμή, μεταξύ του 0 και του τρέχοντος παραθύρου ανταγωνισμού  $W$ , και την έναρξη της διαστήματος υποχώρησης με μείωση αυτού του μετρητή στο σύνολο κάθε χρονοσχιμής πρωτοκόλλου, διάρκειας  $\sigma$ , για όση διάρκεια ο δίαυλος παραμένει ανενεργός. Ο μετρητής υποχώρησης αρχικοποιείται μόνο σε περίπτωση που αυτός δεν περιέχει ήδη μια μη μηδενική τιμή, η οποία υποδεικνύει ότι έχει αρχικοποιηθεί ήδη στο παρελθόν. Όταν ο μετρητής ενός τερματικού φτάσει στο μηδέν, τότε το τερματικό αποκτά πρόσβαση στο δίαυλο και μεταδίδει το πρώτο πλαίσιο της νέας FES. Όταν η κατάσταση του μέσου ανιχνεύεται ως ενεργή, τότε η μείωση του μετρητή σταματάει,



Σχήμα 3.1: Η Διαδικασία Υποχώρησης στην DCF

και η διαδικασία υποχώρησης εκκινεί εκ νέου, όταν ανιχνευτεί το μέσο ανενεργό για διάστημα DIFS για τον υπολειπόμενο χρόνο υποχώρησης (βλ. σχήμα 3.1).

Με τον τρόπο αυτό διατήρησης του υπολειπόμενου χρόνου υποχώρησης εξασφαλίζεται δικαιοσύνη και όλα τα Ανταγωνιζόμενα τερματικά αποκτούν πρόσβαση στο δίαυλο. Το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού μέσα στο οποίο επιλέγεται η τιμή αρχικοποίησης του μετρητή υποχώρησης, τίθεται ανάλογα με την ιστορία μεταδόσεων του τερματικού. Αποτυχημένες μεταδόσεις, δηλαδή μεταδόσεις που δεν επιβεβαιώθηκαν, προκαλούν διπλασιασμό του παραθύρου ανταγωνισμού. Επιτυχείς μεταδόσεις προκαλούν την αρχικοποίηση του παραθύρου ανταγωνισμού στο αρχικό του, ελάχιστο μέγεθος.

### 3.1.3 Χρόνοι αναμονής και επαναμεταδόσεις

Για τη διαπίστωση πως μία μετάδοση ήταν αποτυχημένη, το τερματικό Πηγή θέτει χρόνους αναμονής των πλαισίων επιβεβαίωσης (ack, cts). Αν αυτοί οι χρόνοι αναμονής λήξουν χωρίς να έχει ληφθεί το αναμενόμενο πλαίσιο, τότε η μετάδοση θεωρείται αποτυχημένη, το παράθυρο ανταγωνισμού διπλασιάζεται και το τερματικό επιχειρεί επαναμετάδοση αφού προηγουμένως εκτελέσει τη διαδικασία ανταγωνισμού. Ο μέγιστος αριθμός των επαναμεταδόσεων, που επιχειρείται για ένα συγκεκριμένο πλαίσιο δεδομένων, τίθεται με συγκεκριμένη παράμετρο λειτουργίας του πρωτοκόλλου.

### 3.1.4 Ανίχνευση φέροντος

Η Ανίχνευση Φέροντος στο πρωτόκολλο IEEE 802.11 πραγματοποιείται τόσο από το φυσικό στρώμα όσο και από το υπόστρωμα MAC με το μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος. Ο μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος στο φυσικό στρώμα αποτιμά την κατάσταση του μέσου

ως ανενεργή, στη περίπτωση που α) η συνολική ισχύς που μετράται σε όλο το κανάλι είναι μικρότερη από ένα κατώφλι ή β) δεν ανιχνεύεται αποδιαμορφώσιμο σήμα ή γ) συνδυασμός των α) και β).

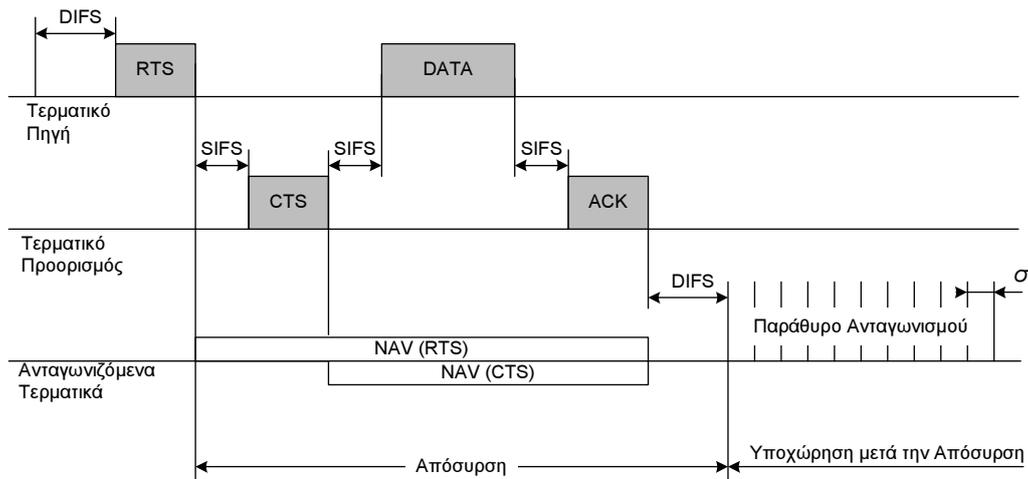
Ο μηχανισμός εικονικής ανίχνευσης φέροντος στο υπόστρωμα MAC δρα επικουρικά στο φυσικό μηχανισμό, συμβάλλοντας συνολικά στην καταπολέμηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού (διαλείψεις, φαινόμενο κρυμμένου τερματικού), που δυσχεραίνουν την ορθή εκτίμηση της κατάστασης από το φυσικό μηχανισμό. Η εικονική ανίχνευση φέροντος στο MAC επιτυγχάνεται με τη διανομή πληροφορίας κράτησης του μέσου, η οποία ανακοινώνεται με τα μεταδιδόμενα πλαίσια (piggy backing) και προκαλεί τη σήμανση του μέσου ως ενεργού για όλη τη διάρκεια της κράτησης. Τα πλαίσια rts/cts περιέχουν το πεδίο DurationID, το οποίο τίθεται σε μονάδες  $\mu s$  στην υπολειπόμενη διάρκεια της τρέχουσας ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων. Τα Ανταγωνιζόμενα τερματικά, εξάγοντας την πληροφορία αυτή, θέτουν το μετρητή NAV, ο οποίος τοπικά διατηρεί την πληροφορία κράτησης του μέσου για την τρέχουσα FES. Όσο ο μετρητής NAV δεν είναι μηδέν, ο δίαυλος θεωρείται κατειλημμένος και το Ανταγωνιζόμενο τερματικό αποσύρεται από τη διαμάχη. Η διαδικασία με την οποία τίθεται ο μετρητής NAV για μια FES μίας μοναδικής MPDU απεικονίζεται στο σχήμα 3.2(α') ενώ για τεμαχισμένη SDU και πολλαπλές MPDU στο σχήμα 3.2(β').

### 3.1.5 Διαστήματα σιγής

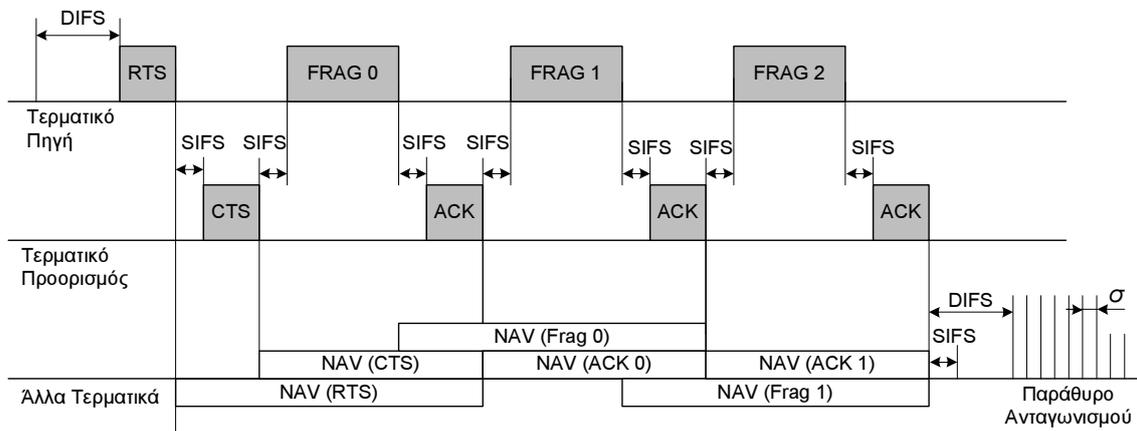
Τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των μεταδόσεων των πλαισίων, κατά τα οποία το μέσο πρέπει να ανιχνεύεται ως ανενεργό, ονομάζονται διαστήματα σιγής IFS - (Inter Frame Space). Τα διαφορετικού μήκους IFS τα οποία χρησιμοποιούνται στη DCF είναι το SIFS - (Short IFS), το DIFS - (DCF IFS) και το EIFS - (Extended IFS) με σειρά αυξανόμενης διάρκειας. Οι συσχετισμοί μεταξύ των διαφορετικών διαστημάτων σιγής απεικονίζονται στο σχήμα 3.3. Ένας κόμβος θα πρέπει, πριν μεταδώσει, να ανιχνεύει το μέσο ανενεργό για εκείνο το διάστημα IFS, το οποίο καθορίζεται από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

#### SIFS

Το διάστημα SIFS, το οποίο είναι και το συντομότερο σε διάρκεια, χρησιμοποιείται από έναν κόμβο πριν μεταδώσει ένα πλαίσιο cts, ack, DFRag ή DLast. Έτσι, χρησιμοποιείται από τους κόμβους οι οποίοι, μετά τη διαδικασία ανταγωνισμού για το μέσο, έχουν το δικαίωμα πρόσβασης σε αυτό και χρειάζεται να το διατηρήσουν μέχρι το πέρας της μεταδιδόμενης FES, ή είναι τα τερματικά Προορισμός της FES. Η Χρησιμοποίηση του μικρότερου διαστήματος IFS μεταξύ των μεταδόσεων μιας FES, εμποδίζει τους υπόλοιπους κόμβους, οι οποίοι θα πρέπει να ανιχνεύουν το μέσο ως ανενεργό για μεγαλύτερο διάστημα από το SIFS, να αποπειραθούν να μεταδώσουν. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται προτεραιότητα στις μεταδόσεις από τους κόμβους που έχουν κερδίσει τον ανταγωνισμό πρόσβασης στο μέσο, δηλαδή στην ολοκλήρωση της τρέχουσας ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων.

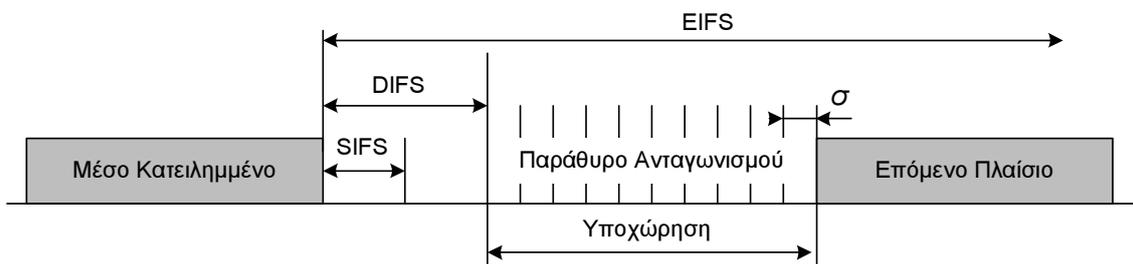


(α) Η Θέση του NAV στην DCF για μοναδική MPDU



(β) Η Θέση του NAV στην DCF για πολλαπλές MPDU

Σχήμα 3.2: Ο Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος στην DCF



Σχήμα 3.3: Τα διαστήματα σιγής στη DCF

## DIFS

Το διάστημα DIFS χρησιμοποιείται από τους κόμβους όταν ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο. Η διαδικασία υποχώρησης (βλ. §3.1.2) εκκινεί όταν το μέσο έχει διαπιστωθεί ανενεργό για διάστημα ίσο με DIFS. Επομένως ένας σταθμός έχει δικαίωμα μετάδοσης /

εκκίνησης μιας FES, μόνο όταν έχει τηρηθεί το διάστημα DIFS και έχει λήξει ο χρόνος υποχώρησης.

### **EIFS**

Το διευρυμένο διάστημα σιγής EIFS υιοθετείται από τους κόμβους, όταν το φυσικό στρώμα τους έχει υποδείξει ότι ένα πλαίσιο, που ξεκίνησε να λαμβάνεται, δεν ελήφθη τελικά ορθά, πράγμα που ελέγχεται από την ακολουθία ελέγχου πλαισίου FCS, πεδίο που φέρουν όλα τα μεταδιδόμενα πλαίσια. Το διάστημα αυτό είναι αρκετά μεγάλο για τη μετάδοση πλαισίου επιβεβαίωσης, ώστε ο κόμβος να έχει τη δυνατότητα να λάβει ορθά ένα πλαίσιο και να επανασυγχρονίσει τον μετρητή NAV (βλ. §3.1.4). Με την ορθή λήψη ενός πλαισίου, ο σταθμός τερματίζει τη διαδικασία τήρησης διαστήματος σιγής EIFS και επανεκκινεί τη διαδικασία ανταγωνισμού για το μέσο, χρησιμοποιώντας το διάστημα σιγής DIFS.

Ο ορισμός προτεραιοτήτων με τη διαφοροποίηση του διαστήματος σιγής, που τηρείται από τους κόμβους, είναι μια πολύ σημαντική μέθοδος ορισμού προτεραιοτήτων πρόσβασης [54] σε ένα καταναμημένο δίκτυο χωρίς κεντρικό ελεγκτή. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή στο πρωτόκολλο IEEE 802.11e, στο οποίο ορίζονται προτεραιότητες για κάθε εξυπηρετούμενη υπηρεσία με χρήση διαστημάτων σιγής ποικίλης διάρκειας.

## **3.2 Η DCF σαν πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο σε δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος**

Η Λειτουργία Καταναμημένου Ελέγχου, λόγω της διάδοσης του προτύπου IEEE 802.11, έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Πάμπολλες αναφορές έχουν γίνει και στην παγκόσμια έρευνα που αφορά τον τομέα των πρωτοκόλλων MAC για δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Πολλά σχήματα πρόσβασης σε δίκτυα Δυναμικής Χρήσης φάσματος περιέχουν σαν μέρος τους τη χρήση της DCF .

Στη μεγάλη τους, όμως, πλειοψηφία προτείνουν την DCF σαν το σχήμα πρόσβασης για το κοινό κανάλι ελέγχου [55], [56], [57], [58], [59]. Το κοινό κανάλι ελέγχου είναι ξεχωριστό κανάλι, ίσως φασματική ζώνη, αφιερωμένο αποκλειστικά στο δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Το κανάλι αυτό είναι συνεχώς διαθέσιμο στο Δευτερεύον δίκτυο, καθώς δεν υπάρχει κάποιο Πρωτεύον σύστημα που να λειτουργεί σε αυτό. Το κανάλι προσπελάζεται τυχαία με ένα p-επίμονο CSMA/CA σχήμα. Σε κάποιες από τις ερευνητικές προσεγγίσεις, τα πλαίσια rts /cts επιτελούν επιπρόσθετα τη λειτουργία διαπραγμάτευσης για το ποιο κανάλι δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία, σε ένα περιβάλλον πολλαπλών καναλιών. Η πρόσβαση στο, μονίμως διαθέσιμο, κοινό κανάλι ελέγχου δεν είναι διακοπτόμενη, όπως συμβαίνει σε ένα κανάλι Ιεραρχικής-Δυναμικής Χρήσης (βλ. §2.3.2.1). Επομένως δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στη DCF . Η τροποποιημένη DCF , που υλοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιείται για την πρόσβαση στο μοναδικό κανάλι που διατίθεται, με διακοπτόμενο τρόπο, στο περιβάλλον Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

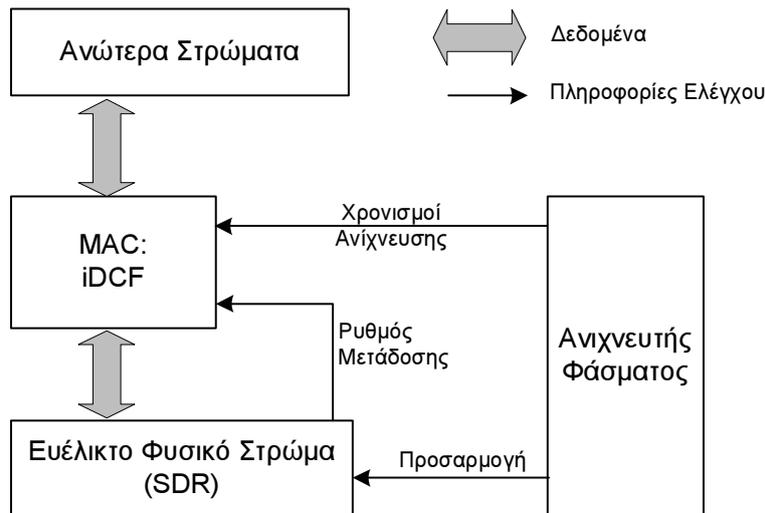
### Κεφάλαιο 3. Το Διακοπτόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο

Κάποιες, επίσης, από τις ερευνητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν τουλάχιστον δύο διακριτούς πομποδέκτες σε κάθε τερματικό. Ο ένας από αυτούς προτείνεται να βρίσκεται πάντα συντονισμένος στο κοινό κανάλι ελέγχου, ώστε να λαμβάνει πάντα τα μηνύματα διαπραγματεύσεων χρήσης των καναλιών. Αυξάνοντας τον αριθμό των διακριτών πομποδεκτών αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος και μειώνονται κατά πολύ οι καθυστερήσεις μετάδοσης, παράλληλα όμως αυξάνεται το συνολικό κόστος των τερματικών. Στη δική μας προσέγγιση, η διακοπτόμενη DCF χρησιμοποιεί έναν και μόνο πομποδέκτη και όλα τα τερματικά του δικτύου χρησιμοποιούν / μοιράζονται ένα και μοναδικό κανάλι: αυτό που προκύπτει από τη διαθεσιμότητα του φάσματος, ύστερα από τη διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα διατριβή, μπορεί να ειπωθεί σαν ένα περιβάλλον μοναδικού καναλιού, ή σαν ένα περιβάλλον πολλαπλών καναλιών, με την έμφαση, όμως, να δίνεται στη συνύπαρξη και το διαμοιρασμό των πόρων σε κάθε κανάλι ξεχωριστά, με χρήση της διακοπτόμενης DCF.

Άλλες ερευνητικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν έναν μοναδικό πομποδέκτη [60], επίσης προτείνουν τη χρήση της DCF κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού. Η διαφορά τους από τη διακοπτόμενη DCF είναι ότι χρησιμοποιούν τη DCF μόνο για πρόσβαση στο κοινό κανάλι ελέγχου. Σε καμία από τις παραπάνω ερευνητικές προσπάθειες η DCF δεν έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις προκλήσεις που τίθενται από το διακοπτόμενο τρόπο λειτουργίας (βλ. §2.3.2).

Στην εργασία [37], έχουν προταθεί κάποιες τροποποιήσεις για διακοπτόμενη λειτουργία πάνω από Πρωτεύον σύστημα GSM. Η υλοποίηση αυτή αποτελεί μια τροποποιημένη / διακοπτόμενη DCF, αλλά μόνο για το συγκεκριμένο Πρωτεύον σύστημα. Για παράδειγμα, η λειτουργία παγώνει στην έναρξη κάθε νέας χρονοθυρίδα του Πρωτεύοντος συστήματος, εκτελεί ανίχνευση και μέχρι την έναρξη της επόμενης χρονοθυρίδας επιχειρεί μεταδόσεις. Το πεδίο NAV σε κάθε πλαίσιο, για το μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος, τίθεται ώστε να δείχνει τον υπολειπόμενο αριθμό χρονοθυρίδων GSM για την ολοκλήρωση της μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων. Το διάστημα υποχώρησης αρχικοποιείται κάθε φορά που ξεκινά μια καινούργια χρονοθυρίδα - GSM, μη διατηρώντας πληροφορία για το παρελθόν, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη δικαιοσύνης αλλά και σε έντονη συμφόρηση στο κοινό κανάλι ελέγχου.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω προσεγγίσεις, η Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου (iDCF) που έχει υλοποιηθεί στην παρούσα διατριβή, μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μεγάλο εύρος σεναρίων με διακοπτόμενο τρόπο σε δίκτυα Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.



Σχήμα 3.4: Η διασύνδεση της iDCF με τις μονάδες φυσικού στρώματος και τον ανιχνευτή φάσματος

### 3.3 Το διακοπτόμενο πρωτόκολλο υποστρώματος MAC για κατανεμημένα Δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος

Ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για κατανεμημένα δίκτυα Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος που θα λειτουργεί με διακοπτόμενο τρόπο, θα πρέπει να αντιμετωπίζει με επιτυχία όλες τις προκλήσεις ενός τέτοιου περιβάλλοντος, όπως αυτές περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. §2.3.2).

Η τροποποιημένη Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου (iDCF - intermittent DCF) που υλοποιήσαμε αποτελεί τον πυρήνα του Διακοπτόμενου Πρωτοκόλλου και ανταποκρίνεται σε όλες τις προκλήσεις του διακοπτόμενου περιβάλλοντος. Στο σχήμα 3.4 απεικονίζεται η διασύνδεση της iDCF με τη μονάδα του φυσικού στρώματος και τη μονάδα ανιχνευτή φάσματος. Η iDCF είναι πάντα ενήμερη για το χρονισμό των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών. Έτσι, είναι σε θέση να υπολογίζει το χρόνο που υπολείπεται μέχρι την επόμενη διακοπή, οπότε και θα εκτελεστεί ανίχνευση φασματικών οπών. Το χρονικό αυτό διάστημα που υπολείπεται ονομάζεται *υπολειπόμενος ενεργός χρόνος*. Επίσης, μετά το πέρας των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών ενημερώνεται από τη μονάδα φυσικού στρώματος για τον νέο ρυθμό μετάδοσης, ο οποίος θα ισχύει για τον προσεχή ενεργό χρόνο.

Κατά τη διάρκεια του ενεργού χρόνου η iDCF βρίσκεται στην κανονική λειτουργία και, με κατανεμημένο τρόπο, διευθύνει το πότε τα τερματικά έχουν δικαίωμα να εκτελέσουν μετάδοση, μοιράζοντας έτσι το δίαυλο ανάμεσα στα τερματικά του δικτύου. Κατά τη διάρκεια των διακοπών, η iDCF παγώνει την κατάσταση της και αποτρέπει τις μεταδόσεις, μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία της ανίχνευσης φασματικών οπών.

Ο συγχρονισμός επιπέδου MAC πραγματοποιείται από την Κατανεμημένη Λειτουργία Συγχρονισμού, η οποία αναλαμβάνει δράση εντός της διάρκειας διακοπής και συγκεκριμένα στο

τέλος αυτής, μετά την αναπροσαρμογή του φυσικού στρώματος. Οι λειτουργίες που επιτελούνται σε αυτό το διάστημα συγχρονισμού, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.13, σελίδα 39, περιγράφονται στην παράγραφο 3.5. Αυτές επιτυγχάνουν το συγχρονισμό των ρολογιών των τερματικών του δικτύου, ο οποίος είναι απαραίτητος τόσο για την κανονική λειτουργία της iDCF όσο και για το συντονισμό των διακοπών.

### 3.4 Η Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο - iDCF

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα οι τροποποιήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στη λειτουργία DCF προς δημιουργία της Διακοπτόμενης Κατανεμημένης Λειτουργίας Ελέγχου (iDCF).

#### 3.4.1 Σχήμα πρόσβασης και υποχρεωτική χρήση τριπλής χειραψίας

Μεταξύ των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, κατά τους ενεργούς χρόνους, η Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου αναλαμβάνει δράση και εκτελεί τις ανταλλαγές πλαισίων, όπως αυτές ορίζονται και στο πρότυπο πρωτόκολλο. Τα τερματικά ακολουθούν τη διαδικασία ανταγωνισμού και όταν κάποιο κερδίσει τον ανταγωνισμό, εκκινεί μια νέα ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων.

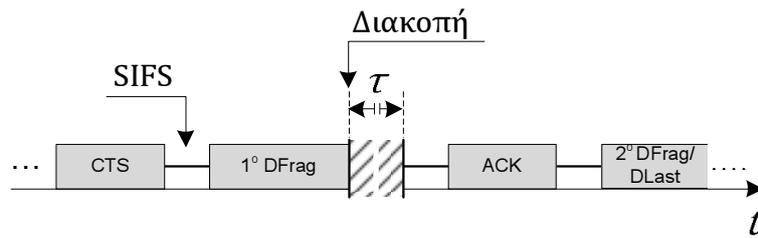
Η διαφορά στις ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου από αυτές του προτύπου, είναι ότι στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο παίρνουν πάντα τη μορφή:

$$\text{FES: rts - cts - [ DFrag - ack - ] DLast - ack} \quad (3.2)$$

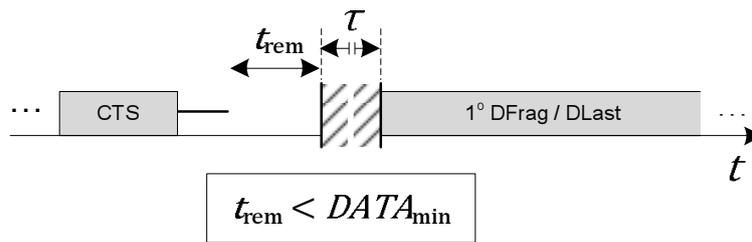
δηλαδή ο μηχανισμός τριπλής χειραψίας μέσω της ανταλλαγής των πλαισίων rts/cts καθίσταται υποχρεωτικός. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα χρόνου παρεμβολής του Δευτερεύοντος δικτύου προς το Πρωτεύον [61], επειδή η πιθανή παρεμβολή ανιχνεύεται νωρίτερα και η μετάδοση του, μεγάλης διάρκειας, πλαισίου δεδομένων δεν πραγματοποιείται. Η μείωση του χρόνου παρεμβολής με τη χρήση τριπλής χειραψίας εξετάζεται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 7 (βλ. §7.1.2).

#### 3.4.2 Μεταδόσεις και Δυναμικός Τεμαχισμός Πλαισίων Δεδομένων

Όπως σημειώθηκε στην παράγραφο 2.3.2.1, είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι όλα τα τερματικά του Δευτερεύοντος δικτύου θα σταματούν τις μεταδόσεις όταν αρχίζει η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Αυτό το εγγυάται η iDCF, η οποία, ούσα ανά πάσα στιγμή ενήμερη για το προσεχές σύνορο του ενεργού χρόνου, δεν εκκινεί καμία μετάδοση αν αυτή θα υπερβεί το χρονικό αυτό σύνορο. Έτσι, πριν από κάθε μετάδοση γίνεται ο απαραίτητος έλεγχος της διάρκειας της μετάδοσης και του υπολειπόμενου ενεργού χρόνου.



(α') Επαρκής ενεργός χρόνος για την πραγματοποίηση Δυναμικού Τεμαχισμού

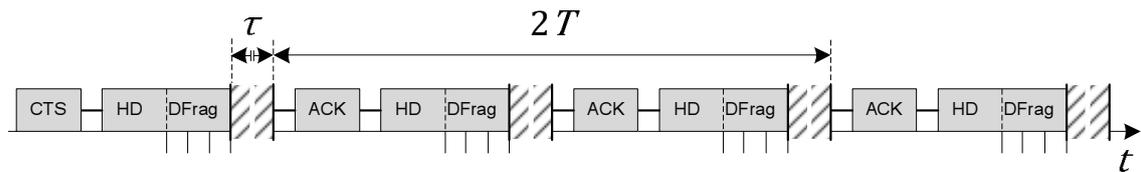


(β') Ο ενεργός χρόνος δεν είναι αρκετός για τη μετάδοση του ελάχιστου τεμαχίου δεδομένων  $DATA_{min}$  το οποίο περιέχει  $L_{min}$  b

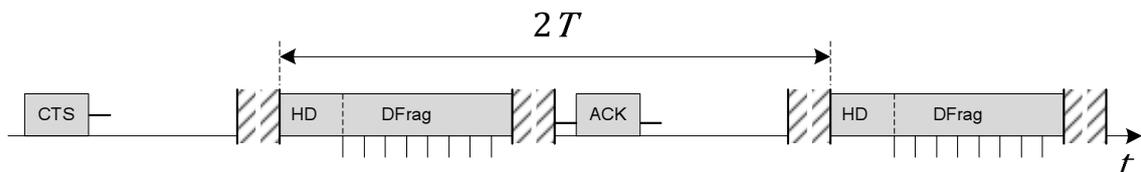
Σχήμα 3.5: Παραδείγματα μετάδοσης δεδομένων και Δυναμικού Τεμαχισμού (1)

Υπάρχει μια διαφοροποίηση, ωστόσο, στη συμπεριφορά του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου ανάλογα με το αν το προς μετάδοση πλαίσιο είναι πλαίσιο ελέγχου ή πλαίσιο δεδομένων. Τα πλαίσια ελέγχου cts και ack δεν είναι δυνατό να τεμαχιστούν. Όταν είναι η στιγμή της μετάδοσης ενός πλαισίου ελέγχου, αν ο διαθέσιμος ενεργός χρόνος δεν επαρκεί, η μετάδοση αναβάλλεται και εκτελείται μετά το πέρας της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών με την έναρξη του νέου ενεργού χρόνου. Με αυτόν τον τρόπο ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος μένει αχρησιμοποίητος. Το πλαίσιο ελέγχου rts, δεν αναφέρθηκε επειδή η τροποποίηση του μηχανισμού υποχώρησης, που περιγράφεται παρακάτω στην παράγραφο 3.4.4, εξασφαλίζει πάντα την ύπαρξη αρκετού ενεργού χρόνου όταν πρέπει να μεταδοθεί πλαίσιο rts.

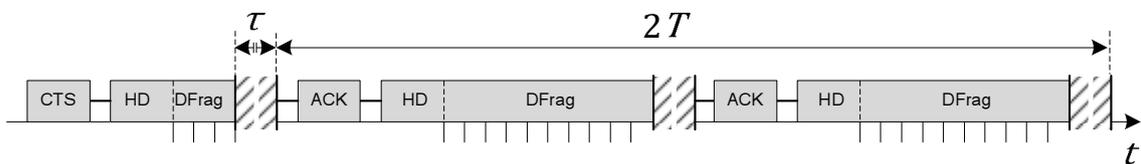
Στην περίπτωση που το προς μετάδοση πλαίσιο είναι πλαίσιο δεδομένων και δεν υπάρχει επαρκής ενεργός χρόνος για τη μετάδοσή του, ακολουθείται διαφορετική στρατηγική. Το πλαίσιο τεμαχίζεται δυναμικά, το πρώτο τεμάχιο καταλαμβάνει ολόκληρο τον υπολειπόμενο ενεργό χρόνο και έτσι αυτός αξιοποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Η παραπάνω διαδικασία του δυναμικού τεμαχισμού λαμβάνει χώρα υπό μια συνθήκη: ο τεμαχισμός πραγματοποιείται μόνο όταν το πρώτο τεμάχιο, που θα καταλάβει ολόκληρο τον υπολειπόμενο ενεργό χρόνο, περιέχει τουλάχιστον  $L_{min}$  b ωφέλιμο φόρτο. Στην περίπτωση που τα bit δεδομένων του τεμαχίου αυτού είναι λιγότερα από την παράμετρο  $L_{min}$ , ο δυναμικός τεμαχισμός δε λαμβάνει χώρα, ο υπολειπόμενος χρόνος δεν αξιοποιείται και το πλαίσιο δεδομένων μεταδίδεται μετά το πέρας της διακοπής. Οι δύο περιπτώσεις που περιγράφηκαν απεικονίζονται στα παραδείγματα των σχημάτων 3.5(α') και 3.5(β').



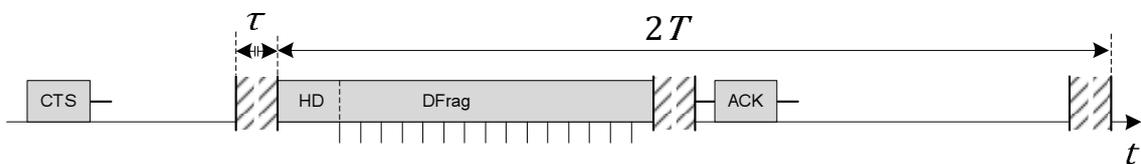
(α') Μικρό  $L_{min}$ . Σε 2 περιόδους έχουν αποσταλεί 6 μονάδες δεδομένων



(β') Μεγάλο  $L_{min}$ . Σε 2 περιόδους έχουν αποσταλεί 8 μονάδες δεδομένων



(γ') Μικρό  $L_{min}$ . Σε 2 περιόδους έχουν αποσταλεί 20 μονάδες δεδομένων

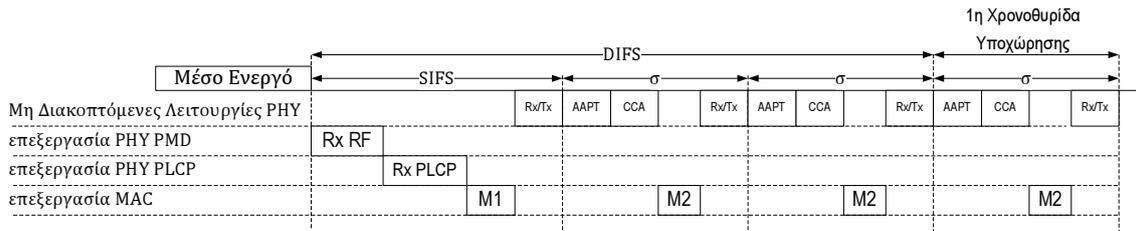


(δ') Μεγάλο  $L_{min}$ . Σε 2 περιόδους έχουν αποσταλεί 15 μονάδες δεδομένων

**Σχήμα 3.6:** Παραδείγματα μετάδοσης δεδομένων και Δυναμικού Τεμαχισμού (2)

Η παράμετρος  $L_{min}$  είναι μια νέα παράμετρος που δείχνει την ελάχιστη ποσότητα ωφέλιμου φόρτου που πρέπει να περιέχει ένα τεμάχιο δεδομένων. Κάθε πλαίσιο δεδομένων συνοδεύεται από ένα πρόσθετο φόρτο του συστήματος, που επιβαρύνει τη συνολική απόδοση. Ο πρόσθετος αυτός φόρτος είναι η μετάδοση της επικεφαλίδας του πλαισίου δεδομένων και η μετάδοση του πλαισίου θετικής επιβεβαίωσης του συγκεκριμένου πλαισίου. Έτσι η σωστή ρύθμιση αυτής της παραμέτρου οδηγεί σε βελτιστοποίηση της επίδοσης του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου, ώστε να πραγματοποιείται δυναμικός τεμαχισμός μόνο στις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες θα υπάρχει συνολικό όφελος πέραν του προφανούς, που είναι η αξιοποίηση του υπολειπόμενου ενεργού χρόνου. Για να δούμε διασθητικά το πότε υπάρχει συνολικό όφελος με τη χρήση του Δυναμικού τεμαχισμού μπορούμε να δούμε το σχήμα 3.6.

Στα σχήματα έχει προστεθεί κλίμακα μονάδας μέτρησης μεγέθους των μεταδιδόμενων δεδομένων, ώστε να είναι περισσότερο επεξηγηματικά. Επίσης, στα μεταδιδόμενα πλαίσια



**Σχήμα 3.7:** Οι επιτελούμενες λειτουργίες εντός των διαστημάτων σιγής και των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου και χρονοισμοί τους

δεδομένων διαχωρίζεται η επικεφαλίδα (HD) από τα δεδομένα. Στα παραδείγματα του σχήματος 3.6 φαίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις: Στην πρώτη (σχήμα 3.6(α') και 3.6(β')) ωφελεί η επιλογή μιας μεγάλης τιμής της παραμέτρου  $L_{min}$ , ενώ στη δεύτερη (σχήμα 3.6(γ') και 3.6(δ')) ωφελεί μία μικρότερη τιμή, αν λάβουμε υπόψη μόνο τις 2 πρώτες περιόδους μετάδοσης. Βλέπουμε, λοιπόν, πως η συγκεκριμένη παράμετρος μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση της απόδοσης του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου. Το γεγονός αυτό εξετάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6 (βλ. §6.1), με χρήση του μαθηματικού μοντέλου επίδοσης της iDCF, όπου προτείνεται και ένας αλγόριθμος εύρεσης τη βέλτιστης τιμής της παραμέτρου  $L_{min}$  ανάλογα με το σενάριο που εφαρμόζεται.

### 3.4.3 Χρονοισμοί διαστημάτων σιγής και χρονοσχισμών πρωτοκόλλου

Τα διαστήματα σιγής που χρησιμοποιούνται στην iDCF είναι αυτά που χρησιμοποιούνται και στο πρότυπο πρωτόκολλο - λειτουργία DCF. Η ύπαρξή τους, όπως είδαμε και στην παράγραφο 3.1.5, είναι αναγκαία για (α) να υπάρχει αρκετός χρόνος μεταξύ των μεταδόσεων προκειμένου το PHY και το MAC να επεξεργαστούν τα ληφθέντα πλαίσια και να ετοιμάσουν τα προς μετάδοση, (β) να αντισταθμίζεται η προβλεπόμενη καθυστέρηση διάδοσης του δικτύου και (γ) να ορίζονται προτεραιότητες πρόσβασης με την υιοθέτηση διαφορετικής διάρκειας διαστημάτων μεταξύ των σταθμών.

Ένα διάστημα IFS είναι πιθανό, αποτελώντας τμήμα μια ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων ή της διαδικασίας ανταγωνισμού του μέσου, να διακοπεί από κάποια διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Όταν συμβαίνει αυτό, το διάστημα σιγής που έχει εκκινήσει σε έναν ενεργό χρόνο διακόπτεται, για όσο διαρκεί η διαδικασία, και η τήρησή του συνεχίζεται και ολοκληρώνεται στον επόμενο ενεργό χρόνο. Είναι πολύ σημαντικό, για όλους τους παραπάνω λόγους αλλά κυρίως για τη διατήρηση των προτεραιοτήτων, όταν συμβαίνει διακοπή να διατηρείται η συνολική διάρκεια του διαστήματος σιγής.

Στο σχήμα 3.7 απεικονίζονται οι διάφορες λειτουργίες που επιτελούνται μέσα στα διαστήματα σιγής SIFS και DIFS και στις χρονοσχισμές του πρωτοκόλλου καθώς και οι χρονοισμοί τους. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι χρονοισμοί εντός των διαστημάτων σιγής και των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου και αναλύεται η συμπεριφορά τους κατά τις διακοπές.

### 3.4.3.1 SIFS

Το θεμελιώδες και μικρότερο διάστημα σιγής είναι το SIFS. Αυτό, είναι το ελάχιστο δυνατό διάστημα στο οποίο ο πομποδέκτης είναι σε θέση να εκκινήσει εκπομπή από τη στιγμή που ολοκληρώνεται μία προηγούμενη εκπομπή στο μέσο. Στο σχήμα 3.7 φαίνεται ότι από τη στιγμή που τελειώνει η μετάδοση στο μέσο, το PHY χρειάζεται χρόνο  $RxRF$  για επεξεργασία και το PHY PLCP (πρωτόκολλο σύγκλισης στο φυσικό στρώμα) χρόνο  $RxPLCP$  μέχρι να προωθήσει το ληφθέν πακέτο προς το MAC. Στη συνέχεια χρειάζεται χρόνος  $M1$  για την επεξεργασία στο MAC και την προετοιμασία του νέου πακέτου προς αποστολή. Στο τέλος της επεξεργασίας αυτής το MAC δίνει σήμα στο PHY να κάνει μεταγωγή στη λειτουργία πομπού, ώστε να στείλει το νέο πακέτο. Η καθυστέρηση αυτής της μεταγωγής στο PHY είναι  $Rx/Tx$ . Επομένως, για το διάστημα SIFS έχουμε:

$$\begin{aligned} SIFS &= D1 + M1 + Rx/Tx, \\ D1 &= aRxRFDelay + aRxPLCPDelay, \\ M1 &= aMACProcessingDelay, \\ Rx/Tx &= aRxTxTurnaroundTime, \end{aligned} \tag{3.3}$$

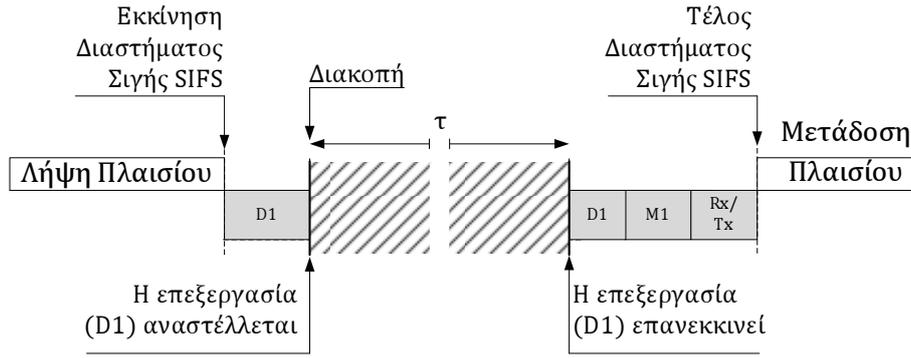
όπου οι παράμετροι  $aRxRFDelay$ ,  $aRxPLCPDelay$ ,  $aRxTxTurnaroundTime$  ορίζονται από το εκάστοτε φυσικό στρώμα και η  $aMACProcessingDelay$  ορίζεται από την υλοποίηση του MAC.

Στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο, όταν μία διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών διακόπτει το διάστημα σιγής SIFS, το πόσο αυτό θα επεκταθεί, εξαρτάται από το τμήμα του SIFS στο οποίο γίνεται η διακοπή. Διακοπή σε τμήματα τα οποία αφορούν επεξεργασία (είτε ψηφιακή επεξεργασία σήματος, είτε επεξεργασία στο επίπεδο MAC), προκαλεί την επέκταση του διαστήματος σιγής κατά τη διάρκεια της διακοπής  $\tau$ . Αυτό γιατί η διεργασία που εκτελεί την επεξεργασία αναστέλλεται με τη διακοπή (όπως κάθε λειτουργία του MAC), διατηρείται η κατάσταση της και επανεκκινείται με την έναρξη του ενεργού χρόνου. Έτσι, όταν η διακοπή στο διάστημα SIFS συμβεί είτε στο διάστημα  $D1$ , είτε στο διάστημα  $M1$ , το διάστημα σιγής επεκτείνεται κατά  $\tau$ :

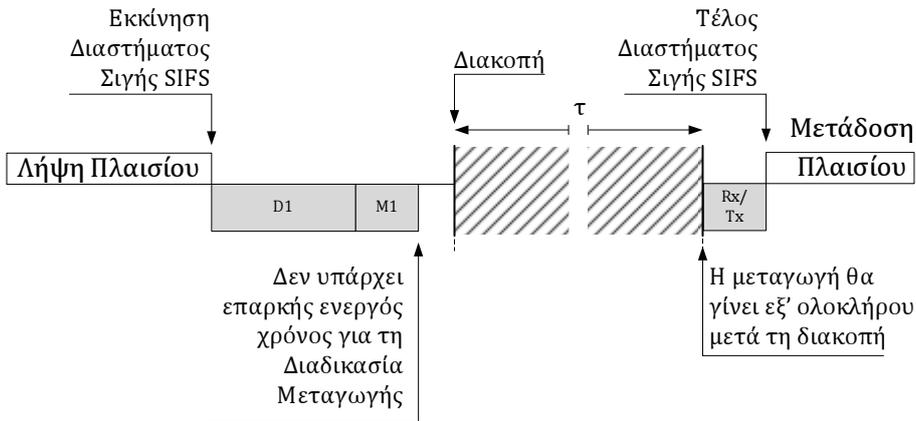
$$SIFS' = SIFS + \tau \tag{3.4}$$

Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται μία διακοπή του διαστήματος SIFS στους χρόνους επεξεργασίας.

Όταν η διακοπή συμβεί στο χρόνο μεταγωγής  $Rx/Tx$  τότε η μεταγωγή θα πρέπει να πραγματοποιηθεί εξ' ολοκλήρου στο νέο ενεργό χρόνο. Η λειτουργία μεταγωγής είναι η μόνη λειτουργία μέσα στο διάστημα SIFS που δεν μπορεί να διακοπεί. Η λειτουργία αυτή, επειδή αφορά διεργασία υλικού, θα πρέπει να ολοκληρώνεται μέσα σε έναν μοναδικό ενεργό χρόνο είτε πριν είτε μετά τη διακοπή. Έτσι, όταν η διακοπή συμβαίνει μέσα στο χρόνο μεταγωγής, το διάστημα σιγής επεκτείνεται κατά το διάστημα  $\tau$  συν τον υπολειπόμενο χρόνο από το τέλος



Σχήμα 3.8: Διακοπή διαστήματος SIFS σε χρόνο επεξεργασίας M1



Σχήμα 3.9: Διακοπή διαστήματος SIFS στο χρόνο μεταγωγής του πομποδέκτη

της επεξεργασίας M1 έως την έναρξη της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών:

$$SIFS' = SIFS + t_{rem} + \tau, t_{rem} \in [0, Rx/Tx) \quad (3.5)$$

Στο σχήμα 3.9 απεικονίζεται ένα παράδειγμα διακοπής του διαστήματος SIFS στη λειτουργία μεταγωγής.

### 3.4.3.2 Χρονοσχισμές πρωτοκόλλου

Λόγω του τροποποιημένου μηχανισμού υποχώρησης στην iDCF, ο οποίος περιγράφεται στην παράγραφο 3.4.4, οι χρονοσχισμές πρωτοκόλλου δε διακόπτονται. Ωστόσο, η εσωτερική τους λειτουργία είναι χρήσιμο να μελετηθεί επειδή τόσο το διάστημα DIFS όσο και το EIFS περιέχουν στο χρονοσχισμό τους τις λειτουργίες των χρονοσχισμών. Η διάρκεια της χρονοσχισμής Πρωτοκόλλου ορίζεται ώστε να είναι αρκετή για να γίνονται σε αυτήν οι ακόλουθες ενέργειες (βλ. σχήμα 3.7).

- AAPT (Αντισταθμιζόμενη Καυστέρηση Διάδοσης). Να φτάσει μία εκπομπή που εκκίνησε στο τέλος του προηγούμενου slot σε όλα τα τερματικά.
- CCA (Αποτίμηση Κατάστασης Μέσου). Να μπορέσει το PHY να καθορίσει την κατάσταση (ενεργό/ανενεργό) του μέσου και να ενημερώσει το MAC για την κατάσταση

αυτή.

- M2. Επεξεργασία και προετοιμασία του προς αποστολή πακέτου στο επίπεδο MAC.
- Rx/Tx. Σε περίπτωση λήξης του μετρητή οπισθοχώρησης πρέπει το PHY να πραγματοποιήσει τη μεταγωγή από την κατάσταση δέκτη στην κατάσταση εκπομπής ώστε να εκκινήσει η εκπομπή.

Επομένως η διάρκεια της χρονοσχιμής πρωτοκόλλου ορίζεται από το άθροισμα:

$$\begin{aligned}\sigma &= AAPT + CCA + M2 + Rx/Tx, \\ AAPT &= aAirPropagationTime, \\ CCA &= aCCATime, \\ M2 &= M1 = aMACProcessingDelay,\end{aligned}\tag{3.6}$$

όπου οι παράμετροι  $aAirPropagationTime$ ,  $aCCATime$  ορίζονται από το εκάστοτε φυσικό στρώμα.

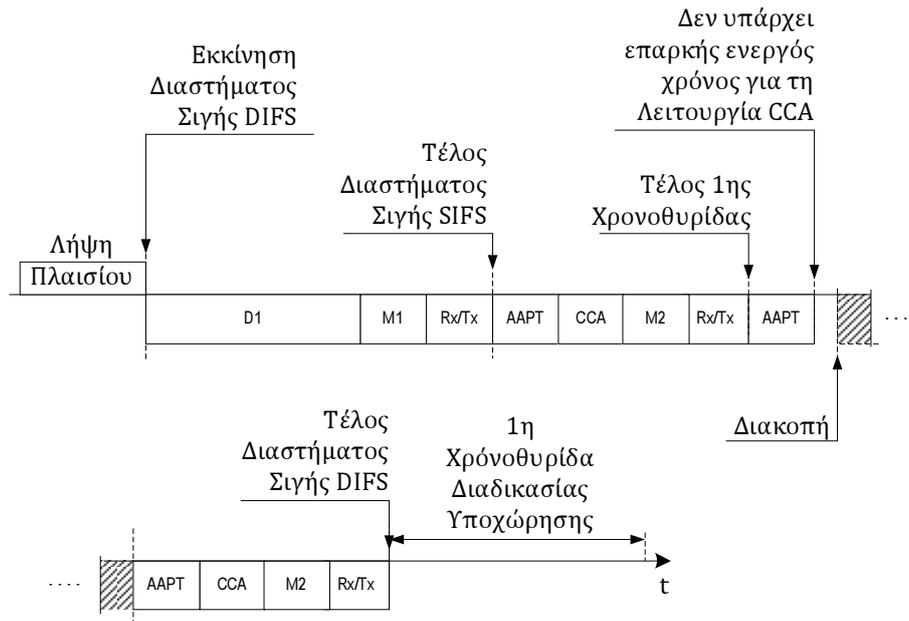
### 3.4.3.3 DIFS

Το διάστημα σιγής DIFS προκύπτει από την τήρηση του διαστήματος SIFS συν δύο χρονοσχιμών πρωτοκόλλου. Οι λειτουργίες, λοιπόν, που επιτελούνται μέσα στο διάστημα σιγής DIFS είναι με τη σειρά:

$$\begin{aligned}DIFS &= SIFS + 2 \cdot \sigma = \\ &= D1 + M1 + Rx/Tx + AAPT + CCA + M2 \\ &\quad + Rx/Tx + AAPT + CCA + M2 + Rx/Tx\end{aligned}\tag{3.7}$$

Στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο, όταν μία διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών διακόπτει το διάστημα σιγής DIFS, το πόσο αυτό θα επεκταθεί, εξαρτάται και πάλι από το τμήμα του διαστήματος στο οποίο γίνεται η διακοπή. Έτσι, διακοπή σε τμήματα που αφορούν επεξεργασία ( $D1$ ,  $M1$ ,  $M2$ ) προκαλεί επέκταση κατά τη διάρκεια  $\tau$  της διακοπής, ενώ σε τμήματα μεταγωγής του πομποδέκτη ( $Rx/Tx$ ), επέκταση κατά  $\tau$  συν τον υπολειπόμενο χρόνο, που κατανέμεται στο διάστημα  $[0, Rx/Tx)$ . Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στο ζευγάρι  $AAPT$  και  $CCA$ , τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ενιαία. Η αντισταθμιζόμενη καθυστέρηση διάδοσης (για να φτάσει μια μετάδοση από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο) και ο χρόνος αποτίμησης της κατάστασης του μέσου (ανίχνευσης της ύπαρξης της μετάδοσης αυτής), επειδή αφορούν μια συγκεκριμένη μετάδοση, θα πρέπει να ολοκληρωθούν και οι δύο μέσα στον ίδιο ενεργό χρόνο. Έτσι, στην περίπτωση που η διακοπή γίνει στο τμήμα  $AAPT + CCA$  κάποιες από τις δύο χρονοσχισμές τότε:

$$DIFS' = DIFS + t_{rem} + \tau, t_{rem} \in [0, AAPT + CCA)\tag{3.8}$$



**Σχήμα 3.10:** Διακοπή διαστήματος DIFS στο χρόνο αποτίμησης κατάστασης του μέσου της δεύτερης εν σειρά χρονοσχισμής πρωτοκόλλου

Στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται ένα παράδειγμα διακοπής του διαστήματος DIFS στη λειτουργία αποτίμησης της κατάστασης του μέσου.

### 3.4.3.4 EIFS

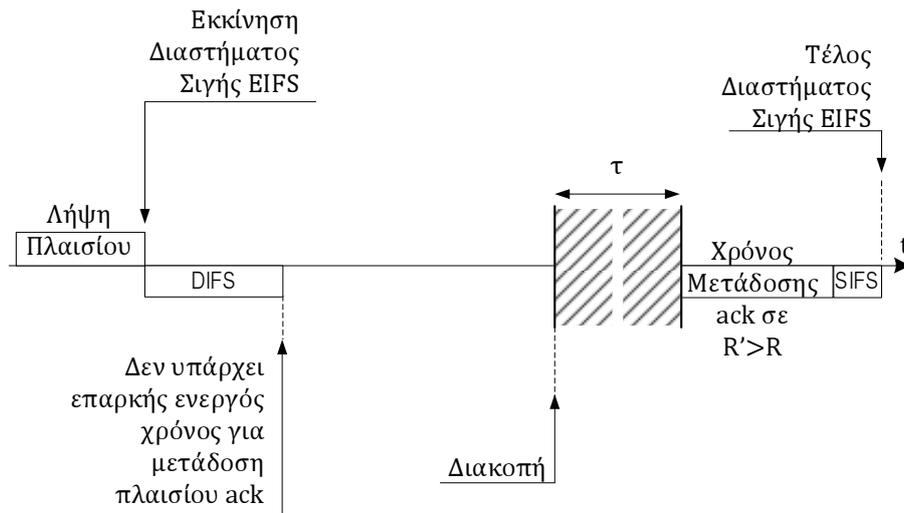
Το επεκτεταμένο διάστημα σιγής, όπως είδαμε, είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιέχει τη μετάδοση ενός πλαισίου ack:

$$EIFS = SIFS + ACK + DIFS \quad (3.9)$$

Στο πρότυπο πρωτόκολλο η διάρκεια του διαστήματος σιγής EIFS προκύπτει αν υπολογιστεί ο χρόνος μετάδοσης του πλαισίου ack με το βασικό ρυθμό 1 Mbps του προτύπου. Στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο λαμβάνεται υπόψη κάθε φορά ο τρέχων ρυθμός μετάδοσης. Αν διακοπεί το διάστημα EIFS από διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών σε κάποιο τμήμα του διαστήματος SIFS ή DIFS, τότε ισχύει για την επέκταση του EIFS ό,τι και για την επέκταση των επιμέρους διαστημάτων σιγής που περιγράφηκε προηγουμένως. Αν η διακοπή συμβεί μέσα στο διάστημα κατά το οποίο ο σταθμός αναμένει τη μετάδοση πλαισίου ack, τότε το διάστημα EIFS εκτείνεται ως:

$$\begin{aligned} EIFS' &= SIFS + t_{rem} + \tau + ACK' + DIFS, \\ t_{rem} &\in [0, ACK + \delta), \end{aligned} \quad (3.10)$$

όπου  $ACK'$  αναπαριστά το χρόνο μετάδοσης του πλαισίου ack στο νέο ρυθμό μετάδοσης μετά τη διαδικασία φασματικής ανίχνευσης, ενώ το  $ACK$  αφορά το χρόνο μετάδοσης του πλαισίου



**Σχήμα 3.11:** Διακοπή διαστήματος EIFS στο χρόνο αναμονής μετάδοσης του πλαισίου ack και αυξημένος ρυθμός μετάδοσης  $R'$  μετά το πέρασ της ανίχνευσης φασματικών οπών

στο ρυθμό μετάδοσης του ενεργού χρόνου στον οποίο εκκίνησε το διάστημα σιγής EIFS.

Το σχήμα 3.11 απεικονίζει τη διακοπή του διαστήματος EIFS, που τηρείται σε ένα τερματικό, η οποία πραγματοποιείται κατά την αναμονή μετάδοσης του πλαισίου ack και ο ρυθμός μετάδοσης  $R'$  στο νέο ενεργό χρόνο είναι μεγαλύτερος του προηγούμενου  $R$ .

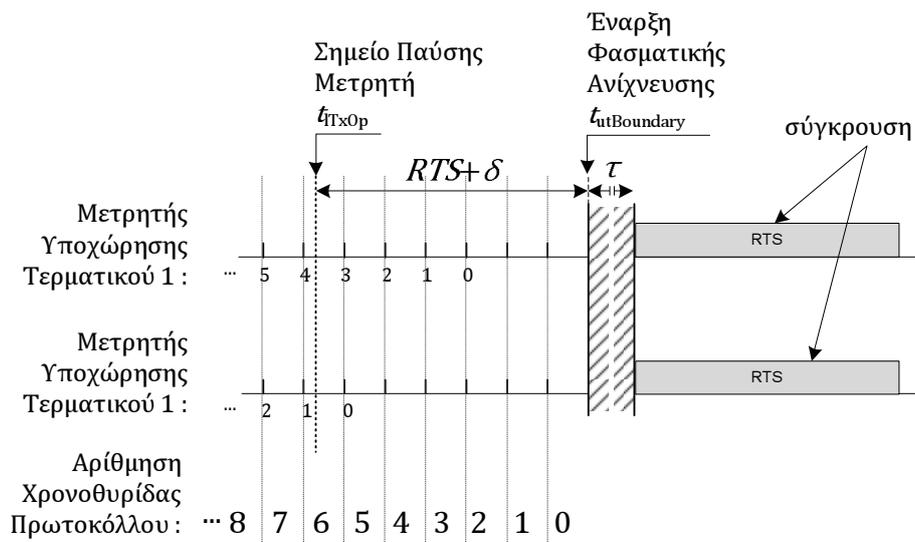
### 3.4.4 Διακοπτόμενος Μηχανισμός Υποχώρησης

Ο διακοπτόμενος τρόπος λειτουργίας της iDCF επιβάλλει την τροποποίηση του μηχανισμού υποχώρησης. Ο μετρητής υποχώρησης θα πρέπει να παγώνει καθώς πλησιάζει η επόμενη διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών, στο σημείο στο οποίο ο εναπομείνας ενεργός χρόνος είναι ακριβώς όσος χρειάζεται για τη μετάδοση του πλαισίου ack. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το παράδειγμα του σχήματος 3.12.

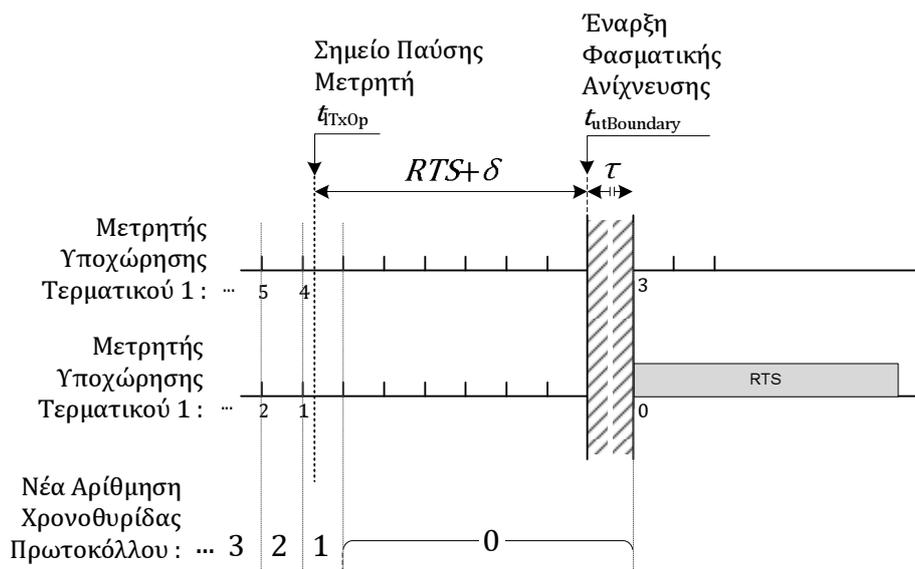
Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4.2 όταν έρθει η στιγμή της μετάδοσης ενός πλαισίου, ελέγχεται ο εναπομείνας ενεργός χρόνος και εάν δεν επαρκεί για ολόκληρη τη μετάδοση, τότε αυτή λαμβάνει χώρα ακριβώς με την έναρξη του επόμενου ενεργού χρόνου. Αυτό γίνεται, προκειμένου η μετάδοση να μην επεκταθεί μέσα στην περίοδο κατά την οποία τα τερματικά πρέπει να εκτελούν τη διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών.

Στο σχήμα 3.12(α') απεικονίζονται δύο Ανταγωνιζόμενα τερματικά που μάχονται για την πρόσβαση στο μέσο εκτελώντας τη διαδικασία υποχώρησης. Ο μετρητής υποχώρησης μειώνεται κατά μία μονάδα στην έναρξη κάθε χρονοσχιμής πρωτοκόλλου. Και στα δύο τερματικά ο μετρητής υποχώρησης μηδενίζεται σε στιγμές στις οποίες δεν είναι δυνατή η μετάδοση του πλαισίου ack, λόγω της επερχόμενης διακοπής. Έτσι, τα δύο τερματικά αναγκάζονται να μεταδώσουν μετά τη διακοπή, με αποτέλεσμα να προκαλείται σύγκρουση των μεταδόσεων, παρόλο που η τυχαία επιλογή διαφορετικού χρόνου υποχώρησης είχε εξασφαλίσει το αντίθετο.

Στο σχήμα 3.12(β') η μείωση του μετρητή υποχώρησης παγώνει όταν τα τερματικά διασχίσουν το χρονικό σημείο  $t_{T_{\text{XOP}}}$ . Το σημείο αυτό ορίζεται σαν η τελευταία χρονική στιγμή



(α') Διαμάχη για το μέσο που οδηγεί σε σύγκρουση πακέτων



(β') Διόρθωση προβλήματος με παύση του μετρητή υποχώρησης στο σημείο  $t_{TxOp}$

**Σχήμα 3.12:** Παραδείγματα διαδικασίας υποχώρησης κοντά το σημείο διακοπής

στην οποία μπορεί να εκκινήσει η μετάδοση του πλαισίου rts. Αν  $t_{utBoundary}$  είναι το χρονικό σημείο - σύνορο του τρέχοντος ενεργού χρόνου - έναρξης της επερχόμενης διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών, τότε:

$$t_{TxOp} = t_{utBoundary} - (RTS + \delta), \quad (3.11)$$

όπου στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης  $\delta$  του δικτύου. Με την τροποποίηση αυτή, οι προτεραιότητες που τίθενται από τον αλγόριθμο επιλογής

διάρκειας υποχώρησης διατηρούνται και αποφεύγεται το φαινόμενο των συγκρούσεων σαν αυτή του σχήματος 3.12(α').

Το πρόβλημα που περιγράφεται στο σχήμα 3.12(α') (η εκπνοή του μετρητή υποχώρησης σε χρονικά σημεία κατά τα οποία ο πομπός δεν είναι σε θέση ή δεν επιτρέπεται να πραγματοποιήσει μετάδοση) και οδηγεί σε αδικία και μη τήρηση προτεραιοτήτων, έχει αναγνωρισθεί επίσης στην εργασία [62] για τερματικά πολλαπλών διεπαφών. Στη μελέτη αυτή, με το όνομα “διασπώμενο” CSMA, αντιμετωπίζεται με ένα μηχανισμό εξόφλησης πιστούμενου χρόνου υποχώρησης, που υπολογίζεται στατιστικά. Ο επιπρόσθετος αυτός χρόνος υποχώρησης αποδίδεται στα τερματικά όταν είναι ξανά σε θέση να μεταδώσουν. Στην iDCF όμως, το γεγονός ότι οι “διασπάσεις” αυτές συμβαίνουν ταυτόχρονα σε όλα τα τερματικά, εξαιτίας των διακοπών, και τα τερματικά γνωρίζουν τα χρονικά σημεία των διακοπών, οδηγεί στην προηγούμενη απλούστερη και αποδοτική λύση της παύσης του μετρητή σε χρονικό σημείο νωρίτερα από τη διακοπή.

Συγκεντρωτικά, αναφέρουμε για τον τροποποιημένο μηχανισμό τις περιπτώσεις στις οποίες η διαδικασία υποχώρησης παγώνει:

1. Όταν ανιχνεύεται μετάδοση και μέχρι να παρατηρηθεί το μέσο ενεργό για διάστημα DIFS μετά το πέρας της, περίπτωση που εφαρμόζεται και στο πρότυπο πρωτόκολλο.
2. Όταν το τερματικό διασχίσει το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  και μέχρι το πέρας της επερχόμενης διαδικασίας φασματικής ανίχνευσης, περίπτωση που προστέθηκε για το διακοπτόμενο πρωτόκολλο.

Στην περίπτωση που ο μετρητής υποχώρησης δεν παγώνει στο σημείο  $t_{TxOp}$ , όπως στο παράδειγμα του σχήματος 3.12(α'), η πιθανότητα ο μετρητής ενός τερματικού να μηδενιστεί πριν το χρονικό σημείο  $t_{utBoundary}$  και μετά το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας με την οποία πραγματοποιούνται διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών. Όσο πιο συχνές είναι οι διακοπές, η πιθανότητα αυτή μεγαλώνει. Επίσης, η πιθανότητα αυτή αυξάνει όσο μεγαλώνει το χρονικό διάστημα  $RTS + \delta$ , επειδή τότε ο αριθμός των χρονοσχισμών του πρωτοκόλλου, που περιέχονται μέσα σε αυτό το διάστημα, είναι μεγαλύτερος. Το τελευταίο εξαρτάται άμεσα από τον τρέχοντα ρυθμό μετάδοσης, εφόσον το μήκος τους πλαισίου rts είναι σταθερό. Ο παραπάνω συλλογισμός, αν  $\hat{t}_{bexp}$  είναι η τυχαία μεταβλητή της χρονικής στιγμής λήξης του μετρητή υποχώρησης, μπορεί να εκφραστεί με τη σχέση:

$$P[t_{TxOp} < \hat{t}_{bexp} \leq t_{utBoundary}] \sim \frac{1}{T}, \frac{1}{R} \quad (3.12)$$

Είναι, επομένως, αντιληπτό ότι ο νέος τροποποιημένος μηχανισμός υποχώρησης, όπως περιγράφεται σε αυτήν την παράγραφο, είναι απαραίτητος ειδικά σε απαιτητικά περιβάλλοντα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, στα οποία επιβάλλονται συχνές διακοπές και επιτυγχάνονται χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης στο Δευτερεύον δίκτυο. Στο κεφάλαιο 5 (βλ. §5.4) η σημασία αυτής της τροποποίησης εξετάζεται και αναλυτικά.

### 3.4.5 Δυναμικός Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος

Ο μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος, που υπάρχει στο πρότυπο πρωτόκολλο, δεν μπορεί να εφαρμοστεί στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της Ιεραρχικής Χρήσης Φάσματος. Μία ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων είναι δυνατό να καταλάβει περισσότερους από έναν ενεργούς χρόνους. Οι παρεχόμενοι ρυθμοί μετάδοσης στους επόμενους ενεργούς χρόνους, πέρα από τον τρέχοντα, δεν είναι γνωστοί εκ των προτέρων. Με άλλα λόγια ο ρυθμός μετάδοσης που παρέχεται μετά από κάθε διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών δεν είναι γνωστός, επειδή δεν είναι γνωστό το μελλοντικό ποσοστό κατάληψης του φάσματος από το Πρωτεύον δίκτυο. Για το λόγο αυτό, η διάρκεια κατά την οποία το μέσο θα είναι κατειλημμένο από μία ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων δεν μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων, πράγμα που δεν ισχύει και στο πρότυπο πρωτόκολλο.

Έτσι, στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο θα πρέπει να υλοποιηθεί ένας διαφορετικός μηχανισμός με δυναμικό υπολογισμό της διάρκειας κράτησης του μέσου. Ο μηχανισμός αυτός θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι η διαδικασία κράτησης του μέσου:

- θα ενημερώνεται με κάθε πλαίσιο που λαμβάνεται από τα τερματικά, τα οποία δε συμμετέχουν στην ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων (Ανταγωνιζόμενα τερματικά),
- στην περίπτωση κατά την οποία κάποιο πλαίσιο της ακολουθίας δε λαμβάνεται ορθά από κάποιο τερματικό (λόγω διαλείψεων, φαινόμενο κρυμμένου τερματικού), το τερματικό αυτό θα πρέπει με ακρίβεια να εξακολουθεί να γνωρίζει την εναπομείνασα διάρκεια κράτησης του μέσου,
- δε θα επηρεάζεται από τις διακοπές λόγω των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών και θα ενημερώνεται με βάση το νέο ρυθμό μετάδοσης σε κάθε έναρξη ενεργού χρόνου.

Ο νέος δυναμικός μηχανισμός εικονικής ανίχνευσης φέροντος χρησιμοποιεί τις ίδιες βασικές δομές με το μηχανισμό του πρότυπου πρωτοκόλλου. Χρησιμοποιεί α) το μετρητή NAV, τον οποίο διατηρούν όλα τα Ανταγωνιζόμενα τερματικά του δικτύου και ο οποίος δείχνει σε *μs* την εναπομείνασα διάρκεια κράτησης του μέσου και β) το πεδίο DurationID των μεταδιδόμενων πλαισίων για την ανακοίνωση της πληροφορίας κράτησης του μέσου, το οποίο τίθεται από τα τερματικά Πηγή και Προορισμός και χρησιμοποιείται από τα Ανταγωνιζόμενα τερματικά.

Η τροποποίηση αφορά τη διαφορετική χρήση των δομών αυτών. Στο δυναμικό μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος το πεδίο DurationID των μεταδιδόμενων πλαισίων τίθεται στις τιμές που απεικονίζονται στον πίνακα 3.1. Έτσι, αυτό που ανακοινώνεται με αυτό το πεδίο δεν είναι άμεσα η πληροφορία διάρκειας της κράτησης, αλλά μία έμμεση πληροφορία, μέσω της οποίας θα υπολογιστεί η διάρκεια της κράτησης. Ανακοινώνεται ο ωφέλιμος φόρτος της μεταδιδόμενης ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων σε *b*. Ο υπολογιστικός φόρτος για την εκτίμηση της διάρκειας κράτησης, επομένως, μετατίθεται στα Ανταγωνιζόμενα τερματικά. Αυτά, ανάλογα με τον τύπο του ληφθέντος πακέτου και τα πεδία MoreFragment και DurationID, υπολογίζουν τη διάρκεια για την οποία το μέσο θα πρέπει να παραμείνει σε κράτηση για την

**Πίνακας 3.1:** Περιεχόμενα πεδίου *DurationID* ανάλογα με τον τύπο του πακέτου και το πεδίο *More Fragment*.

Τύπος Πακέτου	Περίπτωση Πολλαπλών MPDU		Περίπτωση Απλής MPDU	
	More Fragment	DurationID	More Fragment	DurationID
rts	-	$L_P$	-	$L_P$
cts	-	$L_P$	-	$L_P$
data	1	$L_{PN}$	0	0
ack	-	$L_{PN}$	-	0

FES . Ο υπολογισμός αυτός είναι δυναμικός και λαμβάνει υπόψη του τις διακοπές για τις διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών. Συγκεκριμένα, αφού ελέγξει τον εναπομείναντα ενεργό χρόνο  $t_{rem}$  και την απαιτούμενη διάρκεια κράτησης του μέσου  $t_{rsrv}$ , θέτει το μετρητή NAV ανάλογα με τις περιπτώσεις των πινάκων 3.2 έως 3.4. Η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται σε όλες τις περιπτώσεις των παρακάτω πινάκων συνοψίζεται στα εξής:

- Όταν η υπολειπόμενη διάρκεια κράτησης είναι μικρότερη του εναπομείναντος ενεργού χρόνου, ο μετρητής NAV τίθεται κανονικά όπως και στο πρότυπο πρωτόκολλο.
- Όταν η υπολειπόμενη διάρκεια κράτησης είναι μεγαλύτερη του εναπομείναντος ενεργού χρόνου, ο μετρητής NAV τίθεται για έως την έναρξη της επερχόμενης διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών. Ταυτόχρονα με την έναρξη του προσεχούς ενεργού χρόνου και αν δεν έχει μεσολαβήσει ωστόσο λήψη επόμενου πλαισίου της ακολουθίας, ενημερώνεται ο μετρητής NAV με βάση το νέο ρυθμό μετάδοσης που προκύπτει.
- Όταν αναμένεται να πραγματοποιηθεί δυναμικός τεμαχισμός του πλαισίου δεδομένων, αυτό συνυπολογίζεται στη διαδικασία και η εναπομείνασα διάρκεια κράτησης, που θα τεθεί με την έναρξη του επόμενου ενεργού χρόνου, υπολογίζεται με βάση το επόμενο τεμάχιο δεδομένων.

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις της διάρκειας του εναπομείναντος ενεργού χρόνου  $t_{rem}$  που ανακύπτουν με τη λήψη ενός πλαισίου rts. Ελέγχεται το τι θα μπορέσει να μεταδοθεί στον  $t_{rem}$  ώστε να τεθεί ανάλογα ο μετρητής NAV, αλλά και να προετοιμαστεί η θέση του μετρητή NAV για μετά το πέρας της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών. Τότε, οι έλεγχοι και η θέση θα πραγματοποιηθούν εκ νέου με βάση την εναπομείνασα διάρκεια της ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων  $t'_{RSRV}$  που θα εκκρεμεί για μετάδοση.

Ο πίνακας 3.2 δείχνει το ποιοι έλεγχοι πραγματοποιούνται στα Ανταγωνιζόμενα Τερματικά και το πώς τίθεται ο μετρητής NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος μετά από τη λήψη ενός πλαισίου rts. Με την προετοιμασία για ενημέρωση του μετρητή NAV μετά από ενδεχόμενη διακοπή, εξασφαλίζεται πώς ακόμα και αν δε ληφθεί άλλο πλαίσιο για τη συγκεκριμένη ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων από κάποιο τερματικό, το τερματικό θα συνεχίσει να διατηρεί σωστά το μετρητή NAV μέχρι το πέρας της τρέχουσας ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων. Αυτό εξασφαλίζεται και στην περίπτωση που θα πραγματοποιηθεί δυναμικός τεμαχισμός του πλαισίου δεδομένων, όταν ο εναπομείνας ενεργός χρόνος είναι επαρκής για τη μετάδοση ενός τμήματος μόνο του ωφέλιμου φόρτου, μεγέθους  $L_F \in [L_{min}, L_P]$ . Στην

**Πίνακας 3.2:** Ο υπολογισμός και η θέση του μετρητή NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος της iDCF κατά τη λήψη του πλαισίου rts.

Πλάσιο rts. $t_{RSRV} = SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$				
Συνθήκη Διόφκειας $t_{rem}$			NAV	$t'_{RSRV}$
0	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + CTS$	$t_{rem}$	$\max(0, SIFS - t_{rem}) + CTS + SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$
$SIFS + CTS$	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_{min})$	$t_{rem}$	$\max(0, 2SIFS + CTS - t_{rem}) + DATA(L_P) + SIFS + ACK$
$SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_{min})$	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_F)$	$t_{rem}$	$ACK + SIFS + DATA(L_P - L_F) + SIFS + ACK$
$SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_P)$	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$	$t_{rem}$	$\max(0, 3SIFS + CTS + DATA(L_P) - t_{rem}) + ACK$
$SIFS + CTS + SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$	$\leq t_{rem}$		$t_{RSRV}$	0

**Πίνακας 3.3:** Ο υπολογισμός και η θέση του μετρητή NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος της iDCF κατά τη λήψη του πλαισίου cts.

Πλάσιο cts. $t_{RSRV} = SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$				
Συνθήκη Διόφκειας $t_{rem}$			NAV	$t'_{RSRV}$
0	$\leq t_{rem} <$	$+SIFS + DATA(L_{min})$	$t_{rem}$	$\max(0, SIFS - t_{rem}) + DATA(L_P) + SIFS + ACK$
$SIFS + DATA(L_{min})$	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + DATA(L_F)$	$t_{rem}$	$ACK + SIFS + DATA(L_P - L_F) + SIFS + ACK$
$SIFS + DATA(L_P)$	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$	$t_{rem}$	$\max(0, 2SIFS + DATA(L_P) - t_{rem}) + ACK$
$SIFS + DATA(L_P) + SIFS + ACK$	$\leq t_{rem}$		$t_{RSRV}$	0

τελευταία περίπτωση το τερματικό ετοιμάζεται ώστε, μετά το πέρας της διακοπής, να κάνει τους ελέγχους και να θέσει το μετρητή NAV για τη μετάδοση του υπόλοιπου ωφέλιμου φόρτου και των θετικών επιβεβαιώσεων.

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι έλεγχοι και η θέση του μετρητή NAV κατά τη λήψη ενός πλαισίου cts και στον πίνακα 3.4 κατά τη λήψη ενός πλαισίου δεδομένων το οποίο είναι το τελευταίο ή το μοναδικό της ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων. Κατά τη λήψη ενός οποιουδήποτε πλαισίου δεδομένων εκτός του τελευταίου μιας ακολουθίας πολλαπλών MPDU, οι έλεγχοι και οι θέσεις του NAV είναι όμοιοι με αυτούς του πίνακα 3.2 που πραγματοποιούνται κατά τη λήψη ενός πλαισίου rts. Αντίστοιχα, κατά τη λήψη ενός πλαισίου ack, και όταν εκκρεμούν τεμάχια δεδομένων, οι έλεγχοι είναι όμοιοι με αυτούς του πίνακα 3.3 κατά τη λήψη ενός cts. Η μόνη τροποποίηση των πινάκων 3.2 και 3.3 στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, είναι στις παραστάσεις η αντικατάσταση της μεταβλητής  $L_P$  από τη μεταβλητή  $L_{PN}$ , τον ωφέλιμο

**Πίνακας 3.4:** Ο υπολογισμός και η θέση του μετρητή NAV στο Δυναμικό Μηχανισμό Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος της iDCF κατά τη λήψη του πλαισίου data με  $moreFrag=1$ .

Πλάσιο data με $moreFrag=1$ . $t_{RSRV} = SIFS + ACK$				
Συνθήκη Διόφκειας $t_{rem}$			NAV	$t'_{RSRV}$
0	$\leq t_{rem} <$	$SIFS + ACK$	$t_{rem}$	$\max(0, SIFS - t_{rem}) + ACK$
$SIFS + ACK$	$\leq t_{rem}$		$t_{RSRV}$	0

### Κεφάλαιο 3. Το Διακοπτόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο

φόρτο του επόμενου πλαισίου δεδομένων, που φέρουν σαν πληροφορία τα πλαίσια αυτά (βλ. Πίνακα 3.1). Τέλος, κατά τη λήψη του τελευταίου πλαισίου θετικής επιβεβαίωσης ack ο μετρητής NAV μηδενίζεται όπως και στο πρότυπο πρωτόκολλο.

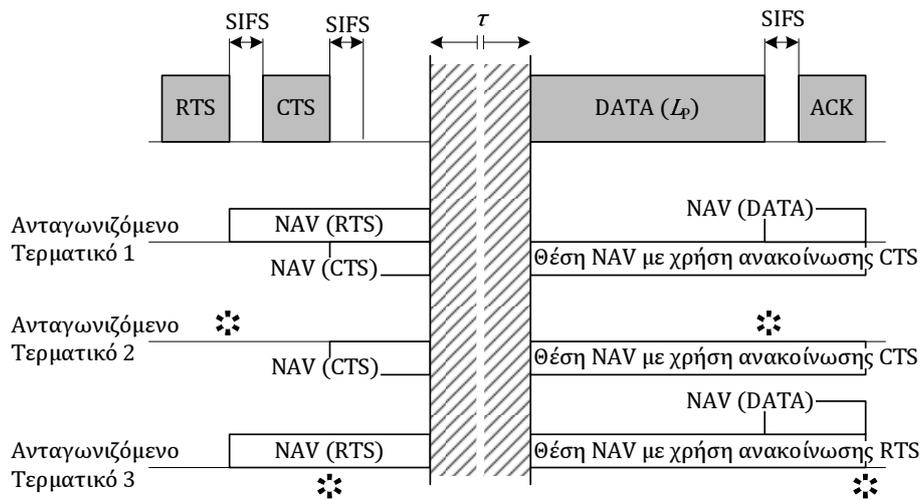
Οι έλεγχοι και η θέση του μετρητή NAV που περιγράφονται στους προαναφερθέντες πίνακες πραγματοποιούνται κάθε φορά που ένα Ανταγωνιζόμενο τερματικό λαμβάνει ένα πλαίσιο και κάθε φορά που εκκινεί ένας νέος ενεργός χρόνος ενώ εκκρεμεί η θέση του NAV, δηλαδή  $t'_{RSRV} \neq 0$ .

Στο σχήμα 3.13 φαίνονται ορισμένα παραδείγματα λειτουργίας του Δυναμικού Μηχανισμού Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος κατά τη διακοπτόμενη λειτουργία της iDCF. Στο παράδειγμα του σχήματος 3.13(α'), το Ανταγωνιζόμενο τερματικό 1 λαμβάνει τα μεταδιδόμενα πλαίσια τόσο από το τερματικό Πηγή (πλαίσια rts, data) όσο και από το τερματικό Προορισμός (πλαίσια cts, ack). Το τερματικό 2 δε λαμβάνει τις μεταδόσεις του τερματικού Πηγή. Παρόλα αυτά, είναι σε θέση να υπολογίζει και να θέτει σωστά τη διάρκεια κράτησης που απαιτείται για την ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων, χρησιμοποιώντας την πληροφορία μεγέθους του πλαισίου δεδομένων που ανακοινώθηκε στο πλαίσιο cts. Μετά το πέρας της διαδικασίας φασματικής ανίχνευσης, γνωρίζοντας το μέγεθος του πλαισίου δεδομένων που θα μεταδοθεί, θέτει κατάλληλα το μετρητή NAV. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν ο μηχανισμός παρέμενε ως είχε στο πρότυπο πρωτόκολλο, η πληροφορία κράτησης που θα περιείχε το cts δε θα είχε αξία, επειδή στον επόμενο ενεργό χρόνο ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να έχει αλλάξει. Το Ανταγωνιζόμενο τερματικό 3, το οποίο δεν είναι σε θέση να λάβει σωστά τις μεταδόσεις του τερματικού Προορισμός, θέτει ομοίως σωστά το μετρητή NAV χρησιμοποιώντας την πληροφορία που ανακοινώθηκε στο πλαίσιο rts.

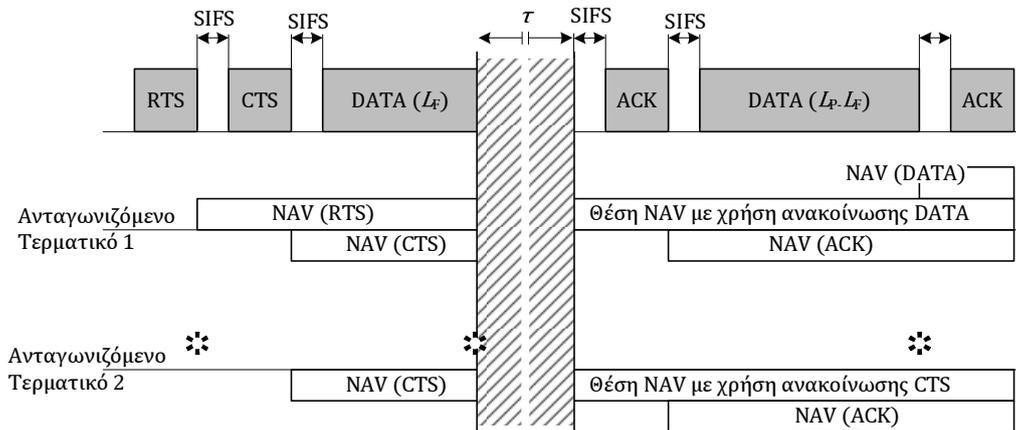
Το σχήμα 3.13(β') δείχνει ένα παράδειγμα θέσης του μετρητή NAV στο οποίο πραγματοποιείται δυναμικός τεμαχισμός του πλαισίου δεδομένων. Το τερματικό 1 λαμβάνει όλες τις μεταδόσεις ενώ το τερματικό 2 λαμβάνει μόνο ό,τι μεταδίδεται από το τερματικό Προορισμός της FES. Και τα δύο τερματικά μετά την έναρξη του νέου ενεργού χρόνου θέτουν σωστά το μετρητή NAV. Ένα τελευταίο παράδειγμα με εξαιρετικά βραχύ ενεργό χρόνο είναι αυτό του σχήματος 3.13(γ'). Τόσο το τερματικό που λαμβάνει όλες τις μεταδόσεις όσο και αυτό που λαμβάνει μόνο τις μεταδόσεις από το τερματικό Πηγή διατηρούν σωστά του μετρητές κράτησης του μέσου ακολουθώντας τους κανόνες του Δυναμικού Μηχανισμού Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος. Σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα βλέπουμε πως ο νέος μηχανισμός εικονικής ανίχνευσης φέροντος αποδίδει όπως αναμένεται σε δύσκολες περιπτώσεις, που παρουσιάζεται το φαινόμενο του κρυμμένου τερματικού, όπως ισχύει και για τον αντίστοιχο μηχανισμό του πρότυπου πρωτοκόλλου.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, δίνεται η υλοποίηση όλων των περιγραφέντων τροποποιήσεων της DCF στην περιγραφική γλώσσα ορισμού πρωτοκόλλων SDL.

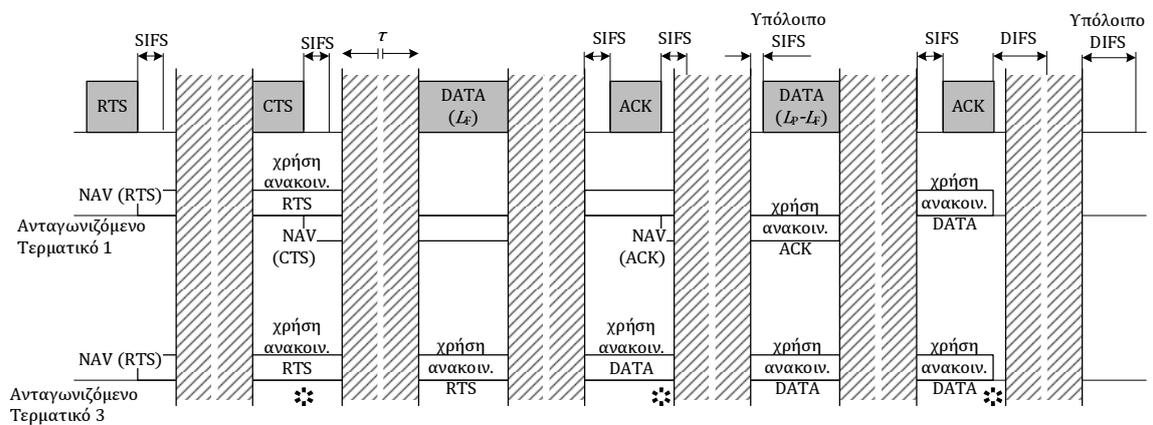
Κεφάλαιο 3. Το Διακοπτόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο



(α) Ανεπαρκής ενεργός χρόνος για τη μετάδοση του πλαισίου δεδομένων



(β') Επαρκής ενεργός χρόνος για την πραγματοποίηση Δυναμικού Τεμαχισμού του πλαισίου δεδομένων



(γ') Βραχύς ενεργός χρόνος

Σχήμα 3.13: Παραδείγματα θέσης του μετρητή NAV στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο

### 3.5 Η Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο

Σε ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών ο συγχρονισμός στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο MAC είναι απαραίτητος. Ένα κοινό σημείο χρονικής αναφοράς καθιστά εφικτή την υλοποίηση θυριδωτών αλγορίθμων πρόσβασης στο μέσο, όπως είναι η πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση χρόνου TDMA, ή το θυριδωτό Aloha καθώς και άλλες συγχρονισμένες διαδικασίες. Οι εσωτερικοί ταλαντωτές των κόμβων όμως, από τους οποίους δέχονται είσοδο οι τοπικοί μετρητές χρόνου, παρουσιάζουν αποκλίσεις από την ονομαστική τους συχνότητα. Αυτό οδηγεί στο να εμφανίζονται μεγάλα σφάλματα - ολισθήσεις μεταξύ των ενδείξεων των τοπικών μετρητών χρόνου και του πραγματικού χρόνου. Τα σφάλματα αυξάνουν με την πάροδο του χρόνου. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την εισαγωγή διαδικασιών συντονισμού των ρολογιών στη λειτουργία των κόμβων.

Στα δίκτυα κεντρικής αρχιτεκτονικής ο κεντρικός σταθμός αναλαμβάνει να συντονίσει τη διαδικασία συγχρονισμού. Ορίζει σημεία χρονικής αναφοράς στέλνοντας περιοδικά μηνύματα συγχρονισμού. Αυτά λαμβάνονται από τους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι με τη σειρά τους διορθώνουν ανάλογα το εσωτερικό τους ρολόι, αντισταθμίζοντας έτσι την ολίσθηση που έχει επέλθει από την τελευταία φορά που έλαβαν μήνυμα συγχρονισμού.

Η παραπάνω διαδικασία δε μπορεί να εφαρμοστεί στα δίκτυα κατανεμημένης αρχιτεκτονικής. Εκεί, ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται με πιο πολύπλοκους αλγορίθμους λόγω της απουσίας κεντρικής οντότητας που να συντονίζει τη διαδικασία. Μια πληθώρα αλγορίθμων κατανεμημένου συγχρονισμού [63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73] έχει προταθεί από την παγκόσμια ερευνητική δραστηριότητα. Ο συγχρονισμός στα κατανεμημένα δίκτυα μπορεί επίσης να πραγματοποιείται με τη χρήση του συστήματος GPS. Ενσωματωμένοι δέκτες GPS στους κόμβους του δικτύου θα αποκομίζουν τις πληροφορίες χρονοσφραγίδων που περιέχουν τα μεταδιδόμενα μηνύματα του εν λόγω συστήματος παγκόσμιας κάλυψης. Ωστόσο η απαίτηση ύπαρξης δεκτών GPS αυξάνει το συνολικό κόστος.

Στη Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου, που υλοποιήθηκε, ο συγχρονισμός είναι απαραίτητος ώστε:

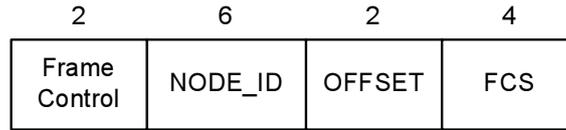
- Να λειτουργεί η διαδικασία θυριδωτής υποχώρησης των σταθμών συντονισμένα σε όλο το εύρος του δικτύου. Αυτό σημαίνει να παγώνει και να επανεκκινεί η μείωση του υπολειπόμενου χρόνου υποχώρησης ταυτόχρονα σε όλους τους σταθμούς.
- Να εκκινείται η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών κενών ταυτόχρονα στους κόμβους του δικτύου. Η παύση των εκπομπών από τους κόμβους του Δευτερεύοντος δικτύου είναι κρίσιμη ώστε να μπορούν να ανιχνεύονται οι εκπομπές από το Πρωτεύον δίκτυο. Ένα τερματικό του Δευτερεύοντος δικτύου που θα ήταν εκτός συγχρονισμού και θα συνέχιζε τις εκπομπές, θα προκαλούσε εσφαλμένα συμπεράσματα ως προς την τρέχουσα φασματική κατάληψη και άρα υποχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

- Να μπορούν να εκτελούνται μετρήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Όπως σε κάθε ασύρματο δίκτυο, που διαθέτει λειτουργίες εγγύησης ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας, η καταγραφή συγκεκριμένων ποιοτικών μεγεθών, όπως η καθυστέρηση πακέτου από άκρη σε άκρη, δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί όταν οι κόμβοι δεν έχουν κοινό χρονικό σημείο αναφοράς.

Ο συγχρονισμός στη Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου επιτυγχάνεται μέσα στη χρονοσχισμή SYNC, η οποία τοποθετείται χρονικά στο τέλος του διαστήματος διακοπής όπως ακριβώς απεικονίζεται στο σχήμα 2.13. Εκεί εφαρμόζεται μία σχετικά απλή διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων συγχρονισμού, η οποία όμως επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου, δεδομένης της σχετικά υψηλής συχνότητας με την οποία εκτελείται. Ο μηχανισμός εκμεταλλεύεται τη διακοπή της λειτουργίας που γίνεται ούτως ή άλλως για τη διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών και δεν επιβαρύνει το δίκτυο με επιπλέον διακοπές. Ο πρόσθετος φόρτος που εισάγεται προκαλείται από την επέκταση της διάρκειας της διακοπής κατά τη διάρκεια  $T_{SYNC}$  της θυρίδας SYNC. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, η Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού στο διακοπτόμενο πρωτόκολλο πρέπει να είναι αποτελεσματικότερη από τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο πρωτόκολλο. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή:

1. Τα μηνύματα συγχρονισμού δεν εμπλέκονται στη φάση ανταγωνισμού του μέσου για μετάδοση δεδομένων, όπως γίνεται στο πρότυπο πρωτόκολλο, αλλά ανταλλάσσονται σε ειδικά αφιερωμένη χρονοθυρίδα, που βρίσκεται χρονικά μετά το πέρας της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών. Αυτό δίνει περισσότερες εγγυήσεις για την ορθή λήψη τους.
2. Υιοθετείται δυναμική διάρκεια  $T_{SYNC}$  της χρονοθυρίδας συγχρονισμού, λόγω μεταβλητότητας του ρυθμού μετάδοσης του φυσικού στρώματος, η οποία περιγράφεται παρακάτω, και επιτρέπει τη διατήρηση της πιθανότητας επιτυχούς αποστολής ενός μηνύματος συγχρονισμού στα επίπεδα που επιθυμεί ο σχεδιαστής.
3. Η περίοδος  $T$  με την οποία λαμβάνει χώρα η διαδικασία συντονισμού είναι αυτή με την οποία εκτελείται και η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Επομένως, είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του προτύπου. Εκεί προτείνεται τυπική τιμή τα  $100ms$  (παράμετρος  $aBeaconPeriod$  του πρωτοκόλλου), η οποία είναι αρκετά μικρή ώστε να καλύψει την ακρίβεια που απαιτείται στο πρότυπο πρωτόκολλο (η ένδειξη των τοπικών μετρητών χρόνου των κόμβων του δικτύου να είναι εντός του εύρους  $4\mu s$  συν τη μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης). Με την υιοθέτηση μικρότερης τιμής περιόδου η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την υλοποιηθείσα λειτουργία συντονισμού είναι σαφώς βελτιωμένη.

Η υλοποιηθείσα Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού εκκινεί με την έναρξη της χρονοθυρίδας SYNC και περιγράφεται από τους εξής βασικούς κανόνες που ακολουθούν όλοι οι εγγεγραμμένοι / ενεργοί κόμβοι του δικτύου ισότιμα:



Σχήμα 3.14: Η μορφή του πλαισίου SYNC

- Κάθε κόμβος προσπαθεί να στείλει μήνυμα συγχρονισμού μέσα στη χρονοθυρίδα SYNC ανεξάρτητα από το αν έχει ήδη λάβει ένα ή περισσότερα τέτοια μηνύματα μέσα στην ίδια χρονοθυρίδα.
- Στην αρχή της χρονοθυρίδας επιλέγει έναν τυχαίο χρόνο απόκλισης  $t_{offset}$  από την αρχή της χρονοθυρίδας, στον οποίο θα επιχειρήσει τη μετάδοση του δικού του μηνύματος συγχρονισμού. Ο χρόνος αυτός δε θα πρέπει να ξεπερνά τα όρια της χρονοθυρίδας συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου μετάδοσης του μηνύματος συγχρονισμού και της μέγιστης καθυστέρησης διάδοσης. Η τυχαία απόκλιση επιλέγεται σε ακέραια πολλαπλάσια  $n_{\sigma_{SYNC}}$  της χρονοθυρίδας  $\sigma_{SYNC}$ :

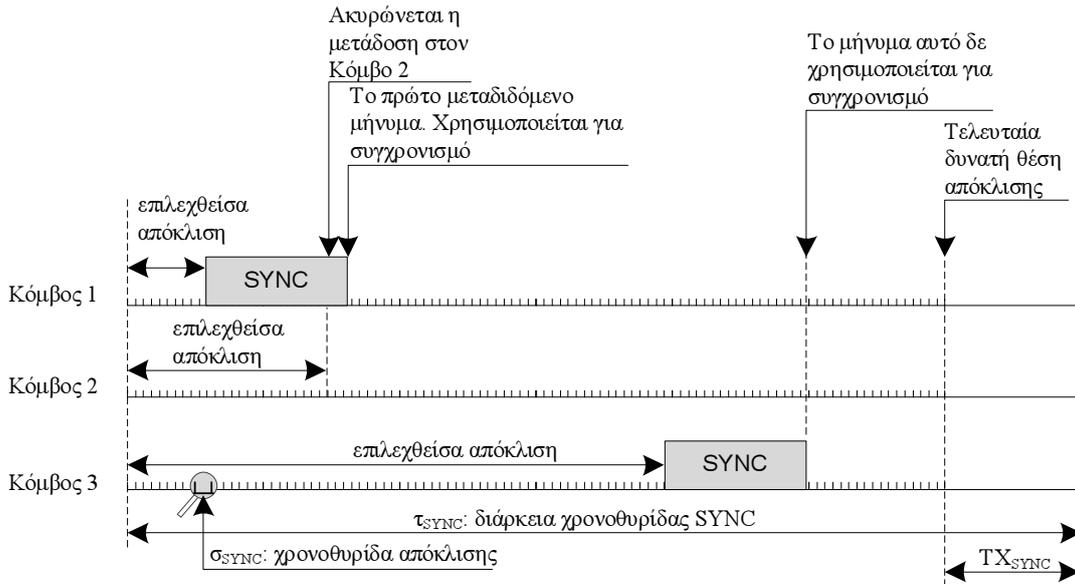
$$t_{offset} = n_{\sigma_{SYNC}} \times \sigma_{SYNC} \quad (3.13)$$

$$n_{\sigma_{SYNC}} \in (0, n_{\sigma_{SYNC},max}], \quad (3.14)$$

$$n_{\sigma_{SYNC},max} = \lfloor \frac{T_{SYNC} - TX_{SYNC} - \delta}{\sigma_{SYNC}} \rfloor, \quad (3.15)$$

όπου  $T_{SYNC}$  ο χρόνος μετάδοσης του μηνύματος SYNC. Η χρονοθυρίδα  $\sigma_{SYNC}$  έχει επαρκή διάρκεια ώστε (α) να φτάσει μια μετάδοση σε κάθε κόμβο του δικτύου (μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης) και (β) να αποτιμηθεί το μέσο σαν ανενεργό/ενεργό.

- Με τη πάροδο του διαστήματος απόκλισης  $t_{offset}$  και αν το μέσο είναι ανενεργό μεταδίδεται το μήνυμα συγχρονισμού. Αν το μέσο είναι ενεργό η μετάδοση ακυρώνεται και ο κόμβος δεν επιχειρεί ξανά μετάδοση στην τρέχουσα χρονοθυρίδα SYNC. Στο σχήμα 3.15 δίνονται ορισμένα παραδείγματα ανταλλαγής μηνυμάτων.
- Το μήνυμα συγχρονισμού περιέχει την ταυτότητα του κόμβου που το μεταδίδει και την απόκλιση από την έναρξη της χρονοθυρίδας, με την οποία πραγματοποιείται η μετάδοση. Η μορφή του πακέτου συγχρονισμού δίνεται στο σχήμα 3.14. Το πεδίο NODE\_ID τίθεται στη διεύθυνση MAC του κόμβου και το πεδίο OFFSET στην τιμή  $n_{\sigma_{SYNC}}$  που έχει επιλεγεί.
- Το πρώτο μήνυμα που λαμβάνει κάθε κόμβος χρησιμοποιείται για να ευθυγραμμίσει / συγχρονίσει το ρολόι του, μόνο εφόσον δεν έχει μεταδώσει ήδη ο ίδιος το δικό του μήνυμα. Για το συγχρονισμό, εξάγει την πληροφορία χρόνου  $t_{offset,rx}$  από το πεδίο OFFSET του ληφθέντος πακέτου και ευθυγραμμίζει το χρονικό σύνορο της τρέχουσας



Σχήμα 3.15: Παράδειγμα λειτουργίας κόμβων κατά τη χρονοθυρίδα SYNC

χρονοθυρίδας SYNC, σύμφωνα με την πληροφορία που έλαβε, σε:

$$t_{SYNC,end} = t_{now} - t_{offset,rx} - TX_{SYNC} + \tau_{SYNC}, \quad (3.16)$$

Τα επόμενα μηνύματα που λαμβάνονται στην ίδια χρονοθυρίδα δε χρησιμοποιούνται για συντονισμό ρολογιού, παρά μόνο για την γνωστοποίηση / ανίχνευση των κόμβων προς / από άλλους κόμβους.

- Μετά τη λήψη ενός μηνύματος συγχρονισμού κάθε κόμβος εξακολουθεί την προσπάθεια να μεταδώσει το δικό του μήνυμα συγχρονισμού τη χρονική στιγμή που έχει επιλέξει τυχαία κατά την έναρξη της διαδικασίας.

Η διάρκεια  $\tau_{SYNC}$  της χρονοθυρίδας SYNC επιλέγεται να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει τη μετάδοση πολλαπλών μηνυμάτων συγχρονισμού. Η επιλογή της τυχαίας χρονικής απόκλισης πριν τη μετάδοση σε κάθε κόμβο, μειώνει την πιθανότητα συγχρούσεων των μηνυμάτων συγχρονισμού. Λόγω της μεταβλητότητας του ρυθμού μετάδοσης, που παρέχει το φυσικό στρώμα στο περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, είναι απαραίτητη η δυναμική ρύθμιση του εύρους της χρονοθυρίδας SYNC ώστε να υπάρχει ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός χρονοθυρίδων  $\sigma_{SYNC}$ , ο οποίος ορίζεται σαν νέα παράμετρος `idcfMinSyncOffsetSlots` του πρωτοκόλλου. Από την εξίσωση 3.15 το ελάχιστο εύρος της χρονοθυρίδας ορίζεται σαν:

$$\tau_{SYNC} \geq idcfMinSyncOffsetSlots \times \sigma_{SYNC} + TX_{SYNC}(R) \quad (3.17)$$

όπου  $R$  είναι ο μεταβλητός ρυθμός μετάδοσης. Η προσαρμογή του εύρους της χρονοθυρίδας γίνεται σε όλους τους κόμβους μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών και τον επαναπρογραμματισμό του φυσικού στρώματος.

### Κεφάλαιο 3. Το Διακοπτόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο

Μετά τη λήψη ενός μηνύματος συγχρονισμού οι μεταδόσεις τέτοιων μηνυμάτων συνεχίζονται με σκοπό την ανίχνευση των γειτονικών κόμβων. Η γνώση της ταυτότητας και του συνολικού αριθμού των γειτονικών κόμβων, την οποία προσφέρει επιπρόσθετα ο μηχανισμός συγχρονισμού που υλοποιήθηκε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη λειτουργία κατανεμημένης πρόσβασης για την προσαρμογή του μεγέθους του αρχικού παραθύρου ανταγωνισμού  $W$  στο πλήθος των Ανταγωνιζομένων τερματικών, ή στην υλοποίηση του σχήματος DSDMA (βλ. §7.2, §7.3), ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση του δικτύου.

Ένας νεοεισερχόμενος κόμβος στο δίκτυο δεν έχει καμία γνώση για το πού βρίσκεται χρονικά το υπάρχον δίκτυο. Για την αρχική ευθυγράμμιση του χρόνου του, ο κόμβος αυτός ακολουθεί τους παρακάτω κανόνες.

- Κάθε κόμβος που εισέρχεται στο δίκτυο, αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση παθητικού συγχρονισμού. Κατά τον παθητικό συγχρονισμό 'ακούει' το μέσο προσπαθώντας να λάβει μηνύματα συγχρονισμού. Όταν λάβει κάποιο μήνυμα συγχρονισμού ευθυγραμμίζει το ρολόι του και αρχίζει να συμμετέχει ενεργά στο συγχρονισμό από την επόμενη χρονοθυρίδα SYNC.
- Στην κατάσταση παθητικού συγχρονισμού παραμένει μέχρι να παρέλθει η μέγιστη διάρκεια αναμονής. Αν ο κόμβος δε λάβει κανένα μήνυμα σε αυτό το διάστημα τότε μεταβαίνει στην κατάσταση ενεργού συγχρονισμού. Το μέγιστο διάστημα αναμονής θα πρέπει να διαρκεί αρκετές περιόδους  $T$  ώστε ο κόμβος να διασχίσει αρκετές χρονοθυρίδες SYNC στις οποίες υπάρχει ενδεχόμενο να λάβει μηνύματα συγχρονισμού.
- Στη κατάσταση ενεργού συγχρονισμού ο κόμβος υποθέτει πως δεν υπάρχουν άλλοι γειτονικοί κόμβοι και αρχικοποιεί ο ίδιος το χρονισμό των χρονοθυρίδων στέλνοντας μηνύματα συγχρονισμού. Οι κανόνες που ακολουθούνται εδώ είναι οι παραπάνω, οι οποίοι ισχύουν και για τους εγγεγραμμένους κόμβους ενός δικτύου.

Στο επόμενο κεφάλαιο, δίνεται η υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας συγχρονισμού για το διακοπτόμενο πρωτόκολλο κατανεμημένου ελέγχου στην περιγραφική γλώσσα SDL.

□



## Κεφάλαιο 4

# Υλοποίηση iDCF στη Γλώσσα SDL

Η SDL - (Specification and Description Language) είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, γενικού σκοπού και μία από τις καταλληλότερες [74] για συστήματα επικοινωνιών πραγματικού χρόνου, των οποίων η συμπεριφορά καθορίζεται από ασύγχρονα συμβάντα. Η SDL προτυποποιήθηκε κατά τα έτη 1976 έως 1992 από την ITU-T. Η πιο πρόσφατη ενημερωμένη έκδοση είναι αυτή του 2000 [75], η οποία ακολουθεί και την εξέλιξη των υπόλοιπων γλωσσών προγραμματισμού γενικού σκοπού προς στην αντικειμενοστρέφεια. Η αποτελεσματικότητά της στην προδιαγραφή συστημάτων, στον έλεγχο και την επικύρωση της ορθής λειτουργίας τους, στον έλεγχο επίδοσής τους αλλά και στη γρήγορη υλοποίηση πρωτοτύπων συστημάτων, της έχουν χαρίσει ευρεία διάδοση τόσο στο βιομηχανικό όσο και στο ακαδημαϊκό περιβάλλον ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [76]. Οι παγκόσμιοι οργανισμοί προτυποποίησης όπως το ETSI, το 3GPP και το IEEE έχουν οδηγηθεί στο να συμπεριλαμβάνουν διαγράμματα γλώσσας SDL στα επίσημα κείμενα των προδιαγραφών.

Το πρότυπο IEEE 802.11 περιλαμβάνει προδιαγραφές υλοποιημένες σε γλώσσα SDL. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η υλοποίηση της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου iDCF στη γλώσσα SDL, όπως προκύπτει από τις τροποποιήσεις και προσθήκες (βλ. §3.4) που πραγματοποιήθηκαν στο πρότυπο πρωτόκολλο (DCF), για την εφαρμογή του σε συστήματα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, και η υλοποίηση της Λειτουργίας Κατανεμημένου Συγχρονισμού. Η υλοποίηση του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου σε SDL προδιαγράφει με σαφέστερο τρόπο τις τροποποιήσεις που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και μπορεί να οδηγήσει άμεσα στην υλοποίηση ενός πρωτοτύπου.

### 4.1 Γενική περιγραφή υλοποίησης του πρωτοκόλλου

Ένα σύστημα SDL αποτελείται από ένα σύνολο μηχανών πεπερασμένων καταστάσεων. Κάθε μηχανή απαρτίζεται από ένα σύνολο ανεξάρτητων διεργασιών που έχουν αυτόνομο χώρο μεταβλητών και οι οποίες λειτουργούν παράλληλα. Η επικοινωνία μεταξύ των διεργασιών

πραγματοποιείται με ανταλλαγή σημάτων είτε ρητά, μέσω των συμβόλων εισόδου και εξόδου της γλώσσας, είτε έμμεσα με το μηχανισμό εισαγωγής και εξαγωγής τιμών μεταβλητών.

Η υλοποίηση ολόκληρου του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο του προτύπου IEEE 802.11 σαν ένα σύστημα *SDL*, εμπεριέχει όλες τις οντότητες του πρωτοκόλλου όπως αυτές περιγράφονται στο πρότυπο. Η οντότητα διαχείρισης του τερματικού, το πρωτόκολλο του υπό-στρώματος ελέγχου λογικής ζεύξης και το πρωτόκολλο του φυσικού στρώματος απαρτίζουν το περιβάλλον του υπό μελέτη συστήματος *SDL*. Η Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου - *iDCF* αφορά, όπως είδαμε, τροποποιήσεις και προσθήκες στη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου - *DCF* του προτύπου IEEE 802.11. Έτσι, ό,τι δεν αφορά τη λειτουργία *DCF*, δεν παρουσιάζεται στην παρούσα υλοποίηση του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου.

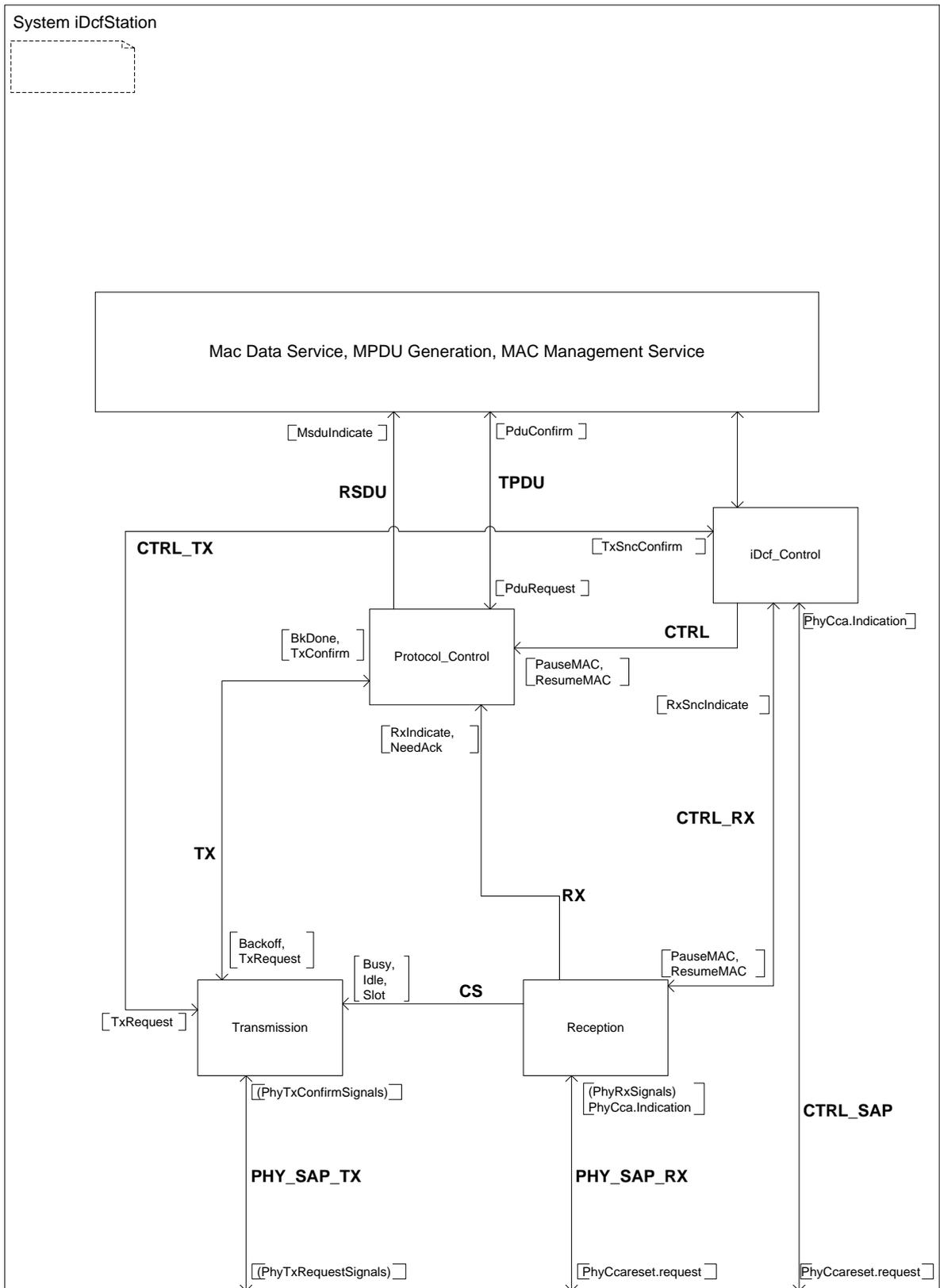
Οι μονάδες που απαρτίζουν το σύστημα *SDL* και η μεταξύ τους διασύνδεση με τα ασύγχρονα κανάλια μεταφοράς σημάτων της γλώσσας απεικονίζονται στη σελίδα 77, σχήμα 4.1. Οι μονάδες που αφορούν τη λειτουργία *DCF*, οι οποίες και τροποποιούνται, είναι η μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου (*Protocol.Control*), η μονάδα Μετάδοσης (*Transmission*) και η μονάδα Λήψης (*Reception*). Σε αυτές προστίθεται η μονάδα Ελέγχου *iDCF*, η οποία συντονίζει τις περιοδικές διακοπές που πραγματοποιούνται όταν ο κόμβος εκτελεί ανίχνευση φασματικών οπών. Στην μονάδα Ελέγχου του πρωτοκόλλου υλοποιείται, όπως θα δούμε, και η Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού του δικτύου (βλ. §3.5).

Στον πίνακα 4.1 εμφανίζονται συγκεντρωτικά οι διεργασίες που εμπεριέχονται σε κάθε μονάδα *SDL*. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζεται το ποιες τροποποιήσεις και προσθήκες στη *DCF* αφορούν και υλοποιούνται σε ποιες διεργασίες του συστήματος *SDL*.

## 4.2 Περιγραφή υλοποίησης ανά μονάδα *SDL*

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα *SDL* των μονάδων και των διεργασιών και περιγράφεται συνοπτικά η τροποποίηση που έχει υλοποιηθεί στο κάθε ένα. Η σύνταξη και η σημασιολογία [77] των διαγραμμάτων της υλοποίησης ταυτίζονται με εκείνες της υλοποίησης που παρουσιάζεται στο πρότυπο IEEE 802.11. Αυτή ακολουθεί την έκδοση *SDL-92* της γλώσσας. Ωστόσο, η μετατροπή του κώδικα σε μορφή συμβατή με την έκδοση *SDL-2000* είναι μια σειρά απλών βημάτων τα οποία περιγράφονται στο τέλος της σύστασης Z.100 [75] της ITU-T.

Σε κάθε διάγραμμα *SDL* περιέχονται μόνο τα δομικά στοιχεία που αφορούν τη λειτουργία *DCF* του προτύπου πρωτοκόλλου και τις τροποποιήσεις και προσθήκες που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτή. Έτσι, στα διαγράμματα των μονάδων *SDL* παρουσιάζονται μόνο οι διεργασίες και τα σήματα που αφορούν τη λειτουργικότητα της *DCF* και στα διαγράμματα των διεργασιών μόνο οι καταστάσεις και οι εντολές που την αφορούν. Το κείμενο που ακολουθεί δεν έχει σκοπό την αναλυτική παρουσίαση της υλοποίησης σε *SDL* της *iDCF*. Αντίθετα, εστιάζει στις τροποποιήσεις και προσθήκες που έχουν πραγματοποιηθεί στη *DCF*, οι οποίες συνολικά καταλήγουν στην υλοποίησης του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4.1: Το SDL σύστημα iDcfStation

Πίνακας 4.1: Η διεργασίες της iDCF και ποιες τροποποιήσεις υλοποιούνται σε κάθε μία

Μονάδα	Διεργασία	Υλοποιηθείσες Τροποποιήσεις - Προσθήκες						
		Διασ. Μηχανισμός Υποχώρησης	Δυν.Μηχ.Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος	Δυναμικός Τεμαχισμός Πλαισίων	Μετάδοση Πλαισίων	Χρόνοι Αναμονής	Διαστήματα Σιγής	Τριπλή Χειραίφια
Ελέγχου Πρωτοκόλλου	Rx_Coordination		✓		✓		✓	
	Tx_Coordination		✓	✓		✓	✓	✓
Μετάδοσης	Data Pump							
	Backoff Procedure							
Λήψης	Channel State	✓	✓			✓	✓	
	Defragment							
	Filter MPDU		✓					
	Validate MPDU					✓		

Προκειμένου να υποστηριχτούν οι τροποποιήσεις και προσθήκες που πραγματοποιήθηκαν στο πρότυπο πρωτόκολλο, είναι απαραίτητοι οι ορισμοί νέων μεταβλητών, σταθερών και τύπων οι οποίοι θα προστεθούν στους υπάρχοντες. Οι νέοι αυτοί ορισμοί απεικονίζονται στο σχήμα 4.2, σελίδα 82. Κάθε ένας εξηγείται αναλυτικότερα παρακάτω, κατά την περιγραφή των διεργασιών στις οποίες χρησιμοποιείται. Η ονοματολογία των νέων μεταβλητών, σταθερών και τύπων ακολουθεί αυτή του προτύπου με εξαίρεση τις παραμέτρους λειτουργίας της iDCF (λ.χ. τιμή της περιόδου διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών). Αυτές, όπως φαίνεται στη σελίδα 82, διαχωρίζονται με το πρόθεμα iDcf σε αντίθεση με τις παραμέτρους λειτουργίας του προτύπου που αναγνωρίζονται από το πρόθεμα dot11.

#### 4.2.1 Μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου

Στη μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου είναι υλοποιημένες οι λειτουργίες της DCF για το μηχανισμό ανταλλαγής πλαισίων rts/cts, τη δημιουργία πλαισίων επιβεβαίωσης ack και το χειρισμό των επαναμεταδόσεων. Στο σχήμα 4.3, σελίδα 83 παρουσιάζεται το διάγραμμα της μονάδας Ελέγχου Πρωτοκόλλου. Τα νέα σήματα που έχουν προστεθεί είναι αυτά που προέρχονται από την μονάδα Ελέγχου iDCF για την παύση και επανεκκίνηση των λειτουργιών, τα οποία προορίζονται και στις δύο διεργασίες της μονάδας.

#### 4.2.1.1 Διεργασία Rx\_Coordination

Η διεργασία αυτή αναλαμβάνει να εκτελέσει τις ενέργειες που απαιτούνται όταν το τερματικό γίνεται αποδέκτης πλαισίων. Προωθεί τα ληφθέντα πλαίσια προς ανώτερα στρώματα ή/και ετοιμάζει και στέλνει τα κατάλληλα πλαίσια επιβεβαίωσης, αφού πρώτα τηρήσει το διάστημα σιγής SIFS. Οι τροποποιήσεις που υλοποιούνται εδώ αφορούν α) το νέο μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος, β) την τήρηση των διαστημάτων σιγής και γ) την αναμονή για επαρκή ενεργό χρόνο στον οποίο θα μεταδοθούν τα πλαίσια επιβεβαίωσης. Το SDL διάγραμμα της διεργασίας αυτής δίνεται στο σχήμα 4.4, σελίδα 84.

α) Η τροποποίηση για το μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος αφορά την ανάθεση του πεδίου DurationID κατά την κατασκευή των πλαισίων επιβεβαίωσης. Κατά την λήψη των πλαισίων και την προετοιμασία πλαισίων επιβεβαίωσης (cts και ack), το πεδίο DurationID τίθεται σύμφωνα με την τροποποίηση της παραγράφου 3.4.5 στις τιμές που παρατίθενται στον πίνακα 3.1.

β) Στη διεργασία αυτή τηρείται το διάστημα σιγής SIFS για τους παραλήπτες των μεταδιδόμενων πλαισίων. Η τροποποίηση αφορά την υλοποίηση της επέκτασης της διάρκειας του διαστήματος σιγής, όταν αυτό διακόπτεται προκειμένου να εκτελεστεί η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Η επέκταση εξαρτάται από το σημείο στο οποίο γίνεται διακοπή (βλ. §3.4.3). Ο υπολογισμός της επέκτασης της διάρκειας πραγματοποιείται στη νέα ρουτίνα iDcfSetSifs, η οποία υπολογίζει τον εναπομείναντα ενεργό χρόνο μέχρι τη διακοπή, με βάση την τιμή της εισερχόμενης νέας μεταβλητής mUtBoundary. Το SDL διάγραμμα της ρουτίνας αυτής δίνεται στο σχήμα 4.5, σελίδα 85. Σε αυτήν τη διεργασία μετράται πραγματικό διάστημα TxSifs, το οποίο είναι το διάστημα SIFS χωρίς την τελευταία καθυστέρηση μεταγωγής του πομποδέκτη (βλ. σχήμα 3.7, σελίδα 56), ώστε τελικά να προκύψει το συνολικό διάστημα σιγής SIFS. Όταν η διακοπή γίνεται στο χρόνο μεταγωγής του πομποδέκτη, η ρουτίνα iDcfSetSifs επιστρέφει εναπομείναν διάστημα τήρησης 0 το οποίο τίθεται κανονικά, ώστε με τη λήξη του να αρχίσει η διαδικασία μεταγωγής. Μόνο στην περίπτωση που το επιστρεφόμενο εναπομείναν διάστημα είναι -1 δεν τίθεται ο μετρητής μετά την επανεκκίνηση του MAC.

γ) Η διεργασία Rx\_Coordination αποφασίζει και δίνει την εντολή, τη στιγμή λήξης του διαστήματος TxSifs, για τη μετάδοση του πλαισίου επιβεβαίωσης. Χρησιμοποιείται η ρουτίνα iDcfRspTxRequest που απεικονίζεται στο σχήμα 4.6, σελίδα 86. Εκεί, συνυπολογίζονται ο εναπομείνας ενεργός χρόνος, ο τρέχων ρυθμός μετάδοσης, ο χρόνος μεταγωγής του πομποδέκτη και το μέγεθος του πλαισίου επιβεβαίωσης. Όταν δεν υπάρχει επαρκής χρόνος για τη μετάδοση, η ρουτίνα αναμένει το πέρας της διακοπής, παραμένοντας σε νέα εσωτερική υπό-κατάσταση, μέχρι να επιχειρήσει ξανά του υπολογισμούς. Σε αυτή την κατάσταση αναμονής ο σταθμός μπορεί να μείνει για απροσδιόριστο χρονικό διάστημα, όταν το αποτέλεσμα της ανίχνευσης φασματικών οπών δεν εξασφαλίζει αρκετό ρυθμό μετάδοσης για την αποστολή του πλαισίου επιβεβαίωσης μέσα στον ορισμένο ενεργό χρόνο. Η ρουτίνα λαμβάνει μέριμνα ώστε να ειδοποιείται κάποια μονάδα διαχείρισης για το χρόνο παραμονής σε αυτήν την κατάσταση μέσω του μετρητή cIdleScanResponsePeriods. Η μονάδα διαχείρισης λαμβάνει κάποια απόφα-

ση, λ.χ. για μεταγωγή ολόκληρου του δικτύου σε διαφορετική φασματική ζώνη, σε περίπτωση που ο χρόνος  $cIdleScanPeriods \times iDcfScanPeriod$  υπερβαίνει ένα κατώφλι.

#### 4.2.1.2 Διεργασία Tx\_Coordination

Στη διεργασία Tx\_Coordination υλοποιούνται οι ενέργειες των πομπών κατά την προετοιμασία και την αποστολή δεδομένων. Εδώ αρχικοποιούνται οι ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων, αποφασίζεται αν θα αποσταλεί πλαίσιο *rts*, τίθενται ορισμένα πεδία της επικεφαλίδας MAC των πλαισίων – όπως ο σειριακός αριθμός και το DurationID–, γίνεται η αρχικοποίηση του μετρητή υποχώρησης, ανάλογα με τον έως τώρα αριθμό επαναμεταδόσεων και ζητείται η τήρηση ενός διαστήματος υποχώρησης, αποφασίζεται η στιγμή μετάδοσης ενός πλαισίου και τίθενται οι μετρητές χρόνων αναμονής των πλαισίων επιβεβαίωσης. Το SDL διάγραμμα της διεργασίας παρουσιάζεται στις εικόνες 4.7 έως 4.9, σελίδες 87 έως 89. Οι τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται σε αυτή τη διεργασία αφορούν α) το νέο μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος, β) το δυναμικό τεμαχισμό των πλαισίων δεδομένων, γ) την τήρηση του διαστήματος σιγής SIFS, δ) την υποχρεωτική χρησιμοποίηση της λειτουργίας τριπλής χειραφίας μέσω της ανταλλαγής των πλαισίων *rts* και *cts* και ε) την αρχικοποίηση των μετρητών χρόνου αναμονής για τα πλαίσια επιβεβαίωσης.

α) Για το δυναμικό μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης της κατάστασης του μέσου η διεργασία αυτή υπολογίζει και θέτει το πεδίο DurationID των πακέτων. Ο τροποποιημένος μηχανισμός στο διακοπόμενο πρωτόκολλο (βλέπε §3.4.5) αφαιρεί τον υπολογισμό της εναπομείνουσας διάρκειας της τρέχουσας ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων από τα τερματικά Πηγές/Προορισμούς των πλαισίων και τον μεταθέτει στα Ανταγωνιζόμενα τερματικά, όπου και πραγματοποιείται εντός της διεργασίας Channel\_State, που περιγράφεται παρακάτω. Σύμφωνα με την τροποποίηση ο πομπός απλά θέτει το συγκεκριμένο πεδίο στην τιμή που δείχνει ο πίνακας 3.1, ανάλογα με το πλαίσιο προς μετάδοση. Το πεδίο αυτό τίθεται ακριβώς τη στιγμή της μετάδοσης, οπότε και πραγματοποιείται, αν χρειάζεται, δυναμικός τεμαχισμός του πλαισίου δεδομένων. Επομένως, στο διακοπόμενο πρωτόκολλο το πεδίο DurationID των πλαισίων τίθεται ακριβώς πριν το πλαίσιο αποσταλεί στην διεργασία Data\_Pump της μονάδας Μετάδοσης, ενώ στο πρότυπο πρωτόκολλο τίθεται κατά την αρχικοποίηση του πλαισίου πριν καν ζητηθεί χρόνος υποχώρησης (backoff) και αποφασιστεί η μετάδοση ή όχι πλαισίου *rts*.

β) Ο δυναμικός τεμαχισμός των πλαισίων δεδομένων υλοποιείται μέσω της ρουτίνας *iDcfDynamicFrag*, της οποίας το SDL διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10, σελίδα 90. Η ρουτίνα αυτή καλείται τη στιγμή ακριβώς πριν τη μετάδοση των πλαισίων ώστε ο δυναμικός τεμαχισμός να γίνει σύμφωνα με τον τρέχοντα εναπομείναντα ενεργό χρόνο, και το πεδίο DurationID να τεθεί ανάλογα με το αποτέλεσμα του τεμαχισμού. Για την απόφαση τεμαχισμού συνυπολογίζονται η τιμή της νέας παραμέτρου λειτουργίας *iDcfMinDynSduFragLng*, για το ελάχιστου επιτρεπτού μεγέθους πλαίσιο δεδομένων, ο εναπομείνας ενεργός χρόνος καθώς και ο ρυθμός μετάδοσης.

Και εδώ, όπως και κατά την αποστολή ενός πλαισίου επιβεβαίωσης, υπάρχει περίπτωση,

λόγω των συνθηκών, για μεγάλο χρονικό διάστημα να μην είναι εφικτή η μετάδοση ούτε του ελάχιστου επιτρεπτού μεγέθους πλαισίου δεδομένων. Η ρουτίνα *iDcfDynamicFragmentation* όπως και η *iDcfRspTxRequest* λαμβάνει μέριμνα ώστε να ειδοποιείται κάποια μονάδα διαχείρισης για τον αριθμό των ανενεργών περιόδων. Αυτό γίνεται μέσω του μετρητή *cIdleScanDataPeriods* ο οποίος εξάγεται στην παράμετρο λειτουργίας του MAC *iDcfIdleScanDataPeriods*.

Στην περίπτωση κατά την οποία εκτελεστεί δυναμικός τεμαχισμός, αποσταλεί το πρώτο τεμάχιο δεδομένων πριν τη διακοπή, αλλά δεν επιβεβαιωθεί η ορθή λήψη του, πριν επιχειρηθεί επαναμετάδοση, η νέα ρουτίνα *iDcfDynamicDeFrag* (σχήμα 4.11, σελίδα 91) αναλαμβάνει να επαναφέρει τα τεμάχια στην αρχική τους κατάσταση, ώστε να αποφασιστεί εκ νέου αν θα εκτελεστεί δυναμικός τεμαχισμός ή όχι. Για να καθίσταται δυνατή η λειτουργία αυτή, προστίθεται στις μεταβλητές της δομής *FragSdu* η δυαδική μεταβλητή *isDynFrag* η οποία τίθεται ως αληθής όταν πραγματοποιείται δυναμικός τεμαχισμός. Ο ορισμός της νέας αυτής μεταβλητής βρίσκεται μέσα στη δομή *FragSdu* στο σχήμα 4.2, σελίδα 82.

γ) Για την τήρηση του διαστήματος σιγής *SIFS* στους πομπούς των πλαισίων από τη διεργασία *Tx\_Coordination* ισχύει ό,τι και στην διεργασία *Rx\_Coordination* και πραγματοποιείται με κλήση της ίδιας ρουτίνας *iDcfSetSifs* (σχήμα 4.5, σελίδα 85).

δ) Η υποχρεωτική ενεργοποίηση της λειτουργίας τριπλής χειραψίας υλοποιείται με την αφαίρεση του ελέγχου για το αν το μήκος του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων υπερβαίνει το κατώφλι που ορίζεται από την παράμετρο *dot11RtsThreshold*. Επίσης, όταν αποστέλλεται το πλαίσιο *rts* δεν ελέγχεται ο εναπομείνας ενεργός χρόνος, όπως γίνεται κατά την αποστολή όλων των άλλων πλαισίων, επειδή η τροποποίηση της διαδικασίας υποχώρησης (βλ. §3.4.4) εξασφαλίζει πάντα την ύπαρξη αρκετού ενεργού χρόνου όταν ο μετρητής υποχώρησης μηδενιστεί.

ε) Η αρχικοποίηση του μετρητή χρόνου αναμονής γίνεται με τη χρήση της ρουτίνας *iDcfSetTimeout*, το διάγραμμα *SDL* της οποίας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12, σελίδα 92. Εκεί γίνεται υπολογισμός και έλεγχος για το αν ο δέκτης έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει τα πλαίσια επιβεβαίωσης μέσα στον τρέχοντα ενεργό χρόνο, συνυπολογίζοντας το διάστημα *SIFS* που πρέπει να προηγηθεί. Ο χρόνος αναμονής τίθεται μόνο στην περίπτωση που υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Όταν δεν υπάρχει επαρκής ενεργός χρόνος έως τη διακοπή, ο χρόνος αναμονής τίθεται για όσο ενεργό χρόνο απομένει και επανατίθεται μετά το πέρας της, σύμφωνα με τον ανανεωμένο ρυθμό μετάδοσης και τα όσα ισχύουν και για το δυναμικό μηχανισμό εικονικής αντίχενυσης φέροντος.

```

Package macsorts

-----
* New types for iDcf Operation
-----
newtype PendingOperation
literal    pndNone,
           pndIfs,
           pndNav,
           pndSlot,
endnewtype PendingOperation;

newtype NavSrc
literal    rts,
           cts,
           data,
           ackFr,
           ackFin,
           nosrc,
endnewtype NavSrc;

-----
* Named static data values (names of form sXYZ)
-----
synonym sRtsLng Integer = 160; /* bits in RTS frames */
synonym sSyncLng Integer = 112; /* bits in SYNC frames */

-----
* System Station Signals declarations
-----
signal ResumeMAC, PauseMAC;
signal TxSncConfirm;
signal RxSncIndicate(Frame, Time, Time);

-----
* Intra-MAC remote variables (names of form mXYZ)
-----
mUtBoundary Time; /* Useful Time Boundary Time */

-----
* Fragmentation Support sorts
-----
newtype FragSdu struct
fTot FragNum; /* number of fragments in pdu FragArray */
fCur FragNum; /* next fragment number to send */
fAnc FragNum; /* next fragment to announce in ATIM or TIM
               when fAnc > fCur, pdu(fCur)+ may be sent */
eol Time; /* set to (now + dUsec(aMaxTxMsdULifetime))
            when the entry is created */
sqf SeqNum; /* SDU se number, set at 1st Tx attempt */
src Integer; /* short retry counter for this SDU */
lrc Integer; /* long retry counter for this SDU */
dst MacAddr; /* destination address */
grpa Boolean; /* =true if RA (not DA) is a group address */
psm Boolean; /* =true if RA (not DA) may be in pwr_save */
resume Boolean; /* =true if fragment burst being resumed */
cnfTo Pld; /* address to which confirmation is sent */
txrate Rate; /* data rate used for initial fragment */
cf CfPriority; /* requested priority (from LLC) */
pdu FragArray; /* array of Frame to hold fragments */
isDynFrag Boolean; /* is set when iDcf Dynamic Fragmentation
                   has been performed */
endnewtype FragSdu;

-----
* Generic PHY parameter set sort
-----
newtype PhyChrctcs struct
aSlotTime Usec;
aSifsTime Usec;
aCCATime Usec;
aRxTxTurnaroundTime Usec;
aTxPLCPDelay Usec;
aRxPLCPDelay Usec;
aTxRxRate Rate; /* New type for iDcf.
                  Set&Read at every UT */
aRxTxSwitchTime Usec;
aTxRampOnTime Usec;
aTxRampOffTime Usec;
aTxRFDelay Usec;
aRxRFDelay Usec;
aAirPropagationTime Usec;
aMACProcessingDelay Usec;
aPreambleLength Usec;
aPLCPHeaderLength Usec;
aMPDUMaxLength Integer;
aCWmin Integer;
aCWmax Integer;
endnewtype PhyChrctcs;

-----
* Operation Table
-----
remote iDcfMinDynSduFragLng Integer
/* octets. Minimum value for
   a dynamic data fragment sdu
   size. That is, without counting
   MAC Header Length */

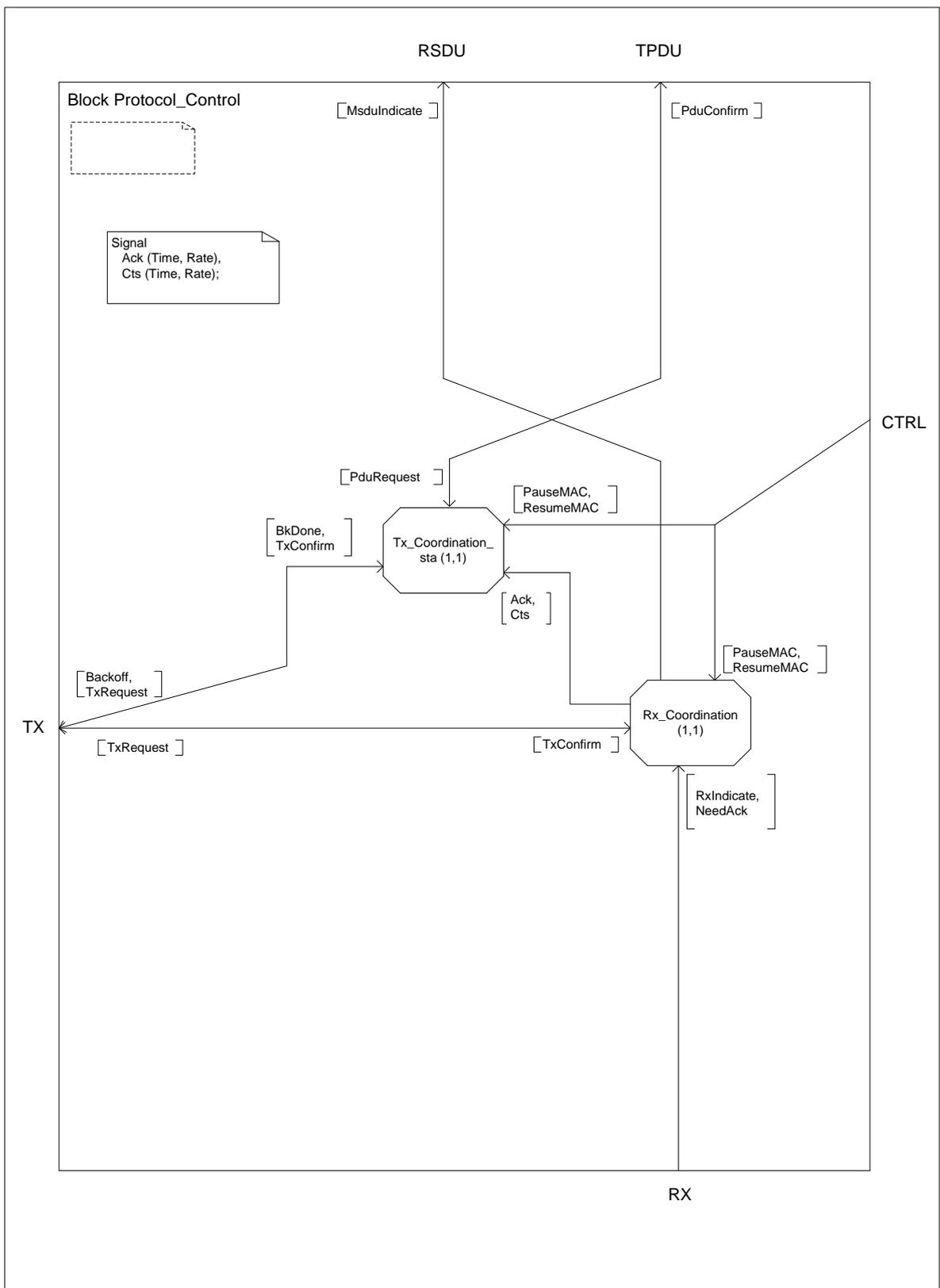
remote iDcfIdleResponsePeriodsCounter Integer nodelay;
/* Idle Periods that Station is
   unable to transmit Rsp
   Frames */

remote iDcfIdleDataPeriodsCounter Integer nodelay;
/* Idle Periods that Station is
   unable to transmit Data
   Frames */

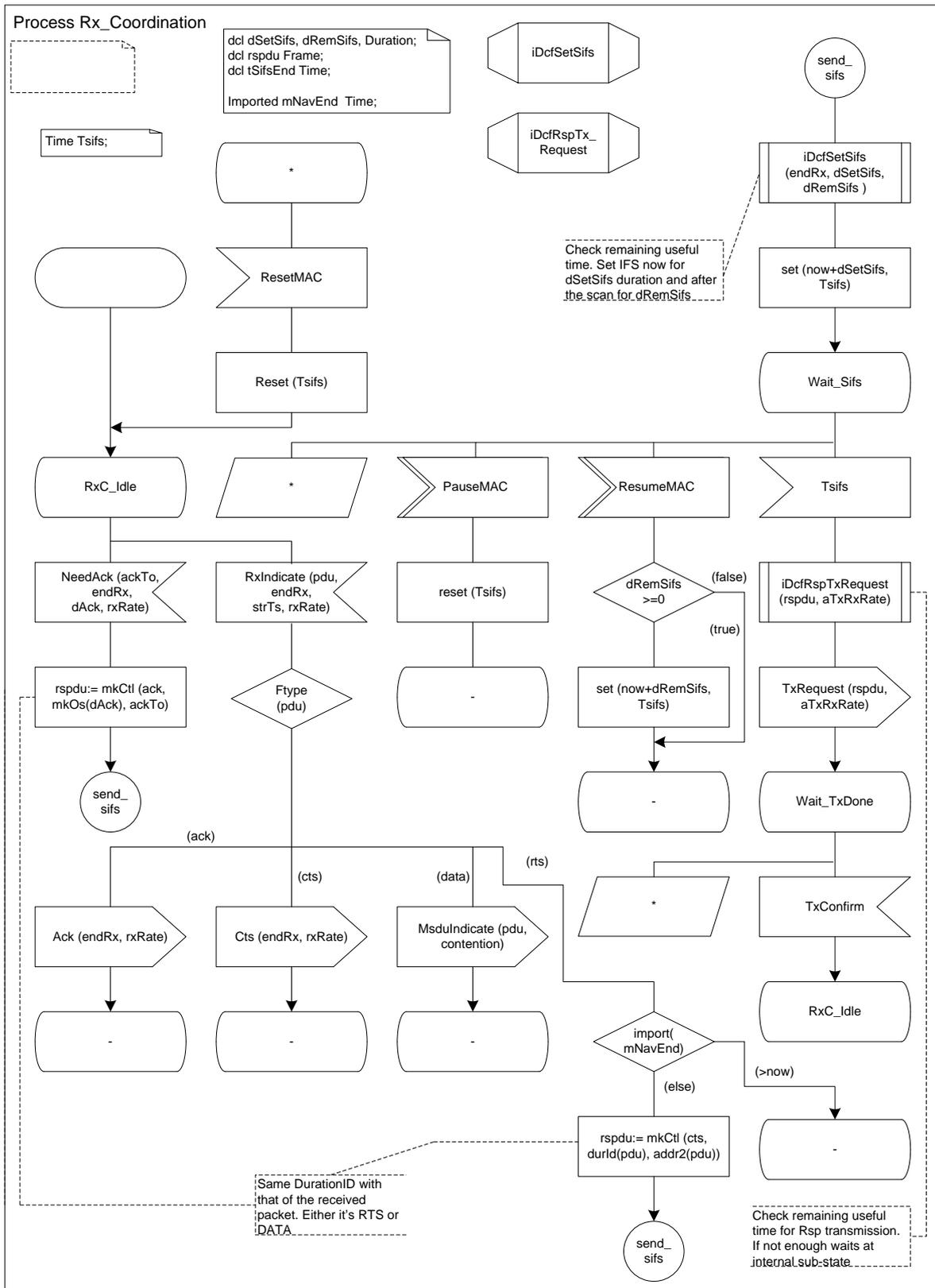
remote iDcfScanPeriod Duration;
remote iDcfScanDelay Duration;
remote iDcfSyncTau Duration;
remote iDcfSyncOffsSlot Duration;
remote iDcfInitSyncMult Integer;

```

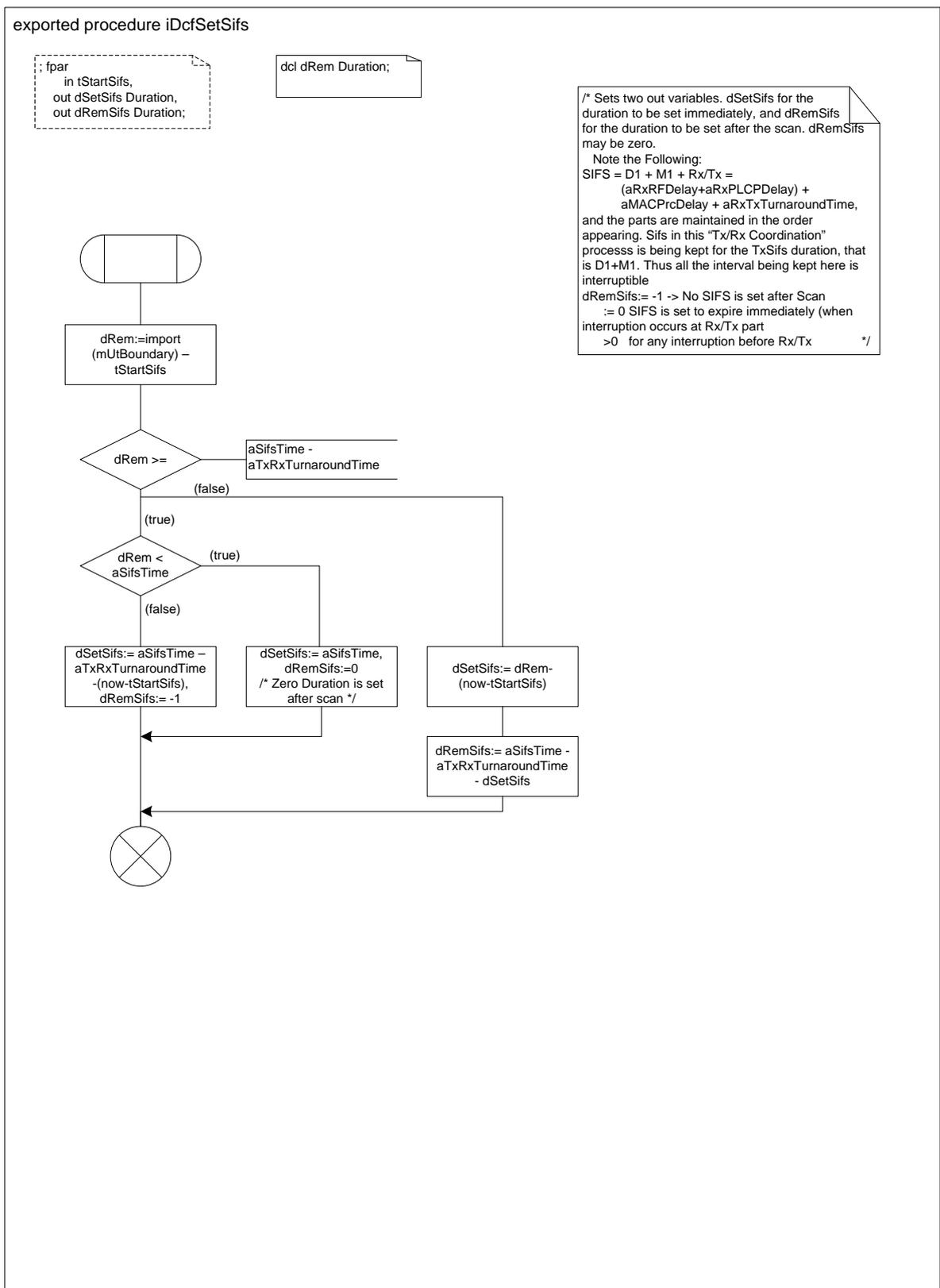
Σχήμα 4.2: Οι ορισμοί νέων τύπων μεταβλητών, μεταβλητών και σταθερών SDL



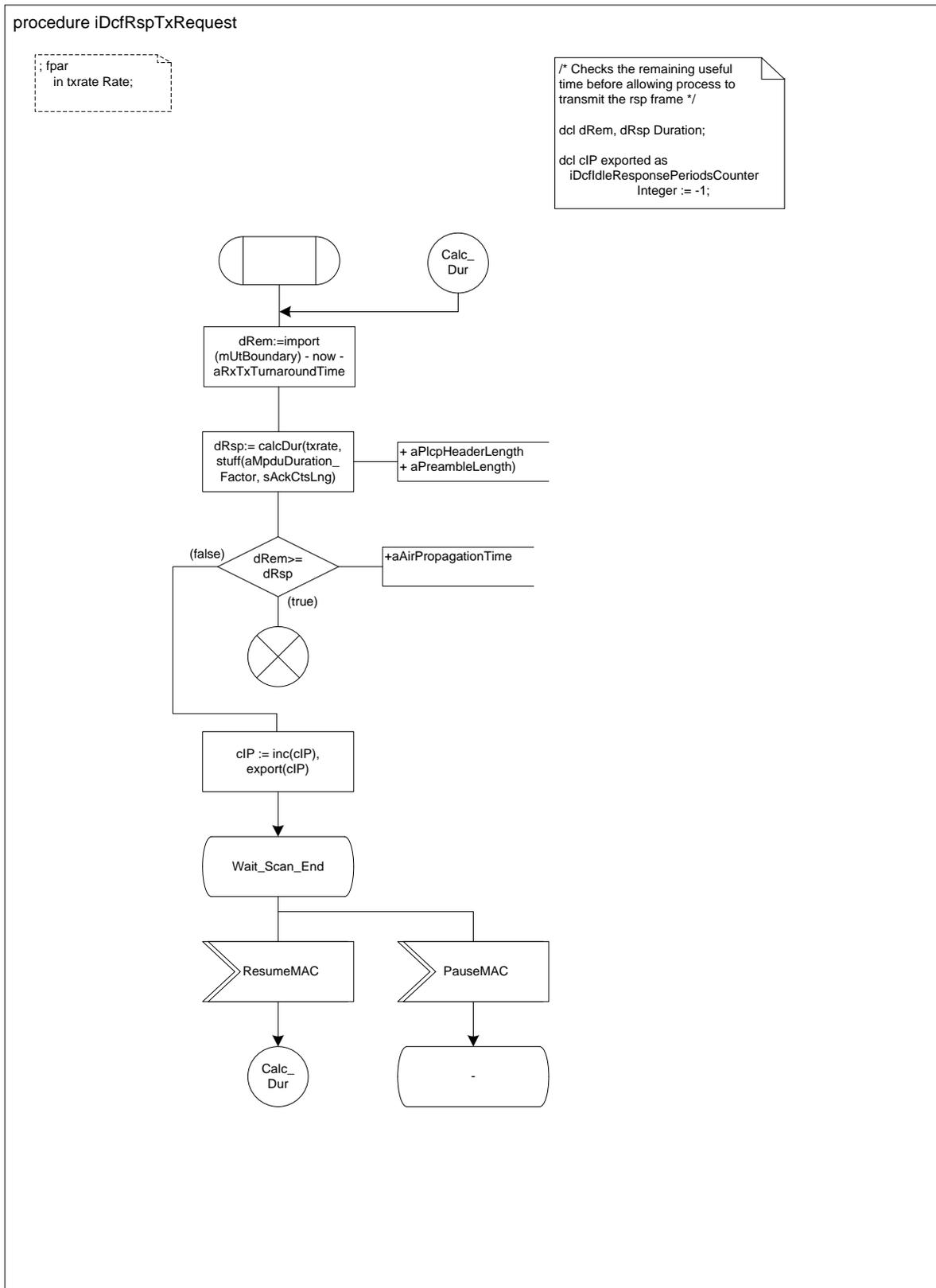
Σχήμα 4.3: Η SDL μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου



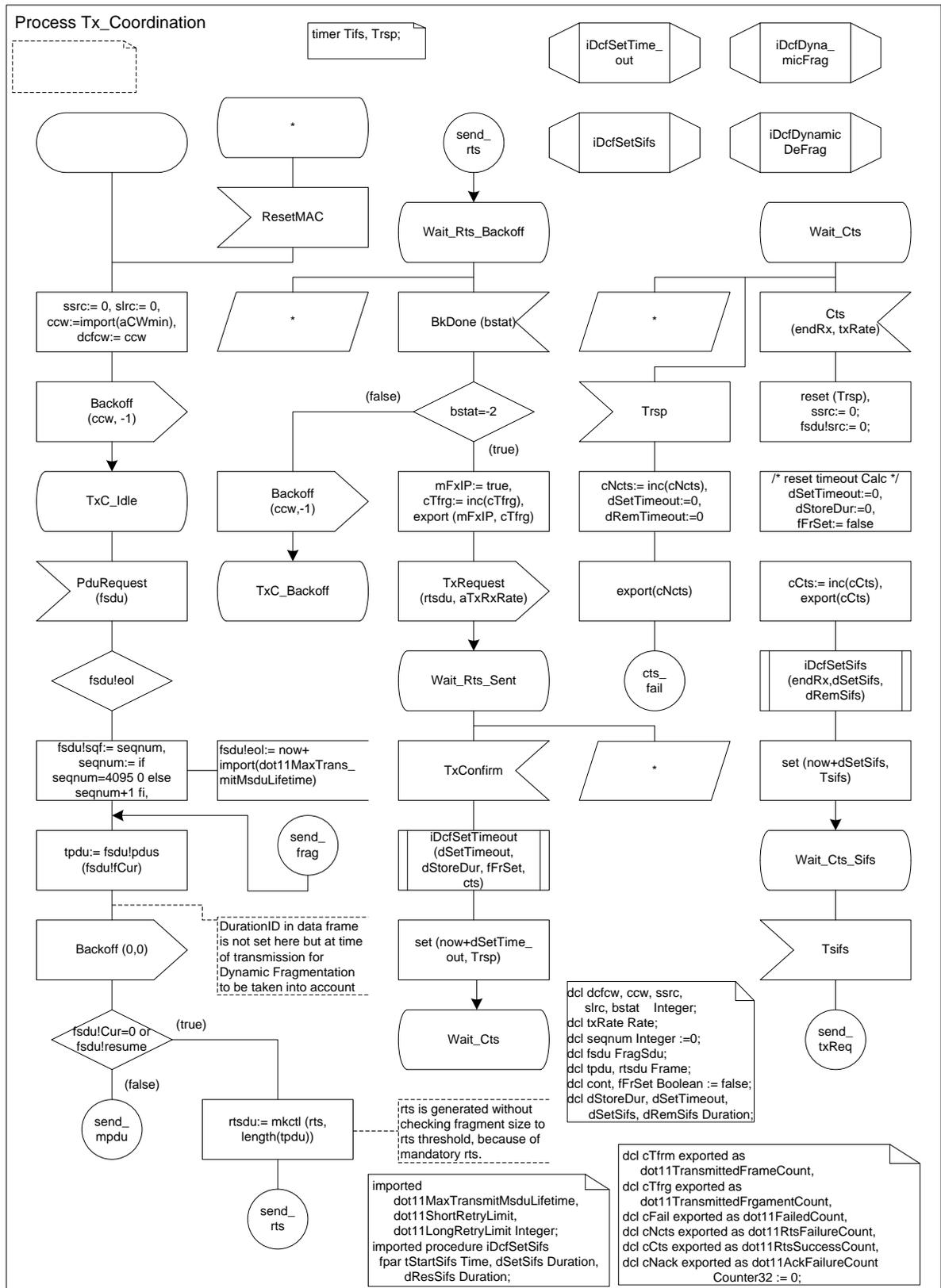
Σχήμα 4.4: Η SDL διεργασία Rx\_Coordination



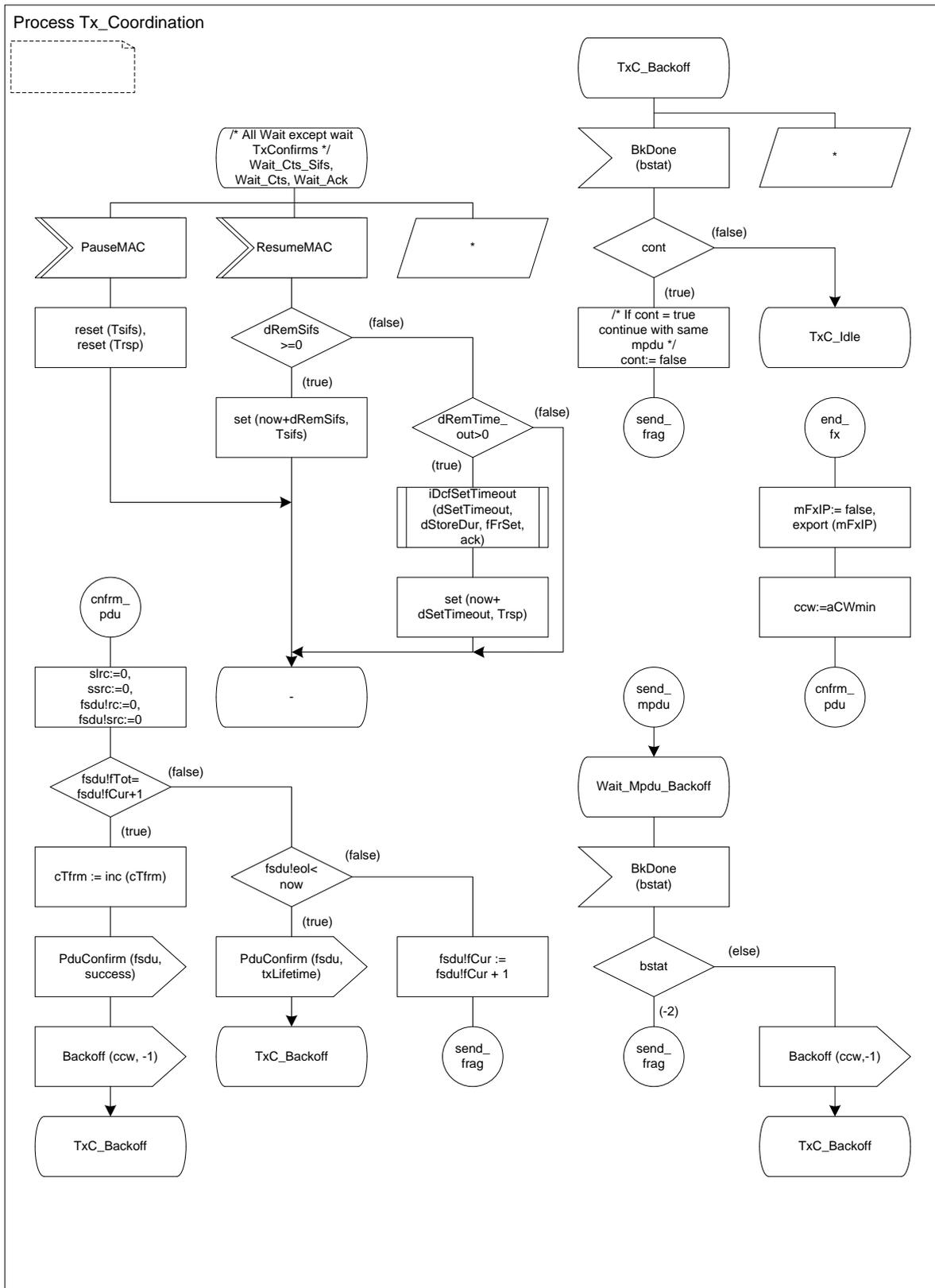
Σχήμα 4.5: Η SDL ρουτίνα υπολογισμού χρόνου επέκτασης των διαστημάτων σιγής



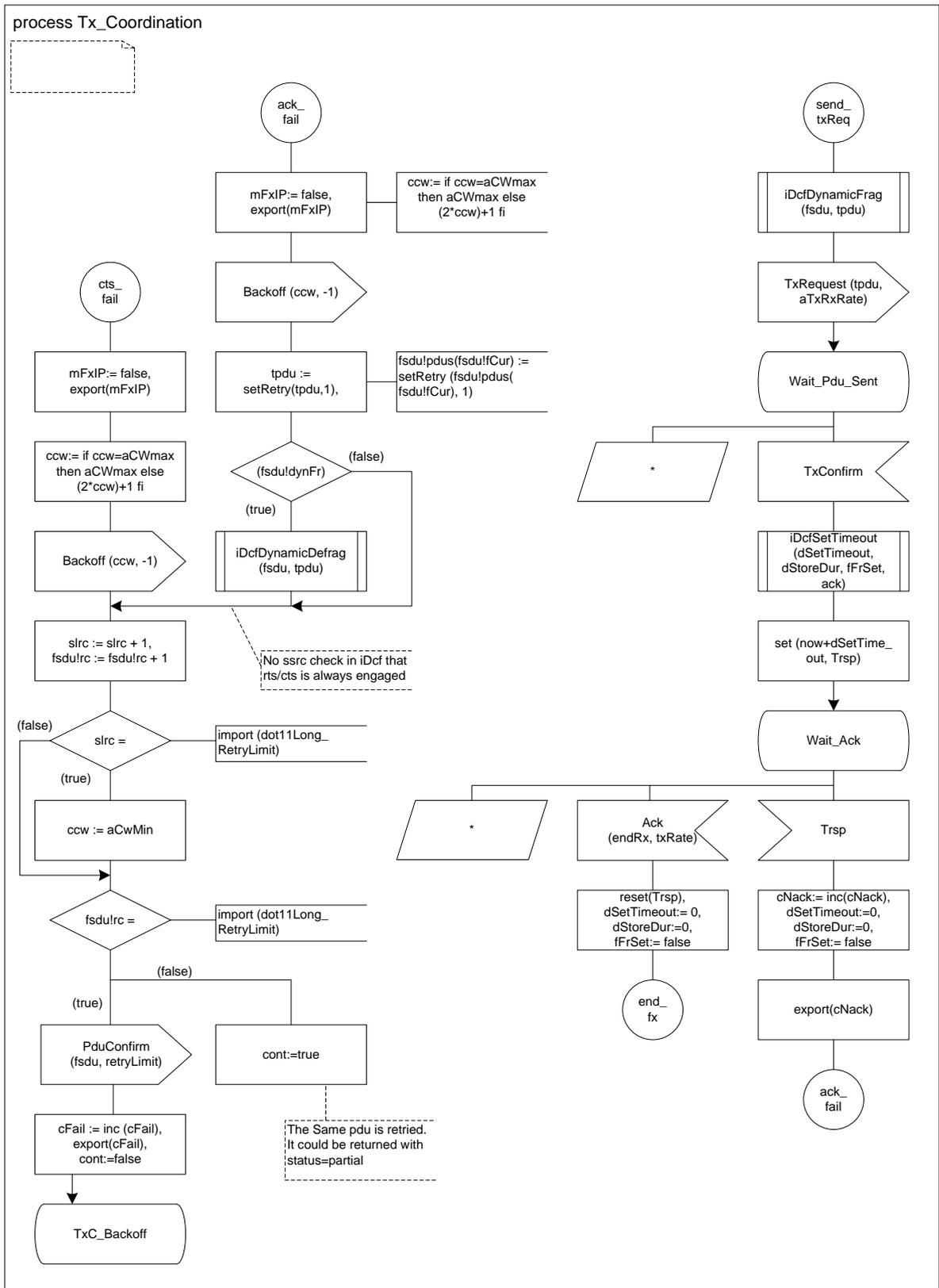
Σχήμα 4.6: Η SDL ρουτίνα απόφασης του σημείου εκκίνησης της μετάδοσης πλαισίων επιβεβαίωσης



Σχήμα 4.7: Η SDL διεργασία Tx\_Coordination (1/3)

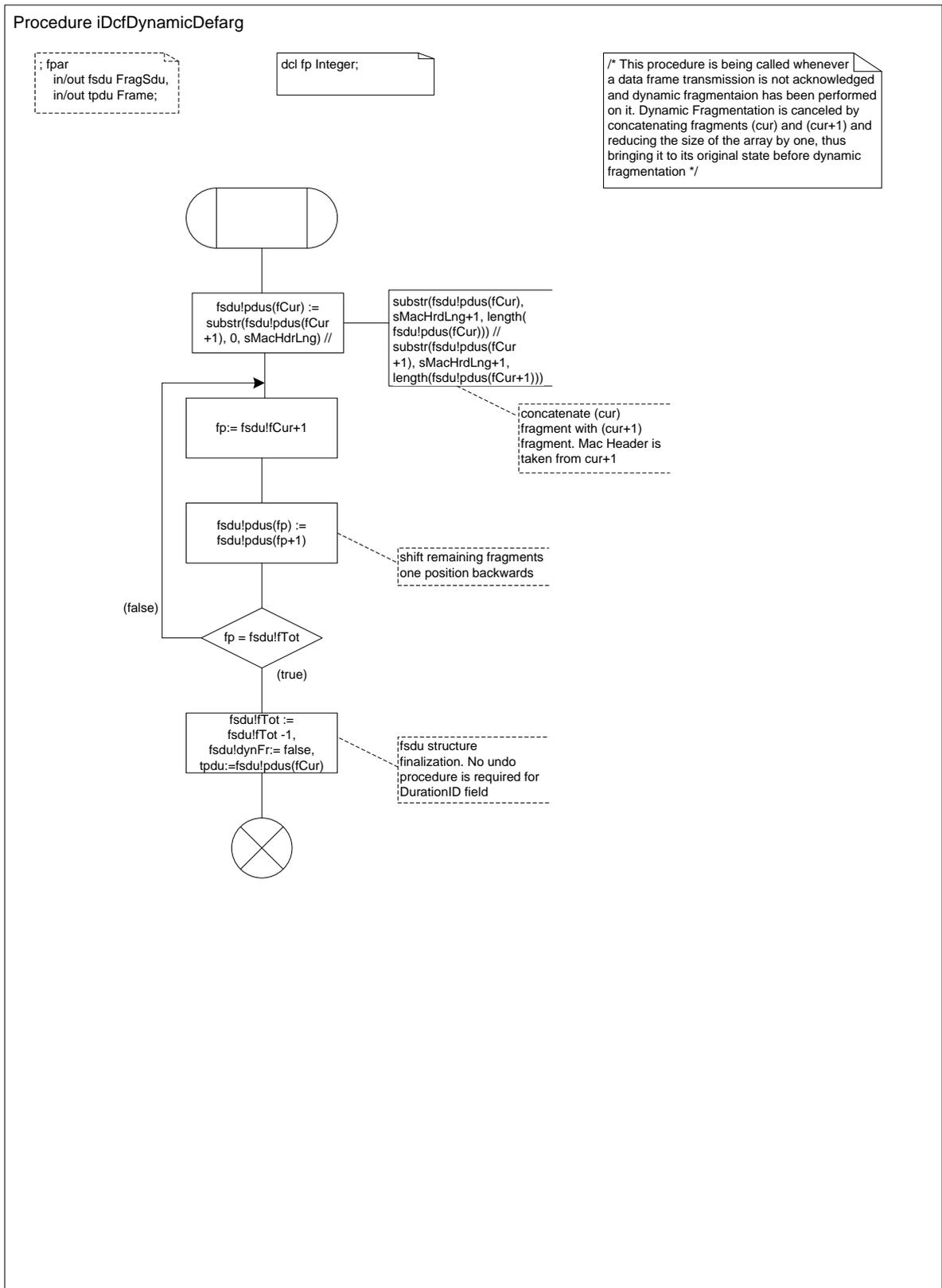


Σχήμα 4.8: Η SDL διεργασία Tx\_Coordination (2/3)

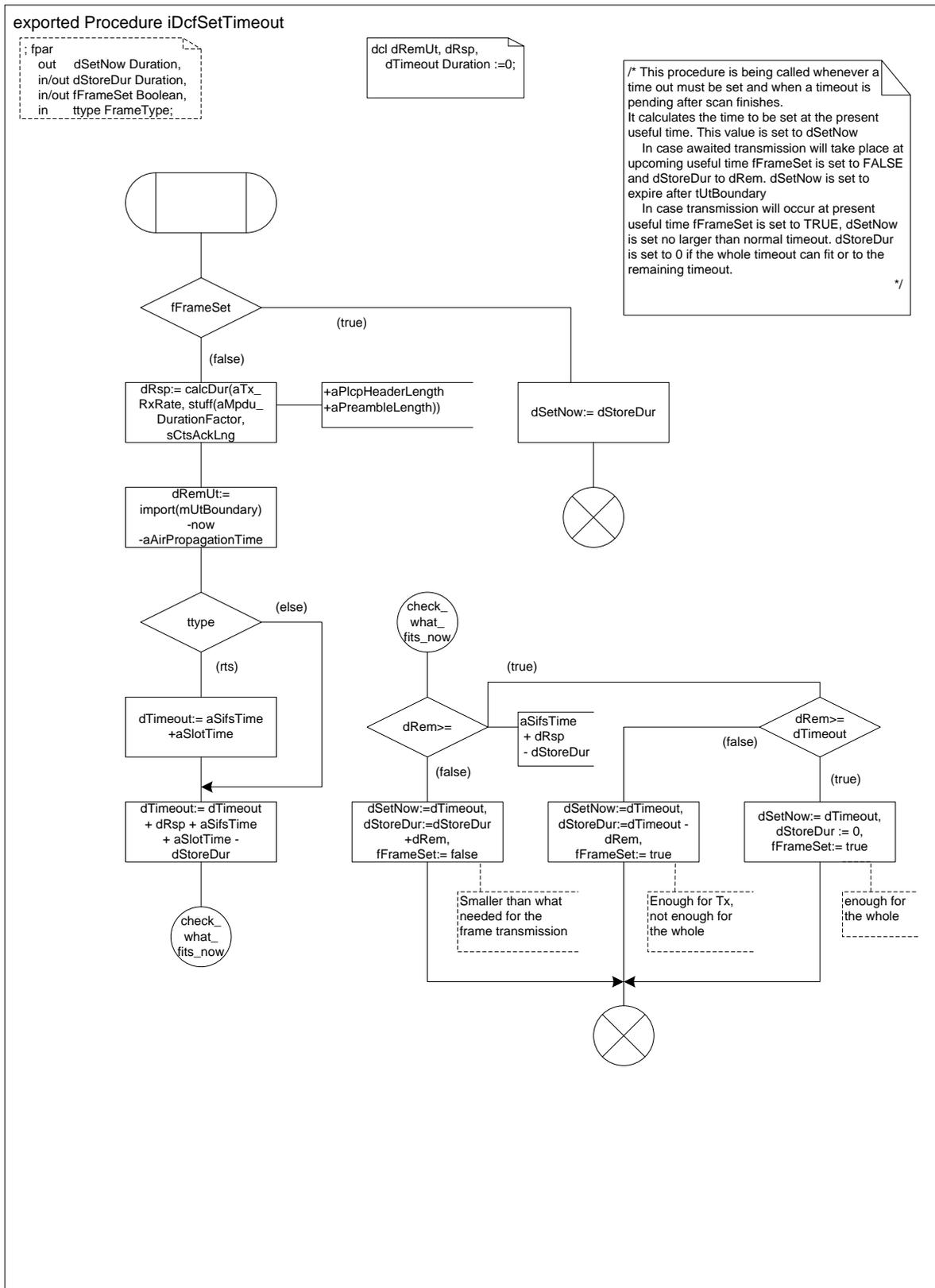


Σχήμα 4.9: Η SDL διεργασία Tx\_Coordination (3/3)





Σχήμα 4.11: Η SDL ρουτίνα ακύρωσης του δυναμικού τεμαχισμού



Σχήμα 4.12: Η SDL ρουτίνα αρχικοποίησης και θέσης του χρόνου αναμονής πλαισίων επιβεβαίωσης

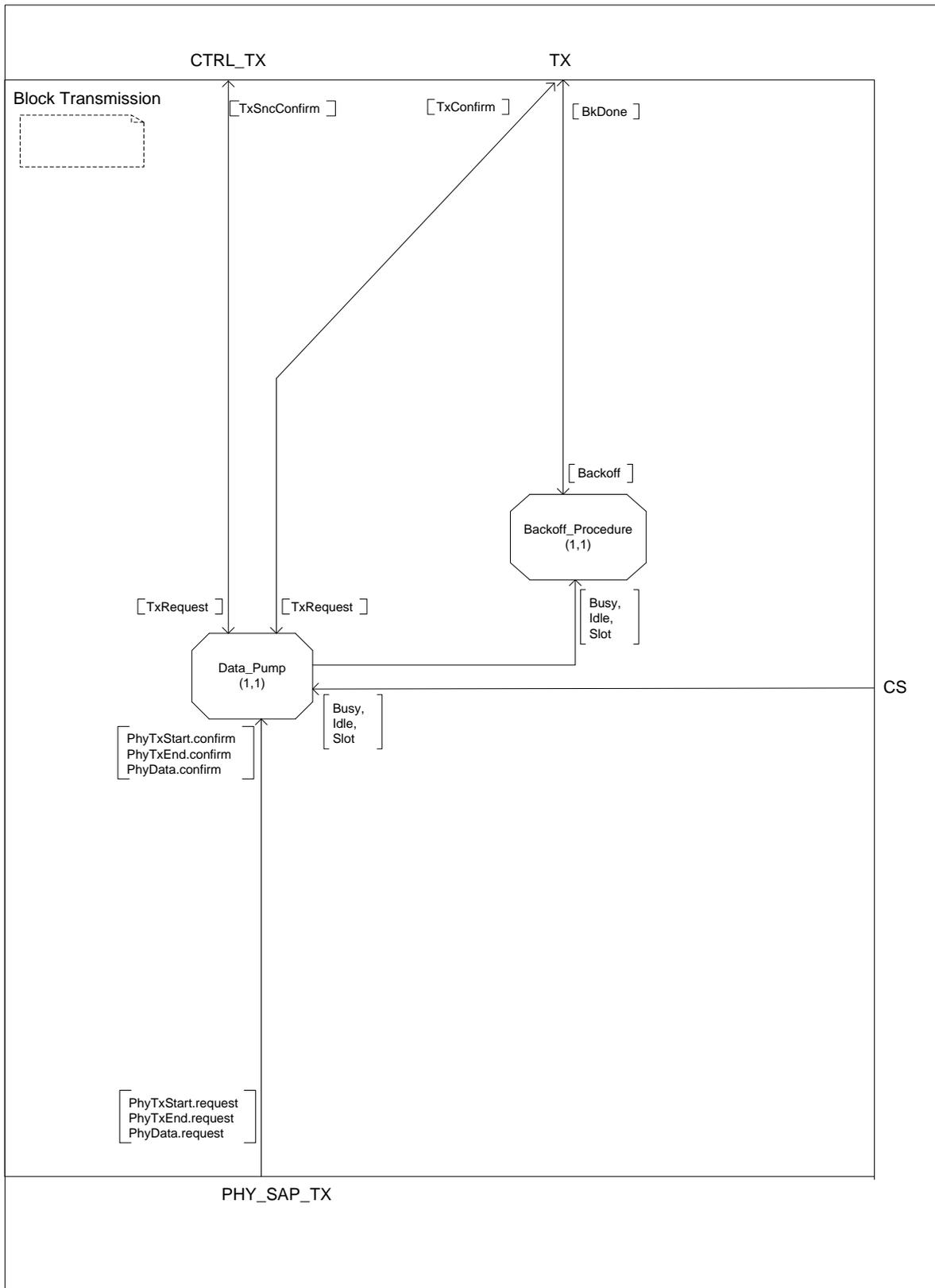
#### 4.2.2 Μονάδα Μετάδοσης

Στη μονάδα Μετάδοσης είναι υλοποιημένη η λειτουργία της DCF για το μηχανισμό υποχώρησης (backoff), η οποία ζητείται από τη μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου. Η μονάδα εκτελεί επίσης μεταφορά επιπέδου οκτάδων από το υπόστρωμα MAC προς το φυσικό στρώμα εισάγοντας ορισμένα πεδία της επικεφαλίδας όπως το FCS - Frame Check Sequence, όπου χρειάζεται. Οι δύο διεργασίες που περιέχει είναι η Data\_Pump και η Backoff\_Procedure. Το διάγραμμα SDL της μονάδας Μετάδοσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13, σελίδα 94.

##### 4.2.2.1 Διεργασίες Data\_Pump και Backoff\_Procedure

Η διεργασία Data\_Pump, εκτός από την μεταφορά οκτάδων προς το φυσικό στρώμα για μετάδοση, προωθεί και τα σήματα Busy, Idle για την ένδειξη της κατάστασης του μέσου και Slot για την ένδειξη των ορίων των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου προς τη διεργασία Backoff\_Procedure, μόνο όταν ο πομπός είναι ανενεργός. Οι λειτουργίες που εκτελούνται εντός της διεργασίας Data\_Pump δεν απαιτούν κάποια τροποποίηση για την υλοποίηση της iDCF.

Η διεργασία Backoff\_Procedure εκτελεί τη διαδικασία υποχώρησης όταν αυτή ζητείται από τη μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου με το σήμα Backoff. Το σήμα αυτό περιέχει σαν παράμετρο την αρχική τιμή του μετρητή υποχώρησης. Λόγω των τροποποιήσεων που πραγματοποιούνται παρακάτω στη διεργασία Channel\_State της μονάδας Λήψης, κατά τις οποίες στέλνεται σήμα ένδειξης χρονοσχιμής πρωτοκόλλου μόνο όταν δεν έχει παρέλθει το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  (βλ. §3.4.4), δεν απαιτείται ούτε εδώ κάποια τροποποίηση για την υλοποίηση της iDCF.



Σχήμα 4.13: Το διάγραμμα SDL της μονάδας Μετάδοσης

### 4.2.3 Μονάδα Λήψης

Στη μονάδα Λήψης είναι υλοποιημένες οι λειτουργίες της DCF για το φυσικό και εικονικό μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος, την τήρηση διαστημάτων σιγής και το χρονισμό των χρονοσχημάτων του πρωτοκόλλου. Επίσης, βρίσκονται λειτουργίες επικύρωσης και επανένωσης των ληφθέντων πακέτων και αναγνώρισης των επόμενων ενεργειών που πρέπει να εκτελεστούν μετά τη λήψη ενός πακέτου, λ.χ. αν πρέπει να τηρηθεί διάστημα σιγής DIFS ή πρέπει να μεταδοθεί πλαίσιο επιβεβαίωσης. Το διάγραμμα SDL της μονάδας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14, σελίδα 99, στο οποίο φαίνονται οι διεργασίες που την αποτελούν και η μεταξύ τους διασύνδεση.

#### 4.2.3.1 Διεργασία Validate\_MPDU

Στη διεργασία αυτή αποφασίζεται το αν θα χρησιμοποιηθεί διάστημα DIFS ή EIFS μετά τη λήψη ενός πλαισίου. Το ληφθέν πλαίσιο μετά την επικύρωση ορθής λήψης προωθείται στη διεργασία Filter\_MPDU για περαιτέρω επεξεργασία. Ο μηχανισμός εικονικής ανίχνευσης φέροντος περιέχει, προαιρετικά, την ενεργοποίηση ενός χρόνου αναμονής (timeout) αμέσως μετά τη λήψη ενός πλαισίου rts (βλ. §4.1). Η αρχικοποίηση αυτού του χρόνου αναμονής στο πρότυπο πρωτόκολλο είναι υλοποιημένη στη διεργασία Validate\_MPDU. Εκεί, με τη λήψη ενός πλαισίου rts, τίθεται ο μετρητής Trts για όσο χρόνο χρειάζεται η αποστολή του πλαισίου cts. Στην περίπτωση που δεν ληφθεί πλαίσιο εντός του χρόνου αναμονής στέλνεται σήμα στη διεργασία Channel\_State η οποία μηδενίζει το μετρητή NAV, προκαλώντας έτσι την ανίχνευση του μέσου ως ανενεργού. Η iDCF τροποποίηση που πραγματοποιείται σε αυτή τη διεργασία είναι απλά η κατάργηση αυτού του χρόνου αναμονής εδώ. Ο κατάλληλος έλεγχος και η αρχικοποίησή του μεταφέρονται στη διεργασία Channel\_State που περιγράφεται παρακάτω.

#### 4.2.3.2 Διεργασία Filter\_MPDU

Οι λειτουργίες που υλοποιούνται εδώ είναι το φιλτράρισμα των ληφθέντων πλαισίων ώστε να αναγνωριστούν τα διπλά ληφθέντα πλαίσια, ο τύπος και ο προορισμός του πλαισίου, να προωθηθούν προς τη διεργασία Defragment και στη συνέχεια προς τα ανώτερα στρώματα και να ειδοποιηθεί η μονάδα Ελέγχου Πρωτοκόλλου αν χρειάζεται μετάδοση πλαισίου επιβεβαίωσης. Η τροποποίηση που πραγματοποιείται σε αυτή τη διεργασία αφορά μόνο τις παραμέτρους του σήματος SetNav, που αποστέλλεται προς τη διεργασία Channel\_State, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού εικονικής ανίχνευσης φέροντος της iDCF (βλ. §4.1). Η δεύτερη παράμετρος του σήματος που μεταφέρει το περιεχόμενο του πεδίου DurationID των ληφθέντων πλαισίων πρέπει να οριστεί ως ακέραιος επειδή μεταφέρει μέγεθος πλαισίου. Επίσης η παράμετρος τύπου NavSrc που καθορίζει τον τύπο της πηγής (τύπος ληφθέντος πλαισίου), με βάση την οποία θα τεθεί το Nav, θα πρέπει να τεθεί σύμφωνα με τους νέους τύπους που έχουν οριστεί στο σχήμα 4.2, σελίδα 82.

#### 4.2.3.3 Διεργασία Defragment

Στη διεργασία αυτή πραγματοποιείται η επανένωση ενός τεμαχισμένου πλαισίου δεδομένων, πριν αυτό παραδοθεί στα ανώτερα στρώματα. Ο δυναμικός τεμαχισμός πλαισίων της iDCF έχει υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο στη διεργασία Tx\_Coordination της μονάδας Ελέγχου Πρωτοκόλλου ώστε να μη χρειάζεται καμία τροποποίηση για την επανένωση των πλαισίων στη διεργασία Defragment.

#### 4.2.3.4 Διεργασία Channel\_State

Η διεργασία Channel\_State είναι αυτή που υλοποιεί τους μηχανισμούς ένδειξης της κατάστασης του μέσου και χρονισμού των χρονοσχημάτων του πρωτοκόλλου. Το διάγραμμα SDL της διεργασίας βρίσκεται στα σχήματα 4.15 έως 4.17, σελίδες 100 έως 102. Για την εκτίμηση της κατάστασης του μέσου ως ενεργού ή ανενεργού επιστρατεύονται δύο μηχανισμοί. Ο φυσικός μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος που δέχεται είσοδο από το φυσικό στρώμα και ο εικονικός μηχανισμός που υλοποιείται στο επίπεδο MAC και περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4.5. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί υπαγορεύουν την υλοποίηση τουλάχιστον τεσσάρων καταστάσεων μηχανής για τη συγκεκριμένη διεργασία, μία για κάθε συνδυασμό των ενδείξεων από τους δύο αυτούς μηχανισμούς. Αυτές είναι οι noCs\_noNav, noCs\_Nav, Cs\_noNav και Cs\_Nav. Μία επιπλέον κατάσταση χρειάζεται για την τήρηση των διαστημάτων σιγής του πρωτοκόλλου. Αυτή είναι η Wait\_IFS.

Για την iDCF, στη διεργασία Channel\_State υλοποιούνται οι τροποποιήσεις που αφορούν α) την τήρηση διαστημάτων σιγής κατά τις διακοπές των διαδικασιών φασματικής ανίχνευσης, β) το νέο μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος, γ) την αρχικοποίηση χρόνων αναμονής επιβεβαιώσεων και δ) την παύση του μετρητή υποχώρησης (backoff) πριν τις διακοπές.

Με τη λήψη του σήματος PauseMAC (σελίδα 101) εκτελείται η βοηθητική ρουτίνα iDcfPauseMac (σχήμα 4.20, σελίδα 105), η οποία ακυρώνει οποιονδήποτε μετρητή εκκρεμεί, εκτός το μετρητή NAV. Αυτόν τον επιμηκύνει για χρονικό διάστημα όσο η διάρκεια της διακοπής. Μετά τη διακοπή, η εκ νέου αρχικοποίηση, για ό,τι εκκρεμούσε, εκτελείται στο σώμα της διεργασίας με τη βοήθεια του νέου προσαρμοσμένου τύπου μεταβλητής PendingOperation του οποίου ο ορισμός βρίσκεται στη σελίδα 82. Η μεταβλητή pendingAfterScan που είναι τύπου PendingOperation τίθεται κατάλληλα από επιμέρους ρουτίνες όπως περιγράφεται παρακάτω. Μετά τη διακοπή επίσης, καλείται η βοηθητική ρουτίνα iDcfNewUtInit (σχήμα 4.20, σελίδα 105) η οποία αρχικοποιεί μεταβλητές που αλλάζουν τιμή με την έλευση ενός νέου ενεργού χρόνου.

α) Τα διαστήματα σιγής που τηρούνται στη διεργασία Channel\_State είναι το DIFS και το EIFS. Κάθε φορά που τίθεται ο μετρητής Tifs για την τήρηση ενός διαστήματος σιγής, ελέγχεται ο χρόνος που απομένει μέχρι την έναρξη της προσεχούς διαδικασίας φασματικής ανίχνευσης. Ο εναπομείνας χρόνος εξετάζεται με τη νέα ρουτίνα iDcfSetIfs που εισήχθη στη διεργασία και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.18, σελίδα 103. Η ρουτίνα αυτή θέτει τη μεταβλητή pendingAfterScan κατάλληλα και τη μεταβλητή dRemIfs σε εκείνη τη διάρκεια του διαστήμα-

τος σιγής που πρέπει να τηρηθεί μετά το πέρας της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών. Το πόση διάρκεια από το διάστημα σιγής τηρείται μετά το πέρας της φασματικής ανίχνευσης, ανάλογα με το σημείο στο οποίο αυτό διακόπτεται, αποφασίζεται με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4.3. Στην περίπτωση που ένα διάστημα σιγής δε θα διακοπεί από τη διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών, η τιμή που τίθεται στην μεταβλητή *dRemIfs* είναι μηδενική. Στο τέλος του τρέχοντος ενεργού χρόνου, με τη λήψη του νέου σήματος *Pause-MAC*, ελέγχεται αν ο σταθμός βρίσκεται σε τήρηση διαστήματος σιγής. Στην έναρξη του ενεργού χρόνου ελέγχεται αν εκκρεμεί η τήρηση διαστήματος σιγής και τίθεται ο μετρητής σύμφωνα με την τιμή που υπολογίστηκε στη ρουτίνα *iDcfSetIfs*.

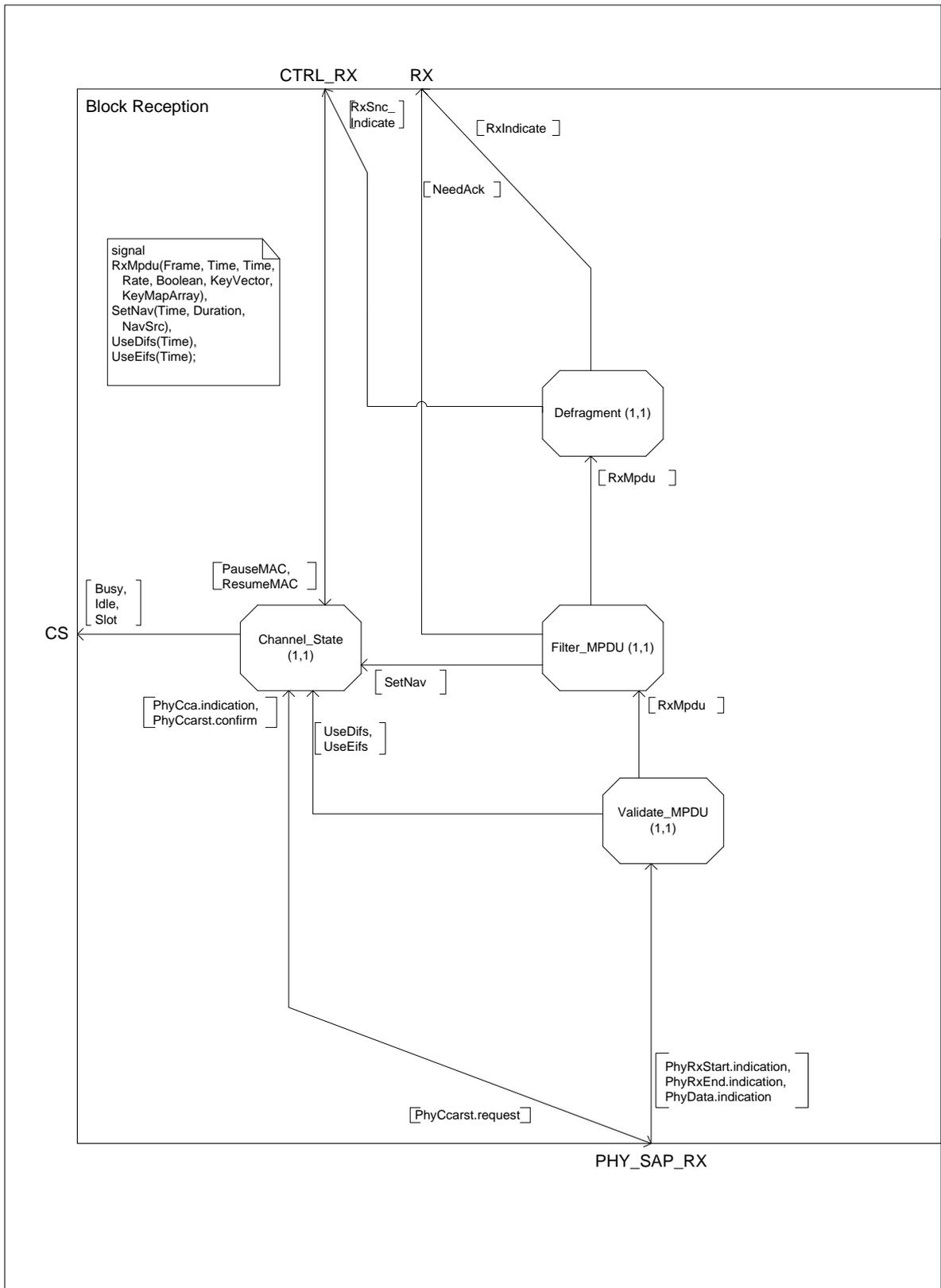
β) Η υλοποίηση του τροποποιημένου μηχανισμού εικονικής ανίχνευσης φέροντος, που έγινε στη διεργασία *Channel\_State*, υποστηρίζεται από την προσθήκη νέων τύπων πηγών *NAV* στον ορισμό του προσαρμοσμένου τύπου *NavSrc* και μια μικρή τροποποίηση στη διεργασία *Filter\_MPDU*, η οποία στέλνει το σήμα *SetNav*. Όταν λαμβάνεται το σήμα *SetNav* στη διεργασία *Channel\_State*, γίνεται έλεγχος τόσο του τύπου της πηγής του, όσο και του τρέχοντος χρονικού σημείου, ώστε να αποφασιστεί ποια θα είναι η νέα τιμή του μετρητή *NAV*, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.4.5 και του πίνακες 3.2 έως 3.4. Ο έλεγχος αυτός και η θέση του μετρητή *NAV* πραγματοποιούνται στη νέα ρουτίνα *iDcfSetNav*. Το *SDL* διάγραμμα της ρουτίνας αυτής παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19, σελίδα 104.

Όταν ο ενεργός χρόνος δεν επαρκεί για το σύνολο της κράτησης που χρειάζεται η τρέχουσα ακολουθία ανταλλαγής πλαισίων  $t_{RSRV}$ , ο μετρητής *NAV* θα τίθεται μέχρι το πέρας του τρέχοντος ενεργού χρόνου και θα πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου με την έναρξη του επόμενου. Ο υπολογισμός αυτός εξασφαλίζεται με τη μεταβλητή *pendingAfterScan* η οποία τίθεται να δείχνει ότι εκκρεμεί η θέση του μετρητή *NAV*. Παράλληλα, οι μεταβλητές *navSrc* και *durationID* τίθενται ώστε όταν θα γίνει ο υπολογισμός να έχουν τιμή σαν να ελήφθη μόλις το σωστό πλαίσιο. Π.χ. αν έχει ληφθεί πλαίσιο *rts* και ο εναπομείνας ενεργός χρόνος επαρκεί για την μετάδοση ενός μόνο τμήματος του πλαισίου δεδομένων ωφέλιμου φόρτου  $L_F$  (βλ. και Εικόνα 3.13(β)), σελίδα 68) οι μεταβλητές αυτές τίθενται στις τιμές  $navSrc = dataFr$  και  $durationID = L_P - L_F$ , όσο θα είναι το πεδίο *DurationID* δηλαδή του τεμαχίου δεδομένων που προλαβαίνει να μεταδοθεί. Έτσι με την έναρξη του νέου ενεργού χρόνου και την κλήση της ρουτίνας *iDcfSetNav* γίνονται οι σωστοί έλεγχοι και τίθεται ο μετρητής *NAV* σαν να ελήφθη μόλις ένα τεμάχιο δεδομένων, το οποίο ανακοινώνει ότι έπεται και άλλο τεμάχιο στην ακολουθία. Τέλος, πολύ σημαντική είναι και η νέα μεταβλητή *dRemSifs* στην οποία αποθηκεύεται το εναπομείναν διάστημα σιγής που θα τηρηθεί στην έναρξη του επόμενου ενεργού χρόνου.

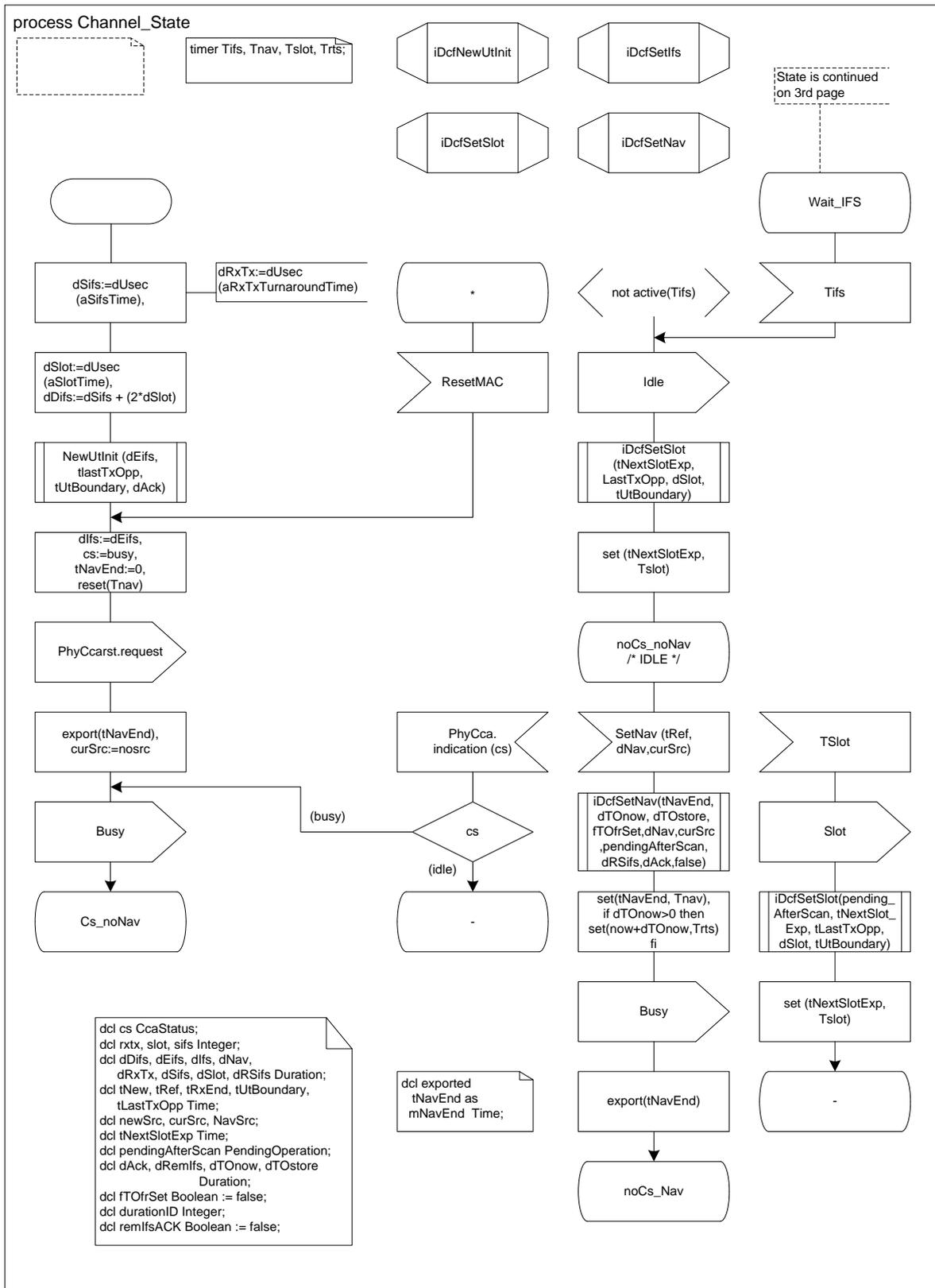
γ) Στη διεργασία *Channel\_State* υλοποιείται επίσης ο μετρητής χρόνου αναμονής (*timeout*) για τα πλαίσια *rts*, ο οποίος στο πρότυπο πρωτόκολλο ήταν υλοποιημένος στη διεργασία *Validate\_MPDU*. Στο τροποποιημένο διακοπτόμενο πρωτόκολλο, πρέπει να γίνουν ορισμένοι έλεγχοι για το πότε πρέπει να τεθεί ένας μετρητής χρόνου αναμονής και ποια θα είναι η τιμή του. Οι έλεγχοι αυτοί είναι συναφείς με τους ελέγχους και του υπολογισμού του τροποποιημένου μηχανισμού εικονικής ανίχνευσης φέροντος και, γι αυτό το λόγο, στην *iDCF*

η αρχικοποίηση του συγκεκριμένου μετρητή χρόνου αναμονής υλοποιήθηκε στη διεργασία Channel\_State. Η αρχικοποίηση του μετρητή χρόνου αναμονής για τα πλαίσια rts ενσωματώνεται στη νέα ρουτίνα iDcfSetNav της διεργασίας. Όταν λαμβάνεται νέο σήμα για SetNav, αν η πηγή του είναι ένα πλαίσιο rts, τότε εσωτερικά στην iDcfSetNav καλείται η ρουτίνα iDcfSetTimeout από τη διεργασία Tx\_Coordination της μονάδας Ελέγχου Πρωτοκόλλου. Εκεί εκτελούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι και υπολογίζεται ο χρόνος που πρέπει να τεθεί πριν και μετά την επερχόμενη διακοπή.

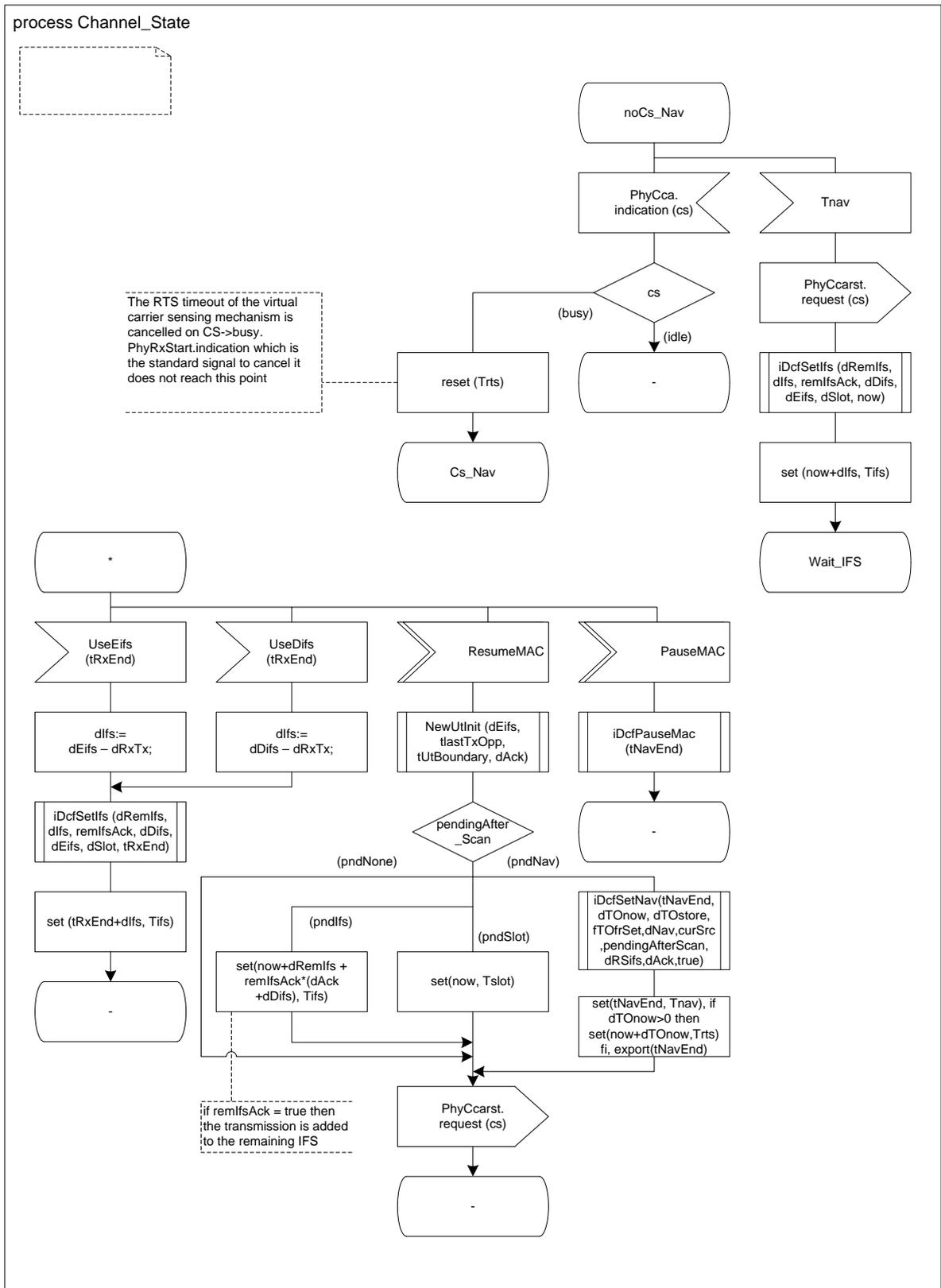
δ) Η τροποποίηση της παύσης του μετρητή υποχώρησης όταν έχει παρέλθει το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  της iDCF, υλοποιείται στη διεργασία Channel\_State. Η διεργασία αυτή τηρεί τον χρονισμό των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου στέλνοντας σήμα στη διεργασία Backoff\_Procedure της μονάδας Μετάδοσης σε κάθε σύνορο χρονοσχισμής. Έτσι, αν η αποστολή αυτού του σήματος παύει όταν έχει παρέλθει το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$ , τότε η παύση του μετρητή πραγματοποιείται επιτυχώς. Η ρουτίνα iDCFSetSlot στο σχήμα 4.20, σελίδα 105, εκτελεί αυτόν τον έλεγχο και προγραμματίζει ανάλογα το πότε θα είναι το σύνορο της επόμενης χρονοσχισμής. Σε περίπτωση που έχει παρέλθει το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  και το σύνορο της επόμενης χρονοσχισμής πρέπει να είναι στην έναρξη του επόμενου ενεργού χρόνου, τίθεται κατάλληλα η μεταβλητή pendingAfterScan σε pndSlot.



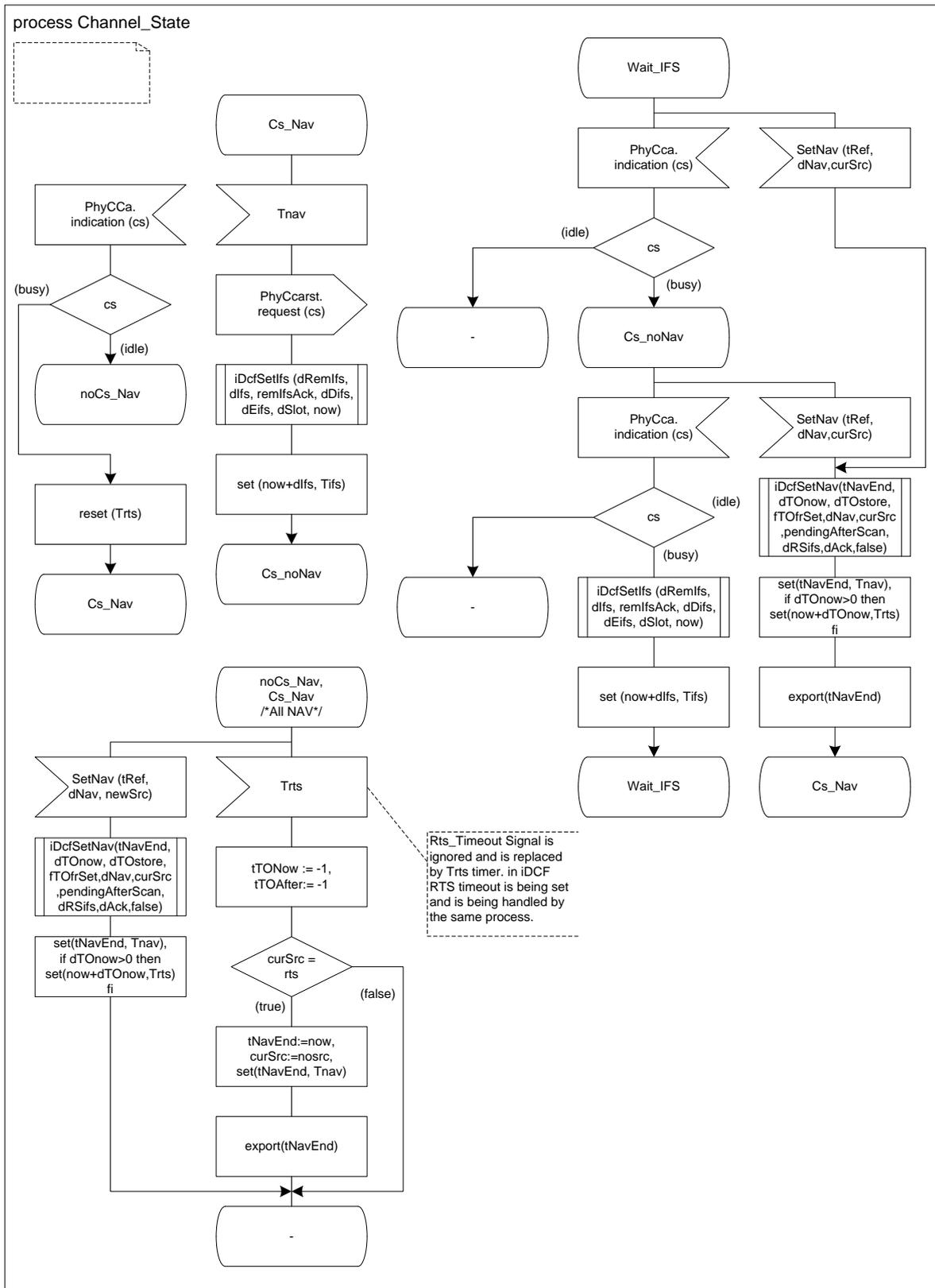
Σχήμα 4.14: Το διάγραμμα SDL της μονάδας Λήψης



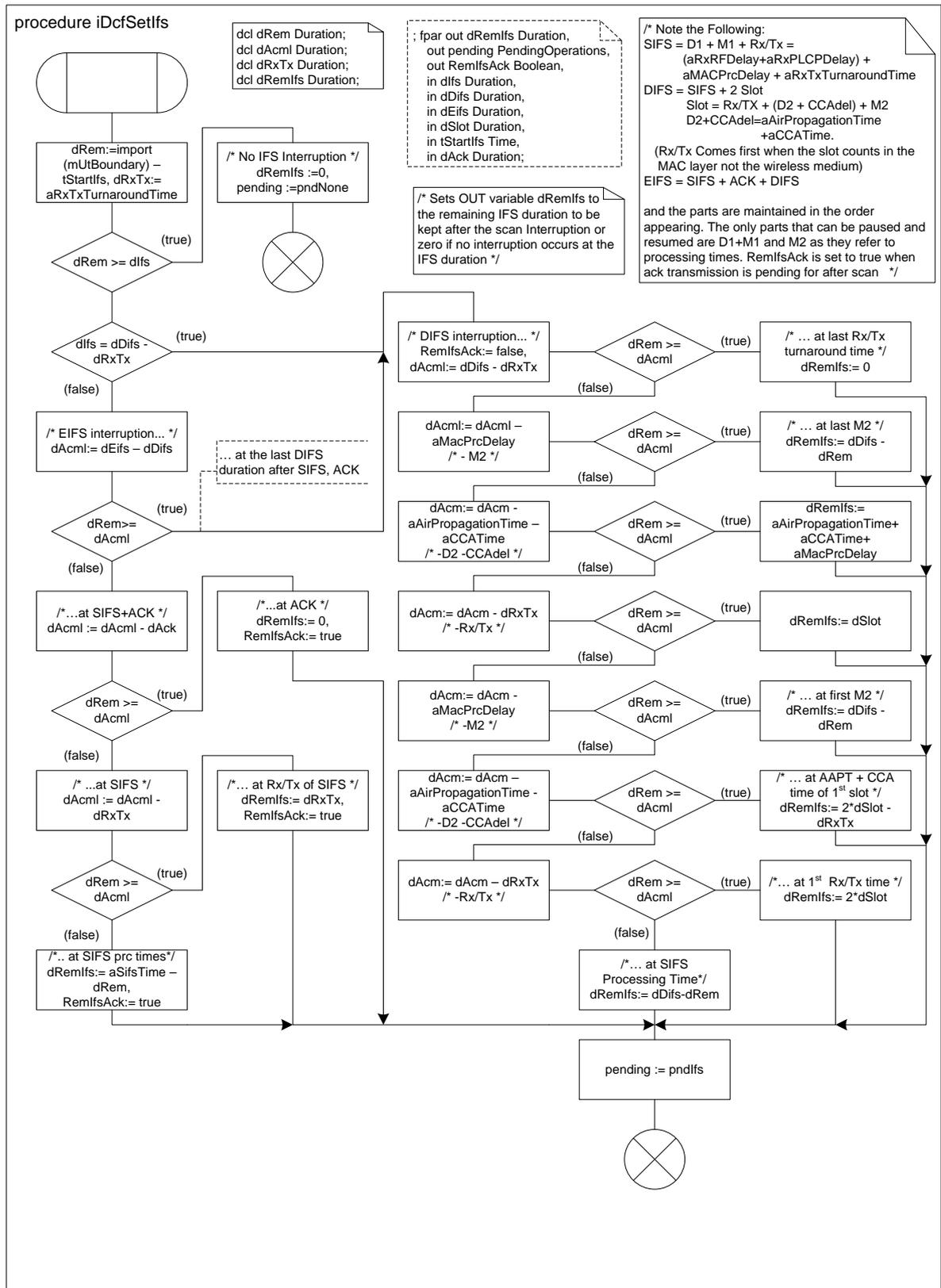
Σχήμα 4.15: Το διάγραμμα SDL της διεργασίας Channel\_State (1/3)



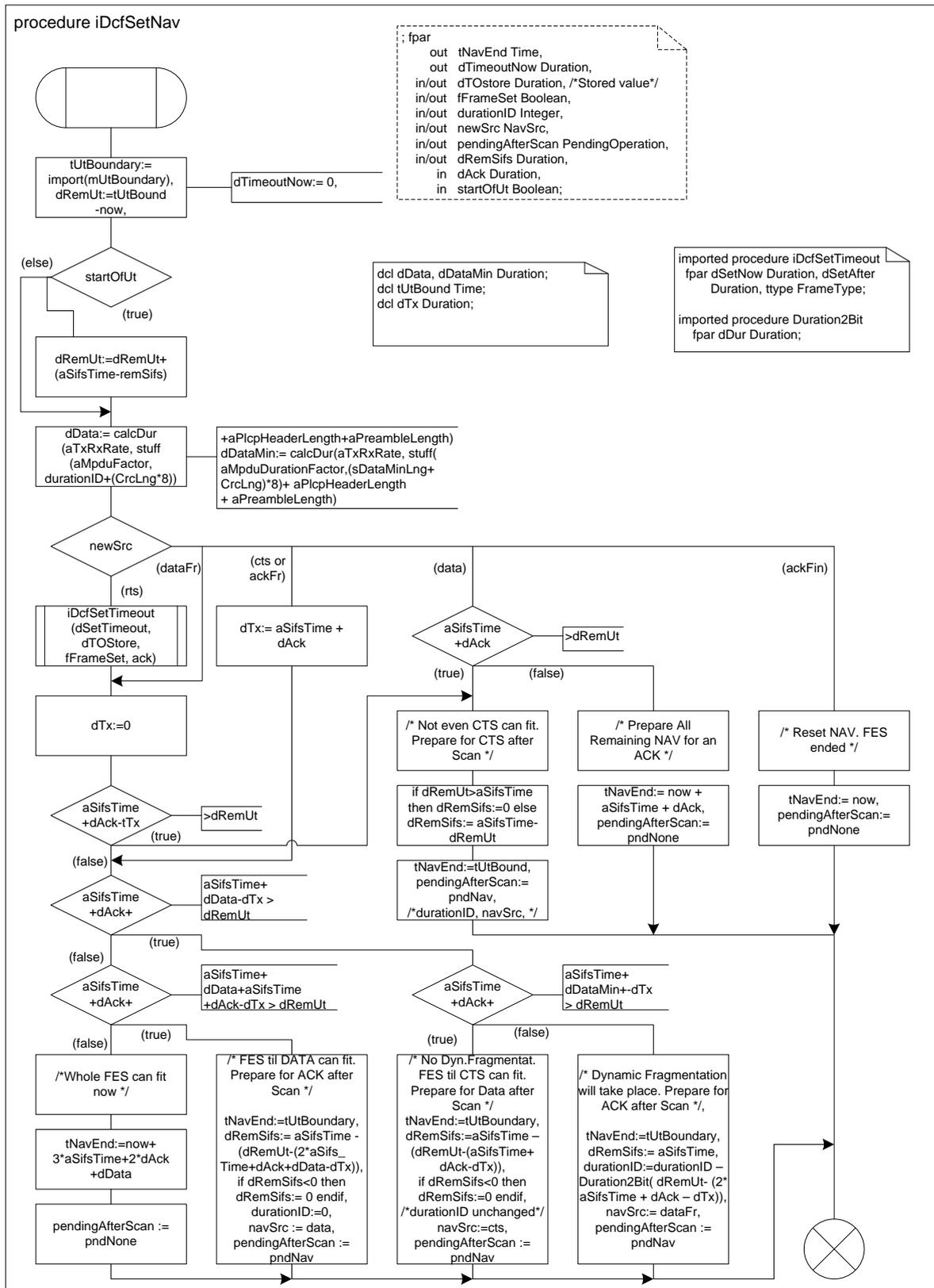
Σχήμα 4.16: Το διάγραμμα SDL της διεργασίας Channel\_State (2/3)



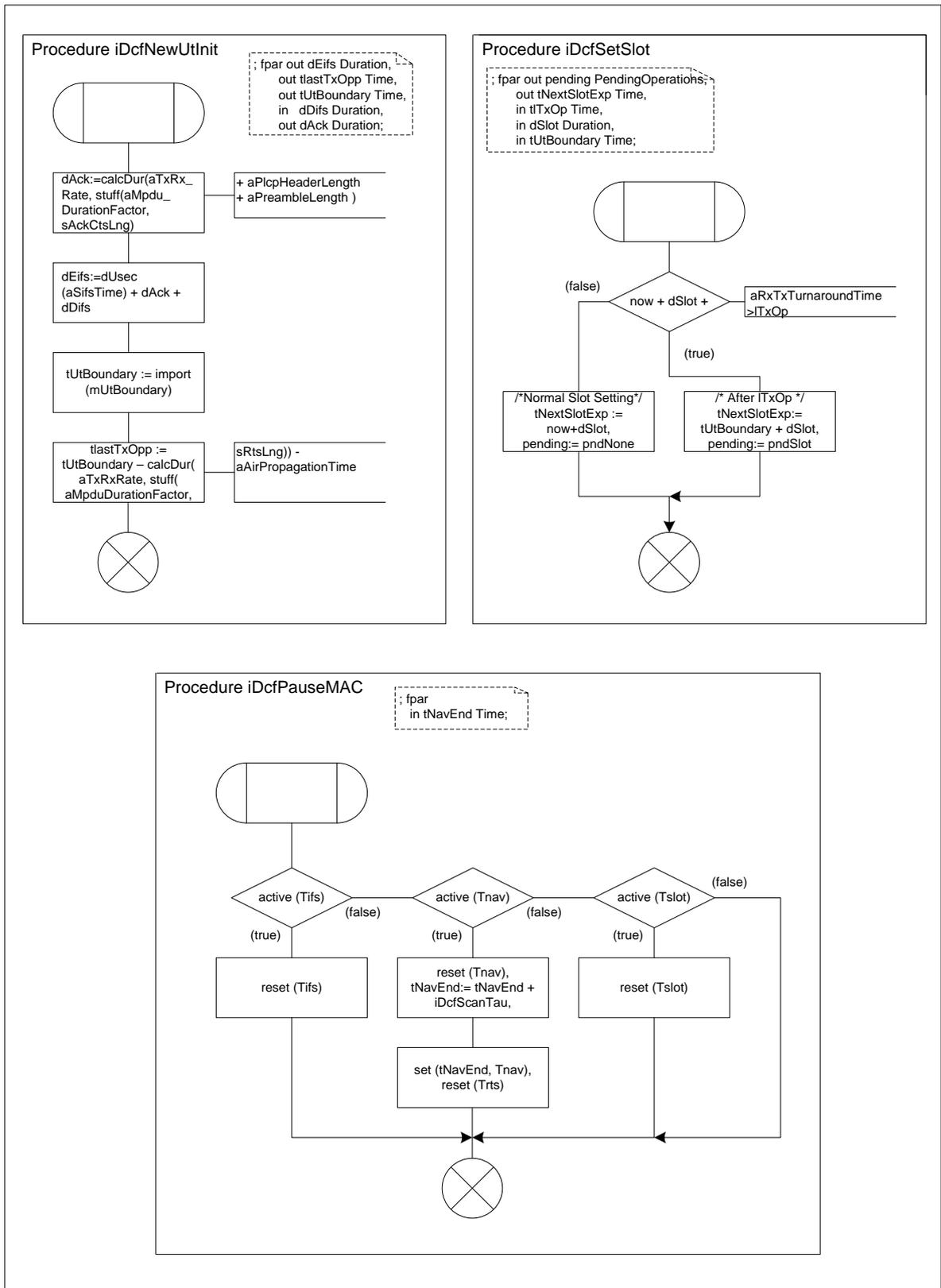
Σχήμα 4.17: Το διάγραμμα SDL της διεργασίας Channel\_State (3/3)



Σχήμα 4.18: Το διάγραμμα SDL της ρουτίνας iDcfSetIfs



Σχήμα 4.19: Το διάγραμμα SDL της ρουτίνας iDcfSetNav



Σχήμα 4.20: Το διάγραμμα SDL της ρουτίνας iDcfSetSlot, iDcfNewUtInit και iDcfPauseMAC

**Πίνακας 4.2:** Νέες παράμετροι *iDCF* που αφορούν τη Λειτουργία Κατανεμημένου Συγχρονισμού

Όνομα Παραμέτρου	Περιγραφή	Μονάδες
<code>idcfSyncTau</code>	Διάρκεια Χρονοθυρίδας $\Sigma\Psi N^{\wedge}$ $\tau_{\text{SYNC}}$	$\mu s$
<code>idcfSyncOffsSlot</code>	Διάρκεια Χρονοθυρίδων $\sigma_{\text{SYNC}}$	$\mu s$
<code>idcfInitSyncTimeoutMult</code>	Πολλαπλασιαστής Περιόδου Φασματικής Ανίχνευσης $T$ για το μέγιστο χρόνο αναμονής στην Παθητική Κατάσταση Συγχρονισμού	$\mu s$
<code>idcfMinSyncOffsetSlots</code>	Ελάχιστος Αριθμός χρονοθυρίδων $\sigma_{\text{SYNC}}$ κατά τη διάρκεια $\tau_{\text{SYNC}}$	$\mu s$

#### 4.2.4 Υλοποίηση σε *SDL* της Λειτουργίας Κατανεμημένου Συγχρονισμού στη μονάδα Ελέγχου *iDCF*

Η μονάδα Ελέγχου *iDCF* είναι η μονάδα που εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης, όπως λειτουργίες ανίχνευσης δικτύων και συσχετίσεων / αποσυσχετίσεων με αυτά, εξουσιοδοτήσεων, λειτουργίες εξοικονόμησης ισχύος και λειτουργίες συγχρονισμού. Η μονάδα αυτή είναι και η κατάλληλη για την υλοποίηση γνωστικών λειτουργιών που έχουν σχέση με τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα όπως διαχείριση φάσματος και φασματικών μεταπομπών. Εδώ λ.χ. θα διαβάζονται οι μεταβλητές `iDcfIdleDataPeriodsCounter`, `iDcfIdleResponsePeriodsCounter`, οι οποίες τίθενται όπως είδαμε στις νέες ρουτίνες `iDcfRspTxRequest` και `iDcfDynamicFrag`, ώστε να συνυπολογίζονται σε μια απόφαση φασματικής μεταπομπής. Εδώ, επίσης, θα τίθενται οι τιμές της περιόδου και της διάρκειας των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών ανάλογα με την επιλεχθείσα φασματική ζώνη και τις απαιτήσεις που αυτή θέτει στη Δευτερεύουσα χρήση του φάσματος (βλ. §2.3.2.2).

Μία από τις ανεξάρτητες διεργασίες που εμπεριέχονται στη μονάδα Ελέγχου *iDCF* θα είναι και αυτή στην οποία θα υλοποιείται η υπηρεσία συγχρονισμού. Στο πρότυπο πρωτόκολλο *DCF*, αντίστοιχα, ο συγχρονισμός υλοποιείται σαν υπηρεσία (service) σε μια διεργασία της μονάδας διαχείρισης του υποστρώματος *MAC*. Οι υπηρεσίες μέσα σε μια διεργασία συνυπάρχουν μοιραζόμενες το χώρο των μεταβλητών ενώ κάθε φορά είναι ενεργή (τρέχει) μόνο μια, αυτή που χειρίζεται το εισερχόμενο σήμα.

##### 4.2.4.1 Η Υπηρεσία *Synchronization*

Η παρακάτω υλοποίηση της Λειτουργίας Κατανεμημένου Συγχρονισμού, που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5, υποστηρίζεται από τον ορισμό των λειτουργικών παραμέτρων του συγχρονισμού του πίνακα 4.2, τη σταθερά `sSyncLng` που τίθεται στο μήκος του πλαισίου συγχρονισμού, τα νέα σήματα `TxSncConfirm` και `RxSncIndicate` και την επέκταση της ρουτίνας `mkCtl` για την κατασκευή πλαισίων τύπου `sync`. Οι ορισμοί των παραπάνω παραμέτρων, μεταβλητών και σημάτων περιέχονται στο σχήμα 4.2, σελίδα 82 ενώ η ροή των νέων σημάτων προδιαγράφεται στα διαγράμματα *SDL* του συστήματος, και των μονάδων Μετάδοσης και Λήψης, σελίδες 77, 94 και 99.

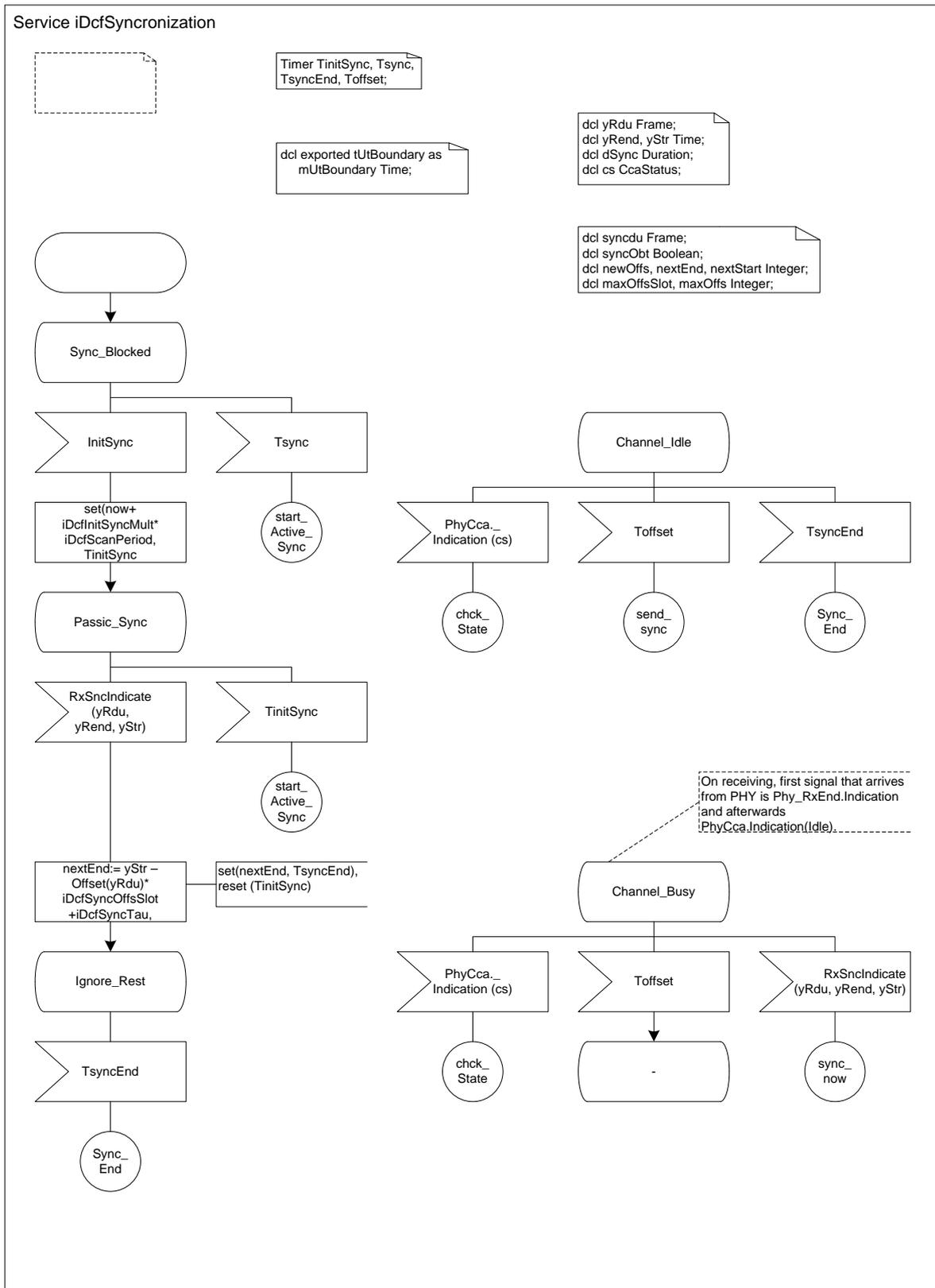
Οι διεργασίες οι οποίες στέλνουν τα σήματα `TxSncConfirm` και `RxSncIndicate` είναι οι

διεργασίες Data.Pump και Defragment, αντίστοιχα. Η τροποποίηση που θα πρέπει να γίνει στη διεργασία Data.Pump είναι απλά η αποστολή του σήματος TxSncConfirm όταν ολοκληρώνει την αποστολή οκτάδων ενός πλαισίου sync προς το φυσικό στρώμα. Η τροποποίηση που θα πρέπει να γίνει στη διεργασία Defragment αφορά την δρομολόγηση ενός ληφθέντος πλαισίου sync μέσω του σήματος RxSncIndicate προς τη μονάδα Ελέγχου iDCF ώστε να παραληφθεί από την υπηρεσία Synchronization.

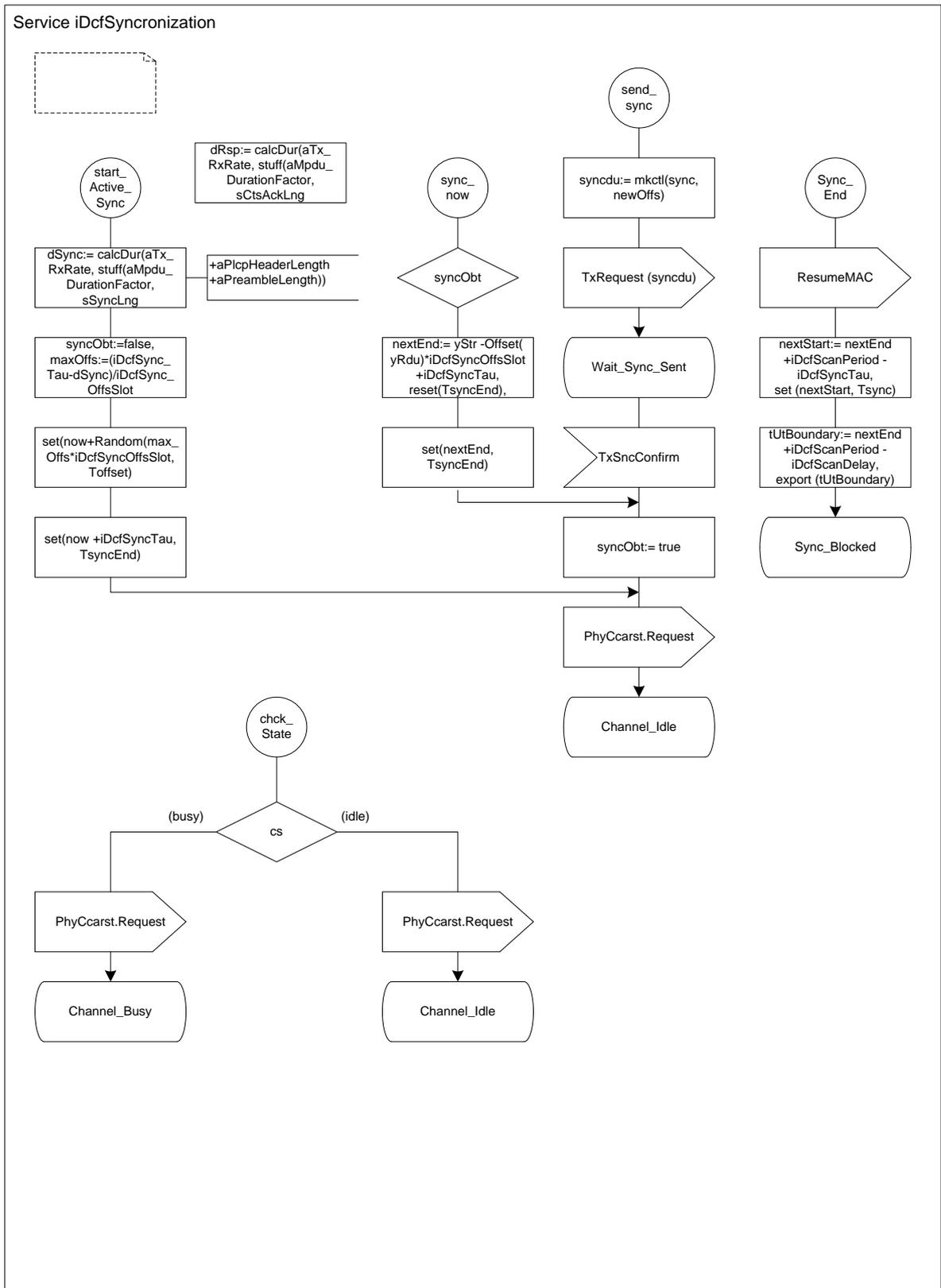
Για τη μέτρηση του χρόνου, όπως και στο πρότυπο πρωτόκολλο, κάθε κόμβος εσωτερικά διατηρεί ένα ψηφιακό μετρητή χρόνου, ο οποίος αυξάνει την τιμή του κατά ένα κάθε 1 μs. Ο μετρητής αυτός ονομάζεται μετρητής TSF - (Time Synchronization Function).

Στις εικόνες 4.21 και 4.22, σελίδες 108 και 109, δίνεται η υλοποίηση της Λειτουργίας Κατανεμημένου Συγχρονισμού που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5. Η διεργασία εκκινεί στην ανενεργή κατάσταση Sync.Blocked. Όταν ένας κόμβος εισέρχεται αρχικά στο δίκτυο, ευρισκόμενος εκτός συγχρονισμού, θα λάβει το σήμα Init\_Sync από κάποια διεργασία Ελέγχου, ώστε να περάσει στην παθητική κατάσταση συγχρονισμού. Εκεί θα παραμείνει αναμένοντας να λάβει μηνύματα συγχρονισμού από τους άλλους κόμβους του δικτύου για χρόνο όχι περισσότερο από αυτόν που ορίζεται με την παράμετρο idefInitSyncTimeoutMult, πράγμα που ελέγχεται από το μετρητή TinitSync\_timeout. Όταν λάβει το πρώτο μήνυμα συγχρονισμού, ευθυγραμμίζει τη λήξη της τρέχουσας χρονοθυρίδας SYNC με βάση τη ληφθείσα τιμή χρονικής απόκλισης από την αρχή της χρονοθυρίδας και τη χρονική στιγμή έναρξης της λήψης του πακέτου, που παρέχεται μαζί με το σήμα εισόδου. Κατόπιν, αφού θέσει τον μετρητή TsyncEnd για το χρονικό σύνορο της τρέχουσας χρονοθυρίδας SYNC, αναμένει το τέλος της. Πριν επιστρέψει στην αρχική ανενεργό κατάσταση Sync.Blocked θέτει τον μετρητή Tsync που θα σημάνει την έναρξη της επόμενης χρονοθυρίδας συγχρονισμού.

Σε περίπτωση που λήξει ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος παραμονής στην παθητική κατάσταση συγχρονισμού, αλλά και κατά τις προγραμματισμένες διαδικασίες συγχρονισμού ο κόμβος εισέρχεται στην κατάσταση ενεργού συγχρονισμού. Αρχικά υπολογίζει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα απόκλισης, μετά την πάροδο του οποίου θα επιχειρήσει μετάδοση μηνύματος συγχρονισμού και θέτει το μετρητή Toffset, ο οποίος θα σηματοδοτήσει το χρονικό αυτό σημείο. Επίσης, θέτει αρχικά τον μετρητή που θα σημάνει το σύνορο της τρέχουσας χρονοθυρίδας SYNC. Στη συνέχεια, αναμένει για μηνύματα συγχρονισμού και επιχειρεί να στείλει το δικό του όταν λήξει ο χρόνος απόκλισης και μόνο στην περίπτωση που το μέσο είναι ανενεργό. Ένας κόμβος πραγματοποιεί ευθυγράμμιση του χρονικού συνόρου της τρέχουσας χρονοθυρίδας SYNC, μόνο κατά την πρώτη λήψη μηνύματος συγχρονισμού και εφόσον δεν έχει ήδη προηγηθεί μετάδοση πλαισίου sync από τον ίδιο. Αυτό εξασφαλίζεται με την μεταβλητή syncObt και τον έλεγχο της τιμής της. Τέλος, με τη λήξη της τρέχουσας χρονοθυρίδας, που σηματοδοτείται από το μετρητή TsyncEnd, επιστρέφει στην κατάσταση Sync.Blocked, αφού πρώτα τεθεί ο μετρητής Tsync για την έναρξη της επόμενης χρονοθυρίδας SYNC.



Σχήμα 4.21: Το διάγραμμα SDL της υπηρεσίας Synchronization (1/2)



Σχήμα 4.22: Το διάγραμμα SDL της υπηρεσίας Synchronization (2/2)

### 4.3 Ο Προσομοιωτής του Δευτερεύοντος δικτύου

Προκειμένου να επικυρωθεί η λειτουργία της *iDCF* σαν το πρωτόκολλο του υποστρώματος MAC ενός Δευτερεύοντος δικτύου γνωστικών τερματικών, αλλά και να αποτιμηθεί η επίδοσή της κάτω από διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, υλοποιήθηκε προσομοιωτής δικτύου. Το περιβάλλον λογισμικού προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε, παρέχει ένα πλήρες σετ εργαλείων ανάπτυξης και λειτουργίας προσομοιωτών διακριτών συμβάντων για δίκτυα επικοινωνιών.

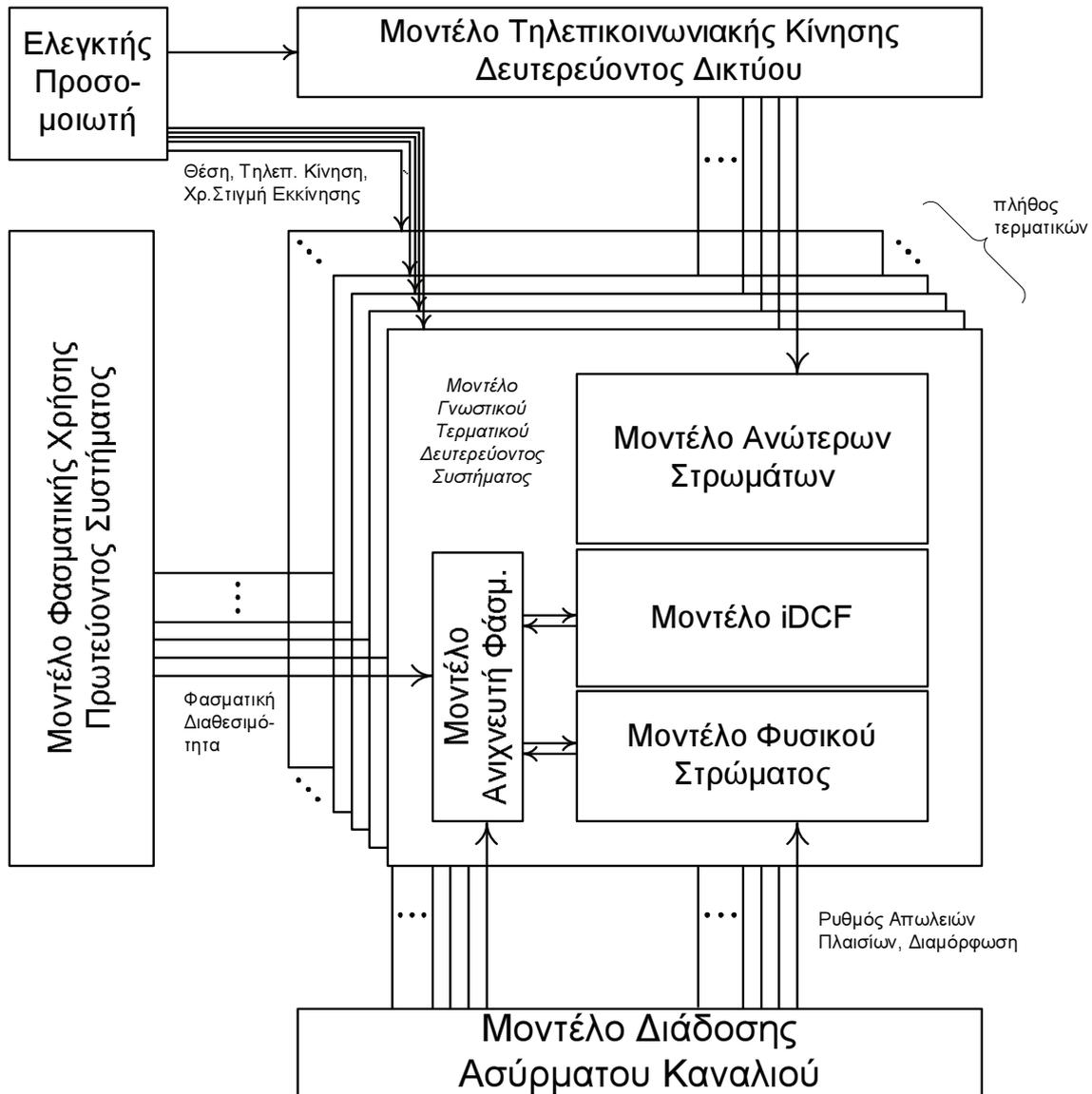
Ο προσομοιωτής που αναπτύχθηκε αποτελείται από διακριτές μονάδες ανεξάρτητες μεταξύ τους που διασυνδέονται κατάλληλα. Έτσι είναι εφικτό να υλοποιηθεί πλήθος διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης διαφοροποιώντας τα μοντέλα κάθε μονάδας, π.χ. μπορεί να εκτιμηθεί η επίδοση του Δευτερεύοντος δικτύου ως προς τη βελτίωση της χρησιμοποίησης του φάσματος που προσφέρει, για διαφορετικά μοντέλα φασματικής χρησιμοποίησης από το Πρωτεύον Δίκτυο. Η αρχιτεκτονική του προσομοιωτή, η διασύνδεση μεταξύ των διακριτών μονάδων του καθώς και το πλήθος παραμέτρων του παρουσιάζονται στο σχήμα 4.23.

Το δίκτυο αποτελείται από ένα πλήθος  $n$  τερματικών τα οποία αρχικοποιούνται και τοποθετούνται στο χώρο, σχηματίζοντας την επιθυμητή τοπολογία δικτύου, από τον ελεγκτή προσομοιωτή. Μερικές παράμετροι που ορίζονται κατά την αρχικοποίηση, εκτός της θέσης, είναι η επιθυμητή χρονική στιγμή εκκίνησης της λειτουργίας του κάθε τερματικού (με αναφορά τη χρονική στιγμή μηδέν έναρξης της προσομοίωσης) και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακής κίνησης που εξυπηρετούνται στο κάθε τερματικό (αν είναι επιθυμητός ο διαχωρισμός των χαρακτηριστικών της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ανά τερματικό).

Το μοντέλο Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης καθορίζει τον τρόπο γέννησης πλαισίων δεδομένων προς μετάδοση, που εξυπηρετούνται στο Δευτερεύον δίκτυο. Στη θέση αυτή μπορεί να τεθεί πληθώρα μοντέλων που προσομοιώνουν ρεαλιστικά διάφορα είδη τηλεπικοινωνιακής κίνησης ή να τεθεί το δίκτυο σε τρόπο λειτουργίας κορεσμού, κατά την οποία σε κάθε τερματικό μετά το πέρας της εξυπηρέτησης του τρέχοντος πλαισίου δεδομένων, ένα νέο πλαίσιο δεδομένων είναι πάντα έτοιμο προς εξυπηρέτηση.

Το μοντέλο Φασματικής Χρήσης Πρωτεύοντος Συστήματος καθορίζει τη διαθεσιμότητα των καναλιών του Πρωτεύοντος συστήματος και τη μεταβολή τους στο χρόνο. Μπορεί να αντικατασταθεί είτε με απλά Μαρκοβιανά μοντέλα ουρών που εξάγουν τη διαθεσιμότητα εξυπηρετητών είτε με αναλυτικά μοντέλα φασματικής διαθεσιμότητας είτε, τέλος, με πραγματικές μετρήσεις. Η πληροφορία που εξάγεται από το συγκεκριμένο μοντέλο διαβιβάζεται στο μοντέλο Ανιχνευτή Φασματικών Οπών των τερματικών κι εκεί εξάγεται η τελική πληροφορία του Διανύσματος Φασματικής Διαθεσιμότητας NAV. Αν συνδυαστεί κατάλληλα με το Μοντέλο Διάδοσης Ασύρματου Καναλιού τότε μπορεί να προκύπτει διαφορετική πληροφορία NAV σε κάθε τερματικό ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες διαλείψεων στο κανάλι μεταξύ τερματικού και Πρωτεύοντος πομπού και να μελετηθεί έτσι κάποιο σχήμα συνεργατικής ανίχνευσης.

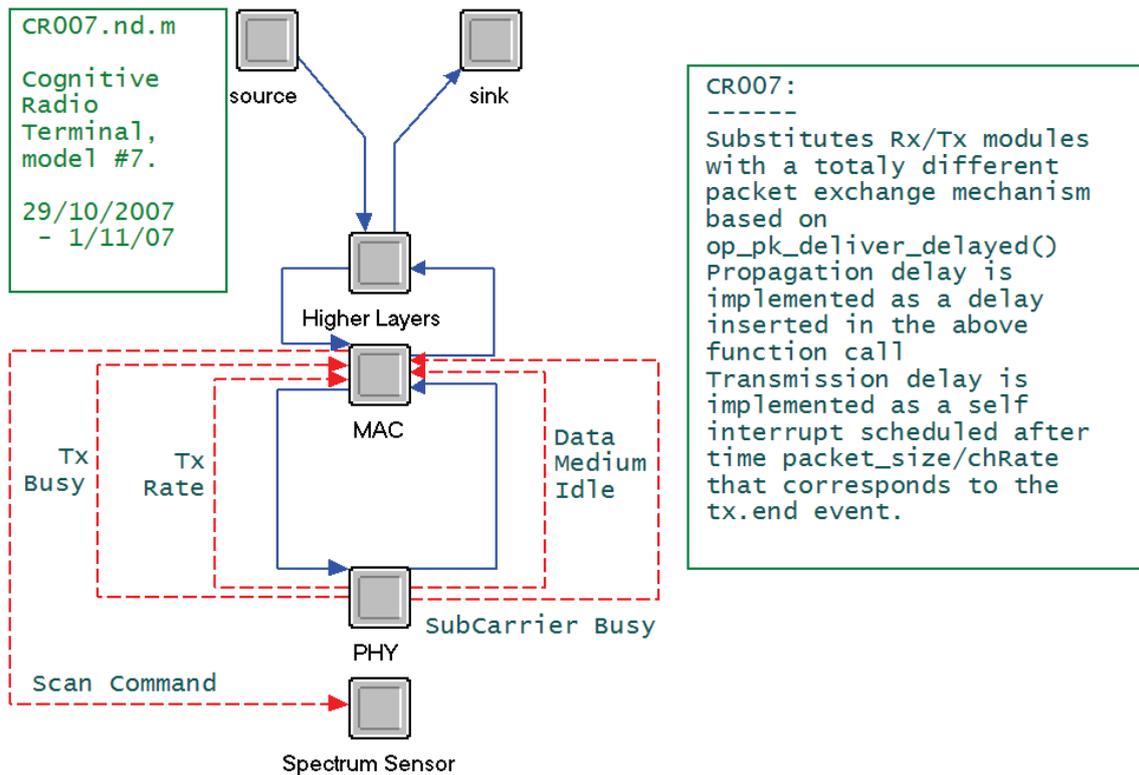
Το μοντέλο του Γνωστικού Τερματικού Δευτερεύοντος Συστήματος απαρτίζεται από τέσσερις διακριτές μονάδες οι οποίες απεικονίζονται και στο σχήμα 4.24, όπως εξήχθη από το περιβάλλον λογισμικού προσομοίωσης. Το μοντέλο Ανώτερων Στρωμάτων στην ουσία είναι



Σχήμα 4.23: Η αρχιτεκτονική του προσομοιωτή δικτύου

ένα ενδιάμεσο στρώμα που παρέχει λειτουργίες σύγκλισης στα ανώτερα στρώματα του δικτύου, ώστε να προσαρμόσει τα δεδομένα προς μετάδοση, όπως αυτά προέρχονται από το μοντέλο Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης Δευτερεύοντος Δικτύου, έτσι που να μπορεί να τα επεξεργαστεί η iDCF, λ.χ. επισυνάπτει διευθύνσεις παραληπτών στα πλαίσια.

Το μοντέλο Φυσικού Στρώματος προσομοιώνει τις λειτουργίες του φυσικού στρώματος του τερματικού. Παραλαμβάνει τα πλαίσια προς μετάδοση από την iDCF και σχηματίζει σειρές συμβόλων OFDM προς μετάδοση. Η λεπτομέρεια με την οποία προσομοιώνονται οι λειτουργίες του φυσικού στρώματος φτάνουν έως εκεί που το αποτέλεσμα επηρεάζει την επίδοση της υπό μελέτη iDCF. Έτσι, προσομοιώνονται οι καθυστερήσεις μετάδοσης προοιμίων OFDM σε κάθε μετάδοση, εισάγεται ένας επιπρόσθετος φόρτος για την επικεφαλίδα του πλαισίου PLCP, καθορίζεται ο ρυθμός μετάδοσης από τη διάρκεια του συμβόλου ανάλογα με την κυκλική του

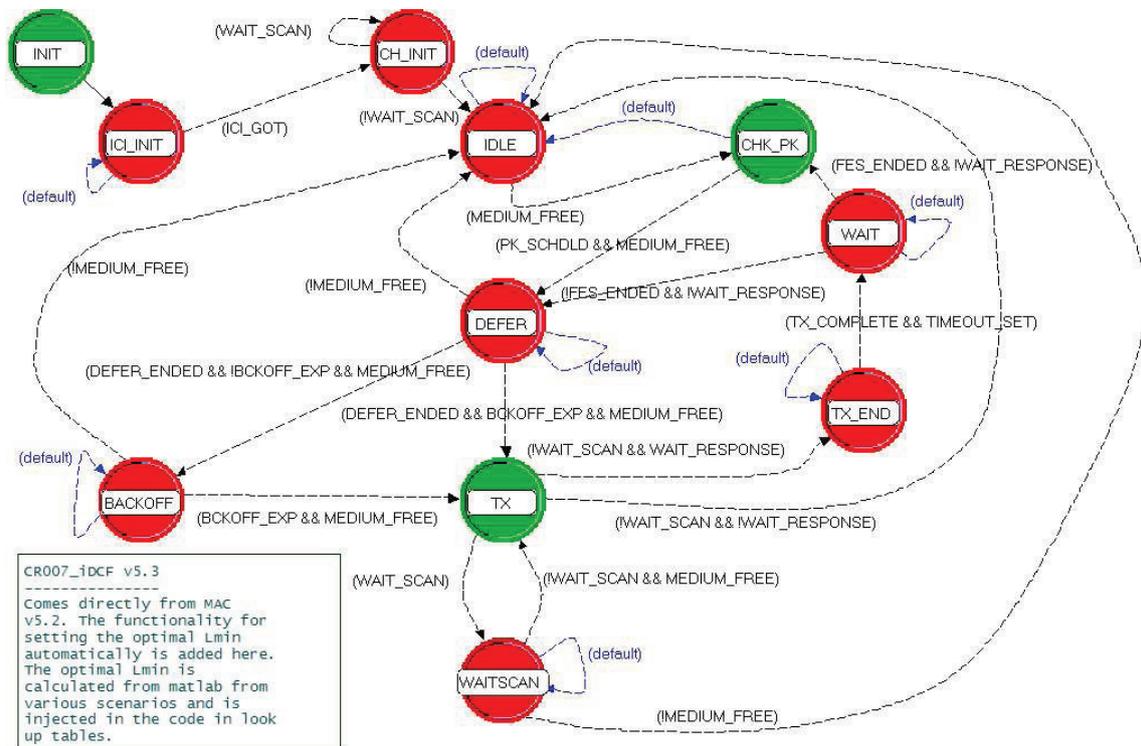


Σχήμα 4.24: Η εσωτερική αρχιτεκτονική ενός κόμβου του δικτύου / Γνωστικού Τερματικού Δευτερεύοντος Συστήματος, όπως εξήχθη από το περιβάλλον λογισμικού προσομοιώσεων (OPNET)

επέκταση, τη διαμόρφωση, η οποία καθορίζεται σε συνδυασμό με το μοντέλο Διάδοσης Ασύρματου Καναλιού, και το συνολικό αριθμό των διαθέσιμων υποφερόντων, ο οποίος διαβιβάζεται από τον Ανιχνευτή Φασματικών Οπών, εισάγονται σφάλματα στη λήψη, τα οποία οδηγούν σε απώλεια πλαισίων, κτλ. Το μοντέλο Ανιχνευτή Φασματικών Οπών, όπως προαναφέρθηκε, καθορίζει το διαθέσιμο αριθμό υποφερόντων προς χρήση, ανάλογα με τη φασματική διαθεσιμότητα, και προωθεί τα αποτελέσματα στο μοντέλο Φυσικού Στρώματος. Επίσης, ενημερώνει και ενημερώνεται από την iDCF για τους χρονισμούς εκτέλεσης των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών.

Κάθε διακριτή μονάδα του μοντέλου Γνωστικού Τερματικού Δευτερεύοντος Συστήματος υλοποιείται στο περιβάλλον λογισμικού προσομοίωσης σαν μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, σε κάθε μια από τις οποίες εκτελούνται συγκεκριμένες λειτουργίες. Συγκεκριμένα εσωτερικά ή εξωτερικά συμβάντα και συγκεκριμένες λογικές συνθήκες πυροδοτούν την αλλαγή καταστάσεων της μηχανής. Το διάγραμμα της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων της iDCF παρουσιάζεται στο σχήμα, όπως εξήχθη από το περιβάλλον λογισμικού προσομοίωσης. Λεπτομέρειες της υλοποίησης της iDCF έχουν παρουσιασθεί στο κεφάλαιο 3 και νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο.

□



Σχήμα 4.25: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων πρωτοκόλλου MAC (iDCF) του Γνωστικού Τερματικού Δευτερεύοντος Συστήματος, όπως εξήχθη από το περιβάλλον λογισμικού προσομοιώσεων (OPNET)



## Κεφάλαιο 5

# Αναλυτικό Μοντέλο Επίδοσης της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το αναλυτικό μοντέλο επίδοσης της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου σε περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος. Η μαθηματική ανάλυση βασίζεται στα μοντέλα Μαρκοβιανών αλυσίδων και τα επεκτείνει ώστε να λαμβάνεται υπόψη η διακοπτόμενη λειτουργία της iDCF και οι επιπτώσεις που αυτή έχει στις χρονικές διάρκειες των χρονοσχισμών που μεσολαβούν μεταξύ των μεταβάσεων καταστάσεων των Μαρκοβιανών αλυσίδων.

### 5.1 Μοντέλα Μαρκοβιανών αλυσίδων

Μία Μαρκοβιανή αλυσίδα είναι μια στοχαστική διαδικασία η οποία χαρακτηρίζεται από τη Μαρκοβιανή ιδιότητα. Η ιδιότητα αυτή σημαίνει ότι η διαδικασία είναι χωρίς μνήμη, δηλαδή δεδομένης της παρούσας κατάστασης, οι μελλοντικές καταστάσεις είναι ανεξάρτητες των καταστάσεων που έχουν προηγηθεί. Ανάμεσα στις πολλές εφαρμογές τους σε ένα ευρύ πεδίο επιστημών (Οικονομικά, Κοινωνιολογία, Φυσική, Βιοϊατρική) αλλά και συγκεκριμένα στην επιστήμη των τηλεπικοινωνιών (Συστήματα Ουρών αναμονής, Εφαρμογές Διαδικτύου (Google)), πρόσφατα προστέθηκε [78] και η εφαρμογή μοντελοποίησης της Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου του πρωτοκόλλου IEEE 802.11, με στόχο την παραγωγή αναλυτικού μοντέλου για τη μελέτη επίδοσής της.

Μετά το πρώτο μοντέλο του Bianchi [78], ακολούθησε πληθώρα διαφορετικών Μαρκοβιανών μοντέλων τα οποία αφορούν τη μελέτη επίδοσης της DCF. Η ποικιλία τους είναι επακόλουθο διαφορετικών παραδοχών και προσεγγίσεων στα εξής 4 σημεία:

1. **Μοντέλο Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης:** Μία βασική διαφοροποίηση μεταξύ των μοντέλων Μαρκοβιανών αλυσίδων προέρχεται από το χρησιμοποιούμενο μοντέλο τη-

λεπικοινωνιακής κίνησης. Ένας πρώτος διαχωρισμός υφίσταται από το αν το μοντέλο αναλύει την επίδοση σε συνθήκες κορεσμού τηλεπικοινωνιακής κίνησης [78], [79], [80], [81], ή την επίδοση σε συνθήκες μη-κορεσμού [82], [83], [84]. Ένα δεύτερο επίπεδο διαχωρισμού προκύπτει στα Μαρκοβιανά μοντέλα που χρησιμοποιούν τηλεπικοινωνιακή κίνηση μη-κορεσμού ανάλογα με το συγκεκριμένο μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Έτσι, διαφορετική είναι η Μαρκοβιανή αλυσίδα που ανακύπτει όταν λ.χ. η κίνηση μοντελοποιείται απλά σαν μια πιθανότητα  $q$  άφιξης τουλάχιστον ενός πακέτου προς εξυπηρέτηση σε κάθε κατάσταση της αλυσίδας για ένα σταθμό με μέγεθος ουράς 1 [83], από την αλυσίδα που προκύπτει όταν η κίνηση μοντελοποιείται σαν αφίξεις ροών πακέτων με γεωμετρικά κατανομημένο πλήθος πακέτων ανά ροή και εκθετικά κατανομημένες ανενεργές περιόδους μεταξύ διαδοχικών ροών [84].

2. **Λεπτομέρειες λειτουργίας DCF :** Διαφοροποίηση επίσης προκύπτει από το βαθμό που η μοντελοποίηση της Μαρκοβιανής αλυσίδας περιλαμβάνει λεπτομέρειες και χαρακτηριστικά που ορίζει το πρότυπο IEEE 802.11 για την DCF . Η κατασκευή της Μαρκοβιανής αλυσίδας εξαρτάται από το αν ο αριθμός επαναμεταδόσεων των πλαισίων, των οποίων η μετάδοση απέτυχε, είναι πεπερασμένος [81], [82], [84], ή άπειρος [78], [83], [79]. Μάλιστα, στο Μαρκοβιανό μοντέλο της εργασίας [84] ενσωματώθηκε για πρώτη φορά η συμπεριφορά της DCF στην περίπτωση που γίνεται άφιξη πλαισίου σε τερματικό με κενή ουρά αναμονής και το μέσο παραμένει ανενεργό για διάστημα DIFS από τη στιγμή άφιξης, κατά την οποία το πλαίσιο μεταδίδεται άμεσα χωρίς την ενεργοποίηση του μηχανισμού υποχώρησης. Η συμπεριφορά αυτή επηρεάζει σημαντικά την επίδοση της DCF σε συνθήκες χαμηλού φόρτου τηλεπικοινωνιακής κίνησης.
3. **Μοντέλο Καναλιού:** Οι πιθανότητες μεταβάσεων καταστάσεων των Μαρκοβιανών αλυσίδων τροποποιούνται, ανάλογα με το αν η μοντελοποίηση χρησιμοποιεί ασύρματο κανάλι χωρίς απώλειες [78], [79], [84], ή κανάλι με διαλείψεις, που μεταφράζεται σε ρυθμό απωλειών πακέτων [82], [81]. Μάλιστα στη δεύτερη κατηγορία η εργασία [80] ενσωματώνει το φαινόμενο του κρυμμένου τερματικού, εισάγοντας νέες υπο-καταστάσεις στη Μαρκοβιανή αλυσίδα.
4. **Παραλλαγές Αλγορίθμου Υποχώρησης:** Τέλος, ποικιλία των Μαρκοβιανών μοντέλων ανακύπτει από τη μελέτη διαφορετικών αλγορίθμων επιλογής χρόνου υποχώρησης και παραθύρου ανταγωνισμού. Όλες οι προαναφερθείσες εργασίες μοντελοποιούν πιστά τον αλγόριθμο εκθετικής υποχώρησης που περιγράφεται στο πρότυπο IEEE 802.11, αφήνοντας ως παραμέτρους το αρχικό μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού καθώς και το μέγιστο μέγεθός του στη μέγιστη βαθμίδα υποχώρησης. Διαφορετικά Μαρκοβιανά μοντέλα προκύπτουν όταν χρησιμοποιούνται ο προσθετικός αλγόριθμος μεταβολής παραθύρου [85], [86], ή ο πολλαπλασιαστικός αλγόριθμος [87].

Ένα κοινό σημείο αυτών των μοντέλων είναι η κατάστρωση της Μαρκοβιανής αλυσίδας, με καταστάσεις που περιγράφονται από την τρέχουσα τιμή του μετρητή υποχώρησης ενός τερμα-

τικού και του σταδίου-βαθμίδας υποχώρησης (αριθμός τρέχουσας επαναμετάδοσης), στο οποίο βρίσκεται το τερματικό. Η μέθοδος υπολογισμού των χρονικών διαρκειών των χρονοθυρίδων των Μαρκοβιανών αλυσίδων για τη Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου, που παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.2.2, μπορεί να εφαρμοστεί ως επέκταση σε οποιαδήποτε από τις Μαρκοβιανές αλυσίδες αυτές.

Παρακάτω, περιγράφουμε και στη συνέχεια εφαρμόζουμε την επέκταση σε δύο μοντέλα Μαρκοβιανών αλυσίδων. Το πρώτο είναι του Bianchi, [78] που είναι το πιο γενικό μοντέλο και αποτελεί τη βάση για όλα τα μοντέλα που επακολούθησαν. Το δεύτερο είναι της Kim [84], το οποίο είναι το πιο πρόσφατο, πλήρες, όσον αφορά τη μοντελοποίηση λεπτομερειών λειτουργίας της DCF, και χρησιμοποιεί μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης μη-κορεσμού.

Και τα δύο μοντέλα που περιγράφουμε και στα οποία εφαρμόζουμε τη μέθοδο υπολογισμού των αναμενόμενων διαρκειών των χρονοθυρίδων των αλυσίδων, χρησιμοποιούν ιδανικό κανάλι διάδοσης. Έτσι, ο μόνος λόγος για τον οποίο παρουσιάζεται αποτυχημένη μετάδοση είναι η σύγκρουση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταδόσεων. Με την επιλογή αυτή καταφέρνουμε να απομονώσουμε και να μελετήσουμε την επίδραση των παραμέτρων του διακοπτόμενου τρόπου λειτουργίας (βλ. § 2.3.2.1) στην *iDCF*.

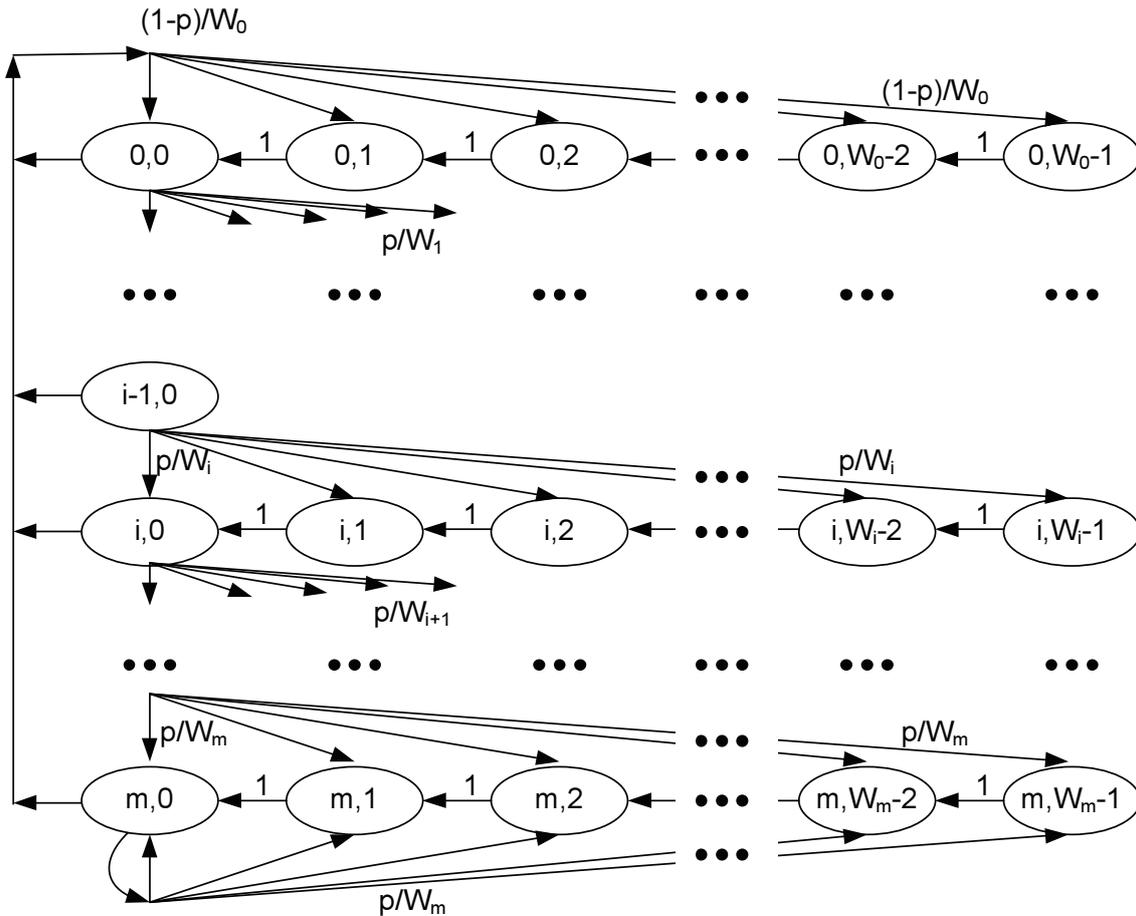
## 5.2 Αναλυτικό μοντέλο επίδοσης *iDCF* για συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης κορεσμού

Στην προσέγγιση αυτή χρησιμοποιούμε τη Μαρκοβιανή αλυσίδα που παρουσιάστηκε στην εργασία [78] και την επεκτείνουμε ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου.

### 5.2.1 Η Μαρκοβιανή αλυσίδα

Θεωρούμε  $b(t)$  τη στοχαστική διαδικασία που αναπαριστά το μετρητή υποχώρησης ενός σταθμού. Η διαδικασία είναι διακριτού χρόνου και οι χρονικές στιγμές  $t$  και  $t + 1$  αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές έναρξης δυο διαδοχικών χρονοθυρίδων της διαδικασίας. Στην έναρξη κάθε χρονοθυρίδας ο μετρητής υποχώρησης κάθε τερματικού μειώνεται κατά μια μονάδα. Με τον ορισμό αυτό, η διακριτή κλίμακα χρόνου της διαδικασίας δε σχετίζεται με τον πραγματικό χρόνο του συστήματος, εφόσον μεταξύ δύο διαδοχικών μειώσεων του μετρητή μπορεί να έχει μεσολαβήσει χρονικό διάστημα  $\sigma$  μιας ανενεργής χρονοσχισμής πρωτοκόλλου,  $T_S$  μιας επιτυχούς FES, ή  $T_C$  μιας σύγκρουσης μεταδόσεων. Ονομάζουμε το χρόνο παραμονής σε κάθε κατάσταση, ή σε κάθε τιμή του μετρητή υποχώρησης, διάρκεια χρονοθυρίδας της αλυσίδας. Έτσι έχουμε την επιτυχή χρονοθυρίδα, την ανεπιτυχή χρονοθυρίδα και την ανενεργή χρονοθυρίδα, κάθε μία με τη διάρκειά της.

Εφόσον η τιμή του μετρητή υποχώρησης σε έναν σταθμό εξαρτάται κι από το τί έχει προηγηθεί από επαναμεταδόσεις, η στοχαστική διαδικασία  $b(t)$  δεν είναι Μαρκοβιανή. Αν θεωρήσουμε όμως και τη στοχαστική διαδικασία  $s(t)$  που αναπαριστά την τρέχουσα προσπά-



Σχήμα 5.1: Η Μαρκοβιανή αλυσίδα του Bianchi

θεια επαναμετάδοσης, στην οποία βρίσκεται το τερματικό, τότε η δισδιάστατη στοχαστική διαδικασία  $\{s(t), b(t)\}$  είναι μια Μαρκοβιανή διαδικασία.

Η στοχαστική διαδικασία  $b(t)$  παίρνει τιμές  $k \in [0, W_i - 1]$  και η  $s(t)$  τιμές  $i \in [0, M]$ , όπου  $M$  είναι ο μέγιστος αριθμός επαναμεταδόσεων που επιτρέπει το πρωτόκολλο. Το παράθυρο ανταγωνισμού  $W_i$  σε κάθε προσπάθεια επαναμετάδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$W_i = \begin{cases} 2^i W, & 0 \leq i \leq m \\ 2^m W, & m < i \leq M \end{cases}, \quad (5.1)$$

όπου  $W$  είναι το αρχικό μέγεθος του παράθυρου ανταγωνισμού και το  $m$  καθορίζει το μέγιστο παράθυρο ανταγωνισμού στην επαναμετάδοση  $m$ .  $W$ ,  $m$  και  $M$  καθορίζονται από το πρωτόκολλο. Ο Bianchi δε λαμβάνει υπόψη του κάποιον περιορισμό στον αριθμό των επαναμεταδόσεων, θεωρώντας ότι άπειρος αριθμός επαναμεταδόσεων επιτρέπεται να συμβεί για μια συγκεκριμένη μετάδοση. Έτσι προκύπτει η δισδιάστατη Μαρκοβιανή αλυσίδα του σχήματος 5.1.

Στις πιθανότητες των μεταβάσεων που φαίνονται στο σχήμα 5.1, η πιθανότητα  $p$  αντιπροσωπεύει τη δεσμευμένη πιθανότητα “το μεταδιδόμενο πλαίσιο συγκρούεται”. Εδώ κρύβεται μια θεμελιώδης υπόθεση: στο μοντέλο θεωρείται ότι αυτή η πιθανότητα είναι σταθερή και

ανεξάρτητη από τον αριθμό των επαναμεταδόσεων που έχουν προηγηθεί. Οι μεταβάσεις που πραγματοποιούνται με πιθανότητα '1' είναι αυτές κατά τις οποίες ο μετρητής υποχώρησης  $k$  μειώνεται κατά μια μονάδα για την ίδια προσπάθεια επαναμετάδοσης  $i$ . Όταν ο μετρητής είναι μηδέν (καταστάσεις  $(i, 0)$ ), ο σταθμός μεταδίδει κι έτσι η επόμενη κατάσταση θα είναι είτε στην 1<sup>η</sup> γραμμή της αλυσίδας στην περίπτωση επιτυχούς μετάδοσης, που γίνεται με πιθανότητα  $(1 - p)$  και αντιπροσωπεύει την αρχικοποίηση του παράθυρου ανταγωνισμού, είτε στην αμέσως επόμενη γραμμή της αλυσίδας στην περίπτωση ανεπιτυχούς μετάδοσης, που γίνεται με πιθανότητα  $p$  και αντιπροσωπεύει το διπλασιασμό του παράθυρου ανταγωνισμού. Μετά από  $m$  επαναμεταδόσεις το παράθυρο ανταγωνισμού δε διπλασιάζεται, αλλά παραμένει σταθερό στη μέγιστη τιμή του. Αυτό αντιπροσωπεύεται στην αλυσίδα στην  $m$  γραμμή από την επαναφορά στην ίδια γραμμή με πιθανότητα  $p$ . Σε κάθε περίπτωση, η μετάβαση προς μια νέα γραμμή κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις καταστάσεις της νέας γραμμής, όπως υπολογίζεται στο πρωτόκολλο για την τυχαία επιλογή τιμής αρχικοποίησης του μετρητή υποχώρησης από το διάστημα  $0 \leq k \leq W_i - 1$ , διαιρώντας την πιθανότητα μετάβασης με τον αριθμό των καταστάσεων  $W_i$  της νέας γραμμής.

Η Μαρκοβιανή Αλυσίδα του σχήματος 5.1 είναι εργοδική και αμείωτη και επομένως οι οριακές πιθανότητες  $b_{i,k}$  που ορίζονται από τη σχέση:

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P \{s(t) = i, b(t) = k\}, i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1), \quad (5.2)$$

υπάρχουν και δεν εξαρτώνται από την αρχική κατάσταση της Μαρκοβιανής αλυσίδας [88]. Οι τιμές των πιθανοτήτων  $b_{i,k}$  στη μόνιμη κατάσταση, μπορούν να βρεθούν από τις σχέσεις μεταβάσεων της αλυσίδας και από τη σχέση κανονικοποίησης του αθροίσματός τους [78]. Έτσι, οι οριακές πιθανότητες είναι:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} p^i b_{0,0}, \quad (5.3)$$

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - 2p)(1 - p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW[1 - (2p)^m]} \quad (5.4)$$

Η πιθανότητα  $\tau_B$  "ένα τερματικό εκπέμπει σε τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα της Μαρκοβιανής αλυσίδας" μπορεί να εκφραστεί σαν την πιθανότητα η αλυσίδα να βρίσκεται σε μια από τις καταστάσεις  $(i, 0)$  εφόσον τα τερματικά εκπέμπουν όταν ο μετρητής υποχώρησης μηδενιστεί, δηλαδή:

$$\tau_B = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - p} = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW[1 - (2p)^m]} \quad (5.5)$$

Η πιθανότητα  $\tau_B$  συνδέεται άμεσα με τη δεσμευμένη πιθανότητα  $p$  και το πλήθος  $n$  των ανταγωνιζόμενων τερματικών. Σύγκρουση σε μια μετάδοση συμβαίνει όταν τουλάχιστον ένα

εκ των  $n - 1$  τερματικών μεταδίδει. Δηλαδή:

$$p = 1 - (1 - \tau_B)^{n-1} \quad (5.6)$$

Το σύστημα των εξισώσεων 5.6 και 5.5 είναι ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους  $p$  και  $\tau_B$ , το οποίο μπορεί να λυθεί με αριθμητικές μεθόδους. Οι πιθανότητες  $p$  και  $\tau_B$  στο μοντέλο του Bianchi εξαρτώνται μόνο από τις τιμές των παραμέτρων  $W$  και  $m$ , που σχετίζονται με τον αλγόριθμο υποχώρησης, και της παραμέτρου  $n$ .

### 5.2.2 Χρονική διάρκεια χρονοθυρίδων Μαρκοβιανής αλυσίδας

Προκειμένου να συνεχιστεί η ανάλυση και να εξαχθούν μεγέθη επίδοσης, όπως είναι το Throughput, χρειάζεται πρώτα να υπολογιστούν οι στατιστικά αναμενόμενες διάρκειες των χρονοθυρίδων της Μαρκοβιανής Αλυσίδας. Στην ανάλυση του πρωτοκόλλου του προτύπου IEEE 802.11 [78] οι διάρκειες αυτές υπολογίζονται ντετερμινιστικά. Έτσι, αν  $T_s$  είναι η διάρκεια της επιτυχούς χρονοθυρίδας, κατά την οποία πραγματοποιείται μια επιτυχής μετάδοση,  $T_c$  είναι η διάρκεια της ανεπιτυχούς χρονοθυρίδας, στην οποία πραγματοποιείται σύγκρουση (ανεπιτυχής μετάδοση) και  $T_{idle}$  η διάρκεια της ανενεργής χρονοθυρίδας τότε:

$$T_s = RTS + \delta + SIFS + CTS + \delta + SIFS + DATA + \delta + SIFS + ACK + \delta + DIFS \quad (5.7)$$

$$T_c = RTS + \delta + DIFS \quad (5.8)$$

$$T_{idle} = \sigma, \quad (5.9)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, και από εδώ και στο εξής, τα πλαίσια γραμμένα με κεφαλαία-πλάγια γράμματα είναι μεταβλητές που αναπαριστούν τους χρόνους μετάδοσης των πλαισίων αυτών και τα διαστήματα σιγής, γραμμένα κατά αυτόν τον τρόπο, τη διάρκεια των διαστημάτων σιγής.

Κατά τη διακοπόμενη λειτουργία της iDCF, όμως, οι χρονικές διάρκειες των χρονοθυρίδων της αλυσίδας δεν μπορούν να βρεθούν ντετερμινιστικά. Η τιμή τους εξαρτάται από το χρονικό σημείο εκκίνησής τους, το οποίο καθορίζει αν και πόσες φορές θα διακοπουν, προκειμένου να εκτελεστεί διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Στην παρακάτω ανάλυση αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές  $t_s$ ,  $t_c$  και  $t_{idle}$ , ενώ οι τιμές που μας ενδιαφέρουν είναι οι στατιστικά αναμενόμενες διάρκειές τους. Στις επόμενες παραγράφους το αναλυτικό μοντέλο υπολογίζει τα  $E[t_s]$ ,  $E[t_c]$  και  $E[t_{idle}]$ .

#### ▷ Βασική Παραδοχή:

Για το αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού των αναμενόμενων διαρκειών των χρονοθυρίδων χρησιμοποιείται η εξής παραδοχή-κλειδί: “Κάθε συμβάν που καταλαμβάνει μη μηδενική διάρκεια, διακόπτεται τυχαία από τις διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών με πιθανότητα ανάλογη της διάρκειάς του”.

## Κεφάλαιο 5. Αναλυτικό Μοντέλο Επίδοσης της iDCF

Η εκτέλεση ενός συμβάντος διάρκειας  $T_{\text{event}}$  έχει πιθανότητα να διακοπεί που δίνεται από τη σχέση:

$$P[\text{το συμβάν διακόπτεται}] = \frac{T_{\text{event}}}{T - \tau}, \quad (5.10)$$

όπου  $\tau$  και  $T$  η διάρκεια και η περίοδος των διακοπών διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως οι ακόλουθοι υπολογισμοί των αναμενόμενων διαρκειών των χρονοθυρίδων της Μαρκοβιανής αλυσίδας δεν ισχύουν μόνο για τη συγκεκριμένη Μαρκοβιανή αλυσίδα αλλά μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε προταθείσα Μαρκοβιανή αλυσίδα που μοντελοποιεί με όμοιο τρόπο την DCF, με σκοπό την επέκτασή της για την iDCF. Αυτό γίνεται και στην παράγραφο 5.3 με την επέκταση του Μαρκοβιανού μοντέλου της Kim [84].

### 5.2.2.1 Αναμενόμενη διάρκεια επιτυχούς χρονοθυρίδας

Η αναμενόμενη διάρκεια της επιτυχούς χρονοθυρίδας  $E[t_s]$  μπορεί να βρεθεί υπολογίζοντας τις αναμενόμενες διάρκειες των επί μέρους τμημάτων της, όπως αυτά παρατίθεται στην εξίσωση 5.7, και κατόπιν αθροίζοντάς τα:

$$E[t_s] = RTS + \delta + 3 \cdot E[t_{\text{SIFS}}] + 2 \cdot E[t_{\text{rsp}}] + E[t_{\text{data}}] + E[t_{\text{DIFS}}], \quad (5.11)$$

όπου  $t_{\text{SIFS}}$ ,  $t_{\text{DIFS}}$ ,  $t_{\text{rsp}}$  και  $t_{\text{data}}$  είναι οι τυχαίες μεταβλητές διάρκειας του διαστήματος σιγής SIFS, του DIFS και της μετάδοσης των πλαισίων-απόκρισης cts /ack και data.

**5.2.2.1.1 Διάρκεια πλαισίου rts.** Στην εξίσωση 5.11 η διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου rts τίθεται αυτούσια χωρίς τελεστή προσδοκίας ως η ποσότητα  $RTS + \delta$ . Ο τροποποιημένος μηχανισμός υποχώρησης στην iDCF (βλ. § 3.4.4) εγγυάται ότι όταν είναι η στιγμή της μετάδοσης ενός πλαισίου rts, δηλαδή όταν μηδενιστεί ο μετρητής υποχώρησης, υπάρχει πάντα επαρκής υπολειπόμενος ενεργός χρόνος για τη μετάδοση. Με άλλα λόγια δε συμβαίνει ποτέ διακοπή μέσα στο χρόνο μετάδοσης του πλαισίου rts.

**5.2.2.1.2 Διάρκεια διαστημάτων σιγής.** Ένα διάστημα σιγής είναι πιθανό να διακοπεί (βλ. § 3.4.3) με αποτέλεσμα η συνολική διάρκειά του να επεκτείνεται. Το πόσο επεκτείνεται εξαρτάται από το συγκεκριμένο τμήμα του διαστήματος, στο οποίο γίνεται η διακοπή και τη λειτουργία που επιτελείται εκεί. Επειδή το μεγαλύτερο τμήμα των διαστημάτων σιγής καταλαμβάνεται από χρόνους επεξεργασίας, οι οποίοι αναστέλλονται και επανεκκινούν μετά το πέρας της διακοπής, για τον υπολειπόμενο χρόνο επεξεργασίας, οδηγούμαστε στην ακόλουθη

προσέγγιση για τα  $E[t_{SIFS}]$  και  $E[t_{DIFS}]$ :

$$E[t_{SIFS}] = \frac{SIFS}{T-\tau} \cdot (SIFS + \tau) + \left(1 - \frac{SIFS}{T-\tau}\right) \cdot SIFS \quad (5.12)$$

$$E[t_{DIFS}] = \frac{DIFS}{T-\tau} \cdot (DIFS + \tau) + \left(1 - \frac{DIFS}{T-\tau}\right) \cdot DIFS \quad (5.13)$$

Η παραπάνω προσέγγιση δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του αναλυτικού μοντέλου, όπως φαίνεται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου με τον προσομοιωτή.

**5.2.2.1.3 Διάρκεια πλαισίων απόκρισης cts και ack .** Τα πλαίσια απόκρισης cts και ack έχουν ίδιο μέγεθος και γι αυτό η αναμενόμενη διάρκειά της μετάδοσής τους υπολογίζεται μαζί ως  $E[t_{rsp}]$ . Όταν συμβαίνει διακοπή στο χρόνο μετάδοσης ενός πλαισίου ελέγχου, η μετάδοση αναβάλλεται για μετά το πέρας της διακοπής (βλ. § 3.4.2). Ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος  $t_{utRem}$ , ο οποίος μπορεί να είναι, στη χειρότερη περίπτωση, ίσος με τη διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου, παραμένει αναξιοποίητος. Έτσι προκύπτει:

$$E[t_{rsp}] = \frac{RSP + \delta}{T - \tau} \cdot (E[t_{utRem}] + \tau + RSP + \delta) + \left(1 - \frac{RSP + \delta}{T - \tau}\right) \cdot (RSP + \delta) \quad (5.14)$$

$$E[t_{utRem}] = \frac{RSP + \delta}{2} \quad (5.15)$$

Ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος τη στιγμή της διακοπής κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα  $(0, RSP + \delta)$ , από το οποίο προκύπτει η (5.15).

**5.2.2.1.4 Διάρκεια πλαισίου δεδομένων.** Η ανάλυση που ακολουθεί για την αναμενόμενη διάρκεια της μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων  $E[t_{data}]$  γίνεται για σταθερό ωφέλιμο φόρτο  $L_P$ . Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. §3.4.2), όταν είναι η στιγμή της μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων της FES υπάρχουν τρεις εκδοχές για το τί μπορεί να συμβεί. Α) δεν υπάρχει επαρκής ενεργός χρόνος για τη μετάδοση ολόκληρου του πλαισίου δεδομένων και ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος δεν είναι αρκετός ούτε για τη μετάδοση πλαισίου δεδομένων με τουλάχιστον  $L_{min} b$  δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος μένει αναξιοποίητος, όπως συμβαίνει και με την αντίστοιχη περίπτωση κατά τη μετάδοση ενός πλαισίου ελέγχου. Β) δεν υπάρχει επαρκής ενεργός χρόνος για τη μετάδοση ολόκληρου του πλαισίου δεδομένων, αλλά αυτός που υπολείπεται επαρκεί για τη μετάδοση ενός τεμαχίου με τουλάχιστον  $L_{min} b$  δεδομένων. Πραγματοποιείται Δυναμικός Τεμαχισμός και μεταδίδεται αμέσως το πρώτο τεμάχιο δεδομένων. Γ) ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος είναι επαρκής για τη μετάδοση ολόκληρου του πλαισίου δεδομένων. Το πλαίσιο δεδομένων μεταδίδεται. Οι αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης των παραπάνω εκδοχών είναι:

$$P_{DIDm} = \frac{(DATA_{min} + \delta)}{T - \tau}, \quad (5.16)$$

$$P_{DIDr} = \frac{\min(T - \tau, DATA + \delta) - (DATA_{\min} + \delta)}{T - \tau}, \quad (5.17)$$

$$P_{DNI} = \frac{\max(T - \tau, DATA + \delta) - (DATA + \delta)}{T - \tau}, \quad (5.18)$$

όπου  $DATA_{\min}$  είναι ο χρόνος μετάδοσης του τεμαχίου δεδομένων με ακριβώς  $L_{\min}$  δεδομένων. Όταν  $DATA + \delta > T - \tau$ , η τελευταία πιθανότητα, ότι ο υπολειπόμενος ενεργός χρόνος είναι επαρκής για τη μετάδοση του πλαισίου δεδομένων και άρα δε γίνεται διακοπή, είναι μηδενική. Σε αυτή την περίπτωση οι πιθανότητες (5.16) και (5.17) γίνονται συμπληρωματικές.

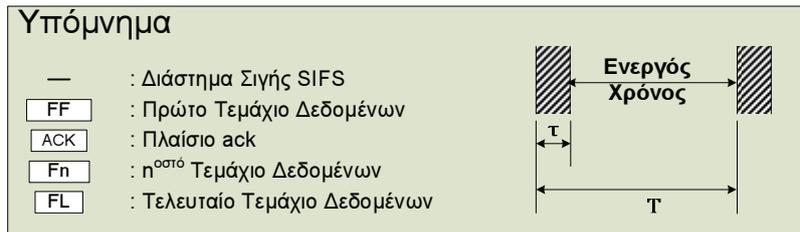
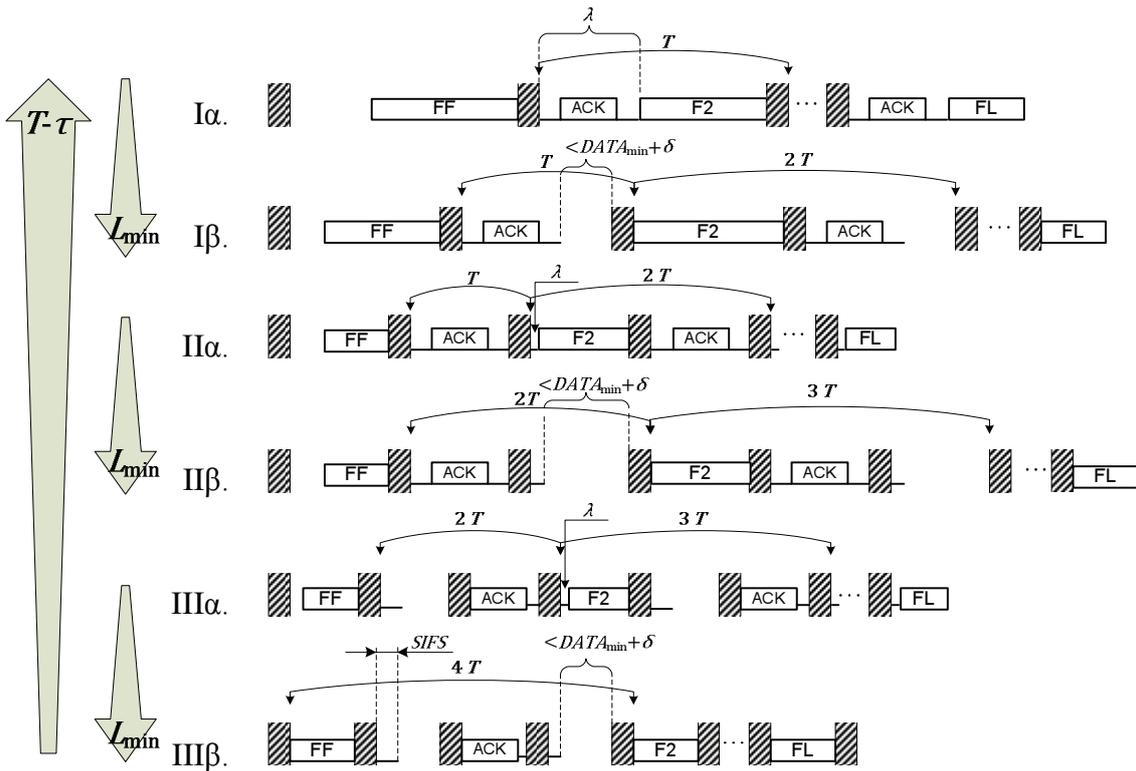
Το πλαίσιο δεδομένων μιας FES μπορεί να μεταδοθεί σε ένα ή περισσότερα τεμάχια. Κάθε τεμάχιο συνοδεύεται από τα πλαίσια θετικής επιβεβαίωσης *ack*, όπως υπαγορεύει το πρωτόκολλο. Η συνολική ακολουθία των τεμαχίων δεδομένων μαζί με τα πλαίσια επιβεβαίωσης, εξαιρώντας το τελευταίο ή το μοναδικό, αποκαλείται Ακολουθία Τεμαχίων Δεδομένων - DFS (Data Fragment Sequence). Υιοθετώντας τη σημειολογία της παραγράφου 3.1.1, παράσταση (3.1), η DFS παίρνει τη μορφή:

$$\text{DFS: [ DFrag - ack - ] DLast} \quad (5.19)$$

Το πλήθος των τεμαχίων δεδομένων που θα απαιτηθούν για τη μετάδοση του συνολικού ωφέλιμου φόρτου, εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης, το μέγεθος του πλαισίου δεδομένων ή αλλιώς τον ωφέλιμο φόρτο  $L_p$ , καθώς και από τη συνολική διάρκεια του ενεργού χρόνου  $T - \tau$ . Η μορφή που έχει η DFS στην κλίμακα του χρόνου αλλάζει ανάλογα με τη διάρκεια του ενεργού χρόνου σε σχέση με τις διάρκειες συγκεκριμένων τμημάτων της DFS. Για να υπολογιστεί η αναμενόμενη διάρκεια  $E[t_{\text{data}}]$ , θα πρέπει να υπολογιστεί ο χρόνος μετάδοσης της DFS. Ο υπολογισμός βασίζεται στη διάκριση, ανάλογα με τη μορφή της DFS, των περιπτώσεων I, II και III και των υπο-περιπτώσεών τους  $\alpha'$  και  $\beta'$  που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.2.

Στο σχήμα αυτό μπορούμε να κάνουμε τις εξής παραδοχές/παρατηρήσεις για την καλύτερη κατανόησή του:

- Όλα τα τεμάχια δεδομένων, εκτός του τελευταίου, καταλαμβάνουν το σύνολο του υπολειπόμενου ενεργού χρόνου μέχρι την έναρξη της προσεχούς διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών. Αυτό σημαίνει ότι το διάστημα σιγής SIFS πριν τη μετάδοση του πλαισίου επιβεβαίωσης *ack* αρχίζει να τηρείται ακριβώς στην έναρξη του επόμενου ενεργού χρόνου.
- Από ποια περίπτωση I, II ή III η DFS παίρνει μορφή, εξαρτάται από παράγοντες, όπως η διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου *ack*  $RSP$  και το  $SIFS$ , οι οποίοι είναι σταθεροί δεδομένου του ρυθμού μετάδοσης. Από ποια υποπερίπτωση  $\alpha'$  ή  $\beta'$  η DFS παίρνει μορφή, εξαρτάται από τη διάρκεια μετάδοσης του ελάχιστου δυνατού τεμαχίου δεδομένων  $DATA_{\min}$ , το οποίο είναι μεταβλητό και ελέγχεται από την παράμετρο  $L_{\min}$ .
- Οι περιπτώσεις/υποπεριπτώσεις στο σχήμα έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε ο ενεργός



Σχήμα 5.2: Μορφές της DFS στην κλίμακα του χρόνου

χρόνος να μειώνεται καθώς μετακινούμαστε από την κορυφή προς τα κάτω, οδηγώντας από την περίπτωση I στην III. Αντίθετα η τιμή της παραμέτρου  $L_{\min}$  αυξάνεται κατά την ίδια μετακίνηση οδηγώντας από τις υποπεριπτώσεις α' στις β' εντός της κάθε περίπτωσης.

Οι έξι συνολικά περιπτώσεις/υποπεριπτώσεις ανακύπτουν όταν ικανοποιούνται οι ακόλουθες ανισότητες:

$$I. T - \tau \geq RSP + \delta + 2 \cdot SIFS$$

**Iα**  $T - \tau \geq RSP + DATA_{\min} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot SIFS$ . Το πλαίσιο επιβεβαίωσης ack και το επόμενο τεμάχιο δεδομένων είναι δυνατό να μεταδοθούν στον ίδιο ενεργό χρόνο.

**Iβ**  $T - \tau < RSP + DATA_{\min} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot SIFS$ . Δεν υπάρχει επαρκής υπολειπόμενος ενεργός χρόνος για τη μετάδοση του επόμενου τεμαχίου δεδομένων μετά τη μετάδοση του πλαισίου ack και την τήρηση του διαστήματος σιγής SIFS. Η μετάδοση λαμβάνει χώρα στον επόμενο ενεργό χρόνο.

$$\text{II. } RSP + \delta + SIFS \leq T - \tau < RSP + \delta + 2 \cdot SIFS$$

**IIα**  $T - \tau \geq \frac{RSP}{2} + \frac{DATA_{\min}}{2} + \delta + SIFS$ . Το διάστημα σιγής, που τηρείται μετά τη μετάδοση του πλαισίου επιβεβαίωσης, ολοκληρώνεται σε διαφορετικό ενεργό χρόνο από αυτόν στον οποίο εκκίνησε. Μετά την ολοκλήρωσή του απομένει επαρκής ενεργός χρόνος για τη μετάδοση ενός τεμαχίου δεδομένων.

**IIβ**  $T - \tau < \frac{RSP}{2} + \frac{DATA_{\min}}{2} + \delta + SIFS$ . Το διάστημα σιγής που τηρείται μετά τη μετάδοση του πλαισίου επιβεβαίωσης, επίσης ολοκληρώνεται σε επόμενο ενεργό χρόνο. Μετά την ολοκλήρωσή του όμως δεν είναι δυνατό να μεταδοθεί τεμάχιο δεδομένων. Έτσι το επόμενο τεμάχιο δεδομένων μεταδίδεται σε νέο ενεργό χρόνο.

$$\text{III. } RSP + \delta \leq T - \tau < RSP + \delta + SIFS$$

**IIIα**  $T - \tau \geq \frac{RSP}{2} + \frac{DATA_{\min}}{2} + \delta + \frac{SIFS}{2}$ . Μετά την ολοκλήρωση του διαστήματος σιγής, που τηρείται μετά τη μετάδοση του τεμαχίου δεδομένων, δεν υπάρχει επαρκής διάρκεια ενεργού χρόνου για τη μετάδοση του πλαισίου επιβεβαίωσης. Αυτό μεταδίδεται στον επόμενο ενεργό χρόνο. Το επόμενο τεμάχιο δεδομένων δύναται να μεταδοθεί στον επόμενο ενεργό χρόνο από αυτόν που κατέλαβε το ack , μετά την ολοκλήρωση του SIFS .

**IIIβ**  $T - \tau < \frac{RSP}{2} + \frac{DATA_{\min}}{2} + \delta + \frac{SIFS}{2}$ . Το πλαίσιο επιβεβαίωσης μεταδίδεται όπως και στην περίπτωση IIIα στο δεύτερο ενεργό χρόνο μετά τη μετάδοση του τεμαχίου δεδομένων. Το επόμενο τεμάχιο δεδομένων, όμως, δεν μπορεί να μεταδοθεί στον πρώτο ενεργό χρόνο μετά τη μετάδοση του ack , επειδή η τήρηση του διαστήματος SIFS δεν αφήνει αρκετή υπολειπόμενη διάρκεια σε αυτόν. Έτσι, το επόμενο τεμάχιο μεταδίδεται στο δεύτερο ενεργό χρόνο μετά τη μετάδοση του ack .

Σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο ζευγών τιμών  $T$  και  $\tau$  και για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης, μόνο μία από τις παραπάνω συνθήκες ικανοποιείται και η DFS παίρνει τη μορφή της αντίστοιχης περίπτωσης/υποπερίπτωσης του σχήματος 5.2. Επίσης, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ικανοποιούνται και οι εξής συνθήκες:

$$\begin{aligned} T - \tau &\geq RTS + \delta, \\ T - \tau &\geq DATA_{\min} + \delta, \\ T - \tau &\geq RSP + \delta \end{aligned} \tag{5.20}$$

Αν οποιοσδήποτε εκ των περιορισμών (5.20) δεν ικανοποιείται, τότε δε μπορεί να ολοκληρωθεί καμία μετάδοση ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων και το Throughput είναι μηδενικό.

Έστω  $x$  ο αριθμός των bit δεδομένων τα οποία αποστέλλονται με το πρώτο τεμάχιο δεδομένων. Το  $x$  λαμβάνει τιμές από το διάστημα:

$$x \in [L_{\min}, L_{\text{ut}}], \tag{5.21}$$

όπου  $L_{\text{ut}}$  είναι το πλήθος των bit δεδομένων, που χωρούν σε ένα τεμάχιο δεδομένων, αν αυτό έχει διαθέσιμο ολόκληρο τον ενεργό χρόνο για τη μετάδοσή του.

Σε αυτό το σημείο, προκειμένου να μετατρέψουμε τις μονάδες χρονικής διάρκειας μετάδοσης σε bit που μεταδίδονται και αντίστροφα, χρειάζεται να εφαρμόσουμε μια συγκεκριμένη υλοποίηση φυσικού στρώματος που θα μας παρέχει τις συναρτήσεις αυτές. Παραδείγματος χάρη, αν χρησιμοποιούσαμε φυσικό στρώμα ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας, τότε οι κατάλληλες συναρτήσεις θα ήταν:

$$f(x) = t_{\text{tx}} = t_{\text{oh}} + x^{(\text{sym})} \times t_{\text{SYM}},$$

$$x^{(\text{sym})} = \left\lfloor \frac{x + L_{\text{oh}}}{n_{\text{DBPS}}} \right\rfloor \quad \text{και} \quad (5.22)$$

$$f^{-1}(t_{\text{tx}}) = x = \left\lfloor \frac{t_{\text{tx}} - t_{\text{oh}}}{t_{\text{SYM}}} \right\rfloor \times n_{\text{DBPS}} - L_{\text{oh}}, \quad (5.23)$$

όπου  $t_{\text{tx}}$  ο ζητούμενος ή δεδομένος χρόνος μετάδοσης,  $t_{\text{oh}}$  ο επιπρόσθετος χρονικός φόρτος (λόγω π.χ. προοιμίου πλαισίου),  $L_{\text{oh}}$  ο επιπρόσθετος φόρτος μεταδιδόμενων bit (λόγω π.χ. επικεφαλίδας πλαισίου φυσικού στρώματος),  $n_{\text{DBPS}}$  τα bit δεδομένων ανά OFDM σύμβολο και  $t_{\text{SYM}}$  η διάρκεια OFDM συμβόλου. Σε αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιούσαμε τη μεταβλητή  $x^{(\text{sym})}$  (αριθμός OFDM συμβόλων) αντί της  $x$  και οι παράμετροι  $L_{\text{min}}$  και  $L_{\text{ut}}$  θα ετίθεντο σε πλήθος OFDM συμβόλων αντί bit.

Στην ανάλυση που ακολουθεί υιοθετούμε το εξής απλοποιημένο μοντέλο συναρτήσεων:

$$f(x) = t_{\text{tx}} = t_{\text{oh}} + \frac{x + L_{\text{H}}}{R}, \quad (5.24)$$

$$L_{\text{H}} = L_{\text{oh}} + L_{\text{MACHD}} \quad \text{και}$$

$$f^{-1}(t_{\text{tx}}) = x = \lfloor (t_{\text{tx}} - t_{\text{oh}}) \cdot R \rfloor - L_{\text{H}}, \quad (5.25)$$

όπου  $L_{\text{H}}$  είναι ο συνολικός επιπρόσθετος φόρτος μεταδιδόμενων bit, που προκύπτει από το άθροισμα του πλήθους bit των επικεφαλίδων MAC και φυσικού στρώματος.

Με τις συμβάσεις (5.24) και (5.25) συνεχίζουμε και υπολογίζουμε την τιμή του  $L_{\text{ut}}$  ως:

$$L_{\text{ut}} = \min(L_{\text{P}}, \lfloor (T - \tau - \delta - t_{\text{oh}}) \cdot R \rfloor - L_{\text{H}}) \quad (5.26)$$

Η συνάρτηση ελαχιστοποίησης εξασφαλίζει ότι η τιμή της παραμέτρου  $L_{\text{ut}}$ , συμφωνώντας με τον ορισμό της, έχει σαν μέγιστη τιμή τον ωφέλιμο φόρτο της ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων. Στον υπολογισμό αυτό λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης στο δίκτυο  $\delta$ .

Εκτός του πρώτου τεμαχίου δεδομένων, η μετάδοση ολόκληρου του ωφέλιμου φόρτου χρειάζεται  $n_{\text{F}}(x)$  τεμάχια ακόμα, το κάθε ένα από τα οποία περιέχει  $L_{\text{PF}}$  bit δεδομένων. Η τιμή της μεταβλητής  $L_{\text{PF}}$  καθορίζεται από την εκάστοτε μορφή της DFS ανάλογα με τις περιπτώσεις/υποπεριπτώσεις του σχήματος 5.2. Ο διαθέσιμος χρόνος  $t_{\text{av}}$  για κάθε μεταδιδόμενο

Περίπτωση	$n_T$	$\lambda$
I $\alpha'$	1	$RSP + \delta + 2 \cdot SIFS$
I $\beta'$	2	0
II $\alpha'$	2	$SIFS - (T - \tau - RSP - \delta - SIFS)$
II $\beta'$	3	0
III $\alpha'$	3	$SIFS - (T - \tau - RSP - \delta)$
III $\beta'$	4	0

**Πίνακας 5.1:** Τιμές των παραμέτρων  $n_T$  και  $\lambda$  των περιπτώσεων μορφής της DFS

τεμάχιο, εκτός του πρώτου, προκύπτει από το σχήμα 5.2 ως:

$$t_{av} = T - \tau - \delta - \lambda, \quad (5.27)$$

όπου το  $\lambda$  ορίζεται ως το τμήμα του ενεργού χρόνου που καταλαμβάνεται από διαστήματα σιγής ή/και μεταδόσεις πλαισίων επιβεβαίωσης, όπως επισημαίνεται στο σχήμα 5.2, και έχει τιμή, που δίνεται στον πίνακα 5.1, ανάλογα με την περίπτωση/υποπερίπτωση σχηματισμού της DFS . Από την (5.25) προκύπτει:

$$L_{PF} = \lfloor (t_{av} - t_{oh}) \cdot R \rfloor - L_H \quad (5.28)$$

οπότε:

$$n_F(x) = \left\lceil \frac{L_P - x}{L_{PF}} \right\rceil \quad (5.29)$$

Έχοντας γνωστό το συνολικό αριθμό  $n_F(x)$  τεμαχίων εκτός του πρώτου, από το σχήμα 5.2 προκύπτει η ακόλουθη παράσταση υπολογισμού του χρόνου μετάδοσης μιας DFS :

$$t_{DFS}(x) = \begin{cases} DATA_{FF}(x) + \delta + (n_T - 1)T + \\ n_T \cdot T \cdot [n_F(x) - 1] + \\ \tau + \lambda + DATA_{FL}(x) + \delta & x < L_P, \\ DATA + \delta & x = L_P \end{cases} \quad (5.30)$$

Η τιμή της μεταβλητή  $n_T$  δίνεται επίσης στον πίνακα 5.1 για κάθε περίπτωση/υποπερίπτωση σχηματισμού DFS . Η μεταβλητή αυτή δείχνει α) για την περίπτωση I $\alpha'$  τον αριθμό των περιόδων  $T$  που απαιτούνται για τη μετάδοση ενός τεμαχίου δεδομένων μαζί με το πλαίσιο επιβεβαίωσης του προηγούμενου τεμαχίου και β) για τις υπόλοιπες περιπτώσεις I $\beta'$  έως III $\beta'$  τον αριθμό των περιόδων  $T$  που απαιτούνται για τη μετάδοση ενός τεμαχίου δεδομένων μαζί με το πλαίσιο θετικής επιβεβαίωσής του.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι στην (5.30) δε συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος μετάδοσης του πλαισίου θετικής επιβεβαίωσης του τελευταίου ή μοναδικού τεμαχίου δεδομένων. Το τελευταίο πλαίσιο ack της FES, όπως φαίνεται και από την παράσταση (5.19), δε συμπεριλαμβάνεται στη DFS. Εξάλλου, λαμβάνεται ξεχωριστά υπόψη στην (5.11) σαν ένα  $E[t_{rsp}]$ .

Στην (5.30) τα  $DATA_{FF}(x)$  και  $DATA_{FL}(x)$  αναπαριστούν τους χρόνους μετάδοσης του

πρώτου και του τελευταίου τεμαχίου δεδομένων αντίστοιχα, τα οποία περιέχουν  $L_{FF}$  και  $L_{FL}$  bit συνολικά:

$$L_{FF}(x) = L_H + x \quad (5.31)$$

$$L_{FL}(x) = L_H + L_P - x - (n_F(x) - 1) \times L_{PF} \quad (5.32)$$

Χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες (5.16), (5.17) και (5.18) η αναμενόμενη διάρκεια  $t_{data}$  της μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned} E[t_{data}] = & P_{DNI} \cdot (DATA + \delta) + \\ & P_{DIDr} \cdot E[t_{DFS}(x)] + \\ & P_{DIDm} \cdot \left( \frac{DATA_{min} + \delta}{2} + \tau + t_{DFS}(x = L_{ut}) \right) \end{aligned} \quad (5.33)$$

Ο πρώτος όρος της (5.33) αναπαριστά την περίπτωση κατά την οποία η μετάδοση του πλαισίου δεδομένων δε διακόπτεται. Ο τρίτος όρος την περίπτωση κατά την οποία η μετάδοση διακόπτεται σε σημείο που να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί δυναμικός τεμαχισμός του πλαισίου. Στην περίπτωση αυτή η μετάδοση ξεκινά στον προσεχή ενεργό χρόνο, έχοντας στη διάθεσή της όλη τη διάρκεια αυτού, εξού και η DFS για  $x = L_{ut}$ . Ο δεύτερος όρος αναπαριστά την περίπτωση στην οποία συμβαίνει διακοπή και πραγματοποιείται Δυναμικός Τεμαχισμός. Σύμφωνα με τη βασική παραδοχή της ανάλυσης, ότι κάθε συμβάν διακόπτεται με πιθανότητα ανάλογη της διάρκειάς του, το  $x$  θα κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα που δίνεται από την (5.21) και επομένως η ποσότητα  $E[t_{DFS}(x)]$  υπολογίζεται εύκολα αν πρώτα υπολογιστεί η προσδοκία του  $n_F(x)$  ως:

$$E[n_F(x)] = \frac{1}{L_{ut} - L_{min} + 1} \sum_{x=L_{min}}^{L_{ut}} \left\lceil \frac{L_P - x}{L_{PF}} \right\rceil \quad (5.34)$$

Η εξίσωση (5.34) δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά λόγω του μη γραμμικού τελεστή. Εύκολα μπορεί να υπολογιστεί ότι:

$$E[n_F(x)] \in [\gamma, \gamma + 1], \gamma = \frac{2L_P - L_{ut} - L_{min}}{2L_{PF}} \quad (5.35)$$

Η απόδειξη του παραπάνω βρίσκεται στο παράρτημα Α'. Η (5.35) δίνει μόνο μια ένδειξη του διαστήματος μέσα στο οποίο βρίσκεται η μέση τιμή του πλήθους των τεμαχίων πλαισίων που θα περιέχει η DFS. Η ακριβής τιμή της (5.34), ωστόσο, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αριθμητικά και στη συνέχεια μέσω της (5.33) να εξαχθεί η  $E[t_{data}]$ .

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί των  $E[t_{SIFS}]$ ,  $E[t_{rsp}]$ ,  $E[t_{DIFS}]$  και  $E[t_{data}]$  οδηγούν μέσω της (5.11) στον υπολογισμό της αναμενόμενης διάρκειας της Επιτυχούς Χρονοθυρίδας της Αλυσίδας  $E[t_s]$ .

### 5.2.2.2 Αναμενόμενη διάρκεια ανεπιτυχούς χρονοθυρίδας

Όμοια με τον υπολογισμό της αναμενόμενης διάρκειας της επιτυχούς χρονοθυρίδας μπορούμε να εξάγουμε την αναμενόμενη διάρκεια  $t_c$  της ανεπιτυχούς χρονοθυρίδας. Από την υποχρεωτική χρήση του μηχανισμού rts / cts προκύπτει πως σύγκρουση θα συμβαίνει πάντα κατά τη μετάδοση του πλαισίου rts . Η διαδικασία υποχώρησης εκκινεί πάντα μετά την τήρηση του διάστημα σιγής DIFS , συνεπώς:

$$E[t_c] = RTS + \delta + E[t_{DIFS}] \quad (5.36)$$

### 5.2.2.3 Αναμενόμενη διάρκεια ανενεργής χρονοθυρίδας

Η αναμενόμενη διάρκεια μιας ανενεργής χρονοθυρίδας της αλυσίδας μπορεί να βρεθεί παρατηρώντας το σχήμα 3.12(β'), σελίδα 62. Εξαρτάται από τη θέση της χρονοσχισμένης πρωτοκόλλου στην κλίμακα του χρόνου σε σχέση με τις χρονικές στιγμές των διακοπών για τις διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών. Παραδείγματος χάριν οι χρονοσχισμένες πρωτοκόλλου με δείκτη 1,2,3,...κοκ του σχήματος 3.12(β') έχουν διάρκεια  $\sigma$ . Αντίθετα, η χρονοσχιμής πρωτοκόλλου με δείκτη 0 έχει συνολική διάρκεια  $\nu_\sigma \cdot \sigma + \tau$ . Όπου

$$\nu_\sigma = \left\lfloor \frac{RTS + \delta}{\sigma} \right\rfloor, \quad (5.37)$$

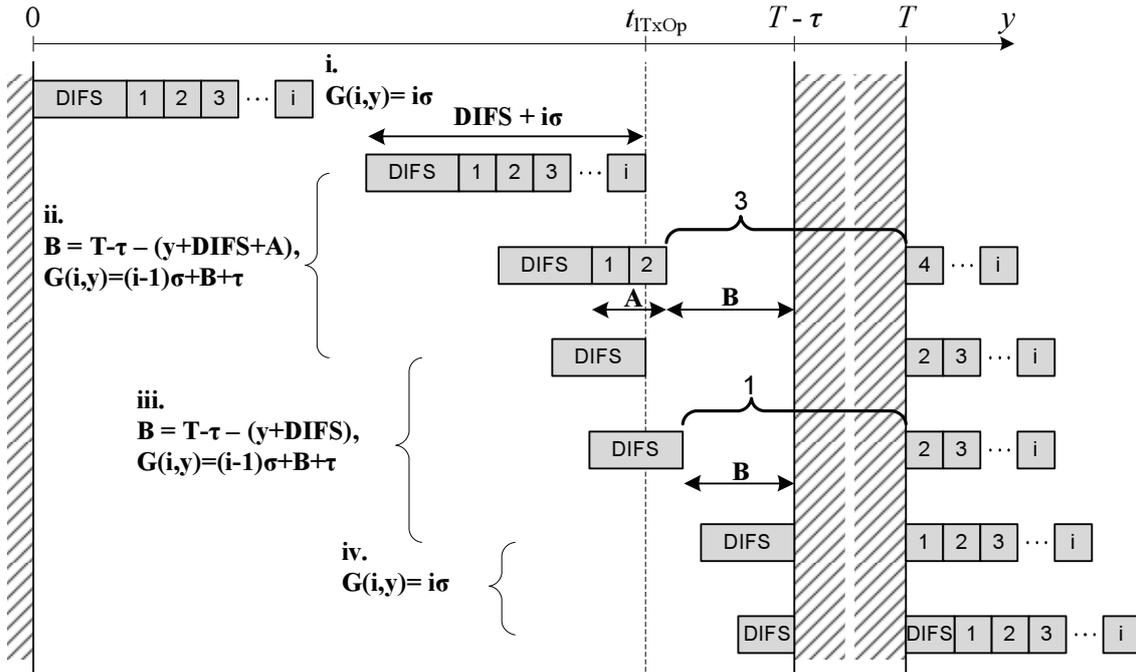
είναι το πλήθος των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου η έναρξη των οποίων βρίσκεται χρονικά μεταγενέστερα του χρονικού σημείου  $t_{TxOp}$ , δηλαδή σε αυτές τις χρονοσχισμένες ο μετρητής υποχώρησης έχει ήδη παγώσει (βλ. § 3.4.4).

Οι χρονοσχισμένες πρωτοκόλλου, και άρα οι ανενεργές χρονοθυρίδες της αλυσίδας, εκκινούν μετά τα διαστήματα σιγής DIFS και επομένως η διάρκειά τους εξαρτάται α) από τη σχετική χρονική θέση των διαστημάτων σιγής DIFS και β) τη σειρά εμφάνισης μετά το διάστημα σιγής. Θεωρούμε ότι η τήρηση του διαστήματος DIFS εκκινεί στο χρονικό σημείο  $y$ ,  $y \in [0, T - \tau)$  μετά την έναρξη του ενεργού χρόνου και ότι, συνολικά μετά την τήρησή του, διανύονται  $I$ ,  $I \in \mathbb{N}^*$ ,  $1 \leq I \leq W_{\max} - 1$  ανενεργές χρονοσχισμένες πρωτοκόλλου πριν επιχειρηθεί μετάδοση. Δεδομένου του πλήθους των ανενεργών χρονοσχισμών πρωτοκόλλου, η αναμενόμενη διάρκεια  $t_{idle}$  της ανενεργής χρονοθυρίδας της αλυσίδας είναι:

$$E[t_{idle}|I = i] = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i (T_{k^{th}slot}) dy, \quad (5.38)$$

όπου  $T_{k^{th}slot}$  η διάρκεια της  $k^{στης}$  χρονοσχισμένης μετά το διάστημα σιγής.

Η συνολική διάρκεια των  $i$  χρονοσχισμών μετά το διάστημα σιγής, δηλαδή το άθροισμα της (5.38), είναι συνάρτηση τόσο της συνεχούς μεταβλητής  $y$  όσο και της διακριτής μεταβλητής  $i$ ,  $G(i, y)$ . Για τη Λειτουργία Κατανομημένου Ελέγχου του προτύπου IEEE 802.111 θα ήταν απλά η συνάρτηση μόνο της μεταβλητής  $i$ :  $G(i) = i \cdot \sigma$ .



Σχήμα 5.3: Υπολογισμός συνολικής διάρκειας ανενεργού χρόνου μετά το διάστημα σιγής DIFS

Στο σχήμα 5.3 αναλύεται η διάρκεια των ανενεργών χρονοσχημάτων, που έπονται του διαστήματος σιγής DIFS. Από το σχήμα αυτό προκύπτει η συνάρτηση  $G(i, y)$  ως εξής:

$$G(i, y) = \begin{cases} i \cdot \sigma, & 0 < y \leq T - \tau - (RTS + \delta) - (DIFS + i \cdot \sigma) \\ (i-1) \cdot \sigma + T - (y + DIFS) - A, & y > T - \tau - (RTS + \delta) - (DIFS + i \cdot \sigma) \\ & \text{and } y \leq T - \tau - (RTS + \delta) - DIFS \\ (i-1) \cdot \sigma + T - (y + DIFS), & y > T - \tau - (RTS + \delta) - DIFS \\ & y \leq T - \tau - DIFS \\ i \cdot \sigma, & T - \tau - DIFS < y \leq T - \tau \end{cases} \quad (5.39)$$

Η ποσότητα  $A$  περιέχει ένα μη γραμμικό τελεστή και προκύπτει από το σχήμα ως:

$$A = \left\lceil \frac{T - \tau - (RTS + \delta) - (y + DIFS)}{\sigma} \right\rceil \cdot \sigma \quad (5.40)$$

Η ολοκλήρωση της συνάρτησης  $G(i, y)$  γίνεται εύκολα, χωρίζοντας το ολοκλήρωμα στα διαστήματα που η συνάρτηση είναι συνεχής. Η ολοκλήρωση του κλάδου της συνάρτησης που περιέχει το μη γραμμικό τελεστή, ποσότητα  $A$ , υπολογίζεται διακρίνοντας περαιτέρω σε περιπτώσεις ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής  $i$ , το οποίο οδηγεί σε μία συνάρτηση με  $i$  κλάδους. Ο υπολογισμός αυτός παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα Β'. Από την (5.38)

και μετά από πράξεις, προκύπτει:

$$E[t_{\text{idle}}|I = i] = \sigma + \sigma \cdot \frac{\tau - 3/2\sigma + (RTS + \delta)}{T - \tau} + \frac{RTS + \delta}{i \cdot (T - \tau)} \cdot [\tau - \sigma + 1/2(RTS + \delta)] \quad (5.41)$$

Παρατηρούμε ότι η αναμενόμενη διάρκεια της ανενεργούς χρονοθυρίδας της αλυσίδας δεδομένου του αριθμού των συνεχόμενων χρονοσχισμών τείνει στο  $\sigma$  για μεγάλους ενεργούς χρόνους  $T - \tau$  όπως, διαισθητικά, θα έπρεπε.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής  $I$  είναι  $P[I = i] = P_{\text{idle}}^i (1 - P_{\text{idle}})$ , όπου  $P_{\text{idle}}$  είναι η πιθανότητα ότι μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα της Μαρκοβιανής αλυσίδας είναι ανενεργή και μπορεί να βρεθεί από την πιθανότητα  $\tau_B$  της αλυσίδας σαν:

$$P_{\text{idle}} = (1 - \tau_B)^n \quad (5.42)$$

Έχοντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ.  $I$  μπορούμε να υπολογίσουμε την αναμενόμενη διάρκεια της ανενεργής χρονοθυρίδας της αλυσίδας ως:

$$E[t_{\text{idle}}] = \sum_{i=1}^{W_{\text{max}}-1} P[I = i] \cdot E[t_{\text{idle}}|I = i], \quad (5.43)$$

το οποίο μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά.

### 5.2.3 Το Throughput κορεσμού της iDCF

Έχοντας υπολογίσει τις αναμενόμενες διάρκειες των τριών ειδών χρονοθυρίδων της αλυσίδας, μπορούμε να υπολογίσουμε το κανονικοποιημένο Throughput κορεσμού  $S_{\text{sat}}$  του συστήματος σαν το κλάσμα της διάρκειας της χρονοθυρίδας της αλυσίδας, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ωφέλιμου φόρτου (bit δεδομένων). Δηλαδή:

$$S_{\text{sat}} = \frac{E[\text{Χρόνος Για τη Μετάδοση Ωφέλιμου Φόρτου}]}{E[\text{Διάρκεια Χρονοθυρίδας Αλυσίδας}]} \quad (5.44)$$

Η αναμενόμενη διάρκεια της χρονοθυρίδας μπορεί να προκύψει από τα τις αναμενόμενες διάρκειες των τριών ειδών χρονοθυρίδων που υπολογίσαμε, χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες εμφάνισης των ειδών αυτών. Έτσι:

$$E[\text{Διάρκεια Χρονοθυρίδας Αλυσίδας}] = P_{\text{idle}} \cdot E[t_{\text{idle}}] + P_S \cdot E[t_s] + P_C \cdot E[t_c], \quad (5.45)$$

όπου  $P_S$  είναι η πιθανότητα μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα να είναι επιτυχής και  $P_C$  να περιέχει ανεπιτυχή μετάδοση. Η  $P_{\text{idle}}$  όπως ειπώθηκε παραπάνω είναι η πιθανότητα η χρονοθυρίδα να είναι ανενεργή. Οι πιθανότητες αυτές υπολογίζονται από την πιθανότητα  $\tau_B$

ως εξής:

$$P_S = n \cdot \tau_B (1 - \tau_B)^{n-1} \quad (5.46)$$

και

$$P_{tx} = 1 - P_{idle} = 1 - (1 - \tau_B)^n, \quad (5.47)$$

$$P_C = P_{tx} - P_S = 1 - (1 - \tau_B)^n - n \cdot \tau_B (1 - \tau_B)^{n-1} \quad (5.48)$$

$P_{tx}$  είναι η πιθανότητα να υπάρχει μετάδοση σε μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα και είναι συμπληρωματική της πιθανότητας η χρονοθυρίδα να είναι ανενεργή. Δεδομένου ότι μια μετάδοση θα είναι επιτυχής ή ανεπιτυχής, το άθροισμα των πιθανοτήτων  $P_C$  και  $P_S$  δίνει την πιθανότητα  $P_{tx}$ , από όπου προκύπτει η πιθανότητα  $P_C$ .

Στο απλοποιημένο μοντέλο προσδιορισμού των χρόνων μετάδοσης, που χρησιμοποιούμε (βλ. (5.24)), η μετάδοση του ωφέλιμου φόρτου  $L_P$  μιας FES καταλαμβάνει χρονική διάρκεια  $L_P/R$ . Επομένως, από την (5.44) προκύπτει το Throughput κορεσμού της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου ως:

$$S_{sat} = \frac{P_S \cdot L_P/R}{P_{idle} \cdot E[t_{idle}] + P_S \cdot E[t_s] + P_C \cdot E[t_c]} \quad (5.49)$$

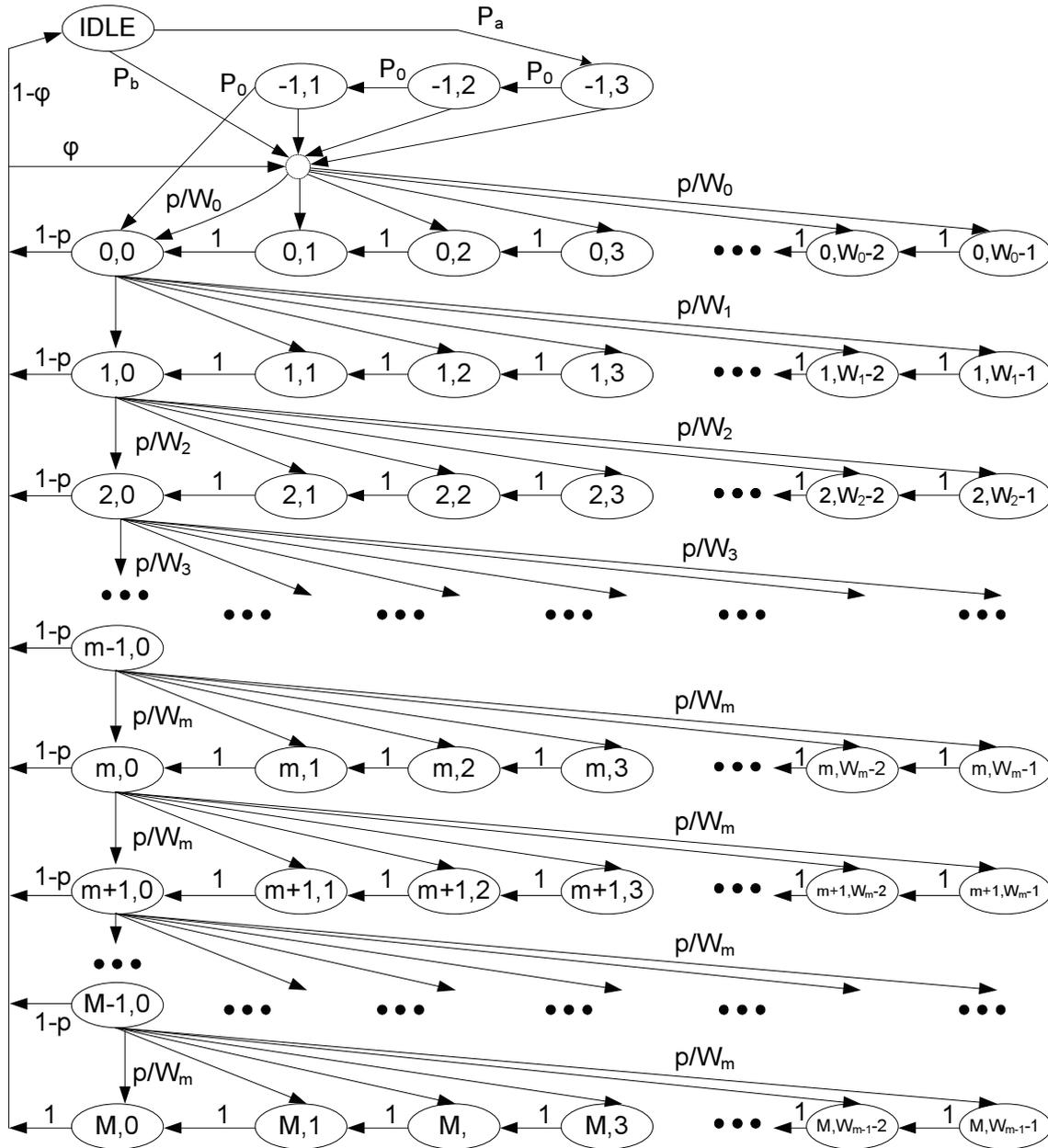
### 5.3 Αναλυτικό μοντέλο επίδοσης για συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης μη-κορεσμού

Για την ανάπτυξη του μοντέλου επίδοσης σε συνθήκες μη-κορεσμού της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, χρησιμοποιούμε μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης που χαρακτηρίζεται από γεννήσεις ρών πακέτων. Η πηγή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης του μοντέλου λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην παράγει ροές πακέτων όσο το τερματικό βρίσκεται σε διαδικασία εξυπηρέτησης (μετάδοσης) της προηγούμενης ροής. Το διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που ολοκληρώνεται η μετάδοση μιας ροής μέχρι την παραγωγή της επόμενης, κατανέμεται εκθετικά με ρυθμό  $\alpha$ .

Το μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης χαρακτηρίζεται επίσης από γεωμετρική κατανομή του πλήθους των πακέτων μιας ροής. Έτσι, η κατανομή του πλήθους  $\Lambda$  των πακέτων είναι:

$$P(\Lambda = k) = \phi^{k-1}(1 - \phi) \quad (5.50)$$

Λόγω της μορφής της γεωμετρικής κατανομής, η γέννηση ρών πακέτων, με πλήθος πακέτων που ακολουθούν αυτήν την κατανομή, είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την εξής διαδικασία γεννήσεων: Μετά από την εξυπηρέτηση ενός πακέτου, ένα νέο πακέτο γεννιέται με πιθανότητα  $\phi$  ή η πηγή εισέρχεται σε ανενεργή περίοδο με πιθανότητα  $1 - \phi$ . Η τελευταία περιγραφή της διαδικασίας γεννήσεων πακέτων είναι κατάλληλη για την ενσωμάτωση του μοντέλου στη Μαρκοβιανή Αλυσίδα μοντελοποίησης της DCF και γι' αυτό υιοθετείται.



Σχήμα 5.4: Η Μαρκοβιανή αλυσίδα της Kim

Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τη Μαρκοβιανή αλυσίδα που παρουσιάστηκε στην εργασία [84] και την επεκτείνουμε, ενσωματώνοντας τις υπολογισθείσες αναμενόμενες διάρκειες των χρονοθυρίδων της αλυσίδας (βλ. §5.2.2), ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου.

### 5.3.1 Η Μαρκοβιανή αλυσίδα

Η Μαρκοβιανή αλυσίδα του σχήματος 5.4 μοντελοποιεί τη λειτουργία της *DCF* σε καταστάσεις που διακρίνονται από την τιμή του μετρητή υποχώρησης, όπως ακριβώς η αλυσίδα του Bianchi. Ωστόσο σε αυτό το μοντέλο έχουν προστεθεί τα ακόλουθα:

**Πεπερασμένος αριθμός επαναμεταδόσεων.** Όπως περιγράφει το πρότυπο IEEE 802.11

όταν η μετάδοση ενός πακέτου αποτύχει σε περισσότερες από έναν μέγιστο αριθμό προσπαθειών, τότε το πακέτο απορρίπτεται. Ο μέγιστος αριθμός προσπαθειών καθορίζεται από την παράμετρο  $M$ . Έτσι, όταν συμβεί η  $M$  επαναμετάδοση, κατάσταση  $(M, 0)$ , ο σταθμός επιστρέφει στην αρχική κατάσταση είτε συμβεί σύγκρουση είτε όχι. Το παράθυρο ανταγωνισμού διπλασιάζεται μετά από κάθε αποτυχημένη προσπάθεια μέχρι το μέγιστο μέγεθός του που καθορίζεται από την παράμετρο  $m$ . Στις καταστάσεις των γραμμών κάτω από την  $m$  γραμμή, το παράθυρο ανταγωνισμού παραμένει σταθερό, έπειτα από κάθε αποτυχημένη προσπάθεια, ίσο με τη μέγιστη τιμή του.

**Μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης.** Το μοντέλο, το οποίο περιγράψαμε, έχει ενσωματωθεί στη Μαρκοβιανή αλυσίδα ως εξής: Ακολουθώντας τη λογική που περιγράφηκε, μετά την επιτυχή αποστολή ενός πακέτου (ή την απόρριψή του) είτε υπάρχει επόμενο πακέτο προς αποστολή με πιθανότητα  $\phi$  είτε η συγκεκριμένη ροή φτάνει στο τέλος της με πιθανότητα  $1 - \phi$ . Στην τελευταία περίπτωση, η αλυσίδα εισέρχεται στη νέα κατάσταση IDLE κατά την οποία το τερματικό δεν έχει πακέτα για αποστολή κι επομένως δεν ανταγωνίζεται.

**Συμπεριφορά κατά την άφιξη πακέτου όσο το μέσο είναι ανενεργό.** Τρεις νέες καταστάσεις  $(-1, 1)$ ,  $(-1, 2)$  και  $(-1, 3)$  έχουν προστεθεί, οι οποίες μοντελοποιούν τη συμπεριφορά της DCF όταν γίνεται άφιξη πακέτου σε τερματικό που δεν έχει άλλα πακέτα στην ουρά και το μέσο ανιχνεύεται ανενεργό για διάστημα DIFS. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11, όταν συμβαίνει αυτό, πραγματοποιείται μετάδοση αμέσως μετά το διάστημα DIFS χωρίς εκτέλεση διαδικασίας υποχώρησης. Οποιαδήποτε στιγμή κατά την τήρηση του διαστήματος σιγής DIFS ανιχνευθεί το μέσο ενεργό, τότε το τερματικό εισέρχεται κανονικά σε διαδικασία ανταγωνισμού. Εφόσον  $DIFS = SIFS + 2\sigma$ ,  $(-1, 3)$  είναι η κατάσταση στην οποία γίνεται ανίχνευση για το διάστημα SIFS, και  $(-1, 2)$  και  $(-1, 1)$  οι καταστάσεις για τις 2 χρονοσχισμές πρωτοκόλλου.

Η δεσμευμένη πιθανότητα σύγκρουσης  $p$  και η πιθανότητα  $\tau_K$ , ότι το τερματικό μεταδίδει σε μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα της αλυσίδας, έχουν κι εδώ την ίδια έννοια με τις πιθανότητες  $p$  και  $\tau_B$  στο μοντέλο του Bianchi. Εκτός από αυτές, στις πιθανότητες μεταβάσεων συναντώνται και οι ακόλουθες: Δεδομένου ότι το τερματικό δεν έχει πακέτα προς αποστολή, τότε οι πιθανότητες ότι μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα της αλυσίδας είναι ανενεργή, επιτυχής και ανεπιτυχής συμβολίζονται αντίστοιχα  $P_0$ ,  $P_1$  και  $P^*$ . Εφόσον ο αριθμός των υπόλοιπων τερματικών είναι  $(n - 1)$  προκύπτει:

$$P_0 = (1 - \tau_K)^{n-1} \quad (5.51)$$

$$P_1 = (n - 1) \cdot \tau_K \cdot (1 - \tau_K)^{n-2} \quad (5.52)$$

$$P^* = 1 - P_0 - P_1 \quad (5.53)$$

Κεφάλαιο 5. Αναλυτικό Μοντέλο Επίδοσης της *iDCF*

Οι αναμενόμενες διάρκειες των χρονοθυρίδων της αλυσίδας  $E[t_s]$ ,  $E[t_c]$  και  $E[t_{idle}]$  υπολογίζονται όπως περιγράφηκε νωρίτερα (βλ. § 5.2.2). Επομένως, για το τερματικό που είναι ανενεργό, οι πιθανότητες  $P_a$  να πραγματοποιηθεί άφιξη πακέτου σε ανενεργή χρονοθυρίδα και  $P_b$  να πραγματοποιηθεί άφιξη σε ενεργή (επιτυχή ή ανεπιτυχή) χρονοθυρίδα, λαμβάνοντας υπόψη την εκθετική κατανομή της ανενεργής περιόδου της πηγής, είναι:

$$P_a = P_0 \cdot \left(1 - e^{-a \cdot E[t_{idle}]}\right) \quad (5.54)$$

$$P_b = P_1 \cdot \left(1 - e^{-a \cdot E[t_s]}\right) + P^* \cdot \left(1 - e^{-a \cdot E[t_c]}\right) \quad (5.55)$$

Η Μαρκοβιανή Αλυσίδα του σχήματος 5.4 είναι επίσης εργοδική και αμείωτη και επομένως οι οριακές πιθανότητες  $b_{i,k}$  μπορούν να βρεθούν. Στο παράρτημα Γ' περιγράφεται το πώς προκύπτουν οι κάτωθι σχέσεις για τις πιθανότητες στη μόνιμη κατάσταση:

$$\begin{cases} b_{IDLE} = \frac{(1-\phi)}{P_a+P_b} \cdot b_{0,0} \\ b_{-1,d} = P_a P_0^{3-d} \cdot b_{IDLE} & , d \in [1, 3] \\ b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0} & , i \in [1, M] \\ b_{0,k} = b_{0,0} - P_a P_0^3 \cdot b_{IDLE} \\ \quad - \frac{k}{W} [\phi \cdot b_{0,0} + P_b \cdot b_{IDLE} \\ \quad + (1 - P_0) \sum_{d=1}^3 b_{-1,d}] & , k \in [1, W_0 - 1] \\ b_{i,k} = \left(1 - \frac{k}{2^i W}\right) \cdot b_{i,0} & , i \in [1, m] \\ b_{i,k} = \left(1 - \frac{k}{2^m W}\right) \cdot b_{i,0} & , i \in [m+1, M] \end{cases} \quad (5.56)$$

Η πιθανότητα μετάδοσης σε τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα της αλυσίδας  $\tau_K$  συνδέεται με τις οριακές πιθανότητες όπως ακριβώς και στην αλυσίδα του Bianchi:

$$\tau_K = \sum_{i=0}^M b_{i,0} = \frac{1 - p^{M+1}}{1 - p} \cdot b_{0,0} \quad (5.57)$$

$$\implies b_{0,0} = \tau_K \frac{1 - p}{1 - p^{M+1}} \quad (5.58)$$

Η πιθανότητα  $\tau_K$  συνδέεται επίσης με τη δεσμευμένη πιθανότητα σύγκρουσης  $p$ :

$$p = 1 - (1 - \tau_K)^{n-1} \quad (5.59)$$

Για τις οριακές πιθανότητες ισχύει η συνθήκη κανονικοποίησης δηλαδή:

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} + \sum_{i=m+1}^M \sum_{k=0}^{W_m-1} b_{i,k} + \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} + b_{IDLE} = 1 \quad (5.60)$$

Από τις σχέσεις (5.56) οι οριακές πιθανότητες εκφράζονται όλες συναρτήσει της  $b_{0,0}$ . Χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις (5.56) στην (5.60) και έπειτα στην προκύπτουσα εξίσωση αντικαθιστούμε το  $b_{0,0}$  από την (5.58), τα  $E[t_s]$ ,  $E[t_c]$  και  $E[t_{idle}]$  από τις (5.11), (5.36) και (5.43) και το  $p$  από την (5.59). Έτσι προκύπτει μια μη γραμμική εξίσωση  $f(\tau_K) - 1 = 0$  η οποία λύνεται με αριθμητικές μεθόδους ως προς  $\tau_K$ .

Από την τιμή της  $\tau_K$  υπολογίζονται οι πιθανότητες  $P_S$ ,  $P_C$  και  $P_{idle}$  από τις (5.46), (5.48) και (5.42), τις οποίες χρειαζόμαστε προκειμένου να εξάγουμε μετρητικά επίδοσης για την iDCF. Στο μοντέλο αυτό μη-κορεσμένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης, σε αντίθεση με το μοντέλο του Bianchi, η τιμή της πιθανότητας  $\tau_K$ , κι επομένως και των υπολοίπων, εξαρτάται τόσο από τις παραμέτρους της διακοπτόμενης λειτουργίας  $T$  και  $\tau$  όσο και από τις παραμέτρους  $\alpha$  και  $\phi$  του μοντέλου τηλεπικοινωνιακής κίνησης, καθώς όλες αυτές υπεισέρχονται στην εξίσωση κανονικοποίησης.

### 5.3.2 Το Throughput μη-κορεσμού της iDCF

Το Throughput του συστήματος για το μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης ρών πακέτων, με εκθετικά κατανομημένες ανενεργές περιόδους της πηγής και γεωμετρικά κατανομημένο πλήθος πακέτων ανά ροή, προκύπτει ομοίως με την εξίσωση (5.49) ως:

$$S_{nsat}(\alpha, \phi) = \frac{P_S \cdot L_P / R}{P_{idle} \cdot E[t_{idle}] + P_S \cdot E[t_s] + P_C \cdot E[t_c]} \quad (5.61)$$

όπου οι πιθανότητες εμφάνισης των ειδών των χρονοθυρίδων προκύπτουν όπως περιγράφεται παραπάνω.

### 5.3.3 Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου

Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης  $E[Y]$  ενός πακέτου, που υπολογίζουμε εδώ, είναι η καθυστέρηση από τη στιγμή που ένα πακέτο γίνεται πρώτο στην ουρά μετάδοσης και το τερματικό αρχίζει τη διαδικασία ανταγωνισμού για τη μετάδοσή του, μέχρι τη στιγμή που αυτή ολοκληρώνεται επιτυχώς (λήψη πλαισίου ack στο τερματικό Πηγή). Λόγω της ιδιομορφίας στην αποστολή του πρώτου πακέτου μιας ροής, στην περίπτωση που ο δίαυλος παραμένει ανενεργός για διάστημα DIFS, πραγματοποιείται διαφορετικός υπολογισμός για την καθυστέρηση μετάδοσης του πρώτου πακέτου μιας ροής  $E[Y_f]$  και διαφορετικός για την καθυστέρηση μετάδοσης ενός οποιουδήποτε άλλου, κοινού πακέτου  $E[Y]$ .

Αν  $Y_j$  είναι η καθυστέρηση παραμονής στην  $j$ -φάση υποχώρησης ( $j$  γραμμή της Μαρκοβιανής αλυσίδας), τότε:

$$E[Y_j] = \frac{W_j - 1}{2} \cdot E[\text{Διάρκεια Χρονοθυρίδας Αλυσίδας}] = \frac{W_j - 1}{2} \cdot (P_{idle} \cdot E[t_{idle}] + P_S \cdot E[t_s] + P_C \cdot E[t_c]) \quad (5.62)$$

Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης για ένα κοινό πακέτο υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 E[Y] = & \sum_{i=0}^m [p^i(1-p)] \left( \sum_{j=0}^i E[Y_j] + iE[t_c] + E[t_s] - E[t_{\text{DIFS}}] \right) \\
 & + \sum_{i=m+1}^M [p^i(1-p)] \left( \sum_{j=0}^m E[Y_j] + (i-N)E[Y_m] + iE[t_c] + E[t_s] - E[t_{\text{DIFS}}] \right) \\
 & + \left( 1 - \sum_{i=0}^M [p^i(1-p)] \right) \left( \sum_{j=0}^m E[Y_j] + (M-m)E[Y_m] + (M+1)E[t_c] \right)
 \end{aligned} \quad (5.63)$$

Ο πρώτος όρος της (5.63) αντιστοιχεί στην περίπτωση κατά την οποία το πακέτο αποστέλεται επιτυχώς με έως  $m$  επαναμεταδόσεις, ο δεύτερος όρος από  $m+1$  έως  $M$  επαναμεταδόσεις και ο τελευταίος όρος στην περίπτωση κατά την οποία το πλαίσιο δεν αποστέλεται επιτυχώς σε καμία προσπάθεια με αποτέλεσμα την απόρριψή του.

Για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης του πρώτου πακέτου μιας ροής θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιπτώσεις στις οποίες η άφιξη της ροής πραγματοποιείται σε ανενεργή χρονοθυρίδα της αλυσίδας (πιθανότητα  $P_a$ ) ή σε ενεργή, επιτυχή ή ανεπιτυχή (πιθανότητα  $P_b$ ). Για το  $E[Y_f]$  προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 E[Y_f] = & \sum_{d=0}^2 \left\{ \left( d \frac{E[t_{\text{DIFS}}] - E[t_{\text{SIFS}}]}{2} + E[t_s] + E[Y] \right) \cdot \frac{P_a P_0^d P_1}{P_a + P_b} \right\} \\
 & + \sum_{d=0}^2 \left\{ \left( d \frac{E[t_{\text{DIFS}}] - E[t_{\text{SIFS}}]}{2} + E[t_c] + E[Y] \right) \cdot \frac{P_a P_0^d P^*}{P_a + P_b} \right\} \\
 & + (E[t_{\text{DIFS}}] + E[t_s]) \cdot \frac{P_a P_0^3 P_0}{P_a + P_b} \\
 & + (E[t_{\text{DIFS}}] + E[Y^*]) \cdot \frac{P_a P_0^3 (1 - P_0)}{P_a + P_b} \\
 & + \left( \frac{E[t_s]}{2} + E[Y] \right) \cdot \frac{P_1 (1 - e^{-\alpha E[t_s]})}{P_a + P_b} \\
 & + \left( \frac{E[t_c]}{2} + E[Y] \right) \cdot \frac{P^* (1 - e^{-\alpha E[t_c]})}{P_a + P_b}
 \end{aligned} \quad (5.64)$$

Η πρώτη γραμμή της (5.64) αναπαριστά την περίπτωση όπου γίνεται άφιξη σε ανενεργό μέσο και στη συνέχεια, πριν ολοκληρωθεί η τήρηση του διαστήματος DIFS, το μέσο καταλαμβάνεται από μια επιτυχή μετάδοση. Η ποσότητα  $(E[t_{\text{DIFS}}] - E[t_{\text{SIFS}}])/2$  είναι η αναμενόμενη διάρκεια των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου  $\sigma$ , οι οποίες τηρούνται μετά το διάστημα SIFS προκειμένου να προκύψει το διάστημα DIFS. Ο υπολογισμός εδώ της αναμενόμενης διάρκειας των χρονοσχισμών αυτών ακολουθεί τη λογική υπολογισμού του  $E[t_{\text{DIFS}}]$  και όχι της ανενεργής χρονοθυρίδας της αλυσίδας  $E[t_{\text{idle}}]$ , επειδή οι δύο χρονοσχισμές εντάσσονται στην τήρηση του διαστήματος DIFS και όχι στη διαδικασία υποχώρησης. Η δεύτερη γραμμή της (5.64) αναπαριστά την περίπτωση όπου γίνεται άφιξη σε ανενεργό μέσο και στη συνέχεια, πριν ο-

λοκληρωθεί η τήρηση του διαστήματος DIFS , το μέσο καταλαμβάνεται από μια ανεπιτυχή μετάδοση.

Οι δύο τελευταίες γραμμές της (5.64) αναπαριστούν τις περιπτώσεις όπου η άφιξη γίνεται κατά τη διάρκεια μιας επιτυχούς και μιας ανεπιτυχούς μετάδοσης από τα άλλα τερματικά. Επειδή η άφιξη μπορεί να συμβεί οπουδήποτε μέσα στη χρονική διάρκεια της επιτυχούς ή της ανεπιτυχούς μετάδοσης, η υπολειπόμενη διάρκεια της χρονοθυρίδας της αλυσίδας πριν αρχίσει η διαδικασία ανταγωνισμού τίθεται στο  $1/2$  της διάρκειας αυτής.

Η τρίτη γραμμή αναπαριστά την περίπτωση επιτυχούς μετάδοσης του πρώτου πακέτου της ροής μετά την τήρηση διαστήματος σιγής DIFS . Αυτό γίνεται με πιθανότητα  $P_0$  (οι υπόλοιποι σταθμοί παραμένουν ανενεργοί), αφού φτάσουμε από την κατάσταση  $(-1, 3)$  με πιθανότητα  $P_0^3$  στην κατάσταση  $(0, 0)$ . Η τέταρτη γραμμή αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου εκτελείται μετάδοση μετά την τήρηση του διαστήματος σιγής DIFS , αλλά προκύπτει σύγκρουση. Το  $E[Y^*]$  υπολογίζεται όπως το  $E[Y]$ , με τη διαφορά ότι θεωρείται δεδομένο ότι έχει γίνει ήδη μια σύγκρουση, επομένως δε λαμβάνεται υπόψη η πρώτη γραμμή της Μαρκοβιανής αλυσίδας ( $i = 0$ ). Έτσι προκύπτει:

$$\begin{aligned} E[Y^*] = & \sum_{i=1}^m [p^i(1-p)] \left( \sum_{j=1}^i E[Y_j] + iE[t_c] + E[t_s] - E[t_{DIFS}] \right) \\ & + \sum_{i=m+1}^M [p^i(1-p)] \left( \sum_{j=1}^m E[Y_j] + (i-N) E[Y_m] + iE[t_c] + E[t_s] - E[t_{DIFS}] \right) \\ & + \left( 1 - \sum_{i=1}^M [p^i(1-p)] \right) \left( \sum_{j=1}^m E[Y_j] + (M-m) E[Y_m] + (M+1) E[t_c] \right) \end{aligned} \quad (5.65)$$

Σαν πρόσθετο μετρητικό επίδοσης, που σχετίζεται με τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης, μπορεί κανείς να υπολογίσει και την αναμενόμενη καθυστέρηση μετάδοσης ολόκληρης της ροής πακέτων, που προκύπτει από τις μέσες καθυστερήσεις μετάδοσης των μεμονωμένων πακέτων ως εξής:

$$E[Y_{Flow}] = E[Y_f] + \left( \frac{1}{1-\phi} - 1 \right) \cdot E[Y] \quad (5.66)$$

### 5.3.4 Πιθανότητα απώλειας πακέτου

Η πιθανότητα απώλειας πακέτου είναι ένα πολύ σημαντικό μετρητικό επίδοσης, ιδιαίτερα για συστήματα μετάδοσης δεδομένων. Εφόσον στην *iDCF* ένα πακέτο απορρίπτεται όταν έχει συμπληρωθεί ο επιτρεπόμενος αριθμός επαναμεταδόσεων, η πιθανότητα αυτή προκύπτει ως:

$$P_L = p^{M+1} \quad (5.67)$$

## 5.4 Απόδειξη χρησιμότητας της τροποποίησης του μηχανισμού υποχώρησης

Χρησιμοποιώντας τη Μαρκοβιανή Αλυσίδα του Bianchi (βλ. Σχήμα 5.1), αποδεικνύουμε εδώ τη χρησιμότητα και την αναγκαιότητα της τροποποίησης του μηχανισμού υποχώρησης η οποία πραγματοποιήθηκε στην iDCF (βλ. §3.4.4).

Ένας πολύ σημαντικός δείκτης επίδοσης ενός πρωτοκόλλου MAC είναι η πιθανότητα  $P_s$  ότι μια μετάδοση που εκτελείται είναι επιτυχής. Δείχνει με άμεσο τρόπο τί ποσοστό των μεταδόσεων, και άρα της συνολικής ισχύος του συστήματος που καταναλώνεται σε αυτές, συνεισφέρει επιτυχώς στο Throughput του συστήματος και δε δαπανάται άσκοπα σε συγκρούσεις μεταδόσεων. Προκειμένου να φανεί η χρησιμότητα της τροποποίησης του μηχανισμού υποχώρησης στην iDCF, συγκρίνουμε την πιθανότητα  $P_s$  στην υλοποιηθείσα iDCF με την αντίστοιχη πιθανότητα  $P'_s$  σε μία υποθετική ευθεία υλοποίηση, χωρίς την προταθείσα τροποποίηση στο μηχανισμό υποχώρησης. Μία τέτοια ευθεία υλοποίηση είναι αυτή των τερματικών του σχήματος 3.12(α') (σελίδα 62).

Η πιθανότητα  $P_s$  μπορεί να υπολογιστεί σαν την πιθανότητα ότι συμβαίνει ακριβώς μία μετάδοση στο δίαυλο, δεδομένου ότι συμβαίνει τουλάχιστο μία μετάδοση. Η πιθανότητα ότι συμβαίνει ακριβώς μία μετάδοση στο δίαυλο είναι η πιθανότητα ότι μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα είναι επιτυχής δηλαδή είναι η πιθανότητα  $P_s$  που δίνεται από την (5.46). Η πιθανότητα ότι συμβαίνει τουλάχιστο μια μετάδοση είναι η πιθανότητα  $P_{tx}$  που δίνεται από την (5.47). Επομένως:

$$P_s = g(\tau_B) = \frac{P_s}{P_{tx}} = \frac{n\tau_B(1 - \tau_B)^{n-1}}{1 - (1 - \tau_B)^n} \quad (5.68)$$

Μια ευθεία υλοποίηση της DCF, χωρίς την τροποποίηση του μηχανισμού υποχώρησης, μπορεί να μοντελοποιηθεί επίσης από τη Μαρκοβιανή αλυσίδα του σχήματος 5.1. Όμως οι τιμές της δεσμευμένης πιθανότητας “η μετάδοση ενός τερματικού καταλήγει σε σύγκρουση”, της πιθανότητας “ένα τερματικό πραγματοποιεί μετάδοση” και των οριακών πιθανοτήτων της Μαρκοβιανής αλυσίδας διαφοροποιούνται σε  $p'$ ,  $\tau'_B$  και  $b'_{i,k}$  αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των νέων αυτών τιμών γίνεται ως εξής:

Εφόσον η Μαρκοβιανή αλυσίδα που χρησιμοποιούμε παραμένει η ίδια, οι σχέσεις που συνδέουν τις οριακές πιθανότητες  $b'_{i,k}$  στη μόνιμη κατάσταση με τη δεσμευμένη πιθανότητα σύγκρουσης  $p'$  είναι όμοιες με αυτές των (5.3) και (5.4) τις οποίες για ευκολία αναπαριστούμε εδώ ως:  $b'_{i,k} = f(p', W, m, i, k)$ . Για τη σχέση που συνδέει την πιθανότητα  $\tau'_B$  με τις οριακές πιθανότητες, όμως, δεν ισχύει σχέση αντίστοιχη της (5.57). Στην περίπτωση της ευθείας υλοποίησης DCF θα πρέπει να εξεταστεί τί γίνεται στην περίπτωση που μια χρονοσχισμή πρωτοκόλλου βρίσκεται στο σύνολό της έπειτα από το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$ , δηλαδή, με αναφορά στο σχήμα 3.12(α'), σελίδα 62, για τις χρονοσχισμές με αρίθμηση  $0, 1, \dots, 5$ . Αν ο μετρητής υποχώρησης μηδενιστεί σε μία από αυτές τις χρονοσχισμές δεν υπάρχει επαρκής χρόνος για τη μετάδοση του  $pts$  πλαισίου και το τερματικό θα πραγματοποιήσει τη μετάδοση αμέσως μετά το πέρας της διακοπής. Έτσι, για κάθε μια από αυτές τις χρονοσχισμές, όλες

οι οριακές πιθανότητες των καταστάσεων που θα οδηγήσουν στη λήξη του μετρητή πριν την επερχόμενη διακοπή, θα πρέπει να συνυπολογιστούν στον υπολογισμό του  $\tau'_B$ . Παραδείγματος χάριν για τη χρονοσχισμή με αρίθμηση 3 όλες οι οριακές πιθανότητες  $b'_{i,0}, b'_{i,1}, b'_{i,2}, b'_{i,3}$  θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Όσον αφορά τις υπόλοιπες χρονοσχισμές, οι οποίες δε βρίσκονται εντός του διαστήματος μετά το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  και πριν τη διακοπή, ο υπολογισμός του  $\tau'_B$  ακολουθεί την ίδια λογική με αυτήν της εξίσωσης (5.5).

Το πλήθος των χρονοσχισμών πρωτοκόλλου που βρίσκονται ολόκληρες στον ενεργό χρόνο μετά το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  (6 στο παράδειγμα του σχήματος 3.12(α')) δίνεται από την εξίσωση (5.37). Έτσι, για το  $\tau'_B$ , προκύπτει:

$$\begin{aligned} \tau'_B = (1 - \Xi) \sum_{i=0}^m b'_{i,0} + P_0^{(\sigma)} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^0 b'_{i,k} + P_1^{(\sigma)} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^1 b'_{i,k} \\ + \dots + P_{\nu_\sigma-1}^{(\sigma)} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{\nu_\sigma-1} b'_{i,k}, \end{aligned} \quad (5.69)$$

όπου  $\Xi$  είναι η πιθανότητα μιας χρονοσχισμής να βρίσκεται στον ενεργό χρόνο μετά το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  και  $P_0^{(\sigma)}, P_1^{(\sigma)}, \dots, P_{\nu_\sigma-1}^{(\sigma)}$  η πιθανότητα μιας χρονοσχισμής πρωτοκόλλου να είναι αυτή με αρίθμηση  $0, 1, \dots, \nu_\sigma - 1$  αντίστοιχα. Οι ανενεργές χρονοσχισμές μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε μέσα στον ενεργό χρόνο με ίση πιθανότητα. Έτσι, δεδομένου ότι  $P_0^{(\sigma)} = P_1^{(\sigma)} = \dots = P_{\nu_\sigma-1}^{(\sigma)}$ , το  $\Xi$  προκύπτει:

$$\Xi = P_0^{(\sigma)} + P_1^{(\sigma)} + \dots + P_{\nu_\sigma-1}^{(\sigma)} = \frac{\nu_\sigma \sigma}{T - \tau} \quad (5.70)$$

Περιορίζοντας το διάστημα άθροισης, επειδή κάθε στάδιο υποχώρησης  $i$  (γραμμή της αλυσίδας) περιέχει έως  $W_i - 1$  καταστάσεις, λαμβάνουμε:

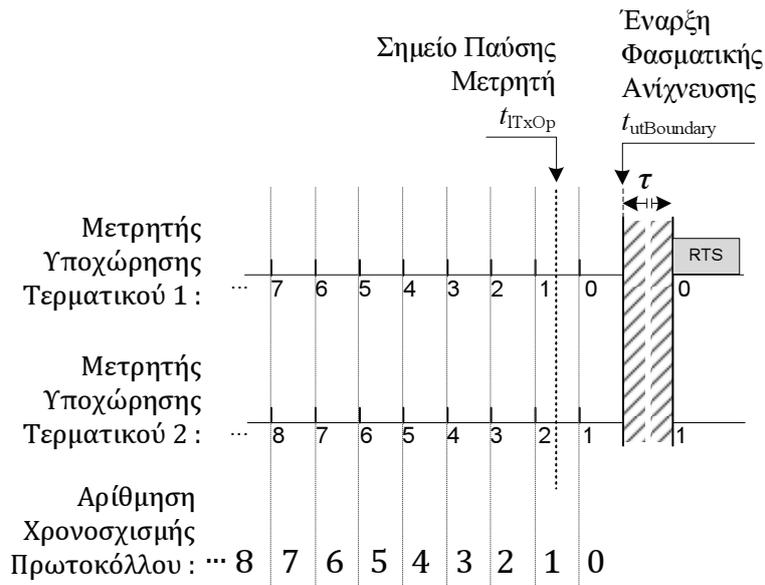
$$\tau'_B = (1 - \Xi) \sum_{i=0}^m b'_{i,0} + \frac{\Xi}{\nu_\sigma} \sum_{j=0}^{\nu_\sigma-1} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{\min(j, W_i-1)} b'_{i,k} \quad (5.71)$$

Μετά από πράξεις και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5.3), η πιθανότητα  $\tau'_B$  προκύπτει:

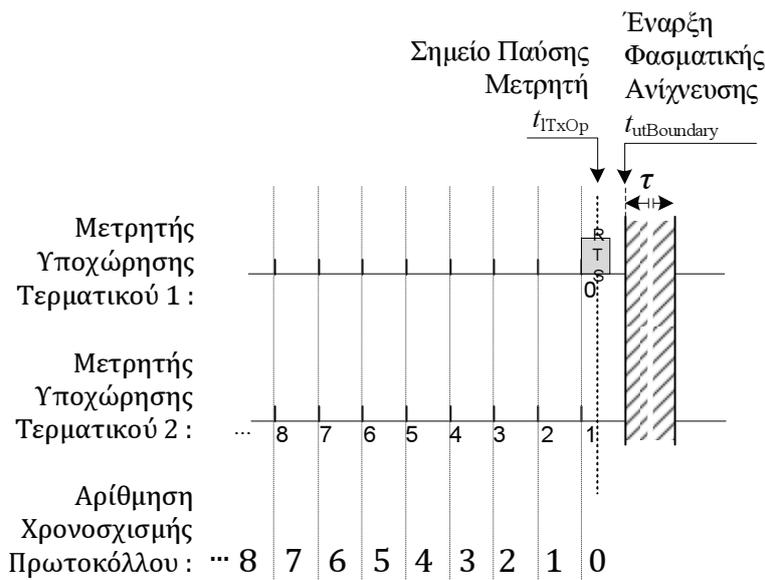
$$\tau'_B = \frac{b'_{0,0}}{1 - p'} \left\{ 1 + \frac{\nu_\sigma(\nu_\sigma - 1)\sigma}{2(T - \tau)} \left[ 1 - \frac{\nu_\sigma + 1}{3W} \cdot \frac{1 - p' + (p'/2)^{m+1}}{1 - (p'/2)} \right] \right\}, \quad (5.72)$$

$\nu_\sigma \leq W$

όπου το  $b'_{0,0}$  προκύπτει από την (5.4) θέτοντας  $p'$  όπου  $p$ . Για  $\nu_\sigma > W$ , η (5.71) θα είχε σαν αποτέλεσμα μια πολύκλαδη συνάρτηση εξαιτίας της συνάρτησης ελαχιστοποίησης στο άνω όριο του εσωτερικού άθροισματος, η οποία μπορεί να βρεθεί εύκολα υπολογιστικά. Όμοια με την ανάλυση της παραγράφου 5.2.1 η πιθανότητα  $p'$  συνδέεται με την  $\tau'_B$  με τη σχέση  $p' = 1 - (1 - \tau'_B)^{n-1}$ . Η πιθανότητα  $\tau'_B$  βρίσκεται λύνοντας το σύστημα της τελευταίας εξίσωσης με την (5.72). Η  $P'_s$ , για την ευθεία υλοποίηση της DCF, μπορεί τώρα να υπολογιστεί με τη



(α')  $\nu_\sigma = 1$ . Ο μετρητής υποχώρησης μπορεί να μηδενιστεί μόνο σε μία χρονοσχισμή μετά το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$

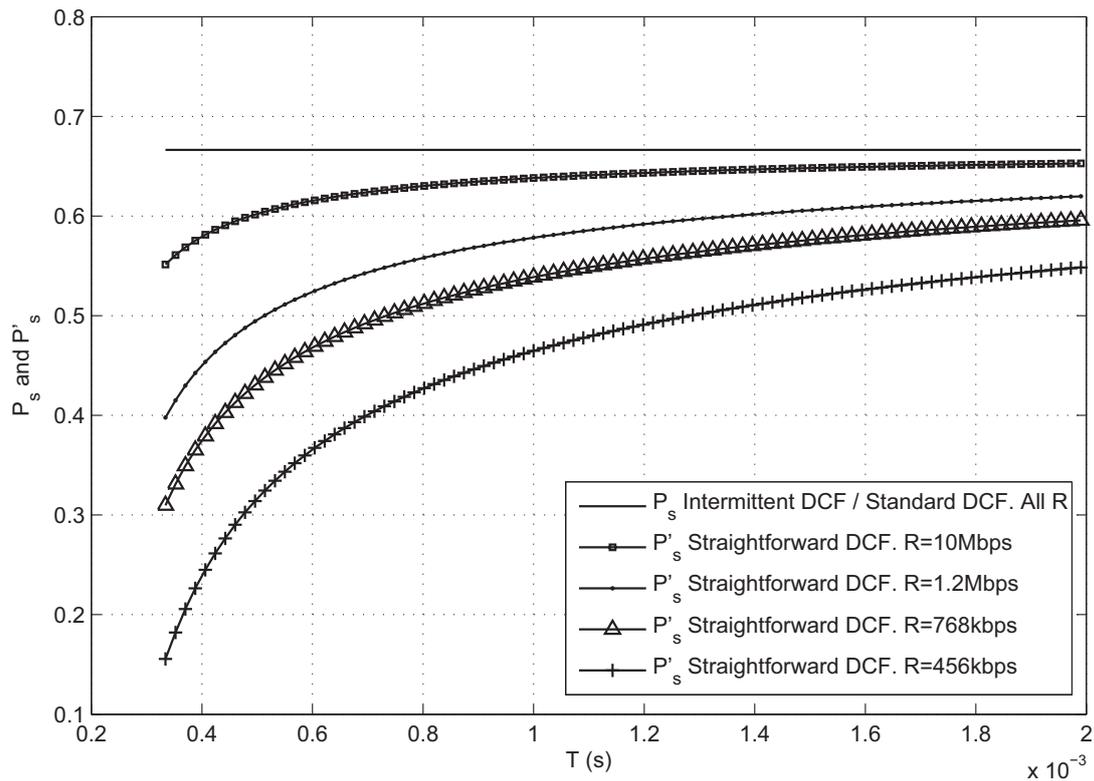


(β')  $\nu_\sigma = 0$ . Ο μετρητής υποχώρησης δε μηδενίζεται ποτέ μετά το χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$

Σχήμα 5.5: Παραδείγματα διαδικασίας υποχώρησης κοντά το σημείο διακοπής - 2

σχέση  $P'_s = g(\tau'_B)$  που ορίζεται από την (5.68).

Παρατηρούμε πως για  $m = 0$  η πιθανότητα  $\tau'_B$  που προκύπτει από την (5.72), είναι ανεξάρτητη της πιθανότητας σύγκρουσης  $p'$ . Το γεγονός αυτό συμβαίνει και για τον υπολογισμό της  $\tau_B$  μέσω της (5.5) και έχει αναγνωριστεί ως “πρόβλημα σταθερού παραθύρου ανταγωνισμού” [78], [89]. Παρόλο που η τιμή  $m = 0$  δε θα ετίθετο σε μια ρεαλιστική υλοποίηση με μεγάλο



**Σχήμα 5.6:**  $P_s$  για την *iDCF* και  $P'_s$  για την ευθεία υλοποίηση της *DCF* σαν συνάρτηση της περιόδου  $T$ , σταθερό  $\tau = 200 \mu s$  και διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης.

πλήθος τερματικών, είναι ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι αυτή η ανεξαρτησία, που προβλέπεται στην (5.72) και την (5.5), έρχεται σε συμφωνία με το γεγονός ότι στη Μαρκοβιανή αλυσίδα που προκύπτει για  $m = 0$ , δε χρειάζεται ορισμός πιθανότητας  $p$  στις πιθανότητες μεταβάσεων, εφόσον μετά από κάθε μετάδοση επιλέγεται πάντα τιμή του μετρητή υποχώρησης από 0 έως  $W$ .

Από την (5.72) παρατηρείται ότι καθώς η τιμή της πιθανότητας  $\Xi$  μικραίνει, δηλαδή για μεγάλες τιμές του ενεργού χρόνου  $T - \tau$ , η σχέση (5.72) προσεγγίζει τη σχέση (5.5) και ως εκ τούτου η πιθανότητα  $\tau'_B$  τείνει προς την  $\tau_B$ . Αυτό υποδηλώνει πως η χρησιμότητα της τροποποίησης στο μηχανισμό υποχώρησης έχει περισσότερο νόημα για μικρές τιμές ενεργού χρόνου, επειδή τότε η διακοπτόμενη λειτουργία επηρεάζει αρνητικά την επίδοση της ευθείας υλοποίησης περισσότερο.

Το  $\tau'_B$ , επίσης, εξισώνεται με το  $\tau_B$  στις περιπτώσεις στις οποίες  $\nu_\sigma = 0$  ή  $\nu_\sigma = 1$ . Οι περιπτώσεις αυτές απεικονίζονται στα παραδείγματα του σχήματος 5.5. Όταν  $\nu_\sigma = 1$  (σχήμα 5.5(α')), ο μετρητής υποχώρησης μπορεί να μηδενιστεί μόνο σε μια χρονοσχιμή μετά το χρονικό σημείο  $t_{ITxOp}$ , αυτή με αριθμηση 0. Αυτό δεν προκαλεί αριθμό συγκρούσεων μεγαλύτερο από τον αναμενόμενο. Όταν  $\nu_\sigma = 0$  (σχήμα 5.5(β')), ο μετρητής υποχώρησης δε μηδενίζεται ποτέ μετά το χρονικό σημείο  $t_{ITxOp}$  και το φαινόμενο που περιγράφεται στο σχήμα 3.12(α') δε συμβαίνει ποτέ.

## Κεφάλαιο 5. Αναλυτικό Μοντέλο Επίδοσης της *iDCF*

Για μεγάλες τιμές του  $\Xi$  και μεγάλες τιμές του  $\nu_\sigma$ , που συμβαίνουν για μικρής διάρκειας ενεργούς χρόνους ή συχνές διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών και χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, το  $\tau'_B$  διαφοροποιείται αρκετά από το  $\tau_B$  χειροτερεύοντας την πιθανότητα  $P'_s$ . Το γράφημα του σχήματος 5.6 δείχνει τη χειροτέρευση της πιθανότητας  $P'_s$  για τέσσερις διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και σαν συνάρτηση της περιόδου  $T$  σε ένα σενάριο όπου το  $\tau$  διατηρείται σταθερό.

Είναι φανερό ότι ο τροποποιημένος μηχανισμός υποχώρησης, που υλοποιήθηκε (βλ. § 3.4.4), καθίσταται απαραίτητος για τη Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου στο περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, ιδιαίτερα στις απαιτητικές συνθήκες των συχνών διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, φασματικών ανιχνεύσεων μεγάλης διάρκειας και χαμηλούς επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης. Σε αυτές τις συνθήκες μια ευθεία υλοποίηση της DCF χωρίς τον τροποποιημένο μηχανισμό υποχώρησης, θα ήταν μη αποδοτική.

□



## Κεφάλαιο 6

# Μελέτη Επίδοσης της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου

Το αναλυτικό μοντέλο επίδοσης της iDCF , που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί ένα κατάλληλο εργαλείο πρόβλεψης της επίδοσης της iDCF σε υποθετικά σενάρια εφαρμογής της. Ένα συγκεκριμένο σενάριο καθορίζεται από την τιμή του διάνυσματος των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου. Με βάση αυτό το διάνυσμα εισόδου το αναλυτικό μοντέλο υπολογίζει και εξάγει τα ζητούμενα μετρητικά επίδοσης της iDCF στο συγκεκριμένο σενάριο.

Κατά τη μελέτη επίδοσης, τα αποτελέσματα που παρέχει το αναλυτικό μοντέλο επικυρώνονται και ισχυροποιούνται με την παράλληλη παράθεση αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Ο προσομοιωτής που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 (βλ. § 4.3) δέχεται το ίδιο διάνυσμα παραμέτρων εισόδου και, έπειτα από ορισμένο αριθμό επαναλήψεων της προσομοίωσης, εκτιμά τις τιμές των παραμέτρων επίδοσης από τη μέση τιμή των ανεξάρτητων μετρήσεων και ταυτόχρονα οριοθετεί διαστήματα εμπιστοσύνης των εκτιμήσεων αυτών.

Οι παράμετροι που καθορίζουν το διάνυσμα εισόδου, τόσο του αναλυτικού μοντέλου όσο και του προσομοιωτή, παρατίθενται στον πίνακα 6.1, ομαδοποιημένες ανά κατηγορία. Στην τρίτη στήλη του πίνακα δίνονται οι τιμές για τις παραμέτρους που έχουν σταθερή τιμή σε όλα τα σενάρια επίδοσης, που μελετώνται, καθώς και το ποιες παράμετροι είναι μεταβλητές. Η διαφοροποίησή αυτών θα ορίσει τα διαφορετικά σενάρια στη μελέτη επίδοσης που ακολουθεί.

Ο επιπρόσθετος χρονικός φόρτος των  $62.5 \mu s$  της μετάδοσης προκύπτει από το προοίμιο του πλαισίου συμβόλων συν τη μετάδοση του συμβόλου SIGNAL, που περιέχει τμήμα της επικεφαλίδας του PLCP υποστρώματος προσαρμογής του προτυποποιημένου φυσικού στρώματος

**Πίνακας 6.1:** Παράμετροι εισόδου αναλυτικού μοντέλου και προσομοιωτή

Περιγραφή	Σύμβολο	Τιμή
<b>ΦΤΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ</b>		
Επιπρόσθετος Χρονικός Φόρτος	$t_{oh}$	62.5 $\mu s$
Φόρτος Μεταδιδόμενων bit	$L_{oh}$	22 b
Ρυθμός Μετάδοσης	$R$	bps - μεταβλητός
<b>ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ MAC</b>		
Διάστημα Σιγής SIFS	$SIFS$	16 $\mu s$
Χρονοσχιμμή Πρωτοκόλλου	$\sigma$	9 $\mu s$
Διάστημα Σιγής DIFS	$DIFS$	34 $\mu s$
Μήκος Επικεφαλίδας MAC	$L_{MAC,HD}$	272 b
Μήκος Πλαισίου rts	$L_{rts}$	160 b
Μήκος Πλαισίων ack , cts	$L_{rsp}$	112 b
Ελάχιστος Επιτρεπτός Ωφέλιμος Φόρτος	$L_{min}$	b - μεταβλητός
Αρχικό Παράθυρο Ανταγωνισμού	$W, W_0$	16
Στάδια Υποχώρησης	$m$	6
Αριθμός Επαναμεταδόσεων	$M$	8
<b>ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ</b>		
Μήκος SDU / Ωφέλιμος Φόρτος	$L_P$	b - μεταβλητός
Κατανομή Διάρκειας Ανενεργών Περιόδων	$\alpha$	$s^{-1}$ - μεταβλητό
Κατανομή Πλήθους Πακέτων ανά Ροή	$\phi$	μεταβλητό
<b>ΔΙΚΤΥΟ</b>		
Τοπολογία		Τυχαία - σταθερή
Πλήθος Τερματικών	$n$	μεταβλητό
Μέγιστη Καθυστέρηση Διάδοσης	$\delta$	$1/3 \mu s$
<b>ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΙΚΗ - ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑ</b>		
Περίοδος εκτέλεσης Διαδικασιών		
Ανίχνευσης Φασματικών Οπών	$T$	s - μεταβλητή
Διάρκεια / Καθυστέρηση Διαδικασιών		
Ανίχνευσης Φασματικών Οπών	$\tau$	s - μεταβλητή

OFDM του IEEE 802.11a [90] για εύρος ζώνης υποκαναλιού  $\Delta_F = 100$  kHz:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{oh}} &= T_{\text{PREAMBLE}} + T_{\text{SIGNAL}} \\
 T_{\text{PREAMBLE}} &= T_{\text{SHORT}} + T_{\text{LONG}} \\
 T_{\text{SHORT}} &= 10 \times T_{\text{FFT}}/4 \\
 T_{\text{LONG}} &= T_{\text{GItr}} + 2 \times T_{\text{FFT}} \\
 T_{\text{GItr}} &= T_{\text{FFT}}/2 \\
 T_{\text{GI}} &= T_{\text{FFT}}/4 \\
 T_{\text{SIGNAL}} &= T_{\text{GI}} + T_{\text{FFT}} = T_{\text{SYM}} \\
 T_{\text{FFT}} &= 1/\Delta_F
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Τα 22 b φόρτου μεταδιδόμενων bit του φυσικού στρώματος προκύπτουν από το υπόλοιπο της επικεφαλίδας του PLCP υποστρώματος, που δεν μεταδίδεται στο σύμβολο SIGNAL, αλλά ενσωματώνεται στα επόμενα σύμβολα μαζί με τα bit ωφέλιμου φόρτου (SDU). Οι παράμετροι του υποστρώματος MAC έχουν τεθεί, επίσης, στις τιμές που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11a.

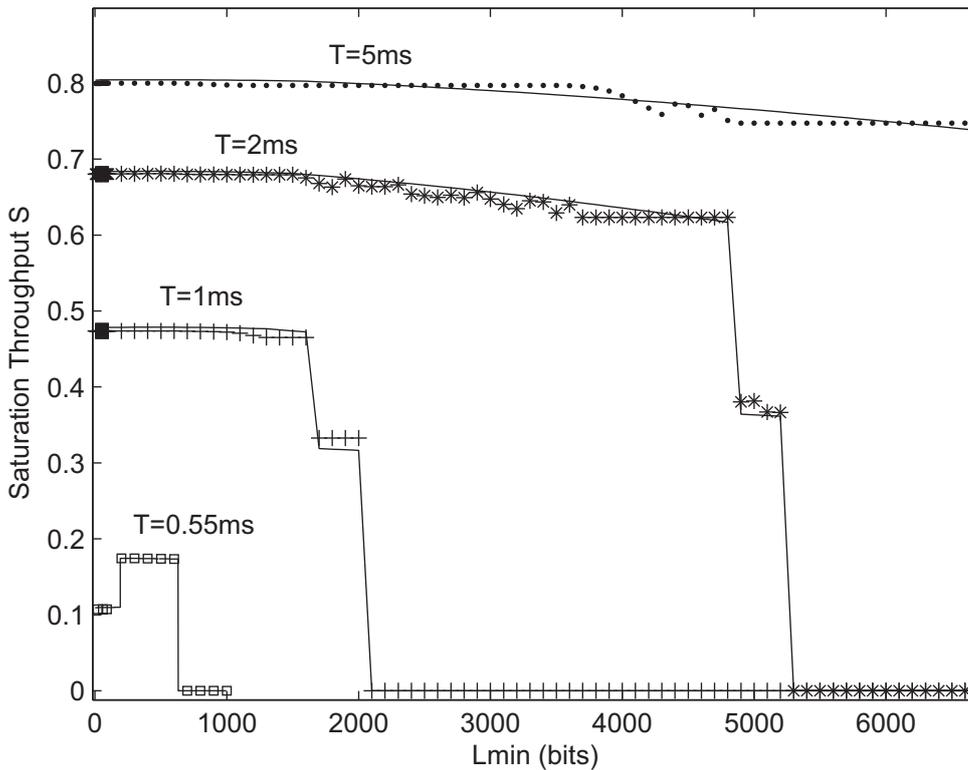
Από τις παραμέτρους του φυσικού στρώματος και του υποστρώματος MAC, εκείνες που είναι μεταβλητές και εξετάζονται κατά τη μελέτη επίδοσης της iDCF, είναι ο ρυθμός μετάδοσης και η νέα παράμετρος της iDCF  $L_{\text{min}}$ . Επίσης, μεταβλητές είναι και οι παράμετροι του μοντέλου τηλεπικοινωνιακής κίνησης και του διακοπτόμενου τρόπου πρόσβασης στο φάσμα. Το νόημα των μεταβλητών παραμέτρων στη μελέτη που ακολουθεί, είναι να αναδειχθεί το πώς αυτές επηρεάζουν την επίδοση της iDCF.

Αντίθετα, οι παράμετροι που δε μεταβάλλονται κατά τη μελέτη, είναι αυτές οι οποίες εισάγουν έναν πρόσθετο και σταθερό φόρτο στη λειτουργία του πρωτοκόλλου και δεν ενδιαφέρουν τη μελέτη επίδοσης, υπό την έννοια ότι τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που εξάγονται, εξάγονται με σχετικές συγκρίσεις μεταξύ σεναρίων, στα οποία αυτές οι παράμετροι έχουν ίδια τιμή.

## 6.1 Η παράμετρος $L_{\text{min}}$

Η πρώτη παράμετρος της οποίας η επίδραση στην επίδοση της iDCF εξετάζεται είναι η νέα παράμετρος  $L_{\text{min}}$ . Ειδικότερα, αναζητείται εκείνη η τιμή της παραμέτρου η οποία θα μεγιστοποιούσε την επίδοσή της, ελαχιστοποιώντας την ποσότητα  $E[t_{\text{data}}]$  μέσω της (5.33).

Η παράμετρος  $L_{\text{min}}$  καθορίζει το ελάχιστο μήκος τεμαχίου δεδομένων που επιτρέπεται να μεταδοθεί όταν πλησιάζει μια διακοπή και δεν υπάρχει επαρκής ενεργός χρόνος για τη μετάδοση ολόκληρου του πλαισίου δεδομένων. Γενικά, το  $L_{\text{min}}$  πρέπει να είναι όσο μικρότερο γίνεται, ώστε η ακολουθία τεμαχίων δεδομένων να είναι μικρότερη σε διάρκεια, όπως διαφαίνεται από την (5.33) και την (5.16). Οι μικρές τιμές της παραμέτρου έχουν σαν αποτέλεσμα μικρής διάρκειας ανεχμετάλλευτους χρόνους και, επίσης, μειώνουν την πιθανότητα ύπαρξης



Σχήμα 6.1: Throughput κορεσμού σε συνάρτηση της παραμέτρου  $L_{min}$  για τέσσερις τιμές περιόδου  $T$ .  $L_P = 16$  kb,  $R = 3.2$  Mbps,  $n = 30$ ,  $\tau = 0.2$  ms.

ανεκμετάλλευτων χρόνων. Από την άλλη μεριά, μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου έχουν σαν αποτέλεσμα μικρότερο συνολικό αριθμό τεμαχίων δεδομένων  $n_F$ , κάτι που προκύπτει από το γεγονός ότι το πρώτο μεταδιδόμενο τεμάχιο εξαναγκάζεται να είναι μεγαλύτερο, κάτι που φαίνεται και από την (5.35). Μικρότερος αριθμός τεμαχίων σημαίνει μικρότερος πρόσθετος φόρτος (μεταδιδόμενες επικεφαλίδες, πλαίσια επιβεβαίωσης) και επομένως μικρότερη διάρκεια  $E[t_{data}]$ . Από τα παραπάνω φαίνεται ότι υπάρχει κάποια τιμή της παραμέτρου  $L_{min}$  που ελαχιστοποιεί την ποσότητα  $E[t_{data}]$ , βελτιστοποιώντας των απόδοση της iDCF.

Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το Throughput -κορεσμού σαν συνάρτηση της παραμέτρου  $L_{min}$  για τέσσερις διαφορετικές τιμές της περιόδου  $T$  και για το σενάριο που περιγράφεται στη λεζάντα του σχήματος. Παρατηρείται ότι στις ασυνέχειες που υπάρχουν στα γραφήματα για  $T = 1$  ms στο σημείο  $L_{min} \simeq 1600$  b και για  $T = 2$  ms στο σημείο  $L_{min} \simeq 4800$  b το Throughput χειροτερεύει περίπου 40%. Η χειροτέρευση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς η τιμή του  $L_{min}$  μεγαλώνει, σε αυτά τα σημεία η ακολουθία τεμαχίων δεδομένων μεταβαίνει από την περίπτωση Ia στην περίπτωση Ib (βλ. σχήμα 5.2, σελίδα 124). Σε αυτά τα δύο σενάρια, για  $L_{min}$  μεγαλύτερο μιας κρίσιμης τιμής, ο ενεργός χρόνος μετά τη μετάδοση του πλαισίου επιβεβαίωσης ack παραμένει ανεκμετάλλευτος και αυτό οδηγεί σε ακολουθία τεμαχίων δεδομένων μεγαλύτερης διάρκειας.

Αντίθετα, η ασυνέχεια στο γράφημα για  $T = 0.55$  ms στο σημείο  $L_{min} \simeq 200$  b οδηγεί σε

αυξημένο Throughput κατά το ίδιο περίπου ποσοστό. Αυτό είναι αποτέλεσμα του ότι σε αυτό το σενάριο, η μετάδοση μεγαλύτερων τεμαχίων δεδομένων, που καταλαμβάνουν το σύνολο της διάρκειας του ενεργού χρόνου (περίπτωση Ιβ), έχει σαν τελικό αποτέλεσμα μικρότερη συνολική διάρκεια της ακολουθίας τεμαχίων δεδομένων. Τέλος, στο σενάριο του σχήματος 6.1 για  $T = 5 \text{ ms}$  δεν υπάρχει ούτε τέτοια μετάβαση, ούτε ασυνέχεια μέχρι το σημείο  $L_{\min} \simeq 14400 \text{ b}$ , επειδή η ανισότητα που καθορίζει ότι η ακολουθία τεμαχίων δεδομένων έχει τη μορφή της περίπτωσης Ια είναι πάντα αληθής σε αυτό το εύρος της παραμέτρου  $L_{\min}$ .

Οι παραπάνω παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και σε άλλα σενάρια για τις περιπτώσεις ΙΙ και ΙΙΙ, όταν το  $L_{\min}$  αυξάνει και η ακολουθία τεμαχίων δεδομένων μεταβαίνει από την υπό-περίπτωση α στην υπό-περίπτωση β. Προφανώς, είναι εξαιρετικής σημασίας το να τεθεί η παράμετρος  $L_{\min}$ , ανά σενάριο εφαρμογής, εντός εκείνου του εύρους τιμών το οποίο οδηγεί στην πιο ευεργετική, σε όρους μικρότερης διάρκειας DFS, υπό-περίπτωση.

### 6.1.1 Επιλογή εύρους $L_{\min}$ - ευνοϊκής υποπερίπτωσης της DFS

Στη σημειογραφία των εξισώσεων που ακολουθούν, ο αριθμός εντός παρενθέσεων στη θέση του εκθέτη σηματοδοτεί σε ποια περίπτωση (I, II ή III) και υποπερίπτωση (α ή β) αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη παράμετρος, λ.χ.  $L_{\text{PF}}^{(I\alpha)}$  είναι τα bit δεδομένων ανά τεμάχιο δεδομένων για την περίπτωση Ια.

Όπως περιγράφηκε, ο σχηματισμός της DFS μπορεί να εξαναγκαστεί να πάρει τη μορφή οποιασδήποτε υποπερίπτωσης, θέτοντας την παράμετρο  $L_{\min}$  στο κατάλληλο εύρος τιμών και όταν και οι δύο υποπεριπτώσεις υπάρχουν για ένα συγκεκριμένο σενάριο. Όταν ο αριθμός  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}$ ,  $i = I, II, III$  των bit δεδομένων ανά τεμάχιο δεδομένων, που μπορεί να χωρέσει μετά το διάστημα  $\lambda$  των υποπεριπτώσεων α, είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό  $L_{\text{ut}}$ , τότε η μόνη δυνατή υποπερίπτωση είναι η α. Αυτό γιατί δεν μπορεί να τεθεί το  $L_{\min}$  σε τιμή μεγαλύτερη του  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}$ , κάτι που θα εξανάγκαζε τη μετάδοση του τεμαχίου να πραγματοποιηθεί στον επόμενο ενεργό χρόνο. Επίσης, όταν ο εναπομείνας ενεργός χρόνος, μετά την παρέλευση χρονικής διάρκειας  $\lambda$ , δεν είναι επαρκής ακόμα και για την ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας, τότε η μόνη εφικτή υποπερίπτωση για τη μορφή της DFS είναι η β. Αυτό γίνεται όταν  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} \leq 0$ .

Έτσι, συμπεραίνεται ότι οι δύο υποπεριπτώσεις επιλέγονται θέτοντας την παράμετρο  $L_{\min}$  εντός ενός από τα κάτωθι διαστήματα:

$$L_{\min}^{(\alpha)} \in (0, \max(0, \min(L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}, L_{\text{ut}}))], L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} > 0 \quad (6.2\alpha')$$

$$L_{\min}^{(\beta)} \in (\max(0, \min(L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}, L_{\text{ut}})), L_{\text{ut}}], L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} < L_{\text{ut}} \quad (6.2\beta')$$

Το διάστημα (6.2α') οδηγεί την DFS στη μορφή της υποπερίπτωσης α, ενώ το διάστημα (6.2β') οδηγεί την DFS στη μορφή της υποπερίπτωσης β. Το διάστημα (6.2α') δεν ορίζεται όταν  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} \leq 0$  κι επομένως δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί DFS με τη μορφή της υποπερίπτωσης α, ενώ το διάστημα (6.2β') δεν ορίζεται όταν  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} \geq L_{\text{ut}}$ .

Η συνθήκη για την οποία υπάρχουν και τα δύο παραπάνω διαστήματα κι επομένως είναι

δυνατό, με ρύθμιση της παραμέτρου  $L_{\min}$ , να επιλεγεί υποπερίπτωση για τη μορφή της DFS ορίζεται από την ανισότητα:

$$0 < L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} < L_{\text{ut}} \quad (6.3)$$

Υπό αυτήν τη συνθήκη, η επιλογή υποπερίπτωσης βασίζεται στην αποτίμηση της ανισότητας:

$$E[t_{\text{DFS}}^{(i\beta)}(x)] < E[t_{\text{DFS}}^{(i\alpha)}(x)] \quad (6.4)$$

Χρησιμοποιώντας τις (5.31) και (5.32) στην (5.30) και έπειτα στην (6.4) προκύπτει:

$$(n_{\text{T}}^{(i\beta)} TR - L_{\text{PF}}^{(i\beta)})E[n_{\text{F}}^{(i\beta)}(x)] + L_{\text{PF}}^{(i\beta)} < (n_{\text{T}}^{(i\alpha)} TR - L_{\text{PF}}^{(i\alpha)})E[n_{\text{F}}^{(i\alpha)}(x)] + L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} + \lambda^{(i\alpha)} R \quad (6.5)$$

Αν η (6.5) αποτιμηθεί ως αληθής, τότε η υποπερίπτωση  $\beta$  είναι η ευνοϊκή και η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου  $L_{\min}$  θα πρέπει να αναζητηθεί στο διάστημα (6.2β'). Αν αποτιμηθεί ως ψευδής, τότε η βέλτιστη  $L_{\min}$  θα πρέπει να αναζητηθεί στο διάστημα (6.2α').

Ο υπολογισμός της προσδοκώμενης τιμής  $E[n_{\text{F}}(x)]$  για κάθε υποπερίπτωση πραγματοποιείται αριθμητικά, χρησιμοποιώντας την (5.34) στο μεγαλύτερο δυνατό κοινό εύρος του  $x$  για τις δύο υποπεριπτώσεις. Το μέγιστο αυτό δυνατό εύρος επιτυγχάνεται για  $L_{\min}^{(\alpha)} = L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}$  και  $L_{\min}^{(\beta)} = L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} + 1$ .

Εναλλακτικά, για ευκολότερη αποτίμηση της ποσότητας  $E[n_{\text{F}}(x)]$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση  $E[n_{\text{F}}(x)] = \gamma + 0.5$  από την (5.35). Πλήθος αριθμητικών παραδειγμάτων έδειξε ότι η χρήση αυτής της προσέγγισης οδηγεί στα ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά την αποτίμηση της ανισότητας (6.5), με αυτό που προκύπτει αν χρησιμοποιηθεί ο ακριβής αριθμητικός υπολογισμός της  $E[n_{\text{F}}(x)]$ .

### 6.1.2 Εύρεση βέλτιστης τιμής $L_{\min}$

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1 και στο σχήμα 3.6, σελίδα 55, η επιλογή του ευνοϊκότερης μορφής για την DFS, μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της παραμέτρου  $L_{\min}$ , έχει μεγάλη σημασία. Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε πως, για τη ρύθμιση αυτή, αρκεί να επιλεγεί μια οποιαδήποτε τιμή από εκείνο το διάστημα (6.2), το οποίο αντιστοιχεί στην εκάστοτε υποπερίπτωση. Το σχήμα 6.1 δείχνει επίσης ότι η “μικρορύθμιση” της τιμής της παραμέτρου  $L_{\min}$ , εντός του επιλεχθέντος διαστήματος, δεν παρέχει μεγάλες διαφορές στην επίδοση του συστήματος. Παρόλα αυτά, αυτή η μικρορύθμιση είναι πολύ χρήσιμη, καθώς εξασφαλίζει ότι η μετάδοση ενός τεμαχίου δεδομένων θα έχει πάντα θετικό αντίκτυπο στην επίδοση και ότι ο επιπρόσθετος φόρτος, που συνοδεύει το μεταδιδόμενο τεμάχιο, δε θα προκαλέσει χειροτέρευση της. Με άλλα λόγια, μετά τη μικρορύθμιση ή μετά την εύρεση και χρήση της βέλτιστης τιμής  $L_{\min}$ , τα τερματικά δε θα δαπανούν ισχύ σε κάποια μετάδοση αν δεν είναι σίγουρο ότι αυτή θα ωφελήσει.

Μετά την επιλογή διαστήματος για την παράμετρο  $L_{\min}$ , η διαδικασία εύρεσης της συγκεκριμένης εκείνης τιμής που βελτιστοποιεί την επίδοση της iDCF μπορεί να ειπωθεί σαν ένα οριοθετημένο μονοδιάστατο διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στόχο την ελαχιστοποίηση

## Κεφάλαιο 6. Μελέτη Επίδοσης της iDCF

ηση της ποσότητας  $E[t_{\text{DFS}}(x)]$ , άρα τη μεγιστοποίηση του Throughput . Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με την εξοντωτική μέθοδο απαρίθμησης (EEM), η οποία όμως είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε υπολογιστικό φόρτο. Παρακάτω περιγράφεται μία απλούστερη μέθοδος, η οποία οδηγεί σε έναν υλοποιήσιμο αλγόριθμο, που μπορεί να ενσωματωθεί στα τερματικά.

Έστω  $z, z \in N^*$  ο αριθμός των bit δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα τεμάχιο δεδομένων στον υπολειπόμενο ενεργό χρόνο, δηλαδή:

$$t_{\text{oh}} + \frac{L_{\text{H}} + z}{R} + \delta = t_{\text{utBoundary}} - t_{\text{current}}, \quad (6.6)$$

όπου  $t_{\text{utBoundary}}$  το χρονικό σημείο έναρξης της επερχόμενης διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών και  $t_{\text{current}}$  η τρέχουσα χρονική στιγμή εκκίνησης της μετάδοσης του τεμαχίου δεδομένων. Αν  $z \geq L_{\text{min}}$ , το πλαίσιο δεδομένων τεμαχίζεται δυναμικά και η μετάδοση εκκινεί για τα πρώτα  $z$  bit δεδομένων. Αν  $z < L_{\text{min}}$ , τότε η μετάδοση θα εκκινήσει μετά το πέρας της διακοπής.

Για να είναι ευνοϊκή η απόφαση να μην αποσταλεί τεμάχιο δεδομένων τη δεδομένη στιγμή, δηλαδή να μην πραγματοποιηθεί δυναμικός τεμαχισμός, θα πρέπει ο συνολικός χρόνος που θα δαπανηθεί για την αποστολή ολόκληρου του ωφέλιμου φόρτου να είναι μικρότερος από αυτόν που θα προέκυπτε, αν πραγματοποιιούταν δυναμικός τεμαχισμός, δηλαδή:

$$\begin{aligned} t_{\text{utBoundary}} - t_{\text{current}} + \tau + t_{\text{DFS}}(L_{\text{ut}}) &< t_{\text{DFS}}(z) \\ \Rightarrow t_{\text{oh}} + \frac{L_{\text{H}} + z}{R} + \tau + t_{\text{DFS}}(L_{\text{ut}}) &< t_{\text{DFS}}(z) \end{aligned} \quad (6.7)$$

Για  $L_{\text{ut}} < L_{\text{P}}$  προκύπτει η ανισότητα:

$$\left\lceil \frac{L_{\text{P}} - z}{L_{\text{PF}}} \right\rceil - \frac{z/R}{n_{\text{T}}T - L_{\text{PF}}/R} > \frac{\tau + t_{\text{oh}} + L_{\text{H}}/R + \delta}{n_{\text{T}}T - L_{\text{PF}}/R} + n_{\text{F}}(L_{\text{ut}}) \quad (6.8)$$

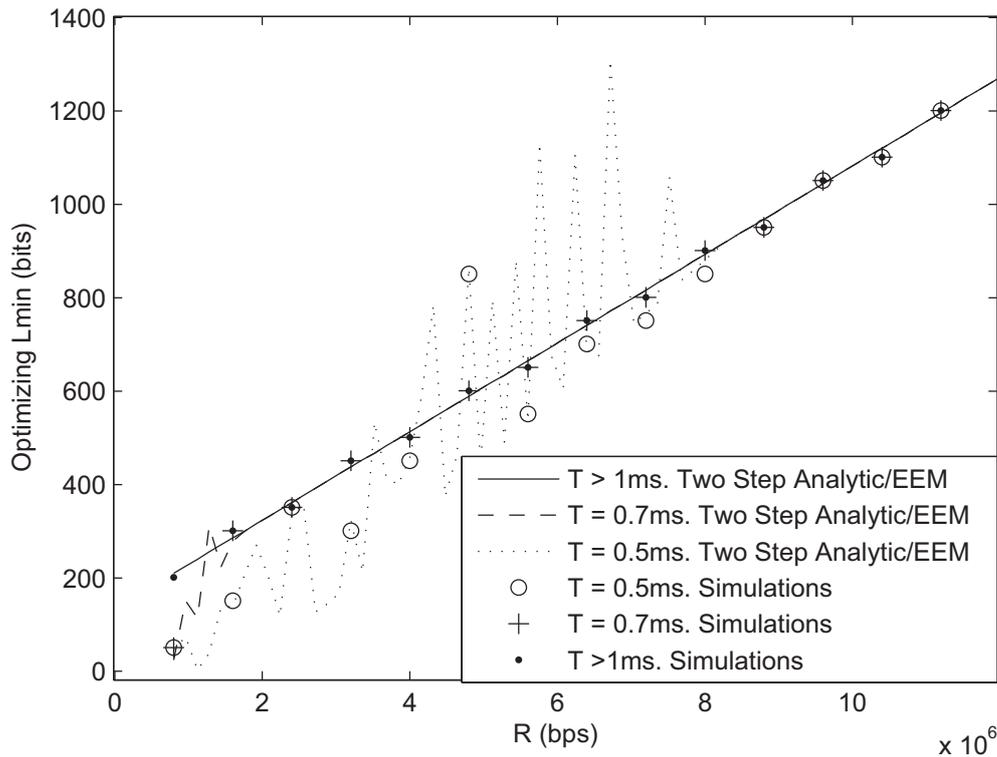
και για  $L_{\text{ut}} = L_{\text{P}}$  η:

$$\left\lceil \frac{L_{\text{P}} - z}{L_{\text{PF}}} \right\rceil - \frac{z/R}{n_{\text{T}}T - L_{\text{PF}}/R} > \frac{T - \lambda - L_{\text{PF}}/R}{n_{\text{T}}T - L_{\text{PF}}/R} \quad (6.9)$$

Οι (6.8) και (6.9) μπορούν να λυθούν αριθμητικά. Εξαιτίας του αρνητικού πρόσημου εμπρός από το  $z$ , η λύση αυτή σημαίνει ότι θα βρεθεί ένα  $K, K \in N^*$  τέτοιο ώστε για  $z \leq K$ , οι ανισότητες θα ικανοποιούνται. Σημειώνεται εδώ ότι δεν υπάρχουν εκθέτες στα μεγέθη  $L_{\text{PF}}$ ,  $n_{\text{T}}$  και  $n_{\text{F}}(x)$ , όπως συμβαίνει στην εξίσωση (6.5), καθότι έχει ήδη αποφασιστεί το διάστημα μέσα στο οποίο αναζητείται η βέλτιστη τιμή  $L_{\text{min}}$  και επομένως οι τιμές αυτών των μεγεθών έχουν καθοριστεί από αυτό.

Η τιμή του  $L_{\text{min}}$  που αναζητείται μπορεί να είναι σε σχέση με το  $K$  είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη είτε ίση:

- Αν τεθεί  $L_{\text{min}} > K$ , τότε θα υπάρξουν  $z$  μέσα στο διάστημα  $K < z < L_{\text{min}}$ , για τα οποία θα αποφασιστεί να αποσταλεί τεμάχιο δεδομένων, αλλά αυτό δεν οδηγεί σε μικρότερη



**Σχήμα 6.2:** Τιμή της παραμέτρου  $L_{min}$  που βελτιστοποιεί το *Throughput* της iDCF, συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης για διαφορετικές περιόδους  $T$

διάρκεια της DFS, εφόσον  $z > K$  και συνεπώς οι (6.8) και (6.9) δεν ικανοποιούνται.

- Αν τεθεί  $L_{min} < K$ , τότε θα υπάρξουν  $z$  μέσα στο διάστημα  $L_{min} < z < K$ , για τα οποία αποφασίζεται να αποσταλεί τεμάχιο δεδομένων πριν τη διακοπή, αλλά το να μην αποστέλλονταν θα οδηγούσε σε μικρότερη διάρκειας DFS, εφόσον  $z < K$  και οι ανισότητες ικανοποιούνται.

Τα παραπάνω δεδομένα οδηγούν στο συμπέρασμα πως η τιμή, που εξασφαλίζει ότι η απόφαση για αποστολή (ή όχι) τεμαχίου δεδομένων πριν τη διακοπή θα είναι πάντα ευνοϊκή, είναι η τιμή  $L_{min}^{opt} = K$ .

Σε όλα τα εξετασθέντα σενάρια, η παραπάνω μέθοδος εύρεσης της τιμής  $L_{min}^{opt}$  έδωσε τα ίδια αποτελέσματα με τη μέθοδο EEM. Η παραπάνω μέθοδος καλείται μέθοδος δύο βημάτων, επειδή αποτελείται από δύο διακριτούς υπολογισμούς: α) την εύρεση του διαστήματος μέσα στο οποίο θα αναζητηθεί η τιμή  $L_{min}^{opt}$  και β) την εύρεση της τιμής της παραμέτρου μέσα σε αυτό το διάστημα.

Στο σχήμα 6.2 απεικονίζεται η τιμή  $L_{min}^{opt}$  σαν συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης για 3 διαφορετικές τιμές της περιόδου  $T$ . Οι τιμές που παρουσιάζονται προκύπτουν από τη μέθοδο δύο βημάτων, από την EEM καθώς και από προσομοιώσεις. Οι τιμές της μεθόδου δύο βημάτων, ταυτίζονται με αυτές της EEM. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν αυξάνοντας, σε κάθε σενάριο, την τιμή της παραμέτρου  $L_{min}$  ανά 50 b και στη συνέχεια επιλέγοντας εκείνη την τιμή

**Algorithm 1** Υλοποίηση σε ψευδο-κώδικα της μεθόδου δύο βημάτων που περιγράφεται στο κείμενο, ο οποίος επιστρέφει την τιμή της παραμέτρου  $L_{\min}$  που ελαχιστοποιεί τη διάρκεια DFS, βελτιστοποιώντας έτσι το Throughput.

---

```

1:  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} \leftarrow (5.28)$  ▷ 1ο Βήμα
2: if  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} \leq 0$  ή  $L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} \geq L_{\text{ut}}$  then ▷ Μοναδική ΥποΠερίπτωση
3:    $y \leftarrow L_{\text{ut}} - 1$ 
4: else ▷ Επιλογή Ανάμεσα σε (α) και (β)
5:    $L_{\min}^{(i\alpha)} \leftarrow L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}, L_{\min}^{(i\beta)} \leftarrow L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} + 1$ 
6:    $Q_a = (n_{\text{T}}^{(i\alpha)} TR - L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}) \frac{2L_{\text{P}} - L_{\text{ut}} - L_{\min}^{(i\alpha)} + L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}}{2L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}} + L_{\text{PF}}^{(i\alpha)} + \lambda^{(i\alpha)} R$ 
7:    $Q_b = (n_{\text{T}}^{(i\beta)} TR - L_{\text{PF}}^{(i\beta)}) \frac{2L_{\text{P}} - L_{\text{ut}} - L_{\min}^{(i\beta)} + L_{\text{PF}}^{(i\beta)}}{2L_{\text{PF}}^{(i\beta)}} + L_{\text{PF}}^{(i\beta)}$ 
8:   if  $Q_b < Q_a$  then ▷ η υποπερίπτωση (β) είναι Ευνοϊκότερη
9:      $y \leftarrow L_{\text{ut}} - 1$ 
10:  else ▷ η υποπερίπτωση (α) είναι Ευνοϊκότερη
11:     $y \leftarrow L_{\text{PF}}^{(i\alpha)}$ 
12:  end if
13: end if
14: repeat ▷ 2ο Βήμα
15:    $y \leftarrow y - 1$ 
16:   αποτίμηση της (6.8) ή (6.9)
17: until (6.8) ή (6.9) Αληθής
18:  $L_{\min}^{\text{opt}} \leftarrow y$ 

```

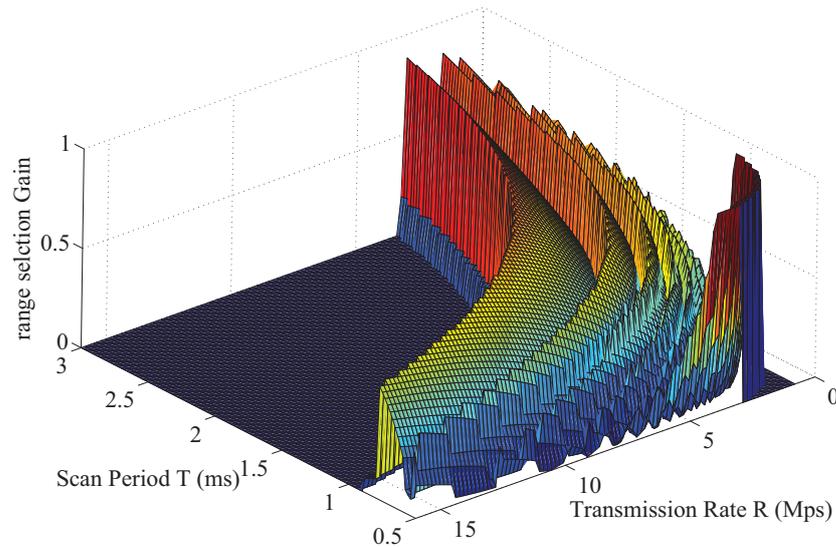
---

που απέδωσε το μεγαλύτερο Throughput. Στο σχήμα παρατηρείται ότι στο συγκεκριμένο σενάριο, για  $T > 1$  ms και για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης ανεξαρτήτως της περιόδου  $T$ , η τιμή  $L_{\min}^{\text{opt}}$  έχει μια γραμμική εξάρτηση ως προς το ρυθμό μετάδοσης. Σε αυτές τις περιοχές του ρυθμού μετάδοσης δεν εξαρτάται ούτε και από την περίοδο, όπως δεν εξαρτάται από το  $L_{\text{P}}$  και το  $n$  σε όλες τις περιπτώσεις. Για χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, όμως, η γραμμική εξάρτηση από το  $R$  χάνεται και ταυτόχρονα το  $L_{\min}^{\text{opt}}$  αρχίζει να εξαρτάται και από την περίοδο  $T$ . Οι παλινδρομήσεις του γραφήματος, που παρατηρούνται έντονα στο σενάριο για  $T = 0.5$  ms, οφείλονται στο ότι αλλάζει συνεχώς το ποια υποπερίπτωση (α' ή β') είναι η ευνοϊκότερη και επομένως το  $L_{\min}^{\text{opt}}$  εναλλάσσεται μεταξύ των διαφορετικών διαστημάτων (6.2), ώστε να εξαναγκάζει κάθε φορά την ευνοϊκότερη υποπερίπτωση.

Η μέθοδος δύο βημάτων που περιγράφηκε, μπορεί να υλοποιηθεί στα τερματικά με τον Αλγόριθμο 1 που δίνεται σε ψευδοκώδικα. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί την προσέγγιση της (5.35) για τον υπολογισμό του  $E[n_{\text{F}}(x)]$ . Επίσης, στον ψευδοκώδικα διακρίνονται τα δύο διακριτά βήματα, α) επιλογής διαστήματος και β) μικρορύθμισης.

### 6.1.3 Κέρδος από βελτιστοποίηση με την παράμετρο $L_{\min}$

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάστηκε η τιμή  $L_{\min}$  που μεγιστοποιεί το Throughput της iDCF για κάθε σενάριο. Η τιμή αυτή μπορεί εύκολα να βρεθεί ανεξάρτητα σε κάθε τερματικό με τη χρήση του Αλγορίθμου 1. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται από τη χρήση της βελτιστοποίησης



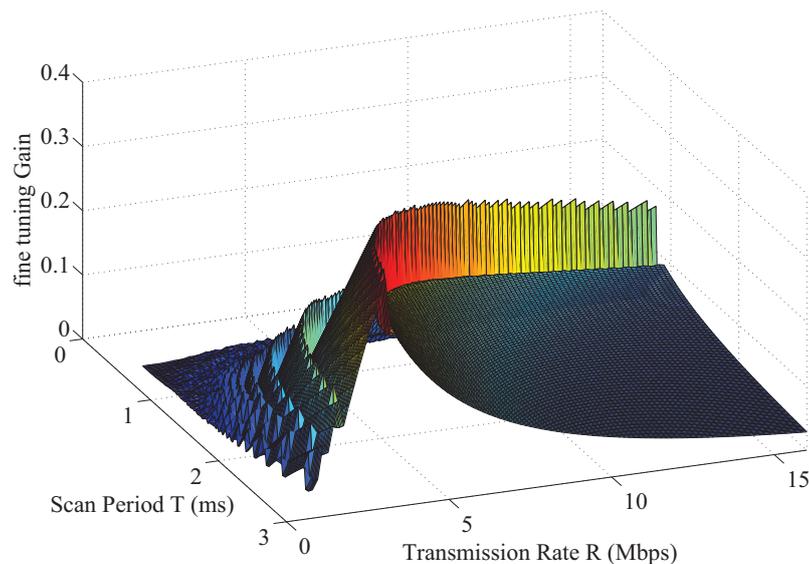
**Σχήμα 6.3:** Κέρδος από τη χρήση του βήματος 1 του αλγορίθμου, επιλογής διαστήματος τιμής για την παράμετρο  $L_{min}$ .  $L_P = 8196$  b,  $n = 30$ ,  $\tau = 200$   $\mu$ s

με την παράμετρο  $L_{min}$  δεν είναι ίδια σε κάθε σενάριο. Περισσότερο εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης και την περίοδο των διακοπών, για σταθερή διάρκεια διακοπής  $\tau$ . Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το κέρδος από τη χρήση της βελτιστοποίησης αυτής.

Το κέρδος της χρήσης της βελτιστοποίησης εξετάζεται ξεχωριστά για κάθε βήμα της μεθόδου δύο βημάτων. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται το κέρδος που προκύπτει από την επιλογή διαστήματος (1ο βήμα Αλγορίθμου) τιμής της παραμέτρου, συναρτήσει της περιόδου  $T$  και του ρυθμού μετάδοσης. Το κέρδος επιλογής διαστήματος υπολογίζεται σαν ο λόγος της μέσης τιμής του Throughput, όταν η παράμετρος  $L_{min}$  παίρνει τιμή στο ευνοϊκότερο διάστημα επιλογής τιμών της παραμέτρου ( (6.2α') ή (6.2β') ), προς τη μέση τιμή του Throughput, όταν η παράμετρος δέχεται τιμή από το άλλο διάστημα ( (6.2β') ή (6.2α') αντίστοιχα). Όταν μόνο η μία υποπερίπτωση μορφής της DFS είναι εφικτή, δηλαδή όταν ορίζεται μόνο ένα από τα δύο διαστήματα (6.2), τότε το κέρδος αυτό είναι μηδενικό. Το κέρδος επιλογής διαστήματος χαρακτηρίζεται από τη γενική τάση να αυξάνεται για χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και μεγαλύτερες τιμές της περιόδου  $T$ . Παρατηρούνται συγκεκριμένες κορυφές σε αυτήν την τάση αύξησης, οι οποίες φτάνουν σε ορισμένα σενάρια έως και 80%.

Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται το κέρδος που προκύπτει από τη χρήση του βήματος 2 του Αλγορίθμου, επιλογής τιμής της παραμέτρου από το ευνοϊκότερο διάστημα. Αυτό υπολογίζεται από το λόγο του μέγιστου Throughput, που προκύπτει με την τιμή  $L_{min}^{opt}$ , προς το ελάχιστο Throughput, μέσα στο ίδιο διάστημα. Οι τιμές του κέρδους αυτού είναι σαφώς μικρότερες, με το μέγιστο κέρδος να μην ξεπερνά την τιμή 35%. Η τάση αύξησης του κέρδους για χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και για μεγαλύτερες τιμές τις περιόδου  $T$  είναι επίσης παρούσα σε αυτό το διάγραμμα.

Τα σχήματα 6.3 και 6.4 παρέχουν, επίσης, εκείνους τους συνδυασμούς  $T, R$ , για το συγ-



**Σχήμα 6.4:** Κέρδος από τη χρήση του βήματος 2 του αλγορίθμου, επιλογής τιμής για την παράμετρο  $L_{min}$  από το ευνοϊκότερο διάστημα.  $L_P = 8196$  b,  $n = 30$ ,  $\tau = 200 \mu s$

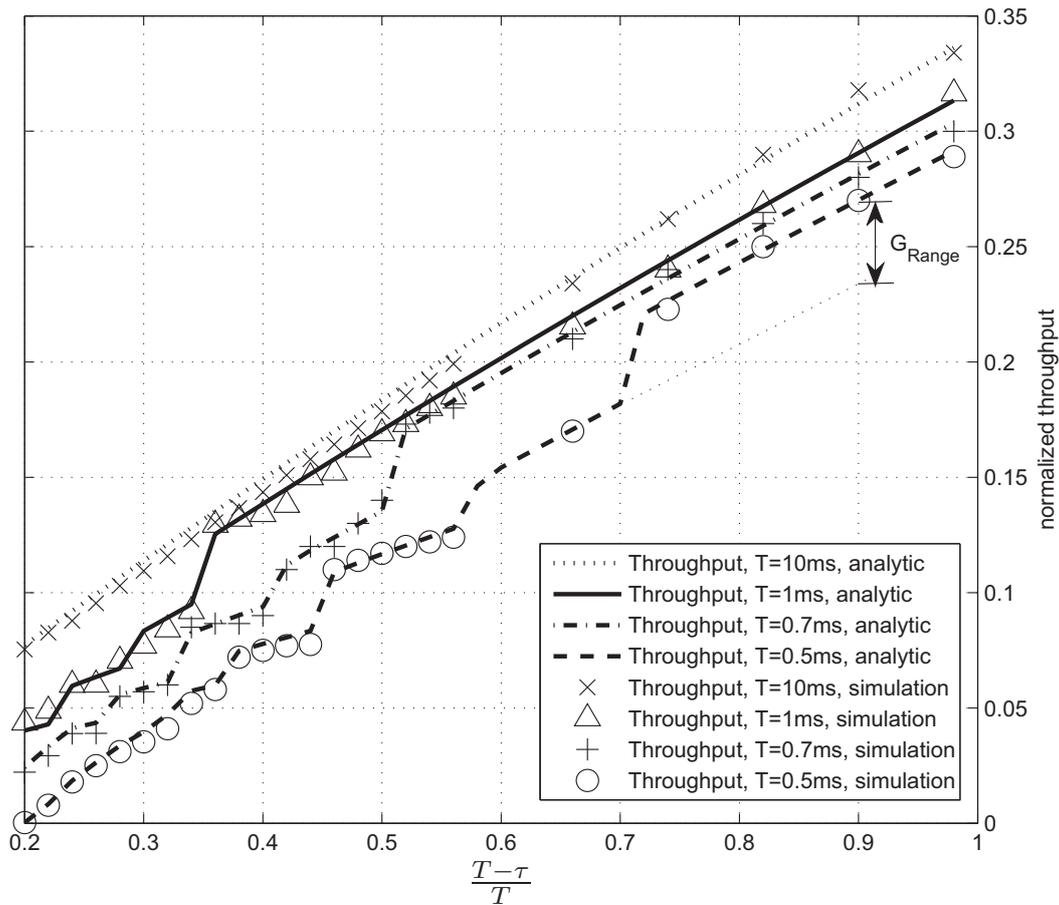
κεκριμένο σενάριο, στους οποίους η χρήση του αλγορίθμου δεν παρέχει κανένα κέρδος. Για μικρές τιμές της περιόδου  $T$  και του ρυθμού μετάδοσης  $R$  καθώς επίσης και για μεγάλες τιμές των  $T$  και  $R$  το κέρδος από την επιλογή διαστήματος είναι μηδενικό. Στον πρώτο συνδυασμό δεν υπάρχει υποπερίπτωση  $\alpha'$  στη μορφή της DFS, επειδή, μετά το χρονικό διάστημα  $\lambda$ , δεν μπορεί να μεταδοθεί ούτε η ελάχιστη ποσότητα δεδομένων. Στο δεύτερο συνδυασμό δεν υπάρχει υποπερίπτωση  $\beta'$  στο σχηματισμό της DFS, διότι ολόκληρο το πλαίσιο δεδομένων μπορεί πάντα να μεταδοθεί μετά το χρονικό διάστημα  $\lambda$ . Το κέρδος επιλογής τιμής μειώνεται, όταν οι τιμές των  $T$  και  $R$  μεγαλώνουν και μετά από μια συγκεκριμένη καμπύλη  $(T, R)$ , στην οποία το κέρδος παρουσιάζει τη μέγιστή του τιμή.

Οι παραπάνω συνδυασμοί μεγάλων  $(T, R)$ , στους οποίους το κέρδος χρήσης του αλγορίθμου είναι μηδενικό, ή πλησιάζει το μηδέν, δεν είναι εφικτοί σε ρεαλιστικά σενάρια. Η παρουσία Πρωτευόντων χρηστών επιβάλλει συχνές διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών. Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, υπονοούν εκτέλεση ανίχνευσης σε μεγάλο εύρος ζώνης, που έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη καθυστέρηση της διαδικασίας ανίχνευσης και άρα μικρότερους ενεργούς χρόνους.

Επομένως η βελτιστοποίηση της απόδοσης της iDCF, που είναι υλοποιήσιμη τοπικά σε κάθε τεμαχικό, μέσω της χρήσης του Αλγορίθμου δύο βημάτων που παρουσιάστηκε, είναι χρήσιμη σε ρεαλιστικά σενάρια Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

## 6.2 Η διάρκεια διακοπής $\tau$

Οι παράμετροι της επικαλυπτικής / διακοπτόμενης λειτουργίας διάρκεια της διακοπής  $\tau$  και περίοδος της διακοπής  $T$  επηρεάζουν ευθέως τη διάρκεια του ενεργού χρόνου. Σε αυτήν τη

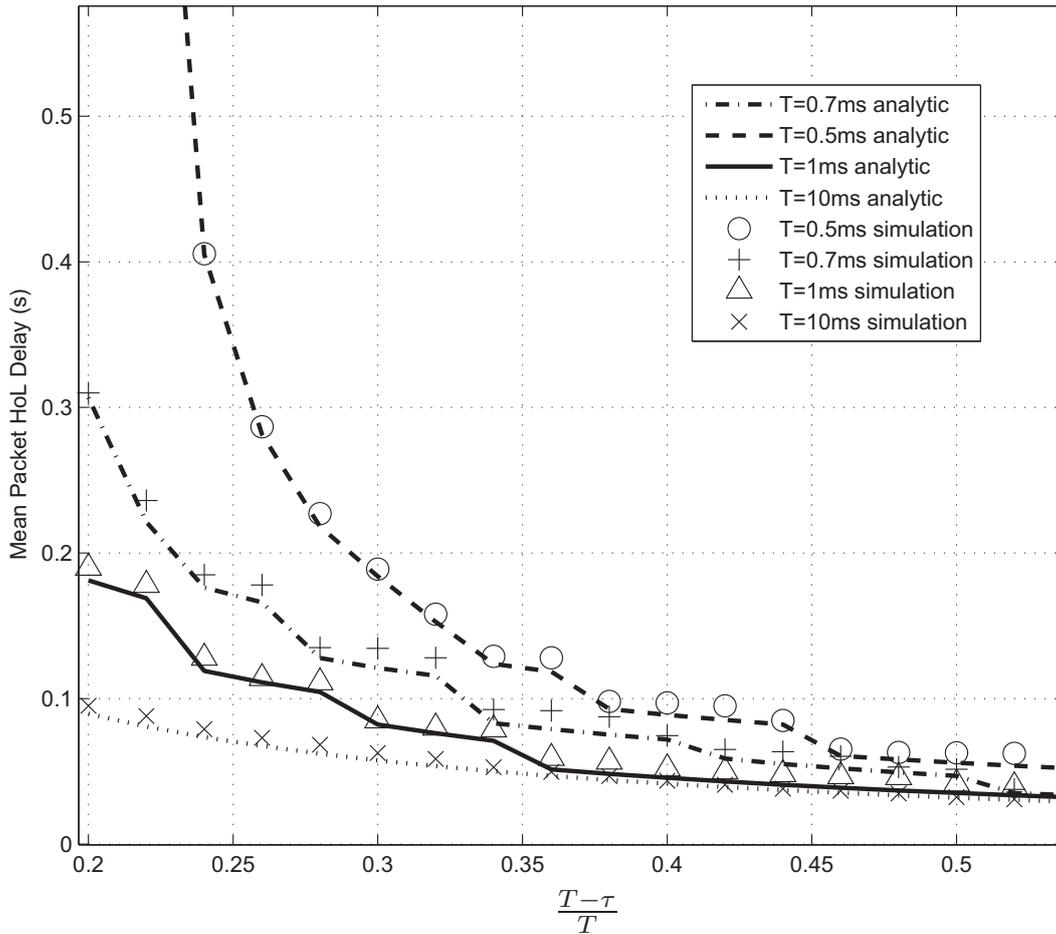


Σχήμα 6.5: Throughput συναρτήσει του ποσοστού ενεργού χρόνου επί της διάρκειας της περιόδου, για διαφορετικές τιμές διάρκειας περιόδου

διάρκεια το διακοπόμενο πρωτόκολλο επιχειρεί μεταδόσεις, συνεπώς τότε γίνονται οι ενέργειες που συνεισφέρουν στο Throughput του συστήματος.

Όπως είναι και διαισθητικά αναμενόμενο, αν κρατάμε σταθερή την τιμή της περιόδου  $T$  και μεταβάλλουμε τη διάρκεια της διακοπής  $\tau$ , το Throughput θα επηρεάζεται γραμμικά ως προς τη μεταβολή του  $\tau$ . Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 6.5 το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή του Throughput συναρτήσει του ποσοστού του ενεργού χρόνου επί της διάρκειας της περιόδου  $\frac{T-\tau}{T}$ , για διαφορετικές τιμές της περιόδου  $T$ . Το Throughput, που παρουσιάζεται στο συγκεκριμένο σχήμα, είναι για μη κορεσμένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση με χαρακτηριστικά  $\lambda = 5/s$ ,  $\phi = 0.95$ ,  $L_P = 2048$  b, για ρυθμό μετάδοσης  $R = 8$  Mbps και αριθμό ανταγωνιζόμενων τεμαχικών  $n = 30$ , ενώ για κάθε τιμή της περιόδου και της διάρκειας διακοπής, το  $L_{min}$  τίθεται στην τιμή που βελτιστοποιεί την επίδοση. Η τάση γραμμικής μείωσης του Throughput σε σχέση με την αύξηση της διάρκειας διακοπής (μείωση του ενεργού χρόνου) είναι φανερή.

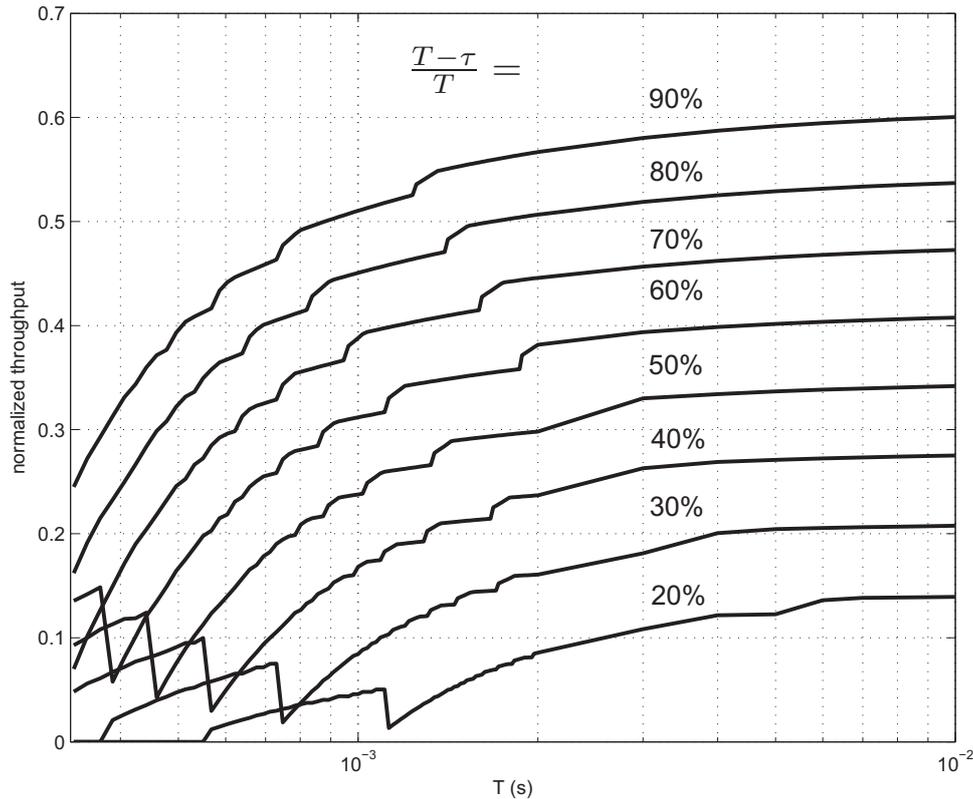
Συγκεκριμένες ασυνέχειες, στις οποίες η τιμή του Throughput μεταβάλλεται απότομα, παρουσιάζονται σε κάθε σενάριο καθώς η ακολουθία τεμαχίων δεδομένων μεταβαίνει από περίπτωση σε περίπτωση (βλ. σχήμα 5.2, σελίδα 124). Κατά τη μετακίνηση στο διάγραμμα προς



**Σχήμα 6.6:** Μέση καθυστέρηση πλαισίου HoL συναρτήσει του ποσοστού ενεργού χρόνου επί της διάρκειας της περιόδου, για διαφορετικές τιμές διάρκειας περιόδου

μικρότερους ενεργούς χρόνους, οι μεταβάσεις αυτές εκκινούν νωρίτερα για μικρότερες τιμές της περιόδου διακοπής  $T$ . Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται και η χρησιμότητα της ορθής επιλογής εύρους τιμών (1ο βήμα αλγορίθμου) της παραμέτρου  $L_{min}$ . Μία τιμή που θα εξανάγκαζε το σχηματισμό της DFS στη μη ευνοϊκή υποπερίπτωση λειτουργίας θα είχε σαν αποτέλεσμα την τοποθέτηση του Throughput στην ιδανική προέκταση της ευθείας τιμών Throughput της μη ευνοϊκής υποπερίπτωσης. Αυτό έχει απεικονιστεί στο σχήμα 6.5 για το σενάριο  $T = 0.5 \text{ ms}$ , στο οποίο παρουσιάζεται σχηματικά το κέρδος  $G_{Range}$  από την επιλογή ευνοϊκής υποπερίπτωσης.

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει του μεγέθους  $\frac{T-\tau}{T}$ , για το ίδιο σενάριο και για τις ίδιες τιμές περιόδου. Η εξάρτηση της καθυστέρησης μετάδοσης πλαισίου HoL από τη διάρκεια της διακοπής  $\tau$  δεν είναι γραμμική. Καθώς η διάρκεια διακοπής αυξάνει (μείωση ενεργού χρόνου) η μέση καθυστέρηση πλαισίου HoL μεγαλώνει με αυξανόμενο ρυθμό. Παρατηρούμε ότι για μικρότερες τιμές της περιόδου διακοπών η επίδραση της αύξησης της διάρκειας διακοπών είναι ισχυρότερη από την επίδραση σε μεγαλύτερες τιμές της περιόδου, καθότι η μέση καθυστέρηση πλαισίου HoL αυξάνει τα-

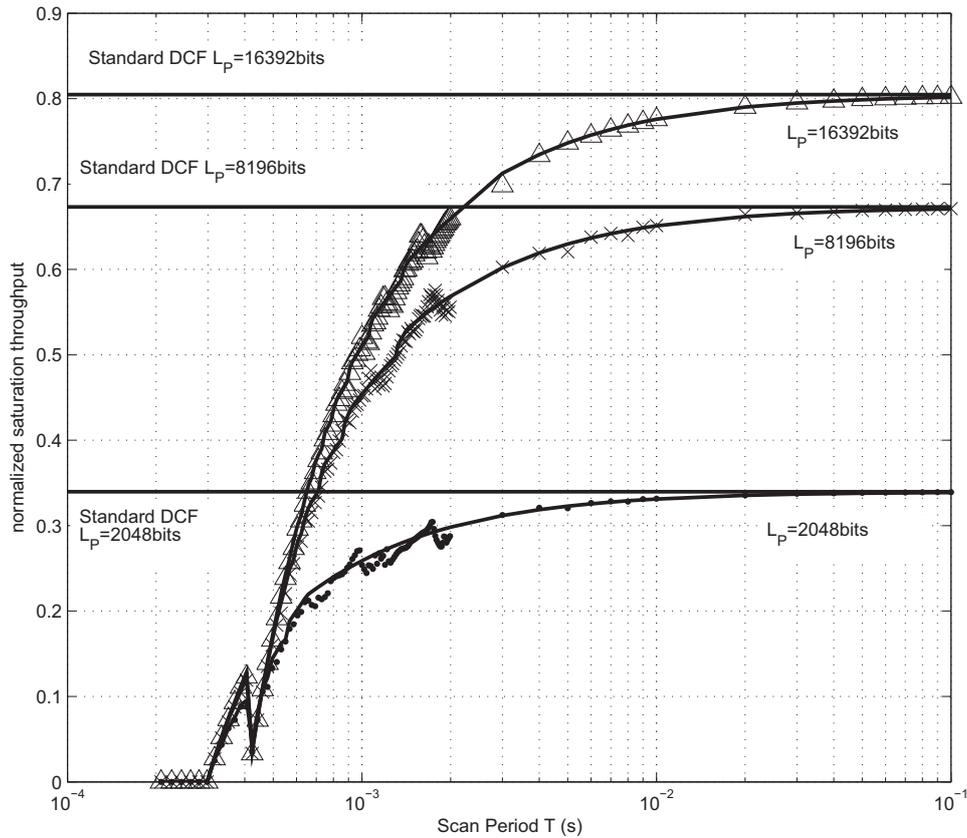


**Σχήμα 6.7:** Επίδραση στο Throughput κορεσμού της μεταβολής της περιόδου διακοπής και της διάρκειας διακοπής κατά το ίδιο ποσοστό, ώστε το ποσοστό ενεργού χρόνου επί της περιόδου να παραμένει σταθερό

χύτερα. Επίσης, παρατηρούνται κι εδώ ασυνέχειες στις καμπύλες, με απότομες μειώσεις στη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL καθώς κινούμαστε προς μεγαλύτερες διάρκειες ενεργού χρόνου, οι οποίες οφείλονται στις μεταβάσεις του σχηματισμού DFS από τη μια υποπερίπτωση στην άλλη. Προεκτείνοντας κι εδώ τις καμπύλες των μη ευνοϊκών υποπεριπτώσεων, μπορούμε να αντιληφθούμε το κέρδος της ορθής επιλογής εύρους τιμών της παραμέτρου  $L_{\min}$ , που αφορά τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL.

### 6.3 Η περίοδος διακοπής $T$

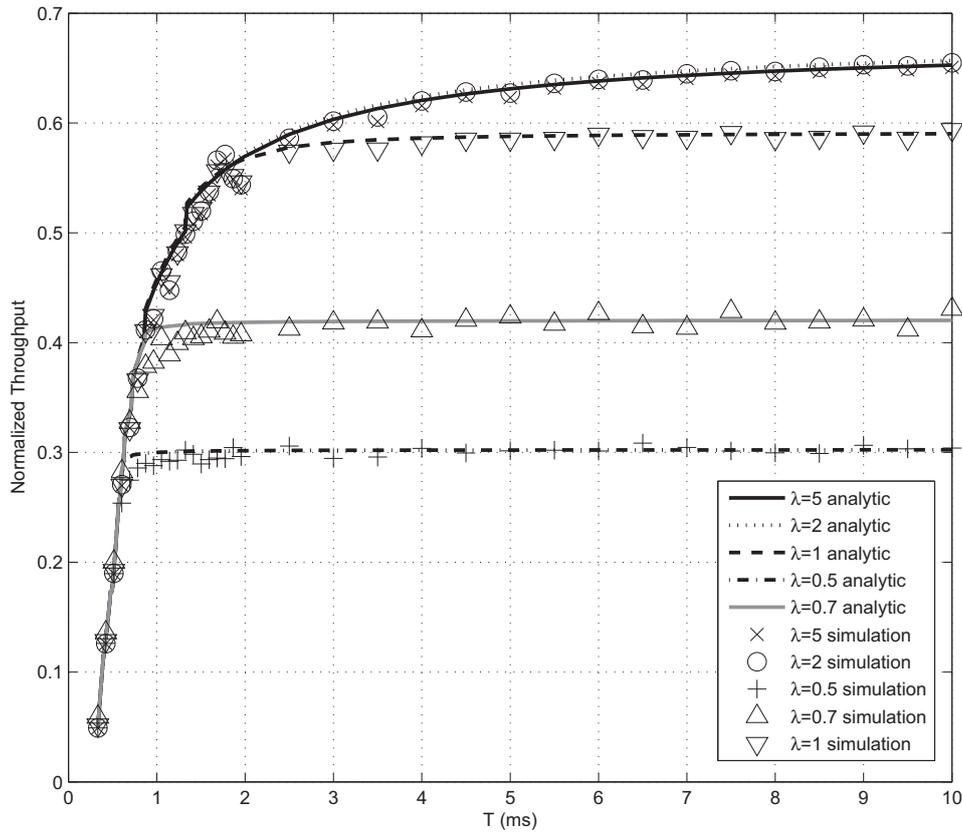
Παρόλο που η περίοδος διακοπών  $T$ , όπως και η διάρκεια διακοπών  $\tau$ , επηρεάζει ευθέως τη διάρκεια του ενεργού χρόνου, αλλά και το ποσοστό ενεργού χρόνου επί της διάρκειας της περιόδου διακοπών, η επίδρασή της στο Throughput του διακοπτόμενου πρωτοκόλλου δεν είναι γραμμική. Η περίοδος διακοπών επηρεάζει εντονότερα την επίδοση της iDCF, καθότι όσο συχνότερες είναι οι διακοπές τόσο εντονότερα γίνονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της διακοπόμενης λειτουργίας, όπως ο δυναμικός τεμαχισμός πλαισίου δεδομένων, που επιφέρει επιπρόσθετο φόρτο και οι ανεχμετάλλευτοι υπολειπόμενοι ενεργοί χρόνοι.



Σχήμα 6.8: Throughput κορεσμού συναρτήσει της περιόδου διακοπών  $T$  για σταθερή διάρκεια  $\tau$  και διαφορετικές τιμές του ωφέλιμου φόρτου  $L_P$ .

Η μεγαλύτερη επίδραση στην επίδοση της περιόδου  $T$  σε σχέση με αυτήν της διάρκειας διακοπής  $\tau$ , παρουσιάζεται και στο σχήμα 6.7. Οι παράμετροι στο σενάριο του σχήματος αυτού είναι  $R = 8\text{Mbps}$ ,  $L_P = 8196\text{b}$ ,  $L_{\min} = 100\text{b}$  και  $n = 30$ . Το Throughput, που εδώ υπολογίζεται μόνο με το αναλυτικό μοντέλο, είναι το Throughput κορεσμού. Σε κάθε καμπύλη, διατηρείται σταθερό το ποσοστό ενεργού χρόνου επί της περιόδου διακοπής, δηλαδή η ποσότητα  $\frac{T-\tau}{T}$ , ενώ μεταβάλλεται τόσο η περίοδος διακοπής όσο και η διάρκεια διακοπής. Το αποτέλεσμα είναι ότι με μείωση της περιόδου  $T$  παρατηρείται μείωση της επίδοσης παρόλο που η ποσότητα  $\frac{T-\tau}{T}$  διατηρείται σταθερή κι επομένως μειώνεται και η διάρκεια  $\tau$ . Η μείωση αυτή, οφείλεται στην αύξηση της αρνητικής επίδρασης που έχει η διακοπόμενη λειτουργία στην iDCF. Αντίθετα η μείωση της επίδοσης στο σχήμα 6.5 με την αύξηση της διάρκειας διακοπής  $\tau$  οφείλεται στην ευθεία επίπτωση που αυτή έχει στο ποσοστό ενεργού χρόνου επί της περιόδου, γι' αυτό και είναι γραμμική.

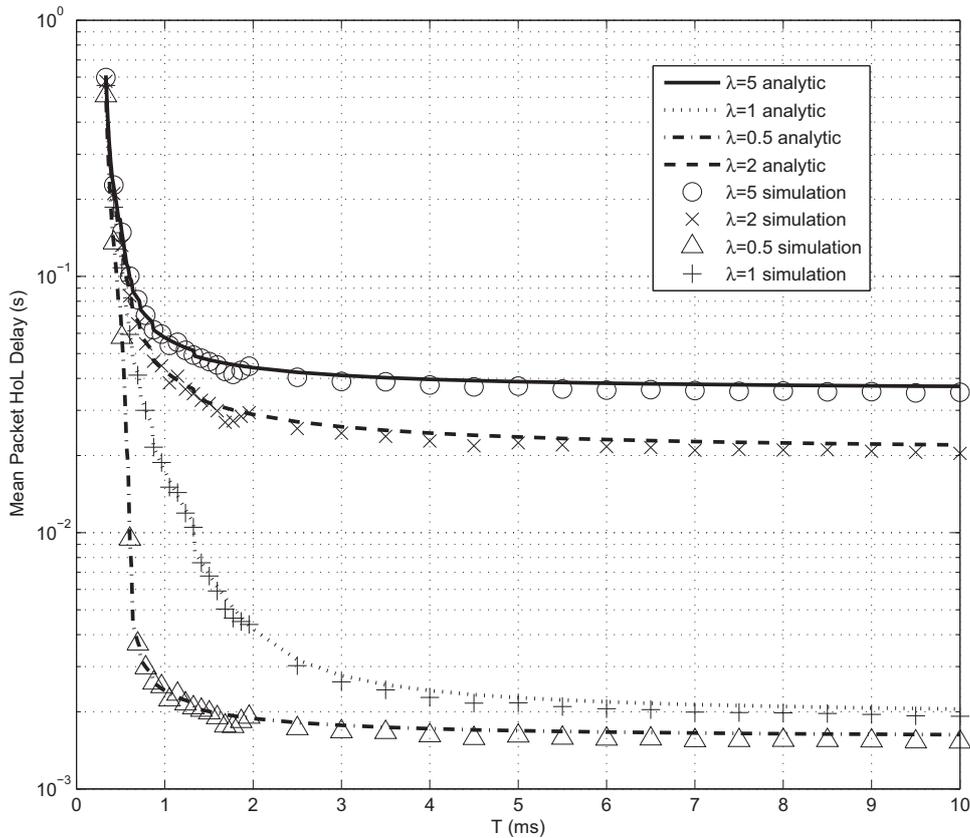
Στα επόμενα σχήματα η διάρκεια διακοπής τίθεται σταθερά σε  $\tau = 200\ \mu\text{s}$ , τιμή που εξασφαλίζει την ύπαρξη αρκετού ενεργού χρόνου για την πραγματοποίηση μεταδόσεων, σύμφωνα με τους περιορισμούς των εξισώσεων (5.20), σε όλο το εξεταζόμενο εύρος τιμών της περιόδου  $T$  για  $R = 8\text{Mbps}$ .



**Σχήμα 6.9:** Throughput συναρτήσει της περιόδου διακοπών για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται το Throughput κορεσμού συναρτήσει της περιόδου διακοπών  $T$  για διαφορετικές τιμές του ωφέλιμου φόρτου  $L_p$ . Κι εδώ αποδεικνύεται ότι η επίδοση της iDCF επηρεάζεται έντονα από την τιμή της παραμέτρου  $T$  της επικαλυπτικής / διακοπόμενης λειτουργίας. Η επίδοση χειροτερεύει πολύ για μικρές τιμές της περιόδου, στις οποίες οι συχνές διακοπές κάνουν έντονα τα χαρακτηριστικά της διακοπόμενης λειτουργίας. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες τιμές της περιόδου, όπου τα φαινόμενα αυτά απαντώνται όλο και αραιότερα, η επίδοση της iDCF πλησιάζει ασυμπτωτικά το άνω της όριο, το οποίο καθορίζεται από την επίδοση της λειτουργίας DCF του προτύπου IEEE 802.11. Για μεγάλες τιμές της περιόδου, η διακοπόμενη λειτουργία δεν έχει μεγάλη επίδραση στην επίδοση του συστήματος. Από κάποια τιμή της περιόδου διακοπών και κάτω το Throughput μηδενίζεται, καθότι δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες (5.20), επομένως δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση μεταδόσεων. Στο σχήμα, επίσης, δίνονται τρεις διαφορετικές καμπύλες οι οποίες δείχνουν την επίδραση της αύξησης του ωφέλιμου φόρτου των πλαισίων δεδομένων στο Throughput κορεσμού του συστήματος.

Μία άλλη παρατήρηση στο σχήμα αυτό, η οποία ισχύει και για το σχήμα 6.6, είναι η παλινδρόμηση των καμπυλών σε μια συγκεκριμένη τιμή της περιόδου. Για περίπου  $T \simeq 500 \mu s$

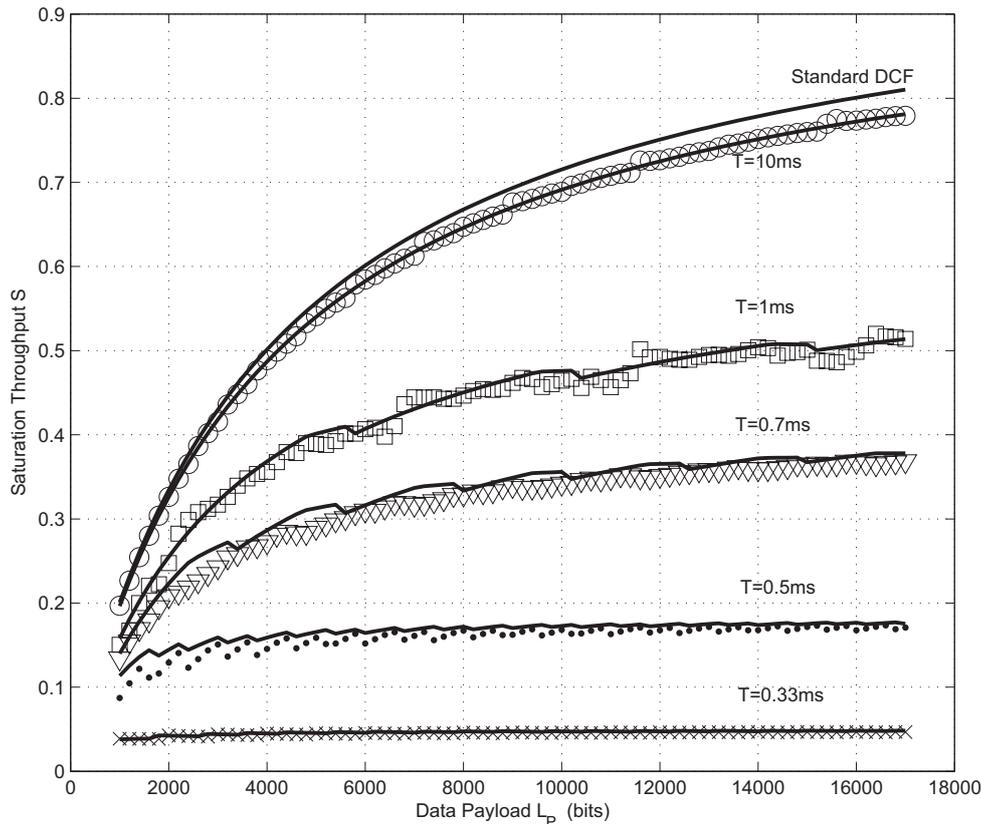


Σχήμα 6.10: Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει της περιόδου διακοπών για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

στο συγκεκριμένο σενάριο, και καθώς κινούμαστε προς μεγαλύτερες τιμές περιόδου  $T$ , το Throughput κορεσμού μειώνεται απότομα πριν αρχίσει την τελική του ανοδική πορεία. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη σταθερή τιμή της παραμέτρου  $L_{min}$ , δηλαδή στη μη χρήση της βέλτιστης τιμής (μέσω του αλγορίθμου 1). Η χρήση της βέλτιστης τιμής θα εξάλειψε την παλινδρόμηση αυτή, εξασφαλίζοντας πάντα τη μέγιστη δυνατή επίδοση για κάθε σενάριο.

Στα δύο επόμενα σχήματα χρησιμοποιείται η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου  $L_{min}$  σε κάθε σενάριο. Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται το Throughput και στο σχήμα 6.10 η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL σαν συνάρτηση της περιόδου διακοπών, για διάφορες τιμές της προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης (μεταβλητό  $\lambda$ ,  $\phi = 0.95$ ,  $L_P = 8196$  b). Για μεγάλα  $\lambda$ , ( $\lambda = 2/s$ ,  $\lambda = 5/sec$ ) και καθώς η περίοδος διακοπών μεγαλώνει, το Throughput πλησιάζει το άνω όριό του. Στο συγκεκριμένο σενάριο και για  $\lambda = 5/sec$  αρχίζουν να στοιβάζονται πακέτα προς εξυπηρέτηση στην ουρά του υποστρώματος MAC και το απεικονιζόμενο Throughput είναι το Throughput κορεσμού. Το Throughput που προκύπτει για  $\lambda = 2/sec$  είναι ελαφρώς αυξημένο, επειδή το σύστημα γι' αυτό το φορτίο κίνησης βρίσκεται ένα βήμα πριν τον κόρο.

Σε ακόμα μικρότερα  $\lambda$ , υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή της περιόδου διακοπών  $T$ , πέρα



**Σχήμα 6.11:** Throughput κορεσμού συναρτήσεως του μεγέθους του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων, για διάφορες τιμές της περιόδου  $T$ .

από την οποία δεν παρατηρείται καμία βελτίωση στην επίδοση ούτε στο Throughput, ούτε στη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL. Αυτή η παρατήρηση είναι πολύ χρήσιμη, καθότι όταν ένα Δευτερεύον σύστημα, όπως αυτό, λειτουργεί σε ένα περιβάλλον Δυναμικής-Ιεραρχικής Χρήσης Φάσματος σε χαμηλά φορτία τηλεπικοινωνιακής κίνησης, μπορεί να μειώσει την περίοδο διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, χωρίς να θυσιάσει την επίδοσή του, ώστε να προσφέρει καλύτερη προστασία από παρεμβολές προς το Πρωτεύον σύστημα.

#### 6.4 Το μέγεθος ωφέλιμου φόρτου μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων $L_p$

Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους ωφέλιμου φόρτου  $L_p$ , του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων, στην επίδοση της iDCF. Γενικά, ισχύει ότι αυξάνοντας το μέγεθος  $L_p$  αυξάνεται τόσο το Throughput, όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.8, όσο και η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL.

Στο σχήμα 6.11 δίνεται το Throughput κορεσμού σε συνάρτηση με το μέγεθος  $L_p$  για διαφορετικές τιμές της περιόδου  $T$ . Η βελτίωση του Throughput για μεγαλύτερα μεγέθη

## Κεφάλαιο 6. Μελέτη Επίδοσης της iDCF

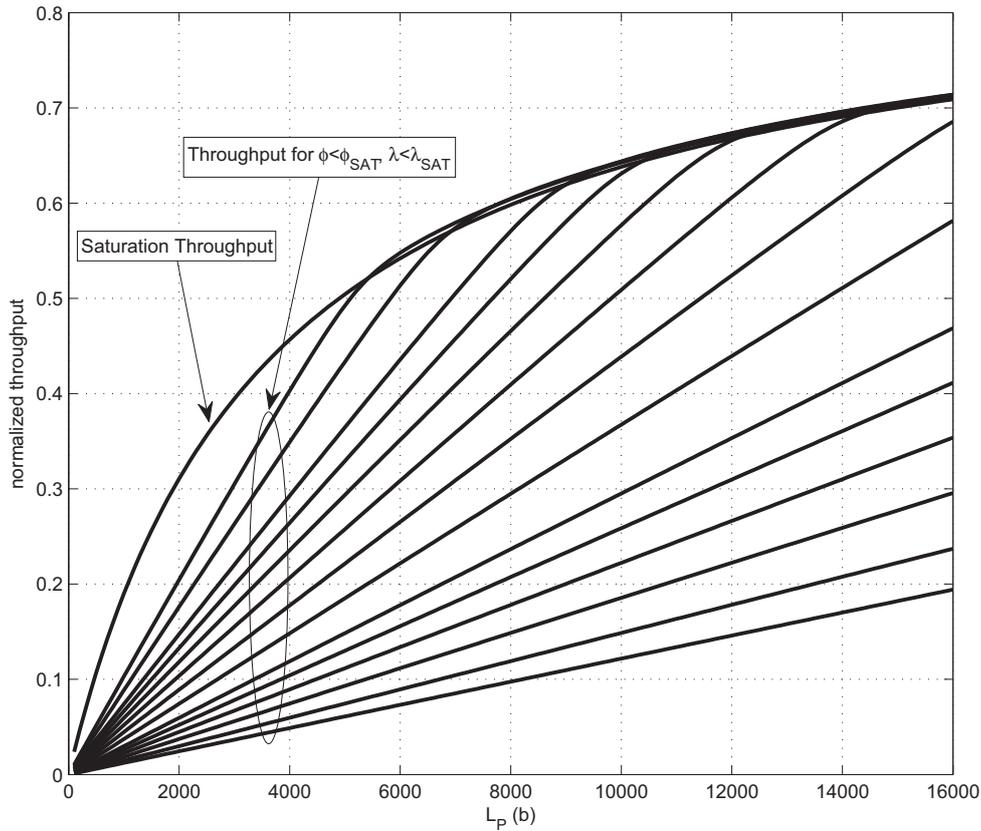
μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων, που παρατηρείται, είναι παρούσα τόσο στην iDCF όσο και στην DCF όπως παρουσιάζεται στο ίδιο σχήμα. Η βελτίωση αυτή, όμως, είναι αισθητή μόνο σε μεγάλες τιμές της περιόδου  $T$ . Σε μικρότερες τιμές της περιόδου η αύξηση δεν είναι ιδιαίτερα αισθητή. Το γεγονός, ότι, για μικρές τιμές της περιόδου, η αύξηση του  $L_P$  δεν προκαλεί σημαντική αύξηση στο Throughput της iDCF, μπορεί επίσης να παρατηρηθεί και στο σχήμα 6.8.

Σε ένα ρεαλιστικό σενάριο, όπου λαμβάνονται υπόψη και οι συγκρούσεις των μεταδόσεων του Δευτερεύοντος συστήματος με τις μεταδόσεις του Πρωτεύοντος, αν εκτιμηθεί ο χρόνος παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο, τότε, όπως θα φανεί και παρακάτω (βλ. §7.1), μικρότερα  $L_P$  έχουν σαν αποτέλεσμα μικρότερους χρόνους παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο. Ο χρόνος παρεμβολής στην περίπτωση σύγκρουσης Πρωτεύουσας μετάδοσης με Δευτερεύουσα είναι ευθέως ανάλογος της διάρκειας μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων. Στην περίπτωση που αποστέλλεται μικρότερου μεγέθους πλαίσιο δεδομένων, η σύγκρουση είτε θα γίνει αντιληπτή στο Δευτερεύον δίκτυο είτε όχι. Στην πρώτη περίπτωση θα διπλασιαστεί το παράθυρο ανταγωνισμού, μειώνοντας περαιτέρω τις απόπειρες μεταδόσεων και άρα το χρόνο παρεμβολής. Στη δεύτερη περίπτωση το Δευτερεύον δίκτυο θα συνεχίσει να μεταδίδει πλαίσια μικρότερου μεγέθους, τα οποία προκαλούν βραχύτερο χρόνο παρεμβολής, συγκρινόμενο με αυτόν που θα προέκυπτε αν αποστέλλονταν μεγαλύτερου μεγέθους πλαίσια. Παρόμοια μελέτη έχει πραγματοποιηθεί στο [61] η οποία παρουσιάζεται παρακάτω στο κεφάλαιο 7. Σε ένα ρεαλιστικό σενάριο, λοιπόν, προκειμένου να διαφυλαχθούν οι χαμηλοί χρόνοι παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο, είναι καλύτερο να επιλέγεται μικρή τιμή για την παράμετρο  $L_P$ , ειδικά όταν μεγαλύτερες τιμές δεν προσφέρουν αξιόλογη αύξηση του Throughput, δηλαδή σε σενάρια όπου απαιτείται μικρή περίοδος  $T$ .

Στο ίδιο σχήμα 6.11 και ιδιαίτερα για  $T \leq 1$  ms, παρατηρούνται ορισμένες ασυνέχειες στα γραφήματα του Throughput. Κατά την κίνηση προς μεγαλύτερες τιμές  $L_P$ , σε αυτά τα σημεία, το Throughput μειώνεται απότομα και κατόπιν συνεχίζει την ανοδική του πορεία. Το πρώτο σημείο στο οποίο παρατηρείται η ασυνέχεια αυτή, για κάθε τιμή της περιόδου  $T$ , είναι το σημείο όπου  $L_P = L_{ut}$ . Σε αυτό το σημείο καταργείται το ενδεχόμενο η μετάδοση του πλαισίου δεδομένων να μη διακόπτεται από διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών. Με άλλα λόγια η πιθανότητα  $P_{DNI}$  μηδενίζεται, προκαλώντας μια απότομη αύξηση της ποσότητας  $E[t_{data}]$ , εφόσον ο πρώτος όρος της εξίσωσης (5.33) εξαλείφεται. Ο όρος αυτός αναπαριστούσε το ενδεχόμενο μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων χωρίς διακοπή, συνεισφέροντας έτσι σε μικρότερη προσδοκώμενη τιμή της διάρκειας μετάδοσης του πλαισίου δεδομένων. Οι επόμενες ασυνέχειες στα γραφήματα συμβαίνουν περιοδικά στα σημεία:

$$L_P = L_{ut} + \nu \cdot L_{PF}, \nu = 1, 2, 3, \dots \quad (6.10)$$

Σε αυτά τα σημεία, η αιτία απότομης μείωσης του Throughput είναι διαφορετική. Όταν το  $L_P$  δίνεται από την (6.10), η αύξησή του κατά 1 μόλις  $b$  είναι αρκετή, ώστε η ποσότητα  $t_{DFS}(x = L_{ut})$  στην (5.33) να περιλάβει ένα ακόμη τεμάχιο δεδομένων, μετά από τη τελευταία



**Σχήμα 6.12:** Οικογένεια καμπυλών *Throughput* για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης, και για  $T = 3 \text{ ms}$

διακοπή και πριν ολοκληρωθεί η μετάδοση ολόκληρου του πλαισίου δεδομένων. Έτσι, η ποσότητα  $t_{DFS}(x = L_{ut})$  αυξάνει απότομα, ώστε να συμπεριλάβει όλο τον πρόσθετο φόρτο, που συνοδεύει την αποστολή ενός ακόμα τεμαχίου δεδομένων, μειώνοντας κατά τον ίδιο τρόπο το *Throughput*. Η Ποσότητα κατά την οποία αυξάνεται το  $t_{DFS}(x = L_{ut})$  δίνεται από την παράσταση  $\tau + 2 \cdot SIFS + RSP + DATA_{FL}$ . Η παραπάνω παρατήρηση είναι χρήσιμη, ώστε να αποφεύγεται ο επιπρόσθετος αυτός φόρτος σαν ενδεχόμενο. Έτσι, όταν επιλέγεται τιμή για την παράμετρο  $L_P$ , είναι χρήσιμο η παράμετρος να τίθεται σε τιμή ελαφρώς μικρότερη από μια που δίνεται από την (6.10).

Για το *Throughput* μη-κορεσμού συναρτήσει της παραμέτρου  $L_P$ , αρκεί να παρατηρηθεί ότι αν  $\phi_{SAT}$  και  $\lambda_{SAT}$  είναι όλα τα ζεύγη τιμών των παραμέτρων  $\phi$  και  $\lambda$  του μοντέλου τηλεπικοινωνιακή κίνησης, που χρησιμοποιούμε, τα οποία οδηγούν το σύστημα στον κόρο, τότε για  $\phi < \phi_{SAT}$  και  $\lambda < \lambda_{SAT}$  οι καμπύλες που προκύπτουν δίνονται στο σχήμα 6.12. Οι καμπύλες αυτές είναι γραμμικές μέχρι τα  $L_P$  εκείνα, στα οποία το σύστημα οδηγείται στον κόρο για τα συγκεκριμένα  $\phi$  και  $\lambda$ . Για μεγαλύτερα  $L_P$  από αυτά, η καμπύλες παύουν να είναι γραμμικές και ακολουθούν την καμπύλη του *Throughput* κορεσμού. Οι καμπύλες για διαφορετικές τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης διαφοροποιούνται με τη διαφορετική κλίση.

## Κεφάλαιο 6. Μελέτη Επίδοσης της iDCF

Η διαφορετική κλίση αυτή προκαλεί και τις διαφορετικές τιμές των  $L_P$ , πέρα από τα οποία έχουμε κορεσμό, ακριβώς επειδή η καμπύλη κορεσμού συναντάται σε διαφορετικά σημεία. Στο σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η οικογένεια αυτών των καμπυλών για  $T = 3 \text{ ms}$ .

Στη συνέχεια εξετάζουμε την επίδραση της μεταβολής του  $L_P$  στη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL σε σενάρια μη κορεσμένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για τα σενάρια αυτά ορίζουμε ως  $L_F$  την ποσότητα πληροφορίας που μεταδίδεται συνολικά από μια ροή πακέτων για το μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης που χρησιμοποιούμε. Ισχύει ότι:

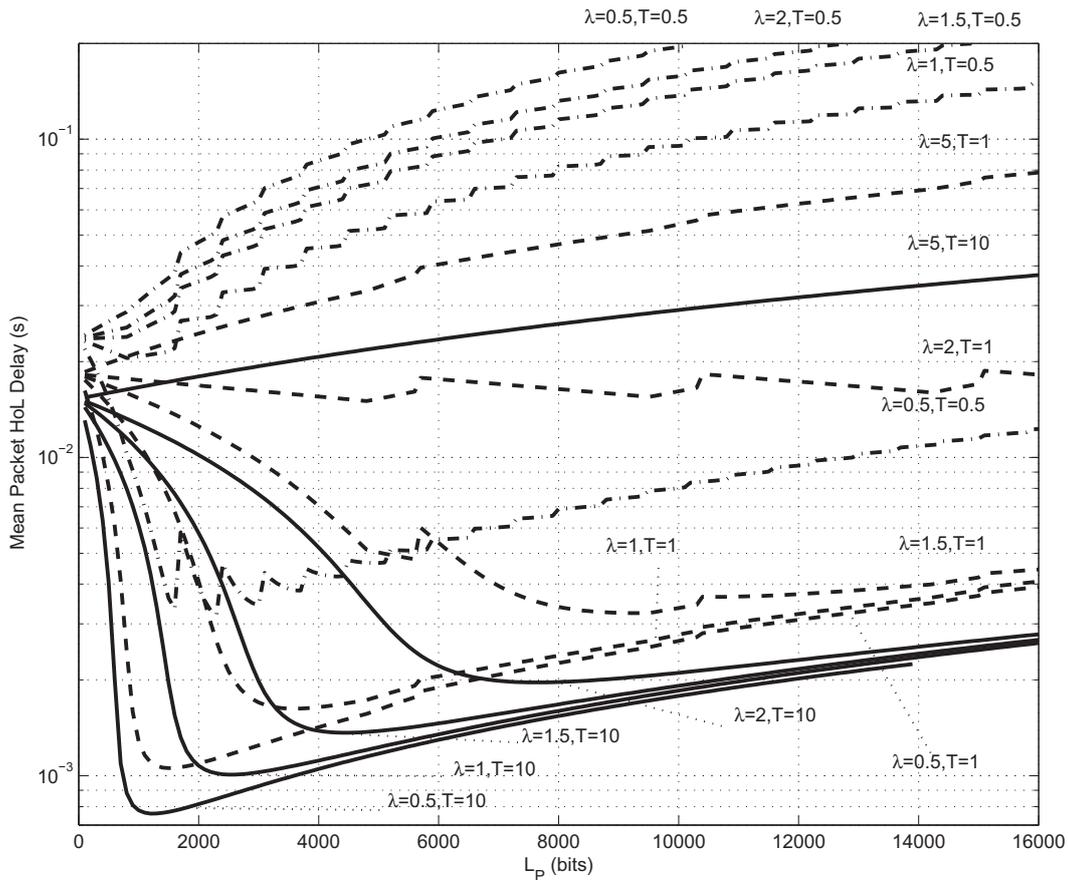
$$E[L_F] = \frac{1}{1 - \phi} \times L_P \quad (6.11)$$

Προκειμένου με τη μεταβολή του μεγέθους του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων  $L_P$  να διατηρείται η συνολική μέση ποσότητα πληροφορίας, που μεταδίδεται σε μια ροή πλαισίων, για κάθε τιμή του  $L_P$  που εξετάζεται, η παράμετρος  $\phi$  του μοντέλου τηλεπικοινωνιακής κίνησης τίθεται στην τιμή:

$$\begin{aligned} \phi &= 1 - \frac{L_P}{E[L_F]}, \\ L_P &\leq E[L_F], \end{aligned} \quad (6.12)$$

όπου  $E[L_F]$  έχει τεθεί σε σταθερή τιμή. Με αυτήν τη ρύθμιση επιτυγχάνεται η ίδια και επιθυμητή μέση τιμή για τον ωφέλιμο φόρτο μιας ροής πακέτων, και εξετάζεται το κατά πόσο η ομαδοποίηση της συνολικής ποσότητας δεδομένων της ροής σε πακέτα διαφορετικού μεγέθους επηρεάζει την επίδοση. Υπό τον περιορισμό της τιμής της παραμέτρου  $L_P$  στην (6.12) εξασφαλίζεται ότι η πιθανότητα  $\phi$  βρίσκεται πάντα εντός του εύρους  $[0, 1]$ .

Υπό τον παραπάνω ορισμό και για  $L_F = 10 \text{ kB}$ , στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει της παραμέτρου  $L_P$ , για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης  $\lambda$ ,  $\phi = 0.95$  και περιόδου  $T$ . Στο σχήμα φαίνεται ότι για μεγάλες τιμές της περιόδου  $T$  (1 ms, 10 ms) και για χαμηλά προσφερόμενα φορτία ( $\lambda = 0.5, 1, 1.5, 2/\text{s}$ ), το μέγεθος μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων  $L_P$  μπορεί να τεθεί, ώστε να ελαχιστοποιεί τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL. Αυτό οφείλεται στο ότι καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της παραμέτρου  $L_P$ , ενώ διατηρούμε σταθερό το μέσο μήκος πληροφορίας ροής  $E[L_F]$ , η μείωση της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης με μείωση του  $L_P$  αντισταθμίζεται με την αύξηση στον ανταγωνισμό, λόγω περισσότερων πλαισίων προς μετάδοση, κάτι που προκαλεί τελικά την αύξηση στη μέση καθυστέρηση μετάδοσης από κάποια τιμή της  $L_P$  και κάτω. Αυτή η τιμή της παραμέτρου  $L_P$ , που ελαχιστοποιεί τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης, είναι διαφορετική ανάλογα με την περίοδο  $T$  λειτουργίας και το προσφερόμενο φορτίο.

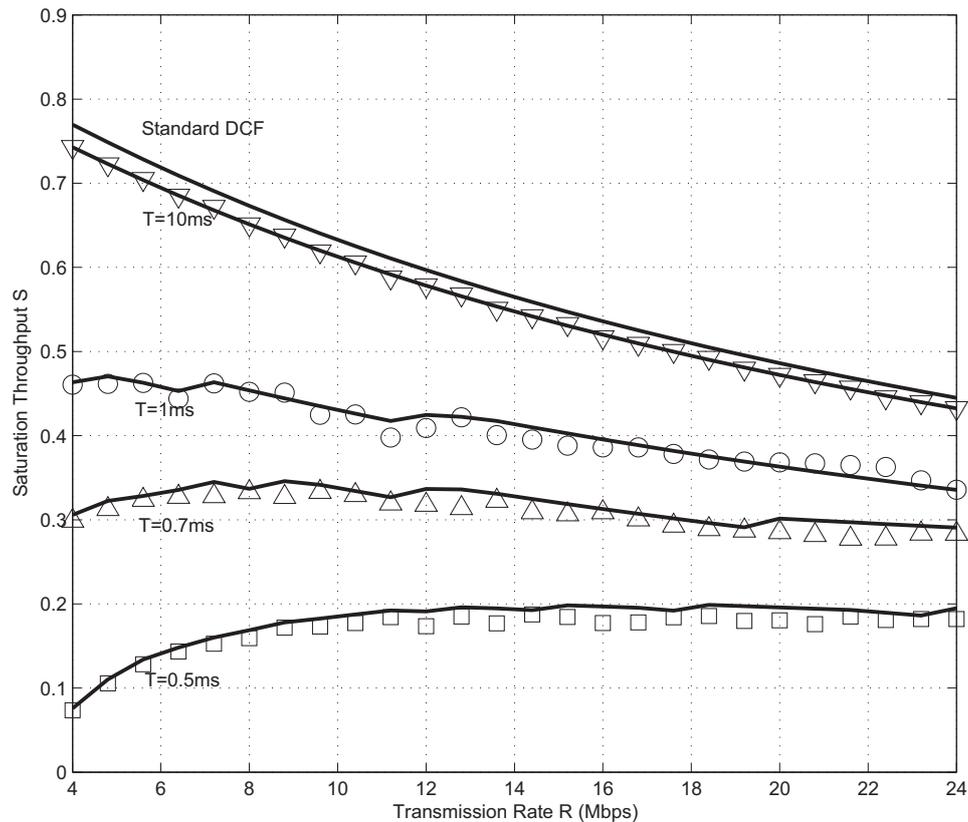


**Σχήμα 6.13:** Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει του μεγέθους του μεταδιδόμενου πλαισίου δεδομένων  $L_P$  για διάφορες τιμές προσφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης και περιόδου.

## 6.5 Ο ρυθμός μετάδοσης $R$

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται το Throughput κορεσμού της iDCF σαν συνάρτηση του υποκειμένου ρυθμού μετάδοσης  $R$ , για διάφορες τιμές της περιόδου ανίχνευσης φασματικών οπών  $T$ . Η Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανομημένου Ελέγχου, όπως και η πρότυπη DCF, έχει μικρότερη απόδοση σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει επειδή συγκεκριμένος χρονικός πρόσθετος φόρτος του πρωτοκόλλου, όπως είναι τα διαστήματα σιγής και ο χρόνος μετάδοσης των προοιμίων των πλαισίων, παραμένουν αμετάβλητα, ενώ μειώνεται ο ωφέλιμος χρόνος μετάδοσης της πληροφορίας. Η επιλεγθείσα τιμή της παραμέτρου  $T$  έχει επίδραση και σε αυτή την παρατήρηση. Μικρές τιμές της περιόδου εξαναγκάζουν την iDCF να διατηρεί ίδια επίδοση ανεξαρτήτως του υποκειμένου ρυθμού μετάδοσης.

Όσον αφορά τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL δεν παρουσιάζει κάποια αξιόπροσεχτη συμπεριφορά σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης. Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης μειώνουν τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης, μικρότερα προσφερόμενα φορτία τηλεπικοινωνιακής κίνησης μετακινούν την καμπύλη καθυστέρησης προς μικρότερες τιμές και μικρότερες



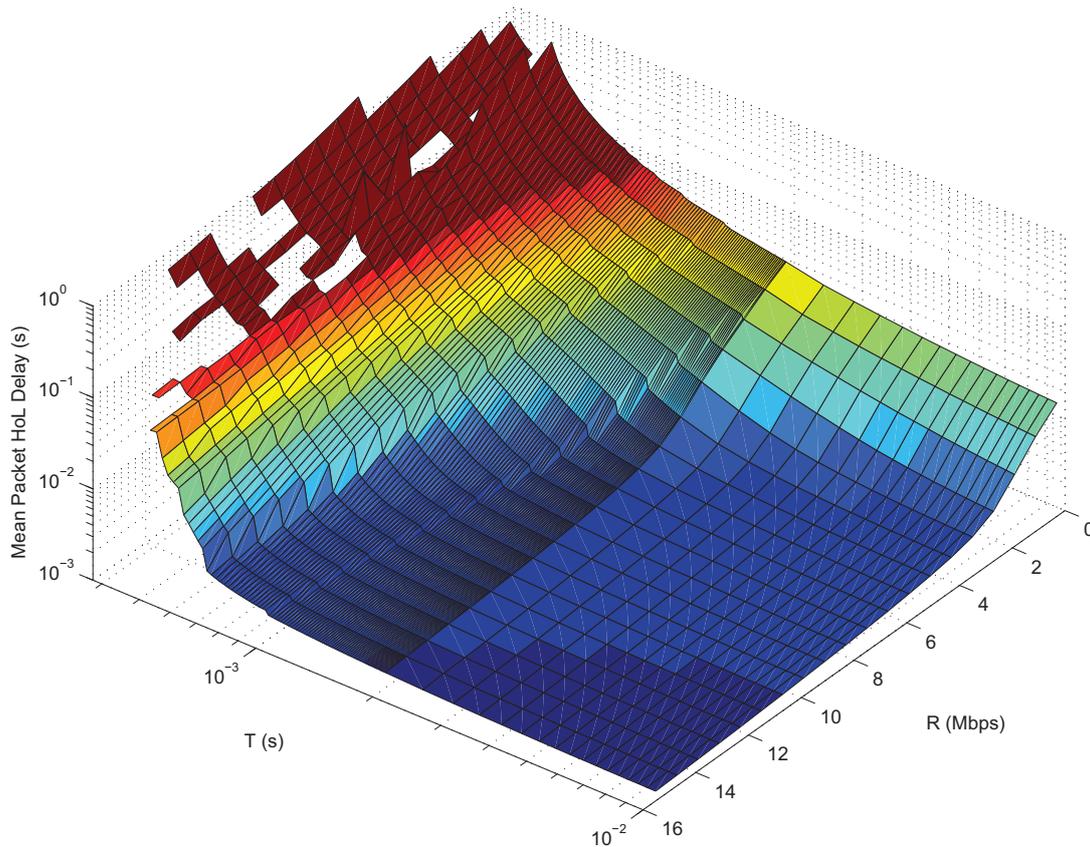
Σχήμα 6.14: Throughput κορεσμού της iDCF συναρτήσεως του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης  $R$  για διαφορετικές τιμές της περιόδου  $T$ .

τιμές της παραμέτρου  $T$  οδηγούν την καμπύλη καθυστέρησης προς υψηλότερες τιμές, όπως και είναι αναμενόμενο.

Στο σχήμα 6.15 δίνεται η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσεως του ρυθμού μετάδοσης και της περιόδου  $T$ , για προσφερόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση  $\lambda = 0.8 \text{ s}^{-1}$  και  $\phi = 0.95$ . Το σχήμα αυτό είναι αντιπροσωπευτικό για το γεγονός ότι η περίοδος διακοπών επηρεάζει περισσότερο την καθυστέρηση μετάδοσης από το ρυθμό μετάδοσης. Ο τελευταίος επιβάλλει απλά μια ανεπαίσθητη αύξηση στη μέση καθυστέρηση.

## 6.6 Ρυθμός μετάδοσης $R$ και Ενεργός Χρόνος $T - \tau$

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε το αντιστάθμισμα που δημιουργείται για δεδομένη τιμή της περιόδου εκτέλεσης διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών  $T$ , μεταξύ της διάρκειας ενεργού ενεργού χρόνου  $T - \tau$  και του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης  $R$  (βλ. §2.3.2.5). Μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης είναι πιθανότερο να προκύπτει χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η φασματική ανίχνευση ευρύτερης περιοχής του φάσματος όμως απαιτεί μεγαλύτερη διάρκεια  $\tau$ , επομένως ο ενεργός χρόνος συρρικνώνεται.

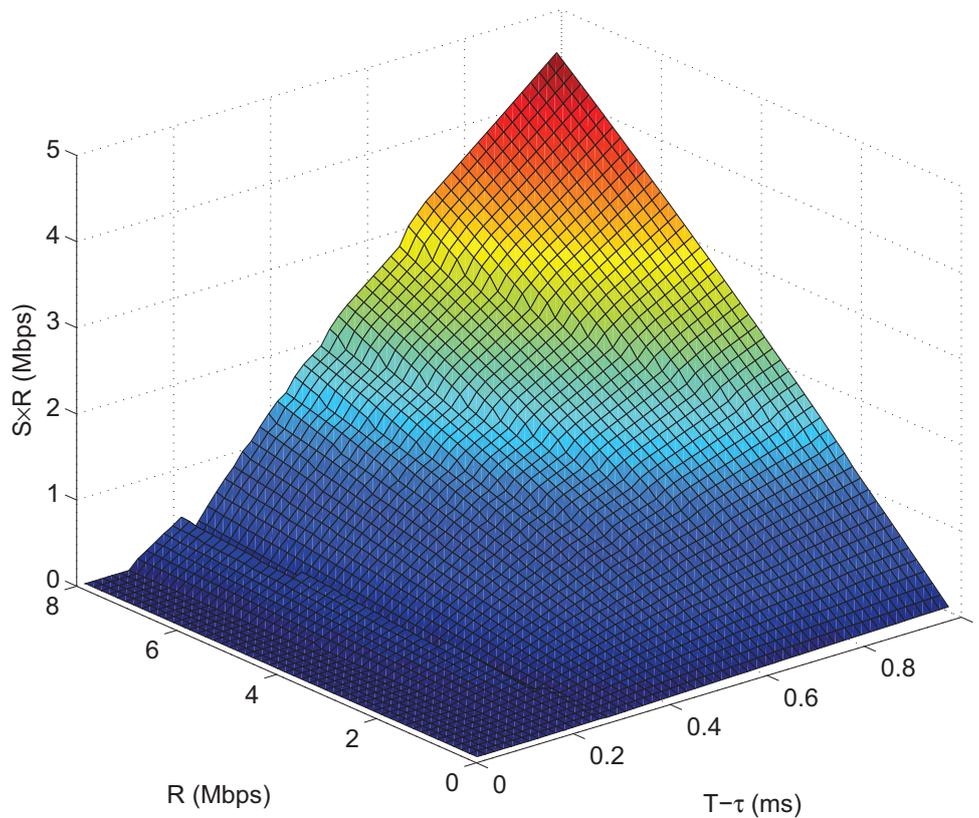


**Σχήμα 6.15:** Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης  $R$  και της περιόδου  $T$ .

Σε συγκεκριμένα σενάρια εφαρμογής, είναι εφικτό να αποφασιστεί ποιος συνδυασμός τιμών  $R$  και  $T - \tau$  είναι ο περισσότερο ευεργετικός. Η απόφαση αυτή εξαρτάται από το συγκεκριμένο Δευτερεύον σύστημα και τον τρόπο που το MAC αξιοποιεί το ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή το κανονικοποιημένο Throughput συναρτήσει του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης (βλ. σχήμα 6.14).

Χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, μπορεί να παρατηρηθεί, για συγκεκριμένες τιμές της περιόδου  $T$ , το λαμβανόμενο Throughput σαν συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης και της διάρκειας του ενεργού χρόνου  $T - \tau$ . Στο σχήμα 6.16 η περίοδος  $T$  έχει τεθεί στην τιμή 1 ms και η διάρκεια  $\tau$  της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών κυμαίνεται ώστε να παρέχει διαφορετικές διάρκειες ενεργών χρόνων. Το Throughput δίνεται σε Mbps και προκύπτει από το πολλαπλασιασμό του κανονικοποιημένου Throughput κορεσμού με το ρυθμό μετάδοσης. Από το σχήμα παρατηρείται ότι μία συγκεκριμένη τιμή Throughput (επίπεδα κάθετα στον άξονα  $z$  λαμβάνεται για συγκεκριμένα ζεύγη τιμών  $(R, T - \tau)$ , τα οποία ορίζονται από συγκεκριμένες καμπύλες. Η εφαρμογή σε συγκεκριμένο σενάριο επικαλυπτικής μετάδοσης θα εξάγει πιο από αυτά τα ζεύγη τιμών είναι εφικτά.

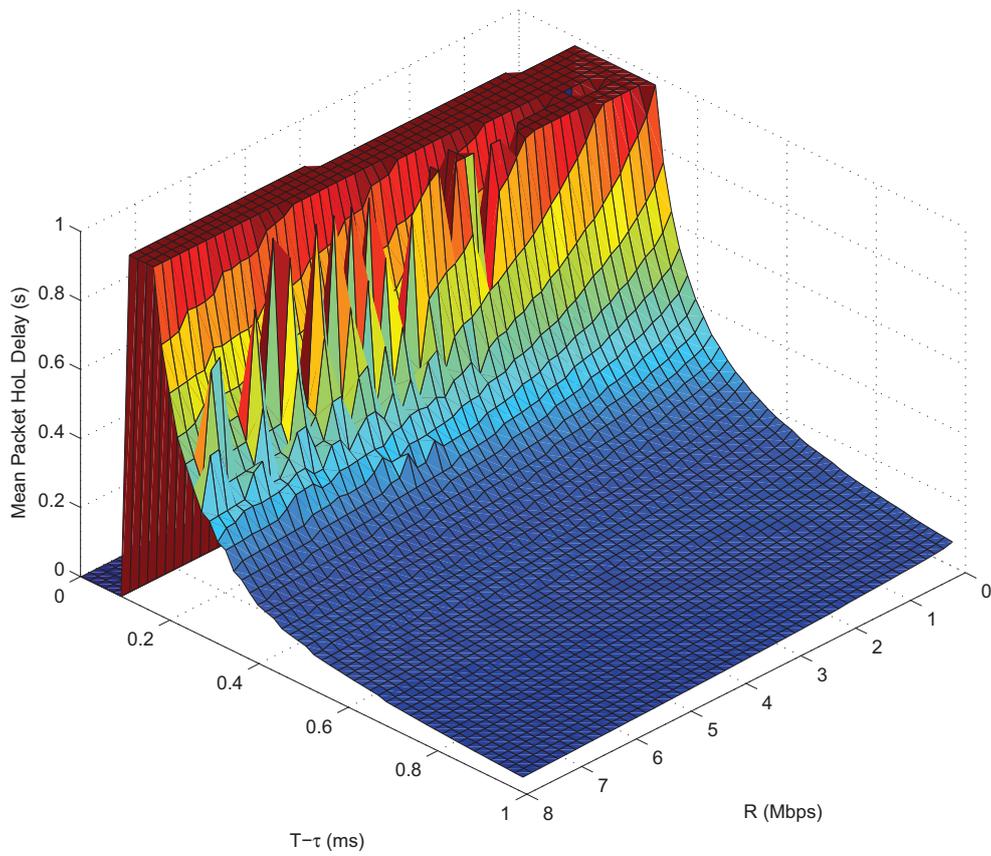
Στο σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει



**Σχήμα 6.16:** Throughput συναρτήσει της διάρκειας του ενεργού χρόνου και του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης για  $T = 1$  ms.

της διάρκειας ενεργού χρόνου και του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης, για την ίδια τιμή  $T = 1$  ms με αυτή του σχήματος 6.16 και για συνθήκες κορεσμένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για τις καμπύλες  $(R, T - \tau)$  που παράγουν το ίδιο Throughput, το σχήμα 6.17 μπορεί να κατευθύνει τη σχεδίαση προς τα ζεύγη τιμών εκείνα, που έχουν σαν αποτέλεσμα μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης. Γενικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η κίνηση με κατεύθυνση προς μεγαλύτερες διάρκειες ενεργού χρόνου ωφελεί περισσότερο από την κατεύθυνση προς μεγαλύτερες τιμές ρυθμού μετάδοσης.

□



Σχήμα 6.17: Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πλαισίου HoL συναρτήσει της διάρκειας του ενεργού χρόνου και του υποκείμενου ρυθμού μετάδοσης για  $T = 1$  ms.

## Κεφάλαιο 7

# Μελέτες Εμπλουτισμού της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου

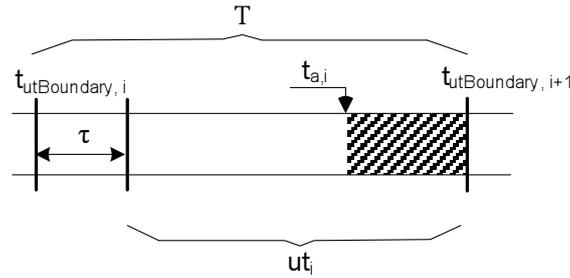
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεκριμένες μελέτες επέκτασης και εμπλουτισμού των δυνατοτήτων της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου. Οι επεκτάσεις αυτές έγιναν με σκοπό α) τη βελτίωση της επίδοσής της ως πρωτόκολλο πρόσβασης σε περιβάλλον Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, β) τη βελτίωση της επίδοσής της γενικά ως κατανεμημένο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο και γ) την επίλυση του προβλήματος κοινού καναλιού των δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος.

### 7.1 Μείωση παρεμβολής προς Πρωτεύον δίκτυο με μεθόδους υποστρώματος MAC

#### 7.1.1 Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, μετά από κάθε διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών, το δίκτυο Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών έχει συμφωνήσει για το Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας NAV . Το NAV , έχοντας κοινοποιηθεί, χρησιμοποιείται για την αναπροσαρμογή του φυσικού στρώματος. Μετά από αυτήν όλα τα μέλη του δικτύου έχουν ένα κοινό κανάλι δεδομένων προς διαμοιρασμό. Το κανάλι αυτό παραμένει σταθερό για όλη τη διάρκεια του ενεργού χρόνου και μέχρι κάποια από τις επόμενες διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών να διαπιστώσει κάποια αλλαγή στο NAV .

Ανάλογα με την επιλεγθείσα τιμή της περιόδου  $T$ , αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τηλεπικοινωνιακής κίνησης του Πρωτεύοντος συστήματος, η φασματική διαθεσιμότητα μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια του ενεργού χρόνου. Τα διαθέσιμα κανάλια του Πρωτεύοντος συστήματος καταλαμβάνονται και ελευθερώνονται από αυτό, με τρόπο ασύγχρονο ως προς την περίοδο των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, που εκτελεί το Δευτερεύον



**Σχήμα 7.1:** Άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη μέσα στον ενεργό χρόνο και σχετικά μεγέθη. Η γκριζα περιοχή είναι η περιοχή στην οποία οι μεταδόσεις του Δευτερεύοντος συστήματος συνεισφέρουν στο ITR.

σύστημα. Για το λόγο αυτό, αναπόφευκτα το Πρωτεύον σύστημα βιώνει παρεμβολή από τις μεταδόσεις του Δευτερεύοντος συστήματος, που χρησιμοποιεί το ίδιο Διάγραμμα Φασματικής Διαθεσιμότητας για όλο τον υπολειπόμενο ενεργό χρόνο από τη στιγμή που καταλαμβάνεται ένα νέο Πρωτεύον κανάλι. Ο χρόνος στον οποίο λαμβάνουν χώρα συγκρούσεις των μεταδόσεων του Δευτερεύοντος συστήματος με αυτές του Πρωτεύοντος, μετράται με το μέγεθος Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής ITR, το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

Στα κεφάλαια 5 και 6 μελετήθηκε η επίδοση της iDCF χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των συγκρούσεων μεταξύ μεταδόσεων Πρωτεύοντος και Δευτερεύοντος συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, δόθηκε έμφαση στη μελέτη της επίπτωσης που έχει ο διακοπόμενος τρόπος λειτουργίας (παράμετροι  $T$  και  $\tau$ ) στο πρωτόκολλο. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει συγχρονισμός - ταύτιση της τιμής της περιόδου  $T$  και της διάρκειας της χρονοθυρίδας της δομής TDMA του Πρωτεύοντος συστήματος κι επίσης οι διαδικασίες ανίχνευσης πραγματοποιούνται στην αρχή των χρονοθυρίδων [37], τότε η προσέγγιση των κεφαλαίων αυτών είναι ολοκληρωμένη, καθότι δεν υπάρχουν τέτοιου είδους συγκρούσεις, πάντα υπό την υπόθεση της τέλει φασματικής ανίχνευσης. Σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον, όμως, και όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα συγχρονισμού της διαδικασίας ανίχνευσης με το χρονοισμό του πλαισίου TDMA (λόγω ύπαρξης περισσότερων του ενός διαφορετικών τεχνολογιών Πρωτευόντων συστημάτων ή μικρής διάρκειας χρονοθυρίδων, που καθιστά μη πρακτική τη διαδικασία ανίχνευσης σε καθεμία), το φαινόμενο αυτό των συγκρούσεων είναι εξαιρετικής σημασίας. Επηρεάζει τόσο το Πρωτεύον σύστημα, με την παρεμβολή που προκαλεί, όσο και το Δευτερεύον σύστημα, εισάγοντας περαιτέρω απώλειες πλαισίων και άρα μείωση του Throughput .

Στα επόμενα, η κατάληψη ενός Πρωτεύοντος καναλιού, το οποίο εθεωρείτο ανενεργό στο πιο πρόσφατο Διάγραμμα Φασματικής Διαθεσιμότητας, ονομάζεται 'άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη'<sup>1</sup>. Στο σχήμα 7.1 οι χρονικές στιγμές  $t_{utBoundary, i}$  είναι οι στιγμές στις οποίες εκκινούν οι διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών διάρκειας  $\tau$ . Τη χρονική στιγμή  $t_{a, i}$  πραγματοποιείται η πρώτη άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη, μέσα στον τρέχοντα ενεργό χρόνο  $ut_i$ . Η άφιξη αυτή έχει σαν συνέπεια ένα η περισσότερα κανάλια που θεωρούνταν ανενεργά να καταλαμ-

<sup>1</sup> Η κατάληψη ενός νέου καναλιού από το Πρωτεύον σύστημα πραγματοποιείται όχι μόνο όταν αφικνύται καινούργιος χρήστης προς εξυπηρέτηση αλλά και όταν τροποποιείται η ανάθεση καναλιών ανάλογα με τη συγκεκριμένη τεχνολογία πρόσβασης, π.χ. λόγω αύξησης των απαιτήσεων εύρους ζώνης των χρηστών, δυναμική ανάθεση λόγω διαλείψεων, κτλ.

## Κεφάλαιο 7. Μελέτες Εμπλουτισμού της *iDCF*

βάνονται για την εξυπηρέτηση του νέου χρήστη. Για το υπόλοιπο του ενεργού χρόνου και έως τη στιγμή  $t_{utBoundary,i+1}$ , όταν το Δευτερεύον δίκτυο πραγματοποιεί μετάδοση πλαισίου, συμβαίνει σύγκρουση μεταδόσεων και προκαλείται παρεμβολή στο Πρωτεύον σύστημα.

Προκειμένου να εκτιμήσουμε ποσοτικά την παρεμβολή ορίζουμε το αδιάστατο μέγεθος Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής *ITR*, σαν το ποσοστό του χρόνου στο οποίο πραγματοποιούνται συγκρούσεις μεταδόσεων μεταξύ του Πρωτεύοντος και του Δευτερεύοντος συστήματος. Έτσι, το μετρήσιμο  $ITR_i$  για τον  $i^{σ\omega}$  ενεργό χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$ITR_i = \frac{\sum_j TX\_TIME_j}{T}, \quad (7.1)$$

όπου  $TX\_TIME_j$  είναι η διάρκεια μετάδοσης του  $j^{σ\tau\omicron\upsilon}$  πλαισίου του Δευτερεύοντος συστήματος που πραγματοποιείται μετά τη χρονική στιγμή  $t_{a,i}$ .

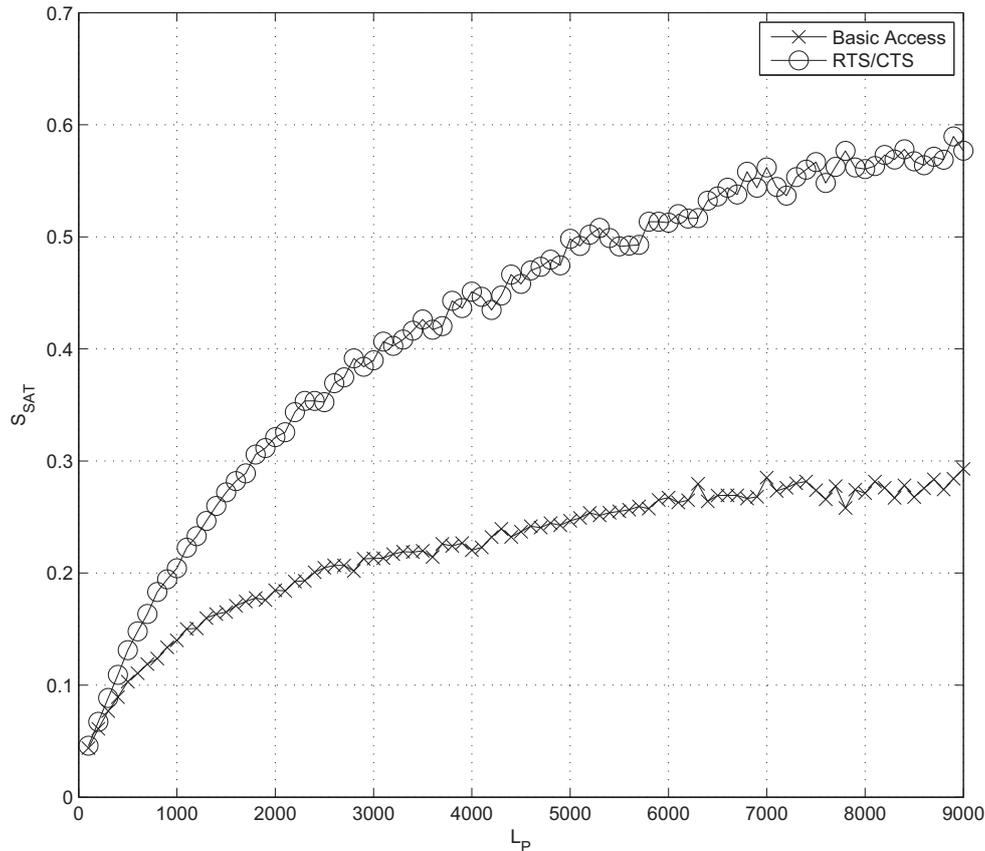
Το *ITR* είναι ένα μέγεθος ποσοτικοποίησης της παρεμβολής που δέχεται το Πρωτεύον δίκτυο. Δεν έχει καμία συσχέτιση με τις λαμβανόμενες ισχύεις των σημάτων στους Πρωτεύοντες δέκτες και επομένως με το λόγο σήματος προς παρεμβολή *SIR*, ο οποίος είναι αυτός που τελικά καθορίζει το αν τα επίπεδα παρεμβολής θα οδηγήσουν ή όχι σε υποβάθμιση της υπηρεσίας του Πρωτεύοντος συστήματος. Μια μετάδοση που προσμετράται στο ποσοστό *ITR* είναι δυνατό να μη γίνει αντιληπτή από το Πρωτεύον σύστημα, ενώ μία άλλη να προκαλέσει έντονη παρεμβολή, καταπατώντας τους βασικούς στόχους σχεδίασης ενός Δευτερεύοντος συστήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις το μέγεθος *ITR* θα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Σκοπός των δύο επόμενων παραγράφων είναι η πρόταση και μελέτη τεχνικών του υποστρώματος *MAC* οι οποίες φροντίζουν για αυτό ακριβώς.

### 7.1.2 Χρήσης τριπλής χειραψίας - μηχανισμού *rts /cts*

Η Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου, όπως είδαμε, μπορεί να λειτουργήσει είτε χρησιμοποιώντας το μηχανισμό μετάδοσης πλαισίων αίτησης κράτησης και επιβεβαίωσης κράτησης του καναλιού (*rts /cts*) είτε με απευθείας μετάδοση του πλαισίου δεδομένων, μετά τη διαδικασία ανταγωνισμού. Εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων της χρήσης του μηχανισμού τριπλής χειραψίας, εδώ εξετάζεται η επίδραση που έχει στο μέγεθος Ποσοστού Χρόνου Παρεμβολής.

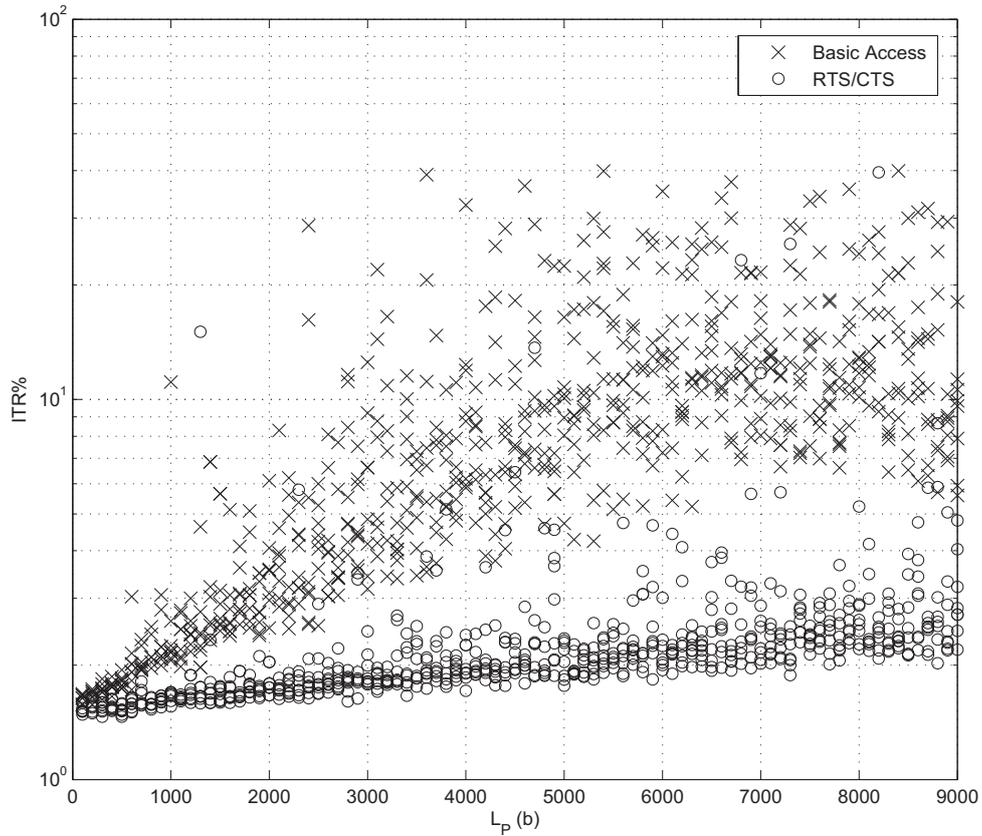
#### 7.1.2.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στη συνέχεια, παρατίθενται αποτελέσματα προσομοίωσης της λειτουργίας του Δευτερεύοντος δικτύου με σκοπό την αποτίμηση της επίδρασης του μηχανισμού *rts /cts* στην επίδοση της *iDCF*, ως προς το *Throughput* που επιτυγχάνει, και το *ITR* που προκαλεί. Συγκρίνονται οι μέθοδοι πρόσβασης α) με χρήση των πλαισίων *rts /cts* και β) χωρίς τη χρήση αυτών, η οποία αναφέρεται ως βασική πρόσβαση. Οι τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν το κάθε εξεταζόμενο σενάριο δίνονται παρακάτω.



**Σχήμα 7.2:** Throughput κορεσμού συναρτήσεσι του μεγέθους πλαισίου δεδομένων για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής για τη διαδικασία κατάληψης φάσματος από το Πρωτεύον Δίκτυο είναι η Μαρκοβιανή ουρά M/M/m/m.  $m = 100$  είναι το πλήθος των καναλιών του Πρωτεύοντος συστήματος, εύρους 100 kHz. Στην τιμή αυτή τίθεται και η απόσταση μεταξύ των υποφερόντων του OFDM επικαλυπτικού συστήματος μετάδοσης του Δευτερεύοντος δικτύου. Έτσι, ένα κανάλι του Πρωτεύοντος συστήματος καταλαμβάνεται από ένα υποφέρον OFDM, στην περίπτωση που ανιχνευθεί ως ανενεργό κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης. Αφίξεις πραγματοποιούνται στο Πρωτεύον σύστημα με ρυθμό  $\alpha$  και εκθετικά κατανομημένους χρόνους και καταλαμβάνουν τυχαία ένα κενό κανάλι. Το Throughput του Πρωτεύοντος δικτύου  $\rho_{PS}$  καθορίζει πόσα κανάλια του δικτύου είναι κατειλημμένα κατά μέσο όρο. Τα μεταδιδόμενα σύμβολα OFDM περιέχουν Guard Interval ίσο με  $T_{FFT}/4$  και το preamble των μεταδόσεων απαρτίζεται από τέσσερα σύμβολα συν ένα, που περιέχει την πληροφορία SIGNAL της επικεφαλίδας PHY PLCP, όπως καθορίζεται στο πρότυπο 802.11a. Τέλος, το κανάλι διάδοσης θεωρείται ιδανικό, ώστε οι μετρήσιμες ποσότητες να επηρεάζονται μόνο από τις επιλογές παραμέτρων του υποστρώματος MAC, των οποίων την επίδραση θέλουμε να εκτιμήσουμε.

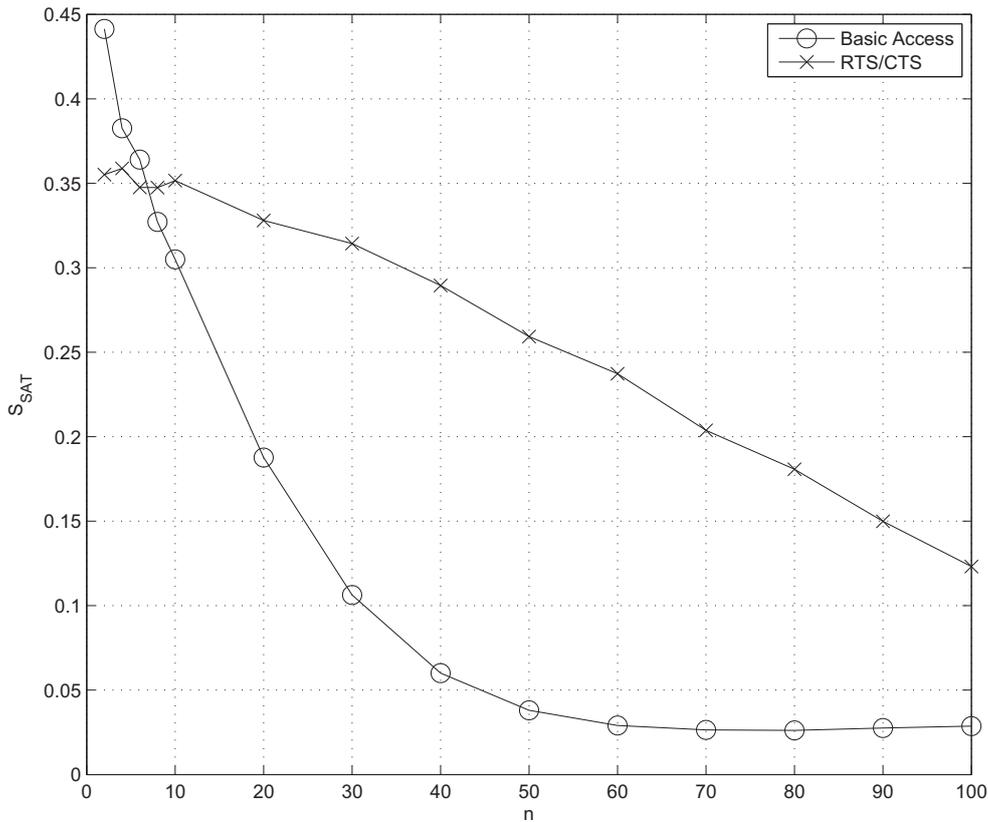


Σχήμα 7.3: II

Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει του μεγέθους πλαισίου δεδομένων για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF

Στο πρώτο σενάριο τίθεται  $\rho_{PS} = 70$ ,  $\alpha = 30 \text{ s}^{-1}$ ,  $n = 20$ ,  $T = 2 \text{ ms}$  και  $\tau = 0.1T$ . Το μέγεθος του πλαισίου δεδομένων είναι μεταβλητό ώστε να εξεταστεί η επίδοση των μεθόδων πρόσβασης ως προς αυτό. Στο σχήμα 7.2 δίνεται το Throughput κορεσμού για μεταβαλλόμενο μέγεθος πλαισίου  $L_P$  και στο σχήμα 7.3 δίνεται το μετρούμενο Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής με κάθε σημείο να αντιστοιχεί σε προσομοίωση λειτουργίας του δικτύου διάρκειας 60 s. Είναι φανερό, ότι για όλα τα μήκη πλαισίου δεδομένων, το Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ενώ το Throughput είναι σαφώς μεγαλύτερο όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός πρόσβασης rts /cts . Εάν χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός βασικής πρόσβασης, η λειτουργία του Δευτερεύοντος δικτύου θα είναι πολύ επιβλαβής για το Πρωτεύον σύστημα, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τους σχεδιαστικούς στόχους του.

Στο επόμενο σενάριο έχει τεθεί  $\rho_{PS} = 70$ ,  $\alpha = 30 \text{ s}^{-1}$ ,  $L_P = 2048 \text{ b}$ ,  $T = 2 \text{ ms}$  και  $\tau = 0.1T$ . Το σχήμα 7.4 απεικονίζει τις μετρήσεις για το Throughput κορεσμού συναρτήσει του πλήθους των ανταγωνιζόμενων τερματικών  $n$  και στο σχήμα 7.5 το Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής. Το Throughput είναι υψηλότερο όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός rts /cts και η παρεμβολή διατηρείται αποτελεσματικά σε σταθερά επίπεδα. Αντίθετα, με τη χρήση του

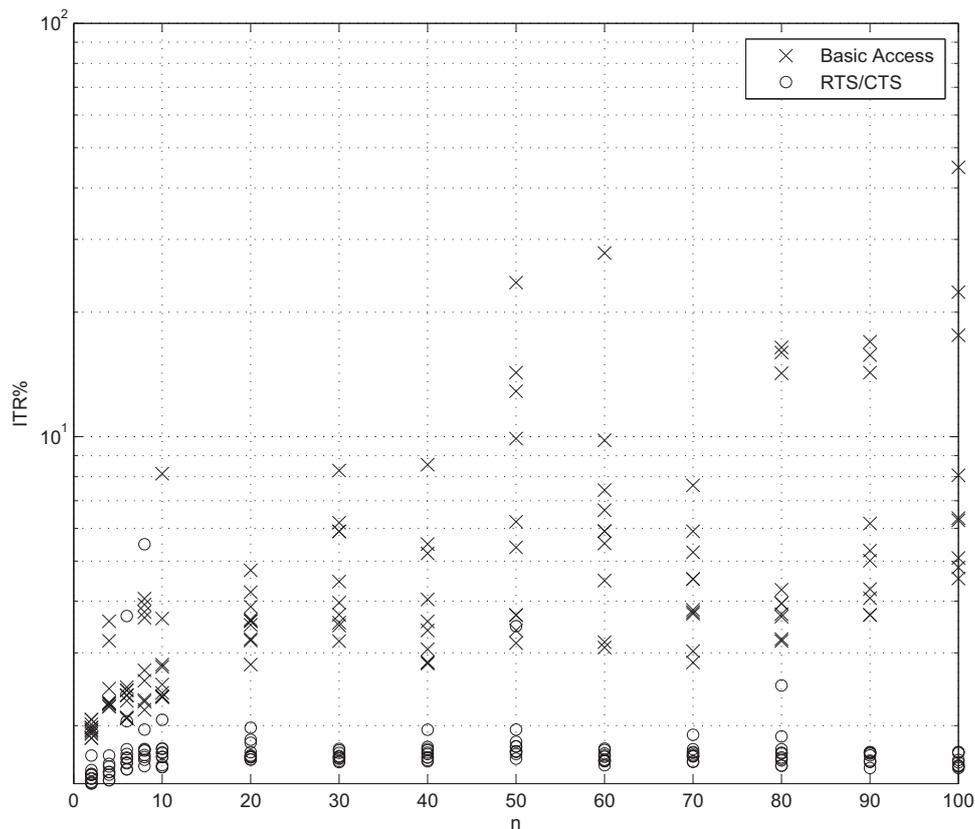


**Σχήμα 7.4:** Throughput κορεσμού συναρτήσει του αριθμού των ανταγωνιζόμενων τερματικών για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF

σχήματος βασικής πρόσβασης, όταν αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, τα, εξ' αρχής υψηλά, επίπεδα παρεμβολής αυξάνονται περαιτέρω.

Στο τελευταίο σενάριο για την εκτίμηση της επίδρασης του μηχανισμού πρόσβασης, ελέγχεται η συμπεριφορά ως προς Throughput , σχήμα 7.6, και χρόνο παρεμβολής, σχήμα 7.7, για μεταβλητή τιμή της περιόδου διαδικασιών φασματικής ανίχνευσης. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι  $\rho_{PS} = 20$ ,  $\alpha = 10\text{ s}^{-1}$ ,  $n = 20$ ,  $L_P = 2048\text{ b}$  και  $\tau = 0.1T$ .

Η παρεμβολή που δέχεται το Πρωτεύον σύστημα μεγαλώνει με γρηγορότερο ρυθμό για το σχήμα Βασικής Πρόσβασης καθώς η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών πραγματοποιείται λιγότερα συχνά. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική γιατί υποδηλώνει άμεσα ότι, δεδομένου του περιορισμού του *ITR* που τίθεται σαν σχεδιαστική παράμετρος, η περίοδος *T* μπορεί να τειθεί σε υψηλότερη τιμή όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *rts /cts* απ' ό,τι αν χρησιμοποιείται η βασική πρόσβαση. Έτσι, χαλαρώνει ο περιορισμός της συχνής διαδικασίας ανίχνευσης, με συνέπεια η επίδοση της iDCF να βελτιώνεται. Επιπρόσθετα, το Throughput της iDCF είναι πάντα υψηλότερο όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός τριπλής χειραφίας.

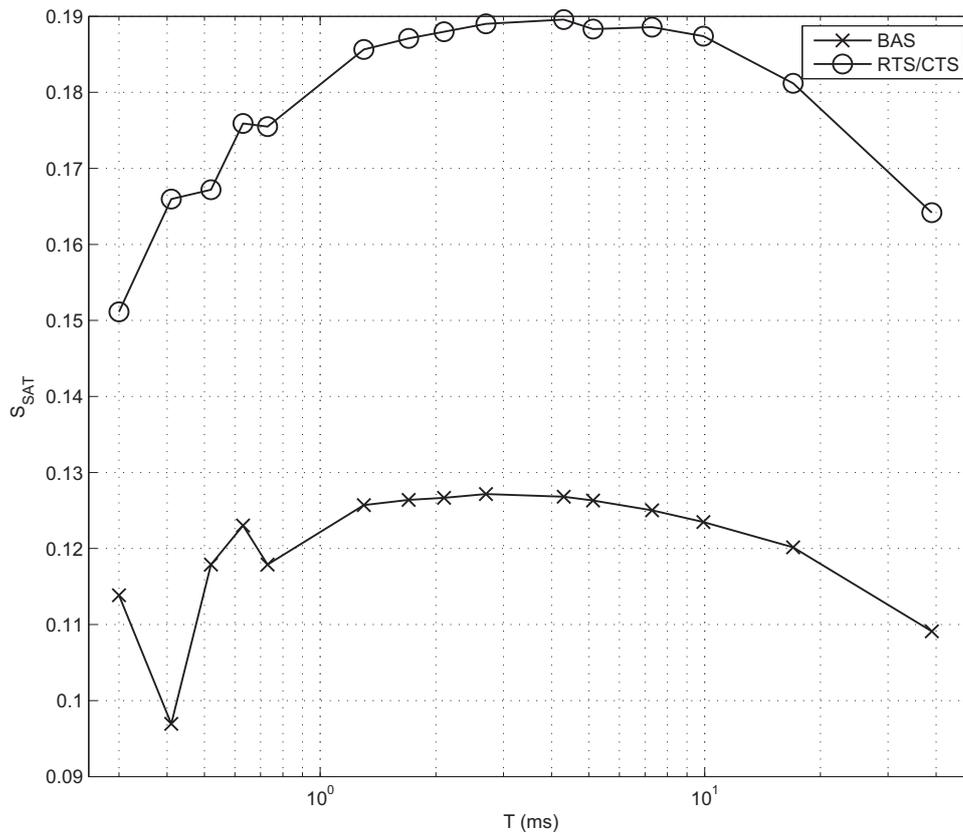


Σχήμα 7.5: Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει του αριθμού των ανταγωνιζόμενων τερματικών για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της *iDCF*

### 7.1.2.2 Ισοζύγιο Throughput - Παρεμβολής και Βέλτιστη τιμή περιόδου $T$

Στα σχήματα 7.6 και 7.7 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της περιόδου εκτέλεσης των διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, αυξάνεται η επίδοση της *iDCF* ως προς το Throughput, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και η παρεμβολή που προκαλείται στο Πρωτεύον σύστημα. Υπάρχει δηλαδή ένα ισοζύγιο μεταξύ Throughput και προκαλούμενης παρεμβολής. Το ισοζύγιο αυτό έχει αναγνωρισθεί υπό την ονομασία Throughput - Sensing tradeoff ή Throughput - Interference tradeoff [91], [92], [93]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.7, η εξάρτηση της ποσότητας παρεμβολής από την περίοδο  $T$  είναι γραμμική, γι' αυτό και τα δύο παραπάνω tradeoff αντιπροσωπεύουν στην ουσία το ίδιο πράγμα. Στις εργασίες αυτές μελετάται η βέλτιστη τιμή που πρέπει να έχει η τιμή της περιόδου  $T$ , υπό συγκεκριμένους περιορισμούς της ποσότητας παρεμβολής που δέχεται το Πρωτεύον σύστημα.

Αν παραμερίσουμε την παρεμβολή που δέχεται το Πρωτεύον σύστημα και εξετάσουμε μεμονωμένα το Throughput του Δευτερεύοντος συστήματος συναρτήσει της τιμής της περιόδου  $T$ , σχήμα 7.6, τότε βλέπουμε ότι υπάρχει μια βέλτιστη τιμή της περιόδου η οποία μεγιστο-

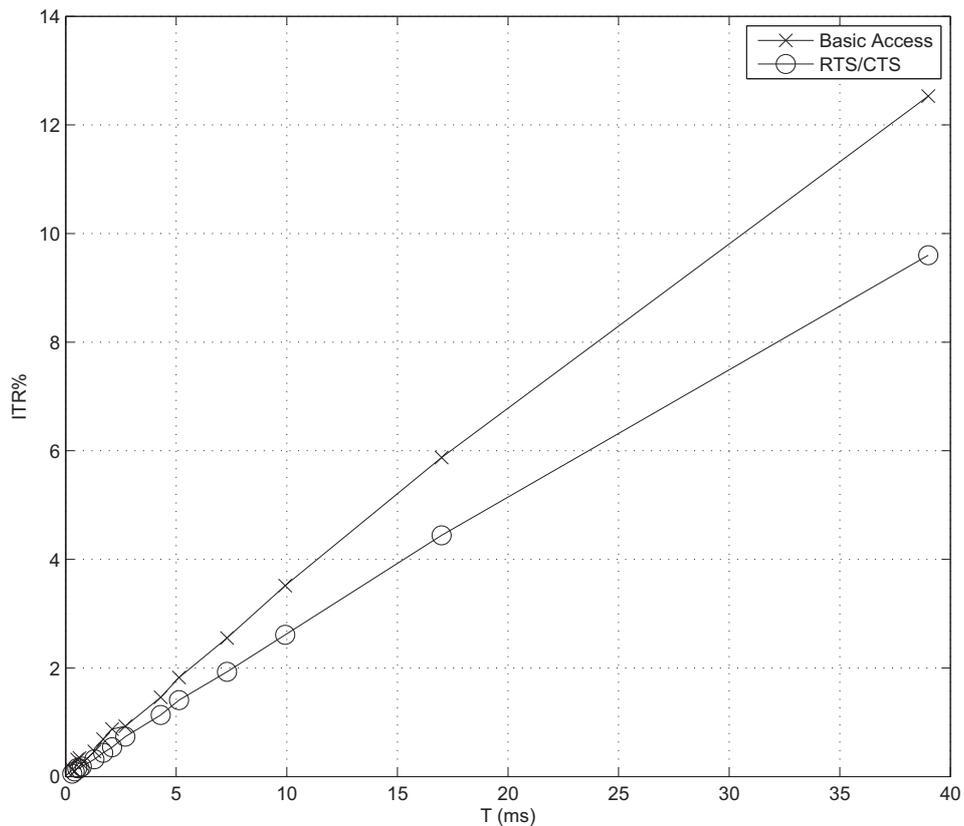


**Σχήμα 7.6:** Throughput κορεσμού συναρτήσεως της περιόδου  $T$  για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της iDCF

ποιεί το Throughput . Πέρα από αυτή, οι συγκρούσεις με τις μεταδόσεις του Πρωτεύοντος συστήματος επηρεάζουν αρνητικά την επίδοση περισσότερο απ' ό,τι την επηρεάζει θετικά η αύξηση της περιόδου, με αποτέλεσμα το Throughput να μειώνεται. Μάλιστα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.8, που περιέχει αποτελέσματα προσομοίωσης, για 4 διαφορετικές τιμές του ρυθμού άφιξης Πρωτευόντων χρηστών, η βέλτιστη τιμή αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακής κίνησης του Πρωτεύοντος συστήματος (τιμή του  $\alpha$  εν προκειμένω).

### 7.1.2.3 Υποχρεωτική χρήση τριπλής χειραψίας στην iDCF

Σε όλα τα παραπάνω σενάρια που εξετάστηκαν οι μετρήσεις στον προσομοιωτή έδειξαν πώς η χρήση του μηχανισμού rts /cts επιτυγχάνει σαφώς μικρότερες τιμές Ποσοστού Χρόνου Παρεμβολής. Ο λόγος πίσω από αυτό είναι ο ίδιος με το γιατί στην πρότυπη DCF το Throughput είναι μεγαλύτερο όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός rts /cts από όταν δε χρησιμοποιείται, για μεγάλα μεγέθη πλαισίου δεδομένων. Στο σενάριο επικαλυπτικής μετάδοσης της iDCF , όμως, τον βλέπουμε από μια διαφορετική οπτική: όταν μεταδίδονται τα πλαίσια rts με λανθασμένο Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας (επειδή έχει προηγηθεί άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη), η διάρκεια της σύγκρουσης με τη μετάδοση του Πρωτεύοντος συστήματος είναι μικρότερη,



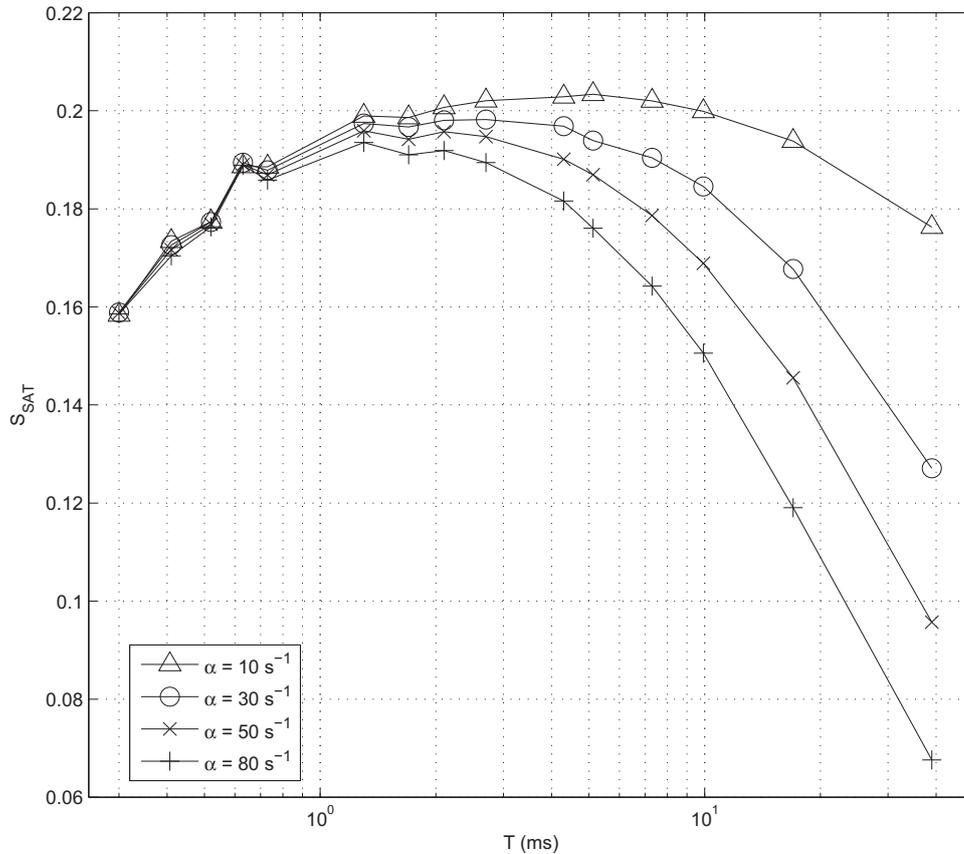
**Σχήμα 7.7:** Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει της περιόδου  $T$  για τις δύο μεθόδους πρόσβασης της *iDCF*

συγκρινόμενη με τη διάρκεια της σύγκρουσης αν είχε σταλεί πλαίσιο δεδομένων. Η *iDCF* έμφυτα οπισθοχωρεί και αναβάλλει την επαναμετάδοση του πλαισίου rts για όλο και μεγαλύτερο χρόνο υποχώρησης, μετά από κάθε σύγκρουση. Έτσι, συνολικά προκύπτει μικρός χρόνος παρεμβολής.

Από αυτά, συμπεραίνεται πως η χρήση του μηχανισμού rts /cts πριν τη μετάδοση του πλαισίου δεδομένων είναι πολύ κρίσιμη σε ένα δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, επικαλυπτικής μετάδοσης, στο οποίο τα χαμηλά επίπεδα παρεμβολών προς το Πρωτεύον Δίκτυο είναι από τους πιο σημαντικούς σχεδιαστικούς στόχους. Γι' αυτό και στην υλοποίηση της *iDCF* (βλ. §3.4.1, §4.2.1.2) έχει καταργηθεί η παράμετρος *RTSThreshold* και όλες οι ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων έχουν τη μορφή της παράστασης (3.2), δηλαδή υιοθετούν πάντα το μηχανισμό τριπλής χειραψίας.

### 7.1.3 Μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων

Ένας δεύτερος μηχανισμός του υποστρώματος MAC, με τον οποίο επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του Ποσοστού Χρόνου Παρεμβολής προς το Πρωτεύον Δίκτυο, είναι ο Μηχανισμός Ανίχνευσης Φέροντος Τριών Καταστάσεων.

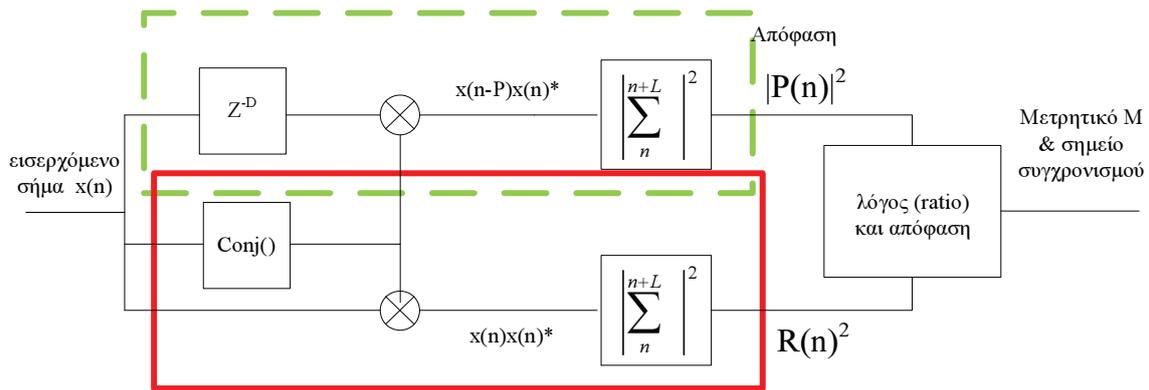


**Σχήμα 7.8:** Throughput συναρτήσει της περιόδου  $T$  για διαφορετικές τιμές του ρυθμού άφιξης Πρωτεύοντων χρηστών

Σε ένα σύστημα πολλαπλής προσπέλασης με ανίχνευση φέροντος, ο μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος, που αποτιμά την κατάσταση του μέσου (καναλιού, φέροντος) ως ανενεργού ή ενεργού, μπορεί να πραγματοποιείται με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

1. Με ανιχνευτή ενέργειας και σύγκριση του αποτελέσματος με ένα συγκεκριμένο κατώφλι.
2. Με ανίχνευση σήματος το οποίο μπορεί να αναγνωρισθεί (όπως ανίχνευση σήματος DSSS, λήψη προοιμίου σήματος OFDM).
3. Με συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων.

Σε ένα συμβατικό σύστημα, το οποίο δε λειτουργεί με επικαλυπτικό τρόπο στο φάσμα, αλλά έχει στη διάθεσή του ένα κανάλι με συγκεκριμένο εύρος ζώνης, οι παραπάνω λειτουργίες πραγματοποιούνται σε μια συνεχή περιοχή του φάσματος, στο κανάλι αυτό. Στην περίπτωση όμως των Δευτερευόντων δικτύων επικαλυπτικής μετάδοσης, όπως είναι αυτά για τα οποία υλοποιήθηκε η iDCF, οι λειτουργίες ανίχνευσης φέροντος θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε ένα μη συνεχές OFDM φυσικό στρώμα. Το κανάλι ενός τέτοιου συστήματος αποτελείται από



Σχήμα 7.9: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου συγχρονισμού

ένα υποσύνολο μόνο των υποφερόντων εκείνων, που καλύπτουν το σύνολο του διατιθέμενου εύρους ζώνης προς χρήση.

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η βελτίωση στην επίδοση που θα προσέφερε ένας μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος του φυσικού στρώματος, ο οποίος θα είχε τρεις καταστάσεις. Στις υπάρχουσες καταστάσεις ενεργό/ανενεργό BUSY, IDLE, η νέα κατάσταση που προστίθεται είναι η “ένδειξη δραστηριότητας στο Πρωτεύον Σύστημα” - PRI\_BUSY. Το μέσο αποτιμάται ως PRI\_BUSY, όταν ανιχνεύεται πιθανή δραστηριότητα του Πρωτεύοντος συστήματος εντός του εύρους ζώνης των υποφερόντων που, τη συγκεκριμένη περίοδο, χρησιμοποιούνται από το Δευτερεύον σύστημα, όπως καθορίζει το Διάγραμμα Φασματικής Διαθεσιμότητας.

Μία υλοποίηση του μηχανισμού ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων παρουσιάζεται στη συνέχεια.

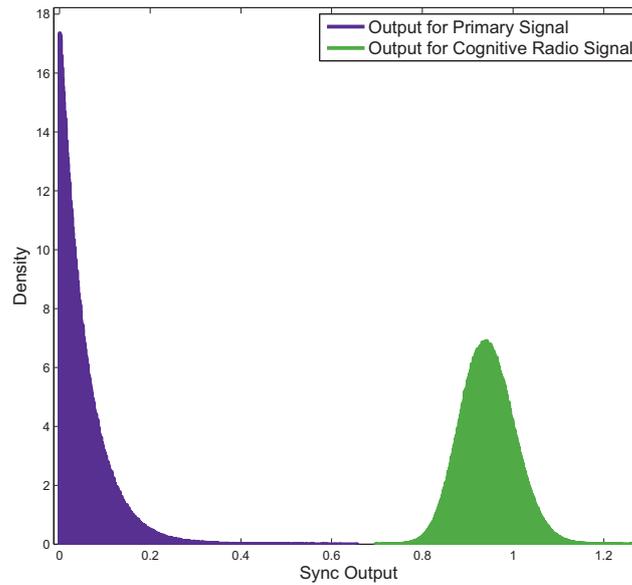
### 7.1.3.1 Υλοποίηση Μηχανισμού 3SCS στο Φυσικό Στρώμα

Αν θεωρηθεί ότι το Σύστημα Γνωστικών Ραδιοεπικοινωνιών χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM, τότε η ανίχνευση και η διάκριση θα πρέπει να γίνεται με βάση τις ιδιαιτερότητες της κυματομορφής.

Στην προσπάθεια μας να κρατήσουμε την υπολογιστική πολυπλοκότητα του σε ρεαλιστικά επίπεδα, είναι επιθυμητή η χρήση απλών αλγορίθμων, που αν είναι δυνατόν, διαμοιράζονται με άλλες λειτουργίες του φυσικού στρώματος των τερματικών του Δικτύου Δυναμικής Χρήσης Φάσματος. Μια τέτοια περίπτωση είναι η χρήση της πληροφορίας που προκύπτει από τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο συγχρονισμού.

Θεωρούμε ότι το φυσικό στρώμα χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο συγχρονισμού των Schmidl & Cox [94], ο οποίος είναι εξαιρετικά απλός και αποδοτικός. Με την ίδια λογική μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τροποποιήσεις του αλγορίθμου (όπως π.χ. στο [95]), ή οι αλγόριθμοι συγχρονισμού που στηρίζονται στην κυκλική επέκταση (χωρίς τη χρήση του προοιμίου) [96]. Οι τελευταίοι αλγόριθμοι δεν προτιμούνται λόγω μειωμένης επίδοσης και αποτελεσματικότητας.

Στο σχήμα 7.9 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα που εξηγεί τη λειτουργία του αλγορίθμου



**Σχήμα 7.10:** Ιστόγραμμα κατανομών της εξόδου του συγχρονιστή με σήματα εισόδου από Πρωτεύον και Δευτερεύον σύστημα, για χρήση από το μηχανισμό 3SCS

μου συγχρονισμού. Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι από τη φύση του ο αλγόριθμος περιλαμβάνει:

- Έναν ανιχνευτή ενέργειας  $R(n)$  (που προσδιορίζεται από τα στοιχεία που περιλαμβάνονται από την κόκκινη συνεχή γραμμή)  $L$  σημείων.
- Υπολογισμό εκτιμητή αυτοσυσχέτισης  $P(n)$  του εισερχόμενου σήματος σε απόσταση  $D$  δειγμάτων (από  $L$  εισερχόμενα δείγματα).

Αν  $N_{\text{sub}}$  ο αριθμός υποφερόντων στο σύστημα, τότε για τον αλγόριθμο συγχρονισμού των Schmidl & Cox τίθεται  $L = D = N_{\text{sub}}/2$ , ενώ για σύστημα χωρίς προοίμιο τίθεται  $L =$  κυκλική επέκταση,  $D = N_{\text{sub}}$ .

Είναι προφανές λοιπόν πως ο ανιχνευτής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ύπαρξης ή μη σήματος στη φασματική περιοχή λειτουργίας. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναγνωρίσει αν η εκπομπή προέρχεται από Πρωτεύον ή από Δευτερεύον τερματικό.

Μια προσεκτικότερη παρατήρηση, όμως, οδηγεί στο συμπέρασμα πως η συγκεκριμένη αυτοσυσχέτιση, που υπολογίζεται, αποτελεί ανιχνευτή χαρακτηριστικού κυματομορφής, αφού εντοπίζει επαναλαμβανόμενες εκπομπές που προέρχονται από OFDM συστήματα. Μάλιστα, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δε χρειάζεται καμία άλλη γνώση για τα προοίμια του σήματος λήψης. Αντίθετα, για ένα διαφορετικό σύστημα (όπως το Πρωτεύον), που είτε είναι σύστημα απλής φέρουσας είτε OFDM με άλλα χαρακτηριστικά και προοίμιο, το αποτέλεσμα της συσχέτισης θα περιορίζεται σε χαμηλές τιμές κοντά στο μηδέν, δίνοντας, έτσι, τη δυνατότητα να ανιχνευτεί η προέλευση της εκπομπής. Μοναδική απαίτηση είναι, όπως και στον απλό

ανιχνευτή ενέργειας, η εκτίμηση της ισχύος θορύβου. Ένα ευχάριστο είναι ότι ο συγχρονιστής αυτός, όπως παρουσιάστηκε από τους Schmidl & Cox, περιέχει (αν και δεν προαπαιτεί) εκτιμητή ισχύος θορύβου.

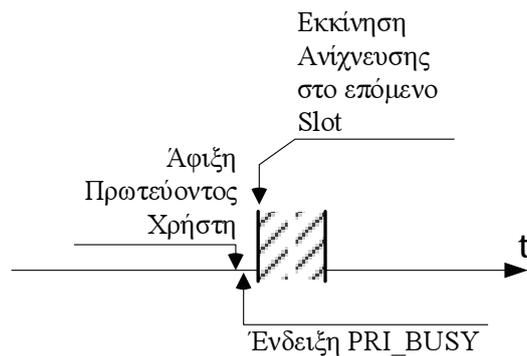
Στο σχήμα 7.10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των κατανομών της εξόδου του συγχρονιστή, αν η είσοδος προέρχεται από OFDM Δευτερεύον σύστημα και από single carrier Πρωτεύον. Ο τρόπος λήψης απόφασης με τη χρήση κατωφλίου είναι προφανής.

### 7.1.3.2 Αξιοποίηση Μηχανισμού 3SCS στο υπόστρωμα MAC

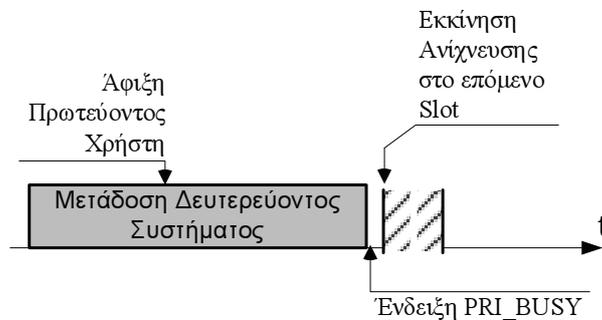
Ο μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων, που προσφέρει το φυσικό στρώμα, μπορεί να αξιοποιηθεί από τη Διακοπτόμενη Λειτουργία Καταναμημένου Ελέγχου, αν εμπλουτιστεί η λειτουργία της κατάλληλα, ώστε να αντιδρά στη νέα κατάσταση. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο διαφορετικές αποκρίσεις της iDCF στη νέα κατάσταση PRLBUSY και συγκρίνονται ως προς την επίδοση που παρέχουν στην iDCF, με αυτή που παρέχει ο απλός μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος δύο καταστάσεων. Η σύγκριση της επίδοσης γίνεται ως προς το Throughput και το μέγεθος Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής *ITR*, που παρουσιάστηκε πρωτύτερα.

**A. Παύση και Αναμονή (SW - Stop & Wait).** Η πρώτη μέθοδος απόκρισης είναι η πιο απλή να υλοποιηθεί στην iDCF. Όταν υπάρχει ένδειξη PRLBUSY, το τερματικό σταματάει τη λειτουργία του, διατηρεί στη μνήμη την κατάστασή του (μετρητής υποχώρησης, λειτουργία που εκχρεμεί ως τερματικό πηγή/προορισμός, κτλ...) και αναμένει την έναρξη της επερχόμενης διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών. Μετά το πέρας της διαδικασίας, έχει αποκτηθεί το νέο έγκυρο Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας και το τερματικό επανεκκινεί τη λειτουργία του. Η μέθοδος αυτή διατηρεί τους χρονισμούς των διακοπών και δεν επηρεάζει το μετρητή που δείχνει στην επόμενη διακοπή. Με τον τρόπο αυτό, διατηρείται ο συγχρονισμός στην εκτέλεση της διαδικασίας ανίχνευσης μεταξύ των τερματικών του δικτύου.

**B. Ιδανική Άμεση Εκκίνηση Διαδικασίας Ανίχνευσης (I - Ideal).** Η δεύτερη μέθοδος είναι ιδανική και στοχεύει στην άμεση έναρξη διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών τη στιγμή που το μέσο αποτιμάται ως PRLBUSY. Η ιδέα εδώ είναι να αποφευχθεί η σπατάλη του ανενεργού χρόνου από τη στιγμή που γίνεται η αποτίμηση του μέσου ως PRLBUSY μέχρι την έναρξη της διαδικασίας ανίχνευσης, που εμπεριέχει η μέθοδος 'Παύση και Αναμονή'. Η μέθοδος αυτή είναι δύσκολο να υλοποιηθεί, επειδή ακριβώς δε διατηρείται ο χρονισμός των διαδικασιών ανίχνευσης. Κάθε τερματικό του δικτύου μπορεί να αποτιμήσει την κατάσταση του μέσου ως PRLBUSY σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Άλλωστε, σε κάποια από τα τερματικά μπορεί να μην υπάρξει καθόλου αυτή η ένδειξη, είτε λόγω διαφορετικής κατάστασης του καναλιού (κρυμμένα τερματικά) είτε γιατί τα τερματικά αυτά την τρέχουσα χρονική στιγμή μπορεί να μη συμμετέχουν σε διαδικασία ανίχνευσης φέροντος, επειδή δεν ανταγωνίζονται για το μέ-



(α') Κατά την άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη δε λαμβάνει χώρα μετάδοση του Δευτερεύοντος συστήματος

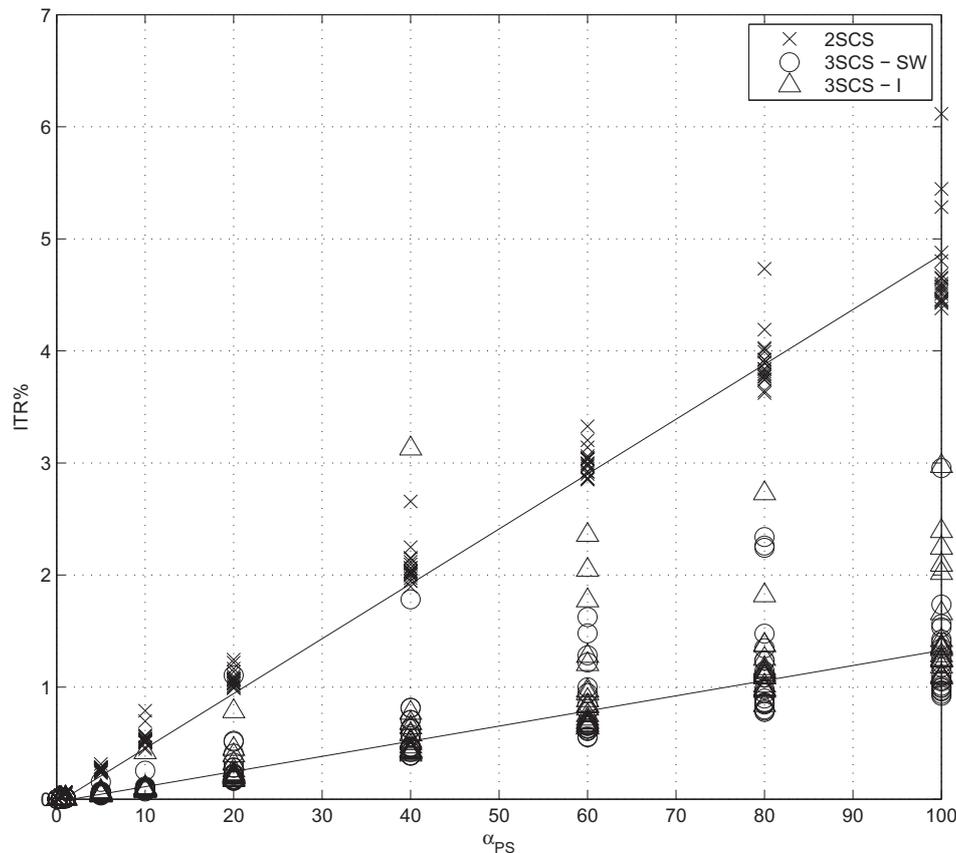


(β') Η ένδειξη PRI\_BUSY γίνεται αμέσως μετά το πέρας της τρέχουσας μετάδοσης του Δευτερεύοντος συστήματος

**Σχήμα 7.11:** Περιπτώσεις άμεσης εκκίνησης της διαδικασίας ανίχνευσης φασματικών οπών μετά την ένδειξη PRI\_BUSY.

σο. Επιπρόσθετα, μετά την εμφάνιση Πρωτεύοντος χρήστη μέσα σε κάποιο/κάποια από τα υποφέροντα του Διανύσματος Φασματικής Διαθεσιμότητας, δεν υπάρχει πια κοινό και έγκυρο διάνυσμα διαθεσιμότητας, το οποίο να παρέχει στο δίκτυο ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας. Έτσι, τα τερματικά δεν μπορούν να συγχρονίσουν από εκεί τη διαδικασία ανίχνευσης με κάποιο μηχανισμό ανταλλαγής πλαισίων ελέγχου.

Η υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε στην iDCF είναι μια ιδανική υλοποίηση στον προσομοιωτή. Σε αυτήν την υλοποίηση η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών ή εκκινεί αμέσως μόλις εμφανιστεί η ένδειξη PRI\_BUSY (πραγματοποιηθεί άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη), σε περίπτωση που δε λαμβάνει χώρα κάποια μετάδοση του Δευτερεύοντος συστήματος, όπως στο σχήμα 7.11(α') ή εκκινεί αμέσως μετά το τέλος της τρέχουσας Δευτερεύουσας μετάδοσης, όπως στο σχήμα 7.11(β'). Για λόγους συγχρονισμού των τερματικών του προσομοιωτή, η εκκίνηση της διαδικασίας γίνεται στην αρχή της χρονοσχισμής πρωτοκόλλου, που ακολουθεί οποιοδήποτε από τα δύο παραπάνω γεγονότα.



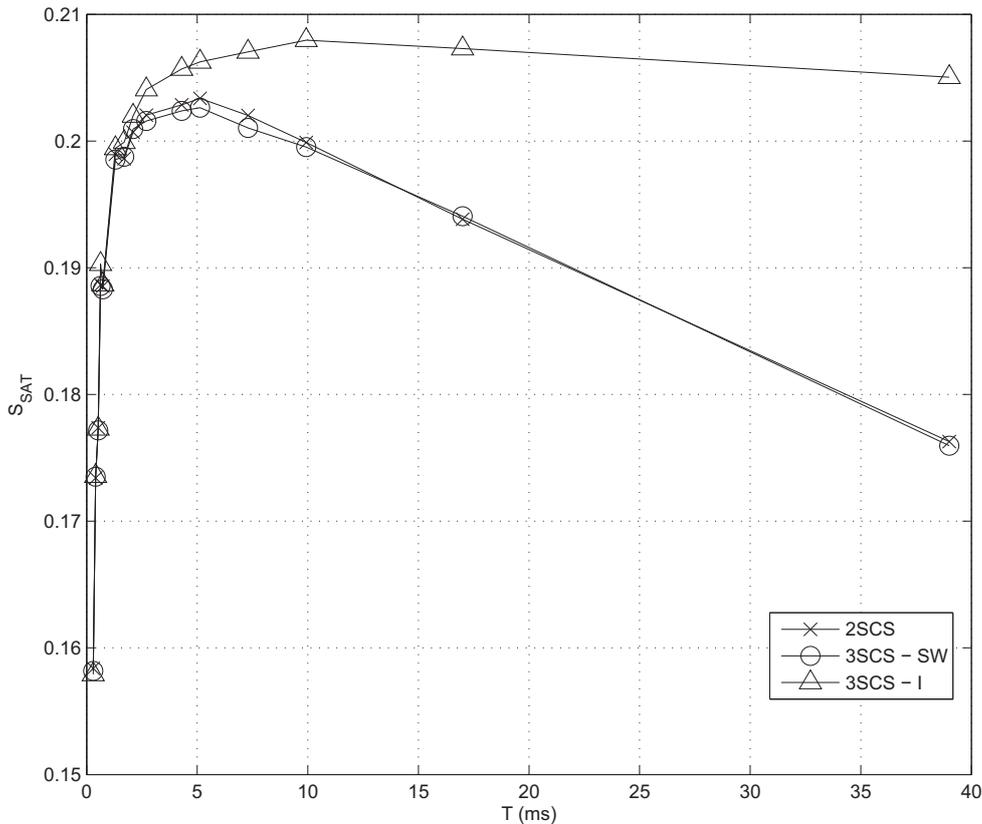
**Σχήμα 7.12:** Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει του ρυθμού άφιξης Πρωτευόντων χρηστών για τις τρεις εκδοχές της *iDCF*

Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική αλλά δύσκολο να υλοποιηθεί για ένα ρεαλιστικό περιβάλλον. Είναι, όμως, χρήσιμη σαν σημείο αναφοράς των μετρητικών επίδοσης, επειδή παρέχει ένα άνω όριο της επίδοσης ρεαλιστικών μεθόδων όπως της A, ή άλλων, μελλοντικών, μεθόδων που σαν σκοπό θα έχουν την πιο γρήγορη εκκίνηση της διαδικασίας ανίχνευσης.

### 7.1.3.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η επίδοση της *iDCF* με ενσωματωμένες καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους, οι οποίες αξιοποιούν το μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος 3 καταστάσεων (3SCS-SW, 3SCS-I), καθώς και η επίδοση της *iDCF* με το μηχανισμό 2 καταστάσεων (2SCS).

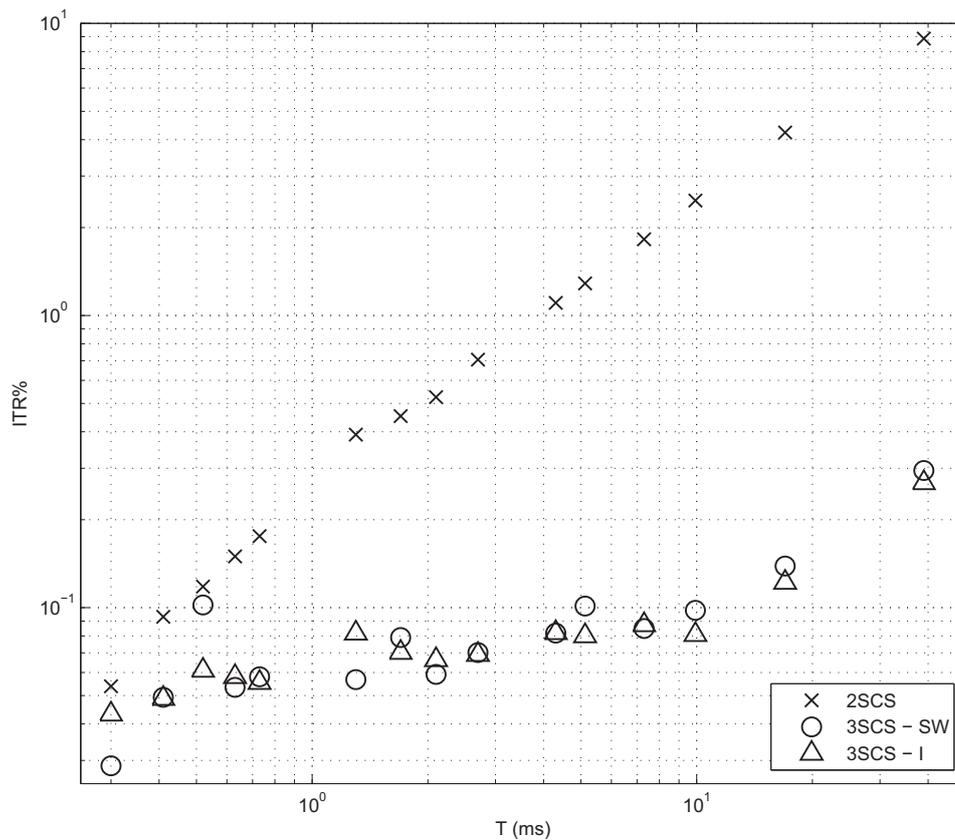
Στο σχήμα 7.12 παρουσιάζεται το Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής που προκαλείται στο Πρωτεύον Σύστημα συναρτήσει του ρυθμού άφιξης Πρωτευόντων Χρηστών για  $\rho_{PS} = 50$ ,  $n = 20$ ,  $T = 1 \text{ ms}$ ,  $\tau = 200 \mu\text{s}$  και  $L_P = 2048 \text{ b}$ . Υψηλότερες τιμές του ρυθμού άφιξης α σημαίνουν μεγαλύτερη πιθανότητα άφιξης Πρωτευόντων χρηστών μέσα στον ενεργό χρόνο



**Σχήμα 7.13:** Throughput συναρτήσεως της περιόδου διαδικασιών ανίχνευσης για τις τρεις εκδοχές της iDCF

και πραγματοποίηση αφίξεων νωρίτερα, το οποίο έχει σαν συνέπεια το Δευτερεύον δίκτυο να αρχίζει να παρεμβάλει νωρίτερα στο Πρωτεύον δίκτυο. Η συμπεριφορά της iDCF με το μηχανισμό 2 καταστάσεων 2SCS, να συνεχίζει να κάνει απόπειρες μεταδόσεων πλαισίων και μετά την άφιξη Πρωτευόντων χρηστών, παρόλο που οι μεταδόσεις αυτές είναι αποτυχημένες λόγω της σύγκρουσης με τις μεταδόσεις του Πρωτεύοντος δικτύου, είναι αυτή στην οποία οφείλεται η μεγάλη αύξηση του *ITR* καθώς αυξάνεται και το  $\alpha$ . Αντίθετα, η iDCF με τις δύο μεθόδους 3SCS-SW και 3SCS-I παρουσιάζει σημαντικά μικρότερες τιμές προκληθείσας παρεμβολής. Με την πρώτη μέθοδο σταματάει τις μεταδόσεις μέχρι να ανανεωθεί το Διάλυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας και έτσι δεν προκαλεί άλλες συγκρούσεις. Με τη δεύτερη μέθοδο ανανεώνει αμέσως το Διάλυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας και συνεχίζει τις μεταδόσεις χωρίς να προκαλεί συγκρούσεις. Οι δύο μέθοδοι, που αξιοποιούν το μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων, έχουν την ίδια συμπεριφορά ως προς την παρεμβολή (οι ευθείες γραμμές τάσεων των μετρήσεων συμπίπτουν).

Παρόλο που οι μέθοδοι 3SCS-SW και 3SCS-I έχουν την ίδια συμπεριφορά ως προς την παρεμβολή, η μέθοδος 3SCS-I υπερέχει της πρώτης ως προς το Throughput του Δευτερεύοντος δικτύου που επιτυγχάνει. Ενώ η μέθοδος 3SCS-SW σταματάει και αναμένει την επόμενη δια-



**Σχήμα 7.14:** Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής συναρτήσει της περιόδου διαδικασιών ανίχνευσης για τις τρεις εκδοχές της *iDCF*

δικασία ανίχνευσης, όταν το μέσο αποτιμηθεί ως PRLBUSY, η μέθοδος 3SCS-I επιτυγχάνει ταχύτερα επιτυχείς μεταδόσεις με το ανανεωμένο Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας, το οποίο αποκτά μετά τη διαδικασία ανίχνευσης που εκκινεί αμέσως. Το σχήμα 7.13 απεικονίζει το μετρηθέν Throughput των 3 εκδοχών της *iDCF* συναρτήσει της περιόδου  $T$ . Στο σενάριο του σχήματος αυτού τέθηκε  $\alpha = 10 \text{ s}^{-1}$ ,  $\rho_{PS} = 20$ ,  $n = 20$ ,  $\tau = 0.1T$  και  $L_P = 2048 \text{ b}$ . Το Throughput χειροτερεύει συνεχώς για τις εκδοχές 3SCS-SW και 2SCS όσο μεγαλώνει η τιμή της περιόδου, όπως ακριβώς και στο σενάριο του σχήματος 7.6. Αντίθετα, με τη χρήση της μεθόδου 3SCS-I, η *iDCF* διατηρεί με επιτυχία το λαμβανόμενο Throughput σε υψηλή τιμή. Στις μεθόδους 3SCS-SW και 2SCS επέρχεται χειροτέρευση της επίδοσης επειδή μετά την άφιξη Πρωτεύοντος χρήστη, και στις δύο περιπτώσεις, δεν πραγματοποιούνται επιτυχείς μεταδόσεις αλλά για διαφορετικό λόγο. Στη μεν 2SCS επειδή όλες οι μεταδόσεις μετά τη χρονική στιγμή  $t_{a,i}$  συγκρούονται με Πρωτεύουσες μεταδόσεις, στη δε 3SCS-SW επειδή μετά τη χρονική στιγμή  $t_{a,i}$  δεν πραγματοποιούνται καν μεταδόσεις.

Τέλος, όσον αφορά τη σύγκριση των τριών εκδοχών της *iDCF*, το σχήμα 7.14 παρουσιάζει την παρεμβολή που προκαλείται στο Πρωτεύον δίκτυο συναρτήσει της περιόδου  $T$ . Ενώ με το μηχανισμό 2 καταστάσεων η παρεμβολή αυξάνεται σημαντικά καθώς οι διαδικασίες

ανίχνευσης πραγματοποιούνται αραιότερα, οι δύο μέθοδοι που αξιοποιούν το μηχανισμό 3 καταστάσεων διατηρούν σε χαμηλά επίπεδα την παρεμβολή ακόμα και σε μεγάλες τιμές της περιόδου  $T$ . Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι, όταν χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος που αξιοποιεί το μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων, ο λειτουργικός περιορισμός συχνής εκτέλεσης διαδικασιών ανίχνευσης φασματικών οπών, που επιβαρύνει την επίδοση της iDCF, μπορεί να γίνει πιο ήπιος χωρίς να ανησυχεί ο σχεδιαστής για τα προκληθέντα επίπεδα παρεμβολών προς το Πρωτεύον δίκτυο.

## 7.2 Προσαρμογές παραθύρου ανταγωνισμού

Εκτενής έρευνα έχει πραγματοποιηθεί διεθνώς για τη βελτίωση της επίδοσης της DCF με χρήση προσαρμοστικών μεθόδων επιλογής του μεγέθους του παραθύρου ανταγωνισμού (Contention Window - CW) [78], [79], [97]. Οι μέθοδοι αυτές εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι το CW καθορίζει σε μεγάλο ποσοστό το ρυθμό των συγκρούσεων που συμβαίνουν καθώς και το χρόνο που το μέσο παραμένει ανενεργό, ενώ υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση (διαδικασία υποχώρησης), και προσπαθούν να προσαρμόσουν το μέγεθός του ανάλογα με το προσφερόμενο φορτίο (τηλεπικοινωνιακή κίνηση, αριθμό ανταγωνιζόμενων τερματικών).

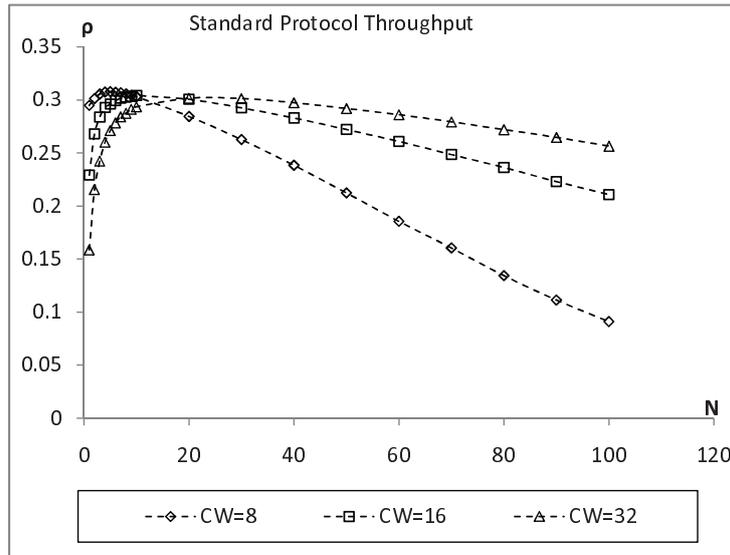
Στα [98], [99] προτείνεται η χρήση προσαρμοζόμενου μεγέθους παραθύρου που βασίζεται στην παρατήρηση του τρέχοντος τηλεπικοινωνιακού φόρτου του δικτύου. Ο τηλεπικοινωνιακός φόρτος εξαρτάται άμεσα από το πλήθος των τερματικών, που ανταγωνίζονται για το μέσο, το οποίο προσεγγίζεται από τη μέτρηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Στο [100] χρησιμοποιούνται 'σημεία ζωής' (signs of life) για την ανίχνευση του πλήθους των τερματικών που ανταγωνίζονται. Με βάση το εκτιμώμενο πλήθος των σταθμών προσαρμόζεται κατάλληλα το CW. Ζωτικά σημεία των τερματικών μπορεί να είναι τα πακέτα που εκπέμπουν στα οποία αναφέρουν πάντα και την ταυτότητά τους (διεύθυνση MAC).

Στις εργασίες [85], [87], [101] δε γίνεται προσέγγιση του αριθμού των τερματικών που ανταγωνίζονται και παράλληλη προσαρμογή του CW, αλλά προστίθεται ένα είδος μνήμης στη διαδικασία μεταβολής του. Στην πρότυπη DCF η τρέχουσα τιμή του CW περιέχει κάποιου είδους πληροφορία του τηλεπικοινωνιακού φόρτου, που υπάρχει στο δίκτυο, καθώς αυτή αυξάνεται μετά από κάθε σύγκρουση. Με την επιτυχή όμως μετάδοση το CW μηδενίζεται στην αρχική τιμή  $CW_0$  και η πληροφορία αυτή χάνεται. Στις εργασίες αυτές, η μνήμη προστίθεται με την αργή αύξηση και μείωση του CW γραμμικά ή πολλαπλασιαστικά:

**Γραμμική μεταβολή** . Κατά τη γραμμική μεταβολή του μεγέθους CW, μετά από αποτυχημένη μετάδοση το CW αυξάνεται κατά μία σταθερή τιμή  $\omega$ , ενώ ύστερα από επιτυχή μετάδοση μειώνεται κατά  $\omega$  με πιθανότητα  $1 - \delta$ , ή παραμένει αμετάβλητο με πιθανότητα  $\delta$ . Τα  $\omega$ ,  $\delta$  είναι παράμετροι του πρωτοκόλλου και διαφορετικές τιμές επιτυγχάνουν διαφορετική επίδοση για διαφορετικό τηλεπικοινωνιακό φόρτο.

**Πολλαπλασιαστική μεταβολή** . Κατά την πολλαπλασιαστική μεταβολή, το CW διπλασιάζεται ύστερα από αποτυχημένη μετάδοση όπως στον αλγόριθμο του προτύπου.



Σχήμα 7.15: Κανονικοποιημένο Throughput της *iDCF* με αλγόριθμο επιλογής *CW* αυτόν του 802.11, για τρεις διαφορετικές αρχικές τιμές *CW*

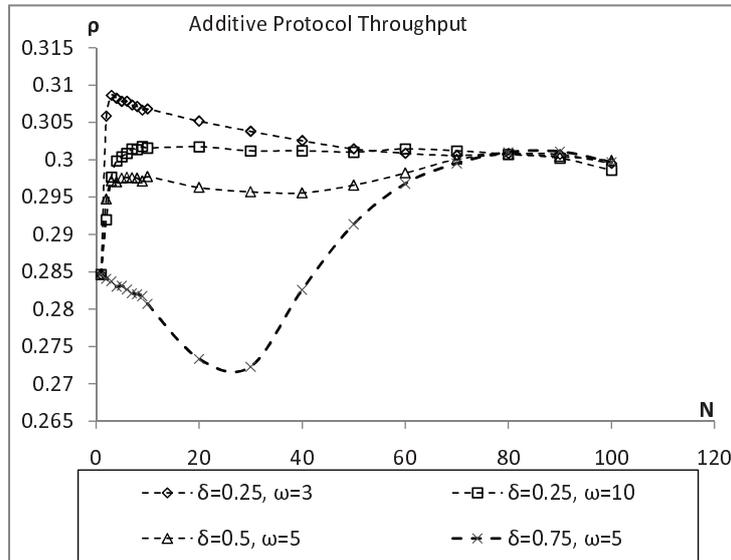
Ύστερα από επιτυχή μετάδοση, το *CW* μειώνεται σε ένα κλάσμα της τρέχουσας τιμής, δηλαδή  $CW = \delta CW_{current}$ , όπου  $\delta \in (0, 1)$ .

Και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι καθώς και ο αλγόριθμος του προτύπου υλοποιούνται και συγκρίνονται παρακάτω στην *iDCF*, με σκοπό την εκτίμηση της επίδοσής τους στο διακοπτόμενο περιβάλλον επικαλυπτικής μετάδοσης. Στα σχήματα 7.15, 7.16 και 7.17 παρουσιάζεται το κανονικοποιημένο Throughput κορεσμού συναρτήσει του πλήθους των τερματικών, όπως μετρήθηκε στον προσομοιωτή, για τον αλγόριθμο μεταβολής του *CW* που υπάρχει στο πρότυπο, τον αλγόριθμο προσθετικής μεταβολής και τον αλγόριθμο πολλαπλασιαστικής μεταβολής αντίστοιχα. Στον προσομοιωτή τέθηκε  $T = 2 \text{ ms}$ ,  $\tau = 400 \mu\text{s}$ ,  $L_P = 2048 \text{ b}$  και  $R = 16 \text{ Mbps}$ .

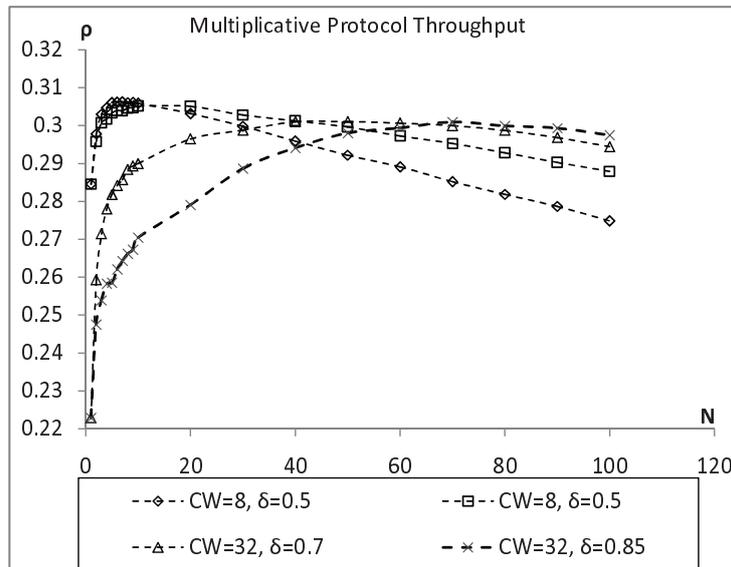
Οι μέθοδοι αυτές όπως και στο πρότυπο πρωτόκολλο παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά στο διακοπτόμενο περιβάλλον, όπως και στην πρότυπη λειτουργία *DCF*. Είναι φανερό ότι, κάθε αλγόριθμος επιλογής μεγέθους *CW*, με συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του, παρουσιάζει πλεονέκτημα έναντι των υπόλοιπων δύο σε συγκεκριμένο εύρος αριθμού ανταγωνιζόμενων τερματικών. Ο προσομοιωτής της *iDCF* μπορεί, έτσι, να αποτελέσει μια πλατφόρμα ελέγχου και βελτίωσης αλγορίθμων επιλογής μεγέθους *CW* στο διακοπτόμενο περιβάλλον επικαλυπτικής μετάδοσης.

### 7.3 Διακοπτόμενος Κατανεμημένος Έλεγχος Πρόσβασης με Διαίρεση Χρονοσχισμής

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μελέτη βελτίωσης της επίδοσης της *iDCF* με χρήση μιας νέας μεθόδου πολυπλεξίας με διαίρεση χρονοσχισμής πρωτοκόλλου, η οποία πραγματοποιείται με κατάλληλη αρχικοποίηση του μετρητή υποχώρησης. Στο σχήμα που προτείνεται, μετά τον αρχικό ανταγωνισμό των τερματικών, επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας και η



Σχήμα 7.16: Κανονικοποιημένο Throughput της iDCF με τον προσθετικό αλγόριθμο επιλογής CW, για τέσσερα διαφορετικά ζεύγη τιμών των παραμέτρων  $\omega$  και  $\delta$



Σχήμα 7.17: Κανονικοποιημένο Throughput της iDCF με τον πολλαπλασιαστικό αλγόριθμο επιλογής CW, για τέσσερα διαφορετικά ζεύγη τιμών των παραμέτρων  $\delta$  και αρχικής τιμής CW

## Κεφάλαιο 7. Μελέτες Εμπλουτισμού της *iDCF*

πρόσβαση στο μέσο έχει τη μορφή πολυπλεξίας στο χρόνο, χωρίς όμως να υπάρχει κεντρικός έλεγχος. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και στην DCF για συμβατικά δίκτυα. Στα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, όμως, που ο σκοπός τους είναι η βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης των φασματικών πόρων και η αξιοποίηση όσο το δυνατόν καλύτερα του ενεργού χρόνου, η χρήση της ταιριάζει απόλυτα με τον χαρακτήρα τους. Το προταθέν σχήμα ονομάζεται DSDMA - Distributed Slot Division Multiple Access.

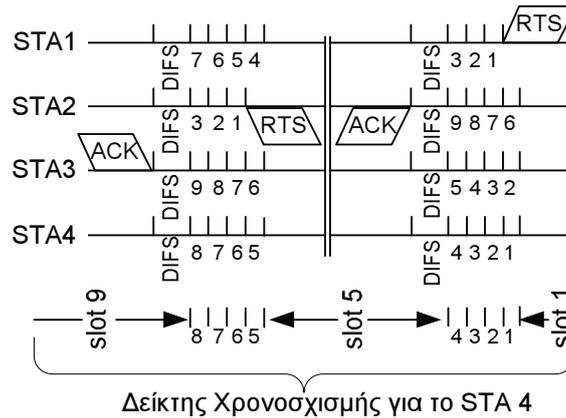
Μία ισχυρή παραδοχή, στην έως τώρα ανάπτυξη του σχήματος DSDMA, είναι η γνώση του αριθμού  $N$  των ενεργών τερματικών, δηλαδή των τερματικών που συμμετέχουν στον ανταγωνισμό για το μέσο, έχοντας συνεχώς δεδομένα για μετάδοση. Αυτή η γνώση μπορεί να αποκτηθεί είτε μετρώντας ζωτικά σημεία (signs of life), όπως στο άρθρο [100], ή με συνεχείς ανταλλαγές μηνυμάτων εγγραφής/διαγραφής. Η υλοποιηθείσα Λειτουργία Κατανομημένου Συγχρονισμού (βλ. §3.5), προβλέπει τη χρήση των μηνυμάτων SYNC για την απόκτηση αυτής της γνώσης. Η παραδοχή ότι τα ενεργά τερματικά είναι τερματικά που λειτουργούν σε ασυμπτωτικές συνθήκες, έχοντας συνεχώς δεδομένα προς μετάδοση, είναι έγκυρη με την έννοια συγκεκριμένων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών των οποίων η τηλεπικοινωνιακή κίνηση έχει περιόδους συνεχούς μετάδοσης δεδομένων.

Στη συνέχεια περιγράφουμε τις δύο κύριες λειτουργίες του πρωτοκόλλου DSDMA την παρακολούθηση χρονοσχισμών και την αρχικοποίηση του χρονομετρητή υποχώρησης.

### 7.3.1 Λειτουργία παρακολούθησης χρονοσχισμής

Κάθε τερματικό, όταν λαμβάνει ένα πλαίσιο, εξάγει από την επικεφαλίδα το πεδίο Address1 (RTS, DATA) ή το πεδίο Address2 (CTS, ACK) που αναφέρονται στο τερματικό Πηγή της τρέχουσας FES. Το τερματικό πηγή της τρέχουσας FES είναι και ο κάτοχος της συγκεκριμένης χρονοσχισμής, στην οποία δείχνει η τρέχουσα τιμή του χρονομετρητή υποχώρησης του τερματικού. Στο παράδειγμα του σχήματος 7.18 για το τερματικό STA4 η χρονοσχισμή με δείκτη 9 ανήκει στο STA3, η χρονοσχισμή με δείκτη 5 στο STA2 και η χρονοσχισμή με δείκτη 1 στο STA1 ενώ οι εναπομείνουσες χρονοσχισμές σε κανένα τερματικό. Όμοια με τη θεωρητική ανάλυση στο κεφάλαιο 5, ο όρος χρονοσχισμή εδώ δεν αναφέρεται στη χρονοσχισμή του πρωτοκόλλου. Αναφέρεται στο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών μειώσεων του χρονομετρητή υποχώρησης σε ένα τερματικό. Το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να είναι ίσο με μία χρονοσχισμή του πρωτοκόλλου στην περίπτωση που η χρονοσχισμή είναι αδρανής, ή μπορεί να είναι ίσο με τη μετάδοση μιας ολόκληρης FES.

Κάθε τερματικό διατηρεί εσωτερικά έναν πίνακα κατανομής χρονοσχισμών, κάθε εγγραφή του οποίου δείχνει τον κάτοχο κάθε χρονοσχισμής. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως η αρίθμηση των χρονοσχισμών είναι διαφορετική σε κάθε τερματικό και εξαρτάται από το χρόνο στον οποίο το κάθε τερματικό άρχισε τη διαδικασία μείωσης του χρονομετρητή υποχώρησης. Για παράδειγμα στο σχήμα 7.18 η χρονοσχισμή με δείκτη 4 για το τερματικό STA1 αντιστοιχεί στη χρονοσχισμή 5 για το τερματικό STA4 και ανήκει στο STA2.



Σχήμα 7.18: Λειτουργία Παρακολούθησης Χρονοσχιμών, παράδειγμα αρίθμησης χρονοσχιμών για το τερματικό STA4, χρονομετρητές υποχώρησης για κάθε τερματικό.

### 7.3.2 Λειτουργία αρχικοποίησης χρονομετρητή υποχώρησης

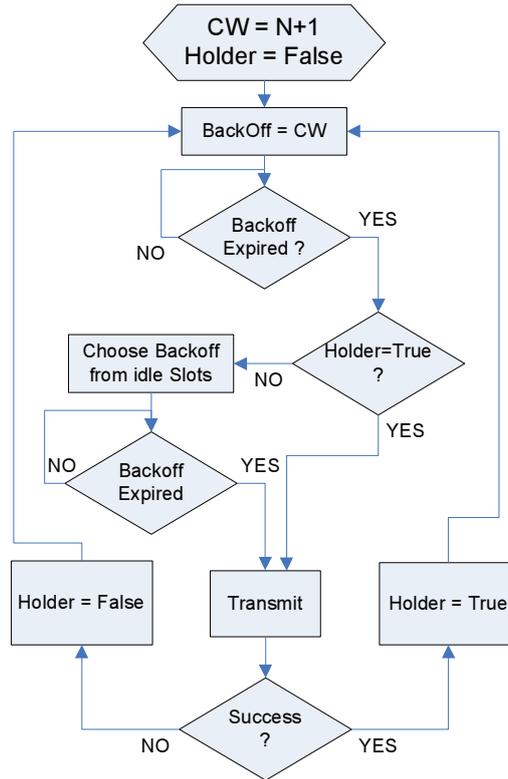
Η λειτουργία παρακολούθησης χρονοσχιμών επιτρέπει στα τερματικά να γνωρίζουν ποιες χρονοσχιμές είναι κατειλημμένες και ποιες ελεύθερες. Έτσι, μπορούν να επιλέξουν τιμή για το χρονομετρητή υποχώρησης από τις ελεύθερες χρονοσχιμές και να αποφύγουν τη σύγκρουση με τερματικά που είναι ήδη κάτοχοι χρονοσχιμών. Το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού τίθεται ίσο με  $N + 1$ . Ύστερα από επιτυχή μετάδοση, ένας σταθμός γίνεται κάτοχος της χρονοσχιμής που χρησιμοποίησε για τη μετάδοση και συνεχίζει να μεταδίδει εκεί θέτοντας πάντα το χρονομετρητή υποχώρησης του στην τιμή  $N + 1$ . Ο αλγόριθμος επιλογής τιμής αρχικοποίησης του χρονομετρητή υποχώρησης δίνεται στο σχήμα 7.19. Το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού τίθεται ίσο με  $N + 1$ , ώστε να υπάρχει μια τουλάχιστον κενή χρονοσχιμή, που θα χρησιμοποιείται από νέα τερματικά που θα θέλουν να προστεθούν στα ενεργά τερματικά, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω το  $N$  και άρα το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού.

Όταν το σχήμα πρόσβασης DSDMA σταθεροποιηθεί, κάθε ενεργό τερματικό είναι κάτοχος μιας χρονοσχιμής και το σχήμα μοιάζει με κάποιου είδους πολυπλεξίας στο χρόνο, χωρίς όμως κεντρικό έλεγχο, στο οποίο δεν υπάρχουν συγκρούσεις. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται “κατάσταση χωρίς συγκρούσεις”. Ο πρόσθετος τηλεπικοινωνιακός φόρτος των πακέτων ελέγχου *rts*, *cts* και *ack* χρειάζεται για να εξυπηρετεί τη λειτουργία παρακολούθησης χρονοσχιμών νέων, ή ενεργών τερματικών, τα οποία είναι κρυμμένα και φυσικά για να εξυπηρετεί τη λειτουργία εικονικής ανίχνευσης φέροντος της iDCF.

### 7.3.3 Θεωρητικό όριο επίδοσης DSDMA

Ακολουθώντας την ανάλυση του εικονικού χρόνου μετάδοσης [98] μπορούμε να υπολογίσουμε ένα άνω όριο  $S_{limit}$  για το Throughput του πρωτοκόλλου DSDMA από την εξίσωση:

$$S_{limit} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{P,i}}{T_{vTxTime}}, \quad (7.2)$$

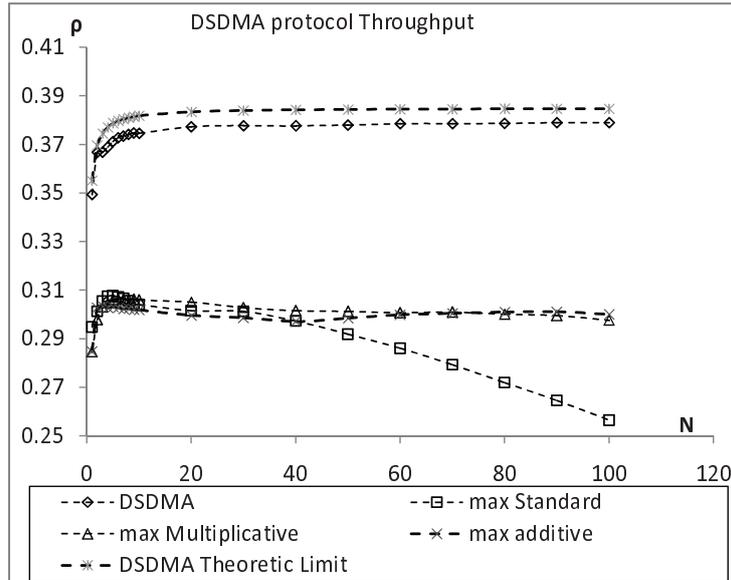


Σχήμα 7.19: Η αλγοριθμική δομή της λειτουργίας αρχικοποίησης του χρονομετρητή υποχώρησης

όπου  $T_{vTxTime}$  είναι ο εικονικός χρόνος μετάδοσης του φορτίου  $L_{P,i}$  όλων των τερματικών, δηλαδή ο χρόνος που συνολικά καταναλώνεται για να αποσταλούν όλα τα bits δεδομένων. Όταν το DSDMA έχει φτάσει την κατάσταση χωρίς συγκρούσεις, έπειτα από μια περίοδο DIFS και την πάροδο μιας χρονοσχιμής πρωτοκόλλου, ο τρέχων κάτοχος της χρονοσχιμής αρχίζει την επόμενη FES στέλνοντας το πλαίσιο rts. Η FES ολοκληρώνεται με την αποστολή του ack από το τερματικό Προορισμός. Υποθέτουμε ότι ένας εικονικός χρόνος μετάδοσης εδώ είναι ο χρόνος κατά τον οποίο όλα τα  $N$  τερματικά έχουν αποστείλει ένα πλαίσιο δεδομένων. Αν λάβουμε υπ' όψιν ότι στο DSDMA υπάρχει πάντα μία αδρανής χρονοσχιμή, κατά την οποία δε μεταδίδει κανένα τερματικό και η οποία ισούται με μία χρονοσχιμή πρωτοκόλλου, και θεωρήσουμε σταθερό μέγεθος πλαισίου δεδομένων  $L_P$  σε όλα τα τερματικά, τότε προκύπτει η εξίσωση:

$$S_{limit} = \frac{(1 - \tau)N \times L_P}{n(DIFS + 3SIFS + \sigma + 2RSP + RTS) + \sigma}, \quad (7.3)$$

η οποία δίνει ένα θεωρητικό άνω όριο του Throughput του DSDMA σαν συνάρτηση του  $N$ . Η παραπάνω εξίσωση είναι απλουστευμένη, επειδή υποθέτει απόλυτο συγχρονισμό μεταξύ των σημείων έναρξης και ολοκλήρωσης των FES και των σημείων έναρξης και ολοκλήρωσης των διαδικασιών φασματικής ανίχνευσης. Με άλλα λόγια, στην εξίσωση αυτή δε λαμβάνονται υπόψη οι τυχούσες διακοπές των FES από τις διαδικασίες φασματικής ανίχνευσης, πριν την έναρξη των οποίων μπορεί να σπαταλάται και επιπρόσθετος χρόνος. Πιο ακριβής εξίσωση θα προέκυπτε, αν χρησιμοποιούταν οι υπολογισθείσες αναμενόμενες διάρκειες των τμημάτων



**Σχήμα 7.20:** *Throughput DSDMA σε σύγκριση με της iDCF σαν συνάρτηση του πλήθους  $N$  των ενεργών τερματικών*

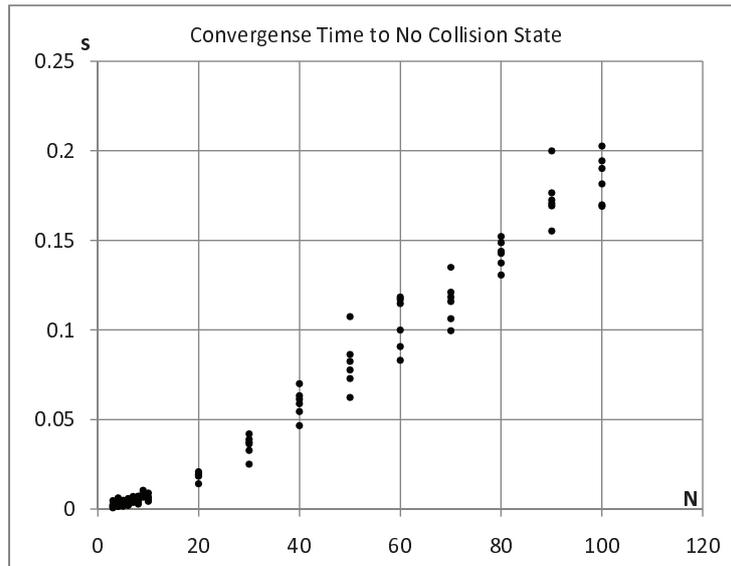
της FES από το κεφάλαιο 5. Για το λόγο αυτό της απλούστευσης, στο σχήμα 7.20 υπάρχει μία απόσταση μεταξύ του Throughput που προκύπτει από την προσομοίωση και του άνω θεωρητικού ορίου.

### 7.3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα της επίδοσης του σχήματος DSDMA για χρονικές περιόδους κατά τις οποίες το  $N$  παραμένει σταθερό και γνωστό. Η παραδοχή αυτή μπορεί να θεωρηθεί και σαν ένα άνω όριο της επίδοσης του DSDMA, το οποίο επιτυγχάνεται όταν λειτουργεί σε τέτοιες χρονικές περιόδους. Στο σχήμα 7.20 παρουσιάζεται η επίδοση του DSDMA σαν συνάρτηση του πλήθους των τερματικών που συμμετέχουν στο δίκτυο για περίοδο  $T = 2\text{ ms}$  και για κανονικοποιημένη διάρκεια φασματικής ανίχνευσης  $\tau = 0.2$  ( $= 0.4\text{ ms}$ ). Επίσης, για σύγκριση, παρουσιάζεται και το Throughput της iDCF για τους τρεις αλγόριθμους επιλογής CW, θέτοντας τις βέλτιστες<sup>2</sup> τιμές των παραμέτρων  $\omega$  και  $\delta$  για κάθε  $N$ .

Στο σχήμα 7.21 παρουσιάζεται ο χρόνος σύγκλισης του DSDMA στην κατάσταση χωρίς συγκρούσεις σαν συνάρτηση του αριθμού των τερματικών  $N$ . Τα αποτελέσματα είναι για διάφορες τιμές των παραμέτρων  $T, \tau$ . Στις μετρήσεις αυτές, γίνεται η υπόθεση ότι όλα τα τερματικά αρχικοποιούνται ταυτόχρονα, γνωρίζοντας την τιμή  $N$ , και υλοποιώντας τον αλγόριθμο αρχικοποίησης του χρονομετρητή υποχώρησης του σχήματος 7.19 φτάνουν στην κατάσταση χωρίς συγκρούσεις. Η γενική ανοδική τάση του χρόνου σύγκλισης καθώς το  $N$  αυξάνεται είναι αναμενόμενη, καθώς για μεγαλύτερες τιμές του  $N$  περισσότερες συγκρούσεις συμβαίνουν κατά τη φάση σταθεροποίησης του πρωτοκόλλου.

<sup>2</sup>βέλτιστες μεταξύ των δοκιμασθέντων τιμών



Σχήμα 7.21: Διάρκεια φάσης σταθεροποίησης του πρωτοκόλλου *DSDMA* συναρτήσει του πλήθους των τερματικών

## 7.4 Προσάρτηση Σε Πρωτεύον δίκτυο - εφαρμογή σε δίκτυο GSM

Μία από τις σημαντικότερες ερευνητικές προκλήσεις των καταναμημένων δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος ή δικτύων Γνωστικών Συστημάτων Ραδιοεπικοινωνιών είναι η ανάθεση/εύρεση ενός κοινού καναλιού ελέγχου ή CCC - (Common Control Channel), το οποίο να χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των πληροφοριών διαχείρισης και ελέγχου (πληροφορίες φασματικής ανίχνευσης, χειραψίας πομπών/δεκτών, λειτουργίας φάρου δικτύου για την αναγνώριση του δικτύου από νέα τερματικά, κ.ο.κ.). Από ένα τέτοιο κανάλι, επίσης, τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος θα διαπραγματεύονται τη φασματική ζώνη λειτουργίας, στην οποία θα εκπέμπουν με επικαλυπτικό τρόπο, εκτελώντας περιοδικά διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών.

Πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει υπό τη βασική υπόθεση της ύπαρξης ενός CCC, το οποίο προϋπάρχει από σχετική εκχώρηση για τα δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος [32], [36], [37]. Τα δίκτυα αυτά όμως, θεωρούνται επισκέπτες στο φάσμα και με τη χρήση μιας προ-αδειοδοτημένης φασματικής ζώνης, το δίκτυο θα έχανε έναν από τους αρχικούς σχεδιαστικούς στόχους του, την παροχή επικοινωνίας, αυτόνομα, οπουδήποτε και οποτεδήποτε χρειαζόταν, χωρίς παρέμβαση και τροποποιήσεις στο παρόν σχηματικό των ασύρματων επικοινωνιών. Το CCC έχει, επίσης, προταθεί να εγκαθίστανται στην ήδη υπάρχουσα μη αδειοδοτημένη ζώνη ISM, η οποία είναι ελεύθερη προς χρήση, υπό βασικούς περιορισμούς μεταδιδόμενης ισχύος. Ένας από τους περιορισμούς μιας τέτοιας προσέγγισης είναι ότι μπορεί να οδηγήσει εύκολα σε κορεσμό του καναλιού ελέγχου, πράγμα το οποίο θέτει όρια στην πυκνότητα τερματικών του Δευτερεύοντος δικτύου [102].

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται και μελετάται μια ιδέα σχηματισμού/δημιουργίας του CCC

προσωρινά και τοπικά, μέσω μιας διαδικασίας ορισμού του, ανάλογα με τις υπάρχουσες υποδομές. Προτείνεται το κοινό κανάλι ελέγχου να βρίσκεται κι αυτό σε ζώνη συχνοτήτων αδειοδοτημένη σε Πρωτεύον σύστημα, στην οποία το δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος θα λειτουργεί επίσης σαν Δευτερεύον σύστημα. Η ζώνη αυτή, η οποία ονομάζεται ζώνη σηματοδοσίας και ελέγχου - SCB (Signaling and Control Band), είναι διαφορετική από τη ζώνη που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων - DTB - (Data Band) και επιλέγεται βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Το σχήμα αυτό ονομάστηκε DUB-MAC - (Dual Unlicensed Band MAC) και η φιλοσοφία του περιγράφεται στη συνέχεια.

Πρόσφατα [102], η πρότασή μας, αυτή της προσάρτησης σε υπάρχον Πρωτεύον δίκτυο, αναφέρθηκε σαν κύριος αντιπρόσωπος των πρωτοκόλλων MAC δικτύων Δυναμικής Χρήσης Φάσματος με δυναμικό / διαμορφώσιμο CCC.

#### 7.4.1 Ζώνη Σηματοδοσίας και Ελέγχου και Ζώνη Δεδομένων

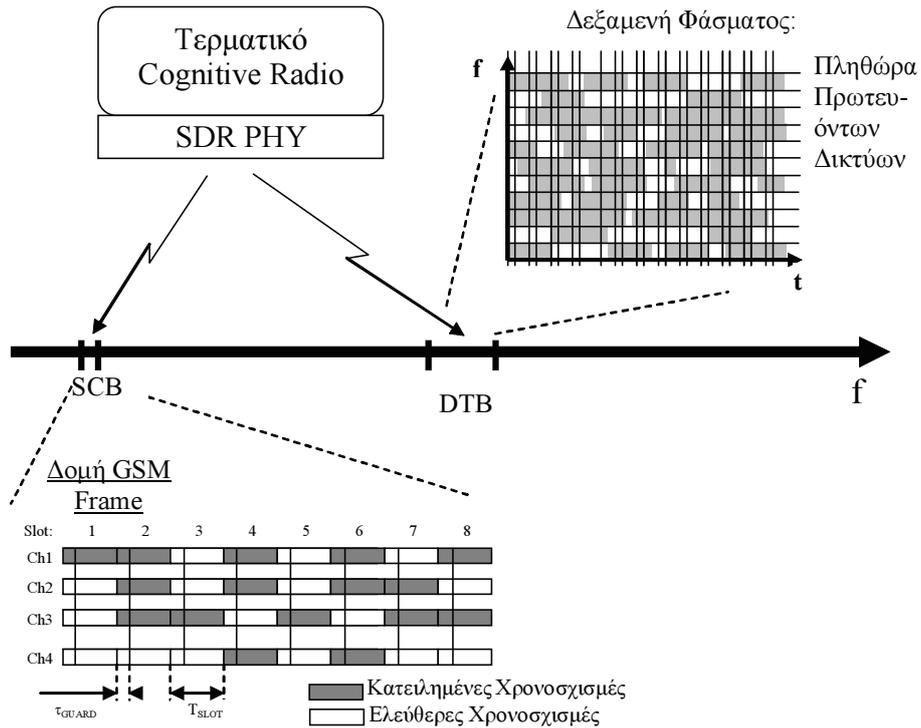
Η ειδοποιός διαφορά της φασματικής ζώνης SCB από την DTB, αλλά και ένα βιώσιμο κριτήριο χρήσης του σχήματος πρόσβασης σε δύο διαφορετικές φασματικές ζώνες, είναι η βεβαιότητα και η εξασφάλιση ότι οι μεταδόσεις στη ζώνη αυτή θα γίνονται με τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια ότι δε θα προκληθεί παρεμβολή στο Πρωτεύον δίκτυο. Αν η χρήση της SCB συνοδεύταν από όλα εκείνα τα μειονεκτήματα της επικαλυπτικής μετάδοσης, που οφείλονται στην αβεβαιότητα έγκυρης και έγκαιρης ανίχνευσης των φασματικών οπών, τότε δε θα είχε νόημα η χρήση του σχήματος DUB-MAC.

Το κριτήριο αυτό μπορεί να ικανοποιηθεί εάν η SCB είναι ζώνη στην οποία λειτουργεί μία γνωστή ασύρματη τεχνολογία δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, θα γίνεται γνωστή η δομή της ασύρματης διεπαφής από το είδος της διαμόρφωσης και τα φίλτρα σχηματισμού παλμών έως το χρονισμό της δομής TDMA του επιπέδου MAC και τις πληροφορίες διάθεσης καναλιών στους χρήστες. Η γνώση αυτή συντελεί στην ελαχιστοποίηση της παρεμβολής, εφόσον το Δευτερεύον δίκτυο γνωρίζει πού, πότε και τί να ανιχνεύσει κατά τη διαδικασία της φασματικής ανίχνευσης.

Υπό την παραπάνω συνθήκη, τίθεται ένας περιορισμός επιλογής της SCB. Το Πρωτεύον δίκτυο, που λειτουργεί σε αυτήν, θα πρέπει να είναι ένα διαδεδομένο εμπορικό δίκτυο με ευρεία κάλυψη. Ένα Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών, που θα είναι σχεδιασμένο να προσαρτάται στην SCB και να διοχετεύει από εκεί τη σηματοδοσία και τα μηνύματα ελέγχου, δε θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς ένα τέτοιο δίκτυο, γι' αυτό και απαιτείται από αυτό η ευρεία κάλυψη.

#### 7.4.2 Σενάριο προσάρτησης σε δίκτυο GSM

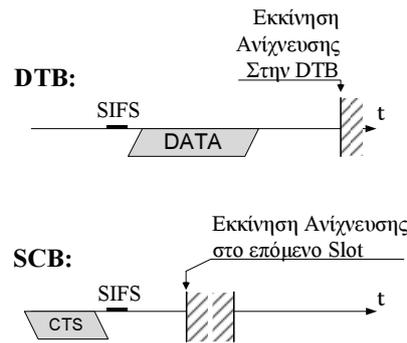
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα λειτουργικό σενάριο, στο οποίο το Γνωστικό Σύστημα Ραδιοεπικοινωνιών χρησιμοποιεί σαν SCB τη ζώνη συχνοτήτων του συστήματος GSM - (Global System for Mobile communication).



**Σχήμα 7.22:** Προσάρτηση ενός Γνωστικού Συστήματος Ραδιοεπικοινωνιών στην SCB για μετάδοση σηματοδοσίας και ελέγχου και στην DTB για μετάδοση δεδομένων

Τα τερματικά του Δευτερεύοντος δικτύου κατά τη φάση αρχικοποίησής τους και συγκεκριμένα στην αναζήτηση του δικτύου Δυναμικής Χρήσης φάσματος, σαρώνουν διαδοχικά όλες τις πιθανές φασματικές ζώνες, που είναι υποψήφιες στο να εξυπηρετήσουν ως SCB. Οι φασματικές ζώνες του δικτύου GSM, στις οποίες γίνεται η αναζήτηση, καθώς και η δομή του πλαισίου του και οι συχνότητες φάρων είναι γνωστές στο Δευτερεύον σύστημα. Τα τερματικά σαρώνουν τη φασματική ζώνη του GSM [37], [103], αποκωδικοποιούν το κανάλι διόρθωσης συχνότητας FCCH, το οποίο δεν είναι κρυπτογραφημένο όπως τα κανάλια δεδομένων, και κατόπιν, αποκτούν χρονικό συγχρονισμό με το δίκτυο GSM, αποκωδικοποιώντας το κανάλι συγχρονισμού SCH. Τότε μπορούν να ανακαλύψουν τις φέρουσες συχνότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη κυψέλη του δικτύου GSM, αποκωδικοποιώντας το κανάλι περιγραφής καναλιών κυψέλης CCD. Έχοντας στη διάθεσή τους τις συχνότητες που χρησιμοποιεί το Πρωτεύον δίκτυο στη συγκεκριμένη κυψέλη, στην οποία βρίσκονται, τα τερματικά μπορούν να ανιχνεύουν, σε αυτές, κενές χρονοθυρίδες της TDMA δομής και να τις χρησιμοποιούν για τη διοχέτευση πληροφορίας σηματοδοσίας και ελέγχου. Οι κενές χρονοθυρίδες μπορούν να βρεθούν με μεγάλη ασφάλεια, ανιχνεύοντας τα κανάλια της κυψέλης για χρονική διάρκεια  $T_{\text{GUARD}}$  στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας, που έχει διάρκεια  $T_{\text{GSM}} = 577\mu\text{s}$ .

Με τον τρόπο αυτό το δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος έχει προσαρτηθεί στο υπάρχον GSM δίκτυο, έχοντας αποκτήσει συγχρονισμό επιπέδου MAC από το κοινό ρολόι του GSM και έχει στη διάθεσή του ένα κανάλι ελέγχου χρησιμοποιώντας τις συχνότητες της κυψέλης GSM που παραμένουν ανενεργές σε κάθε χρονοθυρίδα.



Σχήμα 7.23: Προτεραιότητα της μετάδοσης δεδομένων έναντι της φασματικής ανίχνευσης στη ζώνη SCB

### 7.4.3 Υλοποίηση iDCF με προσάρτηση στο δίκτυο GSM

Η υλοποίηση της iDCF, υπό το πλαίσιο του σχήματος DUB-MAC, έγινε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η διοχέτευση των πληροφοριών ελέγχου να γίνεται στη ζώνη SCB και η διοχέτευση των δεδομένων στη ζώνη DTB. Πληροφορίες ελέγχου του πρωτοκόλλου iDCF θεωρήθηκαν τα πλαίσια ελέγχου rts, cts και ack ενώ τα πλαίσια δεδομένων σαν η πληροφορία δεδομένων.

Κάθε τερματικό που συμμετέχει στο συγκεκριμένο δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος DUB-MAC/iDCF, εκτελεί φασματική ανίχνευση τόσο στην SCB, με περίοδο τη διάρκεια χρονοθυρίδας του GSM, όσο και στην DTB, με περίοδο  $T$ . Η μετάδοση πακέτων data έχει προτεραιότητα έναντι οποιασδήποτε λειτουργίας, εκτός της επερχόμενης διαδικασίας φασματικής ανίχνευσης στην DTB. Έτσι, η μετάδοση πακέτων data δεν αναβάλλεται π.χ. λόγω φασματικής ανίχνευσης της ζώνης σηματοδότησης και ελέγχου. Στο σχήμα 7.23 παρουσιάζεται μια τέτοια περίπτωση προτεραιότητας της μετάδοσης δεδομένων έναντι της επερχόμενης φασματικής ανίχνευσης στη ζώνη SCB.

Η βασική λειτουργία του πρωτοκόλλου DUB-MAC/iDCF γίνεται με διαδοχικές ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων rts-cts-data-ack, οι οποίες ακολουθούν τη διαδικασία ανταγωνισμού, όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, με την τροποποιημένη διαδικασία υποχώρησης να εφαρμόζεται στη ζώνη SCB με παύσεις του μετρητή υποχώρησης πριν το επερχόμενο σύνορο κάθε χρονοθυρίδας GSM.

Η χρήση δύο διαφορετικών ζωνών λειτουργίας στην iDCF – μιας για τη μετάδοση των πλαισίων δεδομένων και μιας για τη μετάδοση των πλαισίων ελέγχου – μπορεί αρχικά να φαίνεται χωρίς νόημα. Αυτό γιατί, σε ένα πρωτόκολλο κατακεκομμένου ελέγχου τύπου CSMA, όπως είναι η iDCF, μόνο μια μετάδοση λαμβάνει χώρα κάθε στιγμή και δεν υπάρχουν παράλληλες μεταδόσεις σε διαφορετικά κανάλια. Ωστόσο, αυτού του είδους η λειτουργία της iDCF σαν DUB-MAC, μπορεί να ωφεληθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Η προσάρτηση στο σύστημα GSM έχει σαν αποτέλεσμα, εκτός των άλλων, την απόκτηση ενός κοινού ρολογιού, αυτού που συντονίζει ο σταθμός βάσης της κυψέλης, και άρα την απόκτηση συγχρονισμού επιπέδου MAC. Επομένως, οι διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών μπορούν να συντονίζονται μέσω αυτού του κοινού ρολογιού και όχι

## Κεφάλαιο 7. Μελέτες Εμπλουτισμού της iDCF

της διαδικασίας συγχρονισμού, που λαμβάνει χώρα εντός του διαστήματος  $\tau$  (βλ. §3.5), η οποία και μπορεί να καταργηθεί.

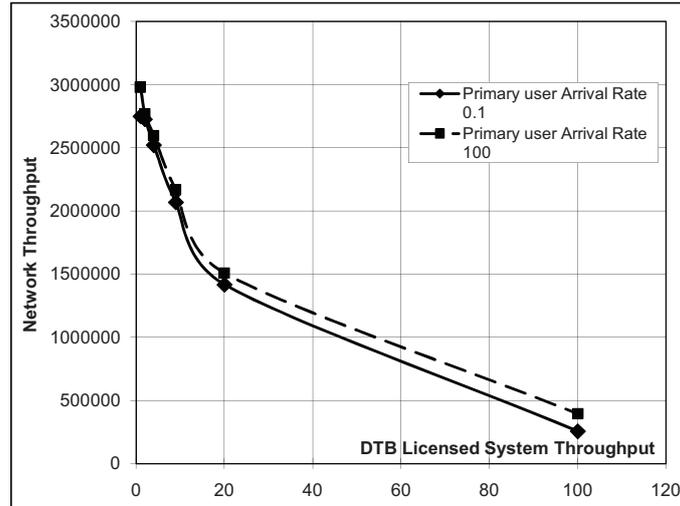
- Η συχνή μετάδοση πλαισίων ελέγχου στην DTB αυξάνει την πιθανότητα συγκρούσεων με τις μεταδόσεις του Πρωτεύοντος συστήματος και άρα την πιθανότητα παρεμβολής προς το Πρωτεύον δίκτυο. Αφαιρώντας τις μεταδόσεις των πλαισίων ελέγχου από τη ζώνη DTB και πραγματοποιώντας τις στην SCB με τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια, μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολής κατά ποσό ανάλογο της διάρκειας μετάδοσης των τριών πλαισίων ελέγχου μιας FES.
- Στην περίπτωση κατά την οποία είτε η περίοδος φασματικής ανίχνευσης  $T$  είναι πολύ μικρή είτε η διάρκεια της φασματικής ανίχνευσης  $\tau$  πολύ μεγάλη, με άλλα λόγια όταν ο ενεργός χρόνος είναι εξαιρετικά βραχύς, είναι προτιμότερο να μη δαπανάται αυτός ο χρόνος στη μετάδοση πλαισίων ελέγχου, αλλά στη μετάδοση δεδομένων και μόνο.
- Χρησιμοποιώντας μια επιπρόσθετη φασματική ζώνη, πέραν της DTB, για τη λειτουργία της iDCF, ανοίγει ο δρόμος για τον επιπλέον εμπλουτισμό και βελτίωση της λειτουργίας, της με την υλοποίηση κάποιου σχήματος ανίχνευσης της σύγκρουσης, χρησιμοποιώντας ανάδραση με μετάδοση εκτός ζώνης (λ.χ. μετάδοση τόνου κατειλημμένου - busy tone), όταν κάποιο Δευτερεύον τερματικό πραγματοποιεί μετάδοση.

### 7.4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

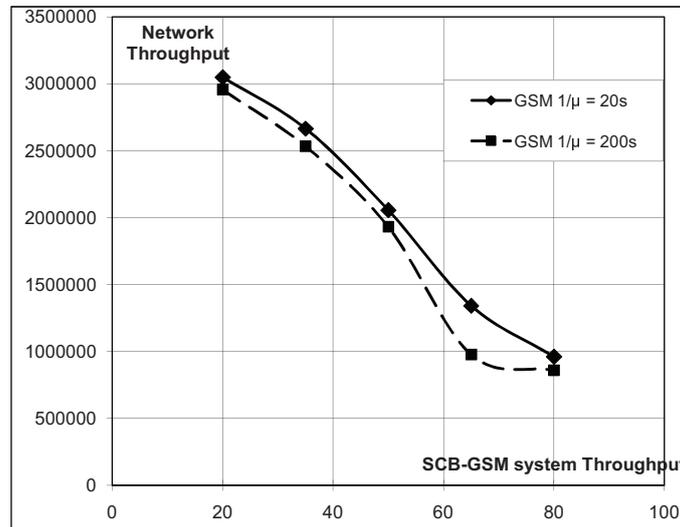
Το πρωτόκολλο DUB-MAC/iDCF υλοποιήθηκε στο προσομοιωτή της iDCF, με κατάλληλες τροποποιήσεις σε αυτόν, ώστε το Δευτερεύον σύστημα να χρησιμοποιεί δύο κανάλια (DTB και SCB), τα οποία μεταβάλλονται ανεξάρτητα ως προς τη διαθεσιμότητα και το ρυθμό μετάδοσης, ανιχνεύονται με διαφορετικές περιόδους  $T$  και  $T_{\text{GSM}} = 577\mu\text{s}$  και με διαφορετικές διάρκειες  $\tau$  και  $\tau_{\text{GURAD}}$ , αντίστοιχα.

Το μοντέλο της κυψέλης GSM, το οποίο παρέχει την πληροφορία διαθεσιμότητας και το ρυθμό μετάδοσης του καναλιού SCB στον προσομοιωτή, υλοποιήθηκε σαν αλυσίδα M/M/m/m, όπου ο αριθμός των εξυπηρετητών-καναλιών δίνεται από τη σχέση  $m = 8 \times C_{\text{GSM}}$ . Το  $C_{\text{GSM}}$  αναπαριστά τον αριθμό φερόντων συχνοτήτων που χρησιμοποιεί μια κυψέλη (τέθηκε στην τυπική τιμή  $C_{\text{GSM}} = 7$ ) και το 8 είναι ο αριθμός των χρονοθυρίδων του πλαισίου TDMA του GSM ανά φέρουσα συχνότητα. Κλήσεις καταφτάνουν στο σύστημα με ρυθμό  $\lambda_{\text{GSM}}$ , καταλαμβάνουν μία χρονοθυρίδα (εκ των οχτώ) μιας φέρουσας συχνότητας, για διάρκεια κλήσης με μέση τιμή  $1/\mu_{\text{GSM}}$ . Από κάθε κανάλι του συστήματος GSM εύρους 200 kHz, το Δευτερεύον σύστημα σε κάθε χρονοθυρίδα GSM χρησιμοποιεί όσα ανιχνευθούν ως ανενεργά ύστερα από ανίχνευση διάρκειας  $\tau_{\text{GURAD}} = 50\mu\text{s}$  και έως την έναρξη της επόμενης χρονοθυρίδας.

Το μοντέλο διαθεσιμότητας της φασματικής ζώνης DTB είναι, επίσης, μια αλυσίδα M/M/m/m με αριθμό καναλιών 300, ρυθμό άφιξης Πρωτευόντων χρηστών  $\lambda_{\text{DTB}}$  και Throughput  $\rho_{\text{DTB}}$ . Το εύρος ζώνης ανά κανάλι DTB τέθηκε στα 100 kHz. Το μη συνεχές σχήμα διαμόρφωσης OFDM υλοποιήθηκε με διαμόρφωση QPSK ανά υποφέρον.



Σχήμα 7.24: *Throughput* κατά την προσάρτηση στο σύστημα GSM σαν συνάρτηση της διαθεσιμότητας της ζώνης δεδομένων DTB



Σχήμα 7.25: *Throughput* κατά την προσάρτηση στο σύστημα GSM σαν συνάρτηση της διαθεσιμότητας της ζώνης σηματοδότησης και ελέγχου SCB

Στο σχήμα 7.24 παρουσιάζεται η επίδραση του *Throughput* του Πρωτεύοντος δικτύου στη ζώνη DTB, για δύο διαφορετικές τιμές του ρυθμού άφιξης  $\lambda$  Πρωτευόντων χρηστών, και για αριθμό τερματικών Δευτερεύοντος δικτύου  $n = 10$ , περίοδο ανίχνευσης κανονικοποιημένη ως προς τη χρονοθυρίδα  $T_{GSM}$  του GSM  $T = 10$  ( $\approx 5.77ms$ ), διάρκεια ανίχνευσης κανονικοποιημένη ως προς την περίοδο ανίχνευσης  $\tau = 0.1$ ,  $\rho_{DTB} = 30$ ,  $\lambda_{DTB} = 0.5 s^{-1}$  προσβάσεις ανά δευτερόλεπτο και  $1/\mu_{GSM} = 45 s$ .

Στο σχήμα 7.25 παρουσιάζεται η επίδραση του *Throughput* του Πρωτεύοντος δικτύου στη ζώνη SCB, για δύο διαφορετικές τιμές της μέσης χρονικής διάρκειας κλήσης GSM  $1/\mu_{GSM}$ . Εδώ έχουμε και πάλι  $n = 10$ ,  $T = 10$ ,  $\tau = 0.1$ ,  $\rho_{DTB} = 2$ ,  $\lambda_{DTB} = 0.5 s^{-1}$ .

□

## Κεφάλαιο 8

# Συμπεράσματα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστίασε στη μελέτη πρωτοκόλλων ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για δίκτυα Ιεραρχικής - Δυναμικής Χρήσης Φάσματος κατανεμημένης αρχιτεκτονικής. Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε και μελετήθηκε η διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου (intermittent Distributed Coordination Function -iDCF), σαν πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης σε κατανεμημένο δίκτυο, το οποίο λειτουργεί στο διακοπτόμενο περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος.

Αρχικά, αναγνωρίστηκαν οι ιδιαίτερες προκλήσεις που τίθενται στην ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου MAC από το περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος. Συγκεκριμένες τροποποιήσεις επιβλήθηκαν στη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου προκειμένου να αντιμετωπίσει αποδοτικά τις προκλήσεις αυτές. Επιβλήθηκε υποχρεωτική χρησιμοποίηση του μηχανισμού τριπλής χειραφίας  $rts/cts$ , ο οποίος αποδείχθηκε να έχει σαφώς βελτιωμένη επίδοση ως προς την προκληθείσα παρεμβολή προς το Πρωτεύον δίκτυο. Επιλέχθηκε να αναβάλλονται οι μεταδόσεις πλαισίων ελέγχου, όταν αυτές πρόκειται να εισέλθουν στη χρονική διάρκεια εκτέλεσης διαδικασιών φασματικής ανίχνευσης. Οι μεταδόσεις δεδομένων ακολουθούν την ίδια αντιμετώπιση, με τη διαφορά του δυναμικού τεμαχισμού τους όταν το μέγεθος, που μπορεί να μεταδοθεί πριν την έναρξη της διαδικασίας φασματικής ανίχνευσης, υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή κατωφλίου. Η επιλογή της τιμής αυτής βρέθηκε να είναι πολύ σημαντική για την επίδοση και χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίησή της. Οι διακοπές κατά τα διαστήματα σιγής πραγματοποιούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι προτεραιότητες πρόσβασης, που καθορίζονται από τα διαφορετικά μήκη τους. Η τροποποίηση του μηχανισμού υποχώρησης υπαγορεύει την παύση του μετρητή υποχώρησης στο χρονικό σημείο  $t_{TxOp}$  ώστε οι προτεραιότητες μετάδοσης, που καθορίζονται από το μηχανισμό, να μην επηρεάζονται από τη διακοπτόμενη λειτουργία. Ο Δυναμικός Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης φέροντος μεταθέτει τους υπολογισμούς και ελέγχους ανάθεσης του μετρητή κράτησης NAV (Network Allocation Vector) στα Ανταγωνιζόμενα τεμαχικά και αντιμετωπίζει επιτυχώς τις προκλήσεις της διακοπτόμενης ακολουθίας ανταλλαγής πλαισίων FES (Frame Exchange Sequence), με τον ακαθόριστο αριθμό τεμαχίων δεδομένων, λόγω δυναμικού τεμαχισμού, και τους άγνωστους μελλοντικούς ρυθμούς μετάδοσης.

Οι τροποποιήσεις αυτές προδιαγράφηκαν σαφώς με την υλοποίηση της Διακοπτόμενης Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου σαν ένα σύστημα SDL. Η επικύρωση της λειτουργίας της iDCF με τον προσομοιωτή δικτύου έδειξε ότι οι παραπάνω τροποποιήσεις είναι απαραίτητες και λειτουργούν επιτυχώς στο διακοπτόμενο περιβάλλον Δεξαμενής Φάσματος.

Το αναλυτικό μοντέλο επίδοσης της iDCF, με τη χρήση Μαρκοβιανών αλυσίδων, αποδείχθηκε ακριβές στην εκτίμηση παραμέτρων επίδοσης και ικανό να συλλάβει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που προκύπτουν από τη διακοπτόμενη λειτουργία και επιδρούν σε αυτές. Η μελέτη επίδοσης που ακολούθησε, εξήγαγε χρήσιμα συμπεράσματα. Η περίοδος Διακοπής  $T$  είναι καίριας σημασίας για την επίδοση και είναι αυτή που επηρεάζει περισσότερο και υποβαθμίζει την επίδοση, εισάγοντας τον πρόσθετο φόρτο των διακοπών. Η διάρκεια των διακοπών  $\tau$ , επηρεάζει επίσης σημαντικά την επίδοση αλλά, όπως αναμενόταν, με πιο άμεσο, γραμμικό τρόπο. Το μέγεθος πλαισίου δεδομένων αποδείχθηκε, όπως και στην πρότυπη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου, ικανό να επιδράσει θετικά στην επίδοση όταν αυτό αυξάνεται. Το γεγονός αυτό, όμως, είναι εντονότερο σε σχετικά μεγάλες περιόδους Διακοπής, καθώς σε μικρότερες ο δυναμικός τεμαχισμός, με τον πρόσθετο φόρτο που εισάγει, δεν ευνοεί τη βελτίωση της επίδοσης. Συγκεκριμένες παλινδρομήσεις, που εντοπίστηκαν στην καμπύλη επίδοσης συναρτήσει του μεγέθους  $L_P$ , αξιολογήθηκαν και βρέθηκαν οι τιμές εκείνες της παραμέτρου, που θα πρέπει να αποφεύγονται κατά τη λειτουργία του δικτύου. Μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης δεν αξιοποιούνται από την iDCF το ίδιο αποδοτικά και σε ένα σενάριο με δεδομένη την περίοδο διακοπής μπορεί να προκύψει το κατάλληλο ζεύγος τιμών  $\tau$  και  $R$  το οποίο παρέχει το μέγιστο Throughput.

Η νέα παράμετρος λειτουργίας της iDCF,  $L_{\min}$ , αποδείχθηκε πολύ σημαντική για την επίδοσή της. Το αναλυτικό μοντέλο επίδοσης χρησιμοποιήθηκε για την κατάλληλη ρύθμιση της παραμέτρου προς βελτιστοποίηση της επίδοσης. Η επιλογή εύρους τιμής της παραμέτρου παρέχει σαφώς μεγαλύτερο κέρδος βελτιστοποίησης απ' ό,τι η μικρορύθμιση της τιμής εντός του ευνοϊκού εύρους τιμών. Ο αλγόριθμος δύο βημάτων, που παρουσιάστηκε, είναι υλοποιήσιμος στα τεμαχικά του δικτύου και είναι απαραίτητος ώστε να μην πραγματοποιείται δυναμικός τεμαχισμός πλαισίου δεδομένων χωρίς να υπάρχει όφελος.

Με χρήση του αναλυτικού μοντέλου, η τροποποίηση του μηχανισμού υποχώρησης της Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου αποδείχθηκε πολύ κρίσιμη για το διακοπτόμενο περιβάλλον, με εξαγωγή της πιθανότητας επιτυχίας μετάδοσης. Μία απεύθείας υλοποίηση χωρίς την προταθείσα τροποποίηση καθίσταται μη λειτουργική σε περιβάλλοντα συχνών διακοπών, για διαδικασίες ανίχνευσης φασματικών οπών, και χαμηλών επιτεύξιμων ρυθμών μετάδοσης.

Τέλος, στις μελέτες εμπλουτισμού της λειτουργίας της iDCF, εξήχθησαν συμπεράσματα για τη χρησιμότητα του προσαρμοζόμενου μεγέθους παραθύρου ανταγωνισμού και στο διακοπτόμενο περιβάλλον, την αυξημένη επίδοση με χρήση της τριπλής χειραψίας και τη βελτίωση στην επίδοση, που παρέχεται, από την αξιοποίηση ενός μηχανισμού ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων 3SCS (3 State Carrier Sensing). Τόσο με χρήση της τριπλής χειραψίας, όσο και με την αξιοποίηση του μηχανισμού 3SCS, ο λειτουργικός περιορισμός εκτέλεσης συχνών διαδικασιών φασματικής ανίχνευσης μπορεί να γίνει πιο ήπιος, για συγκεκριμένα επίπεδα

παρεμβολών, που μπορεί να δέχεται το Πρωτεύον δίκτυο.

## 8.1 Καινοτομίες της Διατριβής

Τα πορίσματα της διατριβής που προάγουν τη γνώση και την τεχνολογία μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Υλοποιήθηκε η διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου σαν αποδοτικό πρωτόκολλο MAC σε δίκτυα Δυναμικής Χρήσης Φάσματος, με συγκεκριμένες τροποποιήσεις, οι οποίες προδιαγράφηκαν σαφώς.
- Αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο, ακριβές στην πρόβλεψη συγκεκριμένων παραμέτρων επίδοσης της iDCF .
- Διερευνήθηκε η επίδραση παραμέτρων της διακοπτόμενης λειτουργίας στην επίδοση του πρωτοκόλλου.
- Αξιολογήθηκε, με αναλυτικό τρόπο, η σημασία του τροποποιημένου μηχανισμού απόσυρσης της Λειτουργίας Κατανεμημένου Ελέγχου στο διακοπτόμενο περιβάλλον.
- Εξετάστηκε αναλυτικά η επίδραση της νέας παραμέτρου MAC  $L_{min}$  στην επίδοση και προτάθηκε αλγόριθμος εύρεσης της βέλτιστης τιμής, υλοποιήσιμος στα τεμαχικά.
- Προτάθηκε μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος 3 καταστάσεων στο φυσικό στρώμα, και δύο μέθοδοι αξιοποίησής του από το υπόστρωμα MAC και τη λειτουργία iDCF , οι οποίες βελτιώνουν αισθητά την επίδοση.
- Προτάθηκε μέθοδος απόκτησης δυναμικού κοινού καναλιού ελέγχου από το Δευτερεύον δίκτυο, με προσάρτηση σε Πρωτεύον δίκτυο ευρείας κάλυψης.
- Εφαρμόστηκαν τα σχήματα προσθετικού και πολλαπλασιαστικού προσαρμοζόμενου μεγέθους παραθύρου ανταγωνισμού και της μεθόδου κράτησης χρονοσχισμένης στη λειτουργία της iDCF .

## 8.2 Προτάσεις επέκτασης

Η μελέτη του θέματος, που εξετάστηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή, μπορεί να συνεχιστεί και να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας ως εξής:

- Οι τροποποιήσεις που υλοποιήθηκαν στην DCF του προτύπου IEEE 802.11 μπορούν να εφαρμοστούν στη λειτουργία EDCA του προτύπου IEEE 802.11e, το οποίο παρέχει διαχωρισμό υπηρεσιών προς υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας, ώστε να μελετηθεί κατά πόσο ένα κατανεμημένο δίκτυο Δυναμικής Χρήσης Φάσματος δύναται να παρέχει εγγυήσεις ποιότητας, όταν λειτουργεί με διακοπτόμενο τρόπο, σαν Δευτερεύον χρήστης τους φάσματος.

- Ποικίλες μελέτες μπορούν να πραγματοποιηθούν στον προσομοιωτή του δικτύου που υλοποιήθηκε. Με την ενσωμάτωση ρεαλιστικού μοντέλου ασύρματου καναλιού με διαλείψεις, ο προσομοιωτής μπορεί να δώσει αποτελέσματα για τη χρησιμότητα του Δυναμικού Μηχανισμού Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος. Από αυτές, μπορεί να εξαχθεί το ποιοί έλεγχοι και υπολογισμοί είναι οι σημαντικότεροι, ως προς τη σωστή διατήρηση του μετρητή NAV, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος στα Ανταγωνιζόμενα τερματικά. Με την ενσωμάτωση ρεαλιστικού μοντέλου φασματικής κατάληψης του Πρωτεύοντος δικτύου ή πραγματικών μετρήσεων διαθεσιμότητας, μπορεί να εξαχθεί η βελτίωση φασματικής χρησιμοποίησης που επιτυγχάνει η λειτουργία iDCF .
- Η ανάλυση του κεφαλαίου 6 μπορεί να επεκταθεί, εισάγοντας μοντέλο αφίξεων Πρωτεύοντων χρηστών στο δίκτυο και να εξαχθούν αναλυτικά μετρητικά επίδοσης Ποσοστού Χρόνου Παρεμβολής. Αυτό, επίσης, θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση της περιόδου διακοπής για συγκεκριμένους περιορισμούς προκληθείσας παρεμβολής.
- Η αξιοποίηση του μηχανισμού ανίχνευσης φέροντος τριών καταστάσεων, επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί και με νέες ρεαλιστικές μεθόδους, όπως είναι η 3SCS-SW. Οι μέθοδοι αυτές θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσο αποδοτικές όσο είναι η 3SCS-SW και να πλησιάζουν όσο γίνεται την επίδοση της ιδανικής 3SCS-I.
- Στη μελέτη απόκτησης δυναμικού κοινού καναλιού ελέγχου με προσάρτηση σε υπάρχον Πρωτεύον δίκτυο, δεν έχει ληφθεί υπόψη η περίπτωση ενός κατανεμημένου Δευτερεύοντος δικτύου με μεταδόσεις πολλαπλών βημάτων (multihop). Αποτελεί πρόκληση ο συνεχής επαναπροσδιορισμός του δυναμικού κοινού καναλιού ελέγχου, και η ερευνητική περιοχή μεταδόσεων πολλαπλών βημάτων σε κατανεμημένα δίκτυα, χωρίς σταθερό και γνωστό κοινό κανάλι ελέγχου, δεν έχει διερευνηθεί ακόμη.

□

## Παράρτημα Α΄

### Προσέγγιση του $\mathbf{E}[n_{\mathbf{F}}(x)]$

$$E[n_{\mathbf{F}}(x)] = \frac{1}{L_{\text{ut}} - L_{\text{min}} + 1} \sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} \left\lceil \frac{L_{\mathbf{P}} - x}{L_{\text{PF}}} \right\rceil \quad (\text{A'.1})$$

Η αναμενόμενη τιμή του  $n_{\mathbf{F}}(x)$ , λόγω του μη γραμμικού τελεστή συνάρτησης οροφής μπορεί να φραγεί άνω και κάτω ως εξής.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Για } x = L_{\text{min}} : \\ \frac{L_{\mathbf{P}} - L_{\text{min}}}{L_{\text{PF}}} \leq \left\lceil \frac{L_{\mathbf{P}} - L_{\text{min}}}{L_{\text{PF}}} \right\rceil \leq \frac{L_{\mathbf{P}} - L_{\text{min}}}{L_{\text{PF}}} + 1 \\ \text{Για } x = L_{\text{min}} + 1 : \\ \frac{L_{\mathbf{P}} - (L_{\text{min}} + 1)}{L_{\text{PF}}} \leq \left\lceil \frac{L_{\mathbf{P}} - (L_{\text{min}} + 1)}{L_{\text{PF}}} \right\rceil \leq \frac{L_{\mathbf{P}} - (L_{\text{min}} + 1)}{L_{\text{PF}}} + 1 \\ \vdots \\ \text{Για } x = L_{\text{ut}} : \\ \frac{L_{\mathbf{P}} - L_{\text{ut}}}{L_{\text{PF}}} \leq \left\lceil \frac{L_{\mathbf{P}} - L_{\text{ut}}}{L_{\text{PF}}} \right\rceil \leq \frac{L_{\mathbf{P}} - L_{\text{ut}}}{L_{\text{PF}}} + 1 \end{array} \right\} + \quad (\text{A'.2})$$

$$\Rightarrow \sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} \left( \frac{L_{\mathbf{P}} - x}{L_{\text{PF}}} \right) \leq \sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} \left\lceil \frac{L_{\mathbf{P}} - x}{L_{\text{PF}}} \right\rceil \leq \sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} \left( \frac{L_{\mathbf{P}} - x}{L_{\text{PF}}} \right) + \sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} \left( \frac{L_{\mathbf{P}} - x}{L_{\text{PF}}} \right)}{L_{\text{ut}} - L_{\text{min}} + 1} \leq n_{\mathbf{F}}(x) \leq \frac{\sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} \left( \frac{L_{\mathbf{P}} - x}{L_{\text{PF}}} \right)}{L_{\text{ut}} - L_{\text{min}} + 1} + \frac{\sum_{x=L_{\text{min}}}^{L_{\text{ut}}} 1}{L_{\text{ut}} - L_{\text{min}} + 1}$$

$$\dots \Leftrightarrow \frac{L_{\mathbf{P}} - \frac{L_{\text{ut}}}{2} - \frac{L_{\text{min}}}{2}}{L_{\text{PF}}} \leq n_{\mathbf{F}}(x) \leq \frac{L_{\mathbf{P}} - \frac{L_{\text{ut}}}{2} - \frac{L_{\text{min}}}{2}}{L_{\text{PF}}} + 1$$

ή

$$E[n_{\mathbf{F}}(x)] \in [\gamma, \gamma + 1], \gamma = \frac{2L_{\mathbf{P}} - L_{\text{ut}} - L_{\text{min}}}{2L_{\text{PF}}} \quad (\text{A'.3})$$



## Παράρτημα Β΄

# Υπολογισμός Ολοκληρώματος $G(i, y)$

Η δυσκολία υπολογισμού του ολοκληρώματος του δεύτερου κλάδου της συνάρτησης  $G(i, y)$  που επαναλαμβάνεται εδώ:

$$\begin{aligned} G(i, y) &= (i - 1) \cdot \sigma + T - (y + DIFS) - A, \\ \text{για } \Psi - i \cdot \sigma &< y \leq \Psi, \\ \text{όπου } \Psi &= T - \tau - (RTS + \delta) - DIFS, \\ \text{και } A &= \left\lceil \frac{\Psi - y}{\sigma} \right\rceil \cdot \sigma, \end{aligned} \tag{B'.1}$$

έγκειται στον υπολογισμό του ολοκληρώματος της ποσότητας  $A$ . Αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί ως εξής: Προκειμένου να απαληφθεί ο μη γραμμικός τελεστής στην ποσότητα  $A$ , για κάθε τιμή του  $i$  με  $1 \leq i \leq W_{\max} - 1$  ο κλάδος αυτός διαχωρίζεται περαιτέρω σε μια συνάρτηση  $i$  κλάδων, κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να ολοκληρωθεί:

$i = 1$  Το αρχικό διάστημα του κλάδου της  $G(i, y)$  περιέχει μόνο ένα υποδιάστημα με σταθερή τιμή της ποσότητας  $A$ :

$$\begin{aligned} \Psi - \sigma < y \leq \Psi &\iff \Psi - y < \sigma \leq \Psi - y + \sigma \iff \\ 0 \leq \frac{\Psi - y}{\sigma} < 1 &\implies A = \left\lceil \frac{\Psi - y}{\sigma} \right\rceil \cdot \sigma = \sigma \end{aligned} \tag{B'.2}$$

$i = 2$  Το αρχικό διάστημα του κλάδου της  $G(i, y)$  περιέχει δύο υποδιαστήματα με σταθερή τιμή της ποσότητας  $A$ :

$$\Psi - 2\sigma < y \leq \Psi \longrightarrow \begin{aligned} &\Psi - 2\sigma < y \leq \Psi - \sigma \quad \text{και} \\ &\Psi - \sigma < y \leq \Psi \end{aligned} \tag{B'.3}$$

Παράρτημα Β'. Υπολογισμός Ολοκληρώματος  $G(i, y)$

Για κάθε ένα υποδιάστημα και με συλλογισμούς όμοιους της (Β'.2) προκύπτουν:

$$\begin{aligned}\Psi - 2\sigma < y \leq \Psi - \sigma &\implies A = 2\sigma \\ \Psi - \sigma < y \leq \Psi &\implies A = \sigma\end{aligned}\tag{B'.4}$$

$i = 3$  Το αρχικό διάστημα του κλάδου της  $G(i, y)$  περιέχει τρία υποδιαστήματα με σταθερή τιμή της ποσότητας  $A$ :

$$\begin{aligned}\Psi - 3\sigma < y \leq \Psi - 2\sigma &\text{ και} \\ \Psi - 3\sigma < y \leq \Psi &\implies \Psi - 2\sigma < y \leq \Psi - \sigma \text{ και} \\ \Psi - \sigma < y \leq \Psi &\end{aligned}\tag{B'.5}$$

Για κάθε ένα υποδιάστημα και με συλλογισμούς όμοιους της (Β'.2) προκύπτουν:

$$\begin{aligned}\Psi - 3\sigma < y \leq \Psi - 2\sigma &\implies A = 3\sigma \\ \Psi - 2\sigma < y \leq \Psi - \sigma &\implies A = 2\sigma \\ \Psi - \sigma < y \leq \Psi &\implies A = \sigma\end{aligned}\tag{B'.6}$$

Ομοίως μπορεί να συνεχιστεί η ίδια συλλογιστική μέχρι το  $i = W_{\max} - 1$ . Έτσι ο υπολογισμός του ολοκληρώματος της ποσότητας  $A$  γίνεται ως εξής:

$i = 1$

$$\int_{\Psi - \sigma}^{\Psi} A dy = \int_{\Psi - \sigma}^{\Psi} \sigma dy = \sigma^2\tag{B'.7}$$

$i = 2$

$$\int_{\Psi - 2\sigma}^{\Psi} A dy = \int_{\Psi - 2\sigma}^{\Psi - \sigma} 2\sigma dy + \int_{\Psi - \sigma}^{\Psi} \sigma dy = 2\sigma^2 + \sigma^2\tag{B'.8}$$

$i = 3$

$$\int_{\Psi - 3\sigma}^{\Psi} A dy = \int_{\Psi - 3\sigma}^{\Psi - 2\sigma} 3\sigma dy + \int_{\Psi - 2\sigma}^{\Psi - \sigma} 2\sigma dy + \int_{\Psi - \sigma}^{\Psi} \sigma dy = 3\sigma^2 + 2\sigma^2 + \sigma^2\tag{B'.9}$$

Εύκολα λοιπόν καταλήγουμε ότι:

$$\int_{\Psi - i\sigma}^{\Psi} A dy = \sigma^2 \cdot \sum_{j=1}^i j = i \cdot (i + 1) \cdot \frac{\sigma^2}{2}\tag{B'.10}$$

## Παράρτημα Γ'

# Εύρεση Οριακών Πιθανοτήτων Μαρκοβιανής Αλυσίδας Kim

Από τη Μαρκοβιανή Αλυσίδα του σχήματος 5.4, σελίδα 133 προκύπτουν τα παρακάτω:

$$\begin{aligned} b_{1,0} &= b_{0,0} \cdot p, \\ b_{2,0} &= b_{1,0} \cdot p = b_{0,0} \cdot p^2, \\ b_{3,0} &= b_{2,0} \cdot p = b_{0,0} \cdot p^3, \\ &\vdots \\ \implies b_{i,0} &= p^i \cdot b_{0,0}, i \in [0, M] \end{aligned} \tag{Γ'.1}$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας στην κατάσταση IDLE προκύπτει:

$$\begin{aligned} b_{\text{IDLE}} \cdot P_a + b_{\text{IDLE}} \cdot P_b &= \\ (1-p)(1-\phi)(b_{0,0} + b_{1,0} + b_{2,0} + \dots + b_{M-1,0}) + (1-\phi)b_{M,0} &= \\ (1-p)(1-\phi) \sum_{i=0}^{M-1} (p^i \cdot b_{0,0}) + (1-\phi)p^M \cdot b_{0,0} &= \\ (1-p)(1-\phi)b_{0,0} \frac{1-p^M}{1-p} + (1-\phi)p^M \cdot b_{0,0} &= (1-\phi)b_{0,0} \\ \implies b_{\text{IDLE}} &= \frac{1-\phi}{P_a + P_b} \cdot b_{0,0} \end{aligned} \tag{Γ'.2}$$

Για τις καταστάσεις  $b_{-1,d}$  προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} b_{\text{IDLE}} \cdot P_a &= b_{-1,3} \cdot (1-P_0) + b_{-1,3} \cdot P_0 = b_{-1,3} \\ b_{-1,2} &= P_0 \cdot b_{-1,3} = b_{\text{IDLE}} \cdot P_a \cdot P_0 \\ b_{-1,1} &= P_0 \cdot b_{-1,2} = b_{\text{IDLE}} \cdot P_a \cdot P_0^2 \end{aligned} \right\} \tag{Γ'.3}$$
$$\implies b_{-1,d} = b_{\text{IDLE}} \cdot P_a \cdot P_0^{3-d}, d = 1, 2, 3$$

Για τις καταστάσεις  $b_{0,k}$ , προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 b_{0,0} &= b_{0,1} + (1-p)\phi \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^{M-1} b_{i,0} + \phi \frac{1}{W_0} \cdot b_{M,0} + P_b \frac{1}{W_0} \cdot b_{IDLE} \\
 &\quad + (1-P_0) \frac{1}{W_0} \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} + P_0 \cdot b_{-1,1} \\
 &= b_{0,1} + (1-p)\phi \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^{M-1} p^i \cdot b_{0,0} + \phi \frac{1}{W_0} p^M \cdot b_{0,0} + P_b \frac{1}{W_0} \cdot b_{IDLE} \\
 &\quad + (1-P_0) \frac{1}{W_0} \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} + P_0 \cdot b_{IDLE} P_a P_0^2 \\
 &= b_{0,1} + \frac{\phi}{W_0} \cdot b_{0,0} + \frac{P_b}{W_0} \cdot b_{IDLE} + \frac{1-P_0}{W_0} \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} + P_a P_0^3 \cdot b_{IDLE} \\
 \implies b_{0,1} &= b_{0,0} - P_a P_0^3 \cdot b_{IDLE} \\
 &\quad - \frac{1}{W_0} \left[ \phi \cdot b_{0,0} + P_b \cdot b_{IDLE} + (1-P_0) \cdot \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} \right] \tag{Γ'.4} \\
 b_{0,1} &= b_{0,2} + (1-p)\phi \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^{M-1} b_{i,0} + P_b \frac{1}{W_0} \cdot b_{IDLE} \\
 &\quad + (1-P_0) \frac{1}{W_0} \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} + \phi \frac{1}{W_0} p^M b_{0,0} \\
 \implies b_{0,2} &= b_{0,0} - P_a P_0^3 \cdot b_{IDLE} \\
 &\quad - \frac{2}{W_0} \left[ \phi \cdot b_{0,0} + P_b \cdot b_{IDLE} + (1-P_0) \cdot \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} \right] \\
 &\quad \vdots \\
 \implies b_{0,k} &= b_{0,0} - P_a P_0^3 \cdot b_{IDLE} \\
 &\quad - \frac{k}{W_0} \left[ \phi \cdot b_{0,0} + P_b \cdot b_{IDLE} + (1-P_0) \cdot \sum_{d=1}^3 b_{-1,d} \right]
 \end{aligned}$$

Τέλος, για τις υπόλοιπες καταστάσεις έχουμε:

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned}
 b_{2,0} &= b_{2,1} + \frac{p}{W_2} \cdot b_{1,0} \\
 \frac{b_{2,0}}{b_{1,0}} &= \frac{p^2}{p} \Rightarrow b_{1,0} = \frac{1}{p} \cdot b_{2,0}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow b_{2,1} &= \left(1 - \frac{1}{W_2}\right) \cdot b_{2,0} \\
 &\quad \vdots \\
 b_{i,k} &= \begin{cases} \left(1 - \frac{k}{W_i}\right) \cdot b_{i,0}, & i \in [1, m] \\ \left(1 - \frac{k}{W_m}\right) \cdot b_{i,0}, & i \in [m+1, M] \end{cases} \tag{Γ'.5}
 \end{aligned}$$

# Βιβλιογραφία

- [1] “Software defined radio forum, accelerating the proliferation of software defined radio technologies.” [Online]. Available: <http://www.sdrforum.org>
- [2] ET Docket No 03-322, “Notice of proposed rule making and order,” FCC, Tech. Rep., Dec. 2003.
- [3] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [4] J. MitolaIII, “Cognitive Radio An Integral; Agent Architecture for Software Defined Radio,” Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [5] F. K. Jondral, “Software-defined radio - basics and evolution to cognitive radio,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 275–283, 2005.
- [6] J. MitolaIII, “Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 514–538, Apr. 1999.
- [7] F. K. Jondral, *Parametrization: A technique for SDR implementation*. London, UK: Wiley, 2002, pp. 232–256.
- [8] P. Mackenzie, L. Doyle, D. O’Mahony, and K. Nolan, “Software radio on general-purpose processors,” in *First Joint IEI/IEE Symposium on Telecommunications Systems*, 2001.
- [9] M. A. L. Thathachar and P. S. Sastry, *Networks of Learning Automata*. Kluwer, 2004.
- [10] R. W. Thomas, D. H. Friend, L. A. DaSilva, and A. B. MacKenzie, “Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, pp. 51–57, Dec. 2006.
- [11] J. MitolaIII and G. Q. Maguire, “Cognitive radio: making software radios more personal,” *IEEE Personal Communications*, vol. 6, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [12] ITU-R, “Rr5-1, article 5, frequency allocations,” ITU-R Radiocommunication Bureau, Tech. Rep., 2000.

- [13] Y. Henri, “Orbit/spectrum allocation procedures registration mechanism,” ITU-R Radiocommunication Bureau, Tech. Rep., Nov. 2006.
- [14] P. Leaves, K. Moessner, and R. Tafazolli, “Dynamic Spectrum Allocation in Composite Reconfigurable Wireless Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 5, pp. 72–81, May 2004.
- [15] SSC: Shared Spectrum Company, “Spectrum Occupancy Measurements.” [Online]. Available: <http://www.sharespectrum.com/measurements/>
- [16] ET Docket No 03-222, “Notice of proposed rule making and order,” FCC, Tech. Rep., Oct. 2003.
- [17] Q. Zhao and B. M. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access,” *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 24, pp. 79–89, May 2007.
- [18] D. N. Hatfield, “Property rights in spectrum: Taking the next step,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005, pp. 43 – 55.
- [19] C. Raman, R. D. Yates, and N. B. Mandayam, “Scheduling variable rate links via a spectrum server,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005, pp. 110 – 118.
- [20] R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse, “Spectrum sharing for unlicensed bands,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005, pp. 251–258.
- [21] —, “Spectrum sharing for unlicensed bands,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, pp. 517–528, Apr. 2007.
- [22] J. MitolaIII, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications,” in *IEEE International Workshop Mobile Multimedia Communications*, Nov. 1999, pp. 3–10.
- [23] B. Wild and K. Ramchandran, “Detecting primary receivers for cognitive radio applications,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, Maryland, USA, Nov. 2005.
- [24] M. Oner and F. K. Jondral, “On the extraction of the channel allocation information in spectrum pooling systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, pp. 558–565, Apr. 2007.
- [25] A. Sahai, N. Hoven, S. Mishra, and R. Tandra, “Fundamental tradeoffs in robust spectrum sensing for opportunistic frequency reuse,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. submitted, 2006.

- [26] A. Sahai, R. Tandra, S. M. Mishra, and N. Hoven, “Fundamental design tradeoffs in cognitive radio systems,” in *International workshop on Technology and policy for accessing spectrum*, Boston, Massachusetts, 2006.
- [27] A. Sahai, N. Hoven, and R. Tandra, “Some fundamental limits on cognitive radio,” in *Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, 2003.
- [28] T. Weiss, J. Hillenbrand, A. Krohn, and F. K. Jondral, “Efficient Signaling of Spectral Resources in Spectrum Pooling Systems,” in *Proceedings of 10th Symposium on Communications and Vehicular Technology*, 2003.
- [29] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, Nov. 2005.
- [30] S. Shankar, C. Cordeiro, and K. Challapali, “Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, Nov. 2005.
- [31] ET Docket No 03-289, “Establishment of interference temperature metric to quantify and manage interference and to expand available unlicensed operation in certain fixed mobile and satellite frequency bands,” FCC, Tech. Rep., Nov. 2003.
- [32] V. Brik, E. Rozner, S. Banarjee, and P. Bahl, “Dsap: a protocol for coordinated spectrum access,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005.
- [33] S. Zekavat and X. Li, “User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, pp. 82–87.
- [34] L. Cao and H. Zheng, “Distributed spectrum allocation via local bargaining,” in *in: Proc. IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) 2005*, Sept. 2005.
- [35] J. Huang, R. Berry, and M. Honig, “Spectrum sharing with distributed interference compensation,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, pp. 88–93.
- [36] L. Ma, X. Han, and C.-C. Shen, “Dynamic open spectrum sharing mac protocol for wireless ad hoc network,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, pp. 203–213.
- [37] P. Papadimitratos, S. Sankaranarayanan, and A. Mishra, “A Bandwidth Sharing Approach to Improve Licensed Spectrum Utilization,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 12, pp. suppl.10 – suppl.14, Dec. 2005.
- [38] J. Zhao, H. Zheng, and G.-H. Yang, “Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, pp. 259–268.

- [39] Q. Zhao, L. Tong, and A. Swami, “Decentralized cognitive mac for dynamic spectrum access,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, pp. 224–232.
- [40] H. Zheng and L. Cao, “Device-centric spectrum management,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, pp. 56–65.
- [41] C. Peng, H. Zheng, and B. Zhao, “Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access,” in *in: ACM Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2006.
- [42] H. Zheng and C. Peng, “Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access,” in *in: Proc. IEEE ICC 2005*, May 2005, pp. 3132–3136.
- [43] R. Menon, R. Buehrer, and J. Reed, “Outage probability based comparison of underlay and overlay spectrum sharing techniques,” in *in: Proc. IEEE DySPAN 2005*, Nov. 2005, p. 101•109.
- [44] A. Stirling, “White space coalition: The story so far,” in *Proceedings of The IET seminar on Cognitive Radio And Software Defined Radio: Technologies and Techniques*, London, Sept. 2008.
- [45] A. Jamin and P. Mahonen, “2. wavelet packet modulation for wireless communications,” *Wiley Interscience Journal on Wireless Communications & Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, Mar. 2005.
- [46] F. Harris and E. Kjeldsen, “1. a novel interpolated tree orthogonal multiplexing (itom) scheme with compact time-frequency localization: an introduction and comparison to wavelet filter banks and polyphase filter banks,” in *SDR- FORUM Technical Conference and Product Exposition*, Oct. 2006.
- [47] U. Berthold and F. Jondral, “Guidelines for Designing OFDM Overlay Systems,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005, pp. 626–629.
- [48] “IEEE 802.22 working group on wireless regional area networks.” [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/22/>
- [49] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and S. S. N., “Ieee 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005.
- [50] Y. Yuan, P. Bahl, R. Chandra, P. Chou, J. I. Ferrell, T. Moscibroda, S. Narlanka, and Y. Wu, “KNOWS: Cognitive Radio Networks Over White Spaces,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Apr. 2007.

- [51] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges and design trade-offs,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32–39, Apr. 2008.
- [52] D. Willkomm, S. Machiraju, J. Bolot, and A. Wolisz, “Primary users in cellular networks: A large-scale measurement study,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Oct. 2008.
- [53] M. Yang and D. Grace, “Cognitive radio with reinforcement learning applied to heterogeneous multicast terrestrial communication systems,” in *The 4th International Conference On Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Hannover*, June 2009.
- [54] Y. Xiao, “An analysis for differentiated services in IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs,” in *Distributed Computing Systems, 2004. Proceedings. 24th International Conference on*, 2004, pp. 32–39.
- [55] N. Choi, M. Patel, and S. Venkatesan, “A full duplex multi-channel mac protocol for multi-hop cognitive radio networks,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, June 2006.
- [56] A. Hsu, D. Wei, and C. Kuo, “A cognitive mac protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks,” in *Proceedings of IEEE WCNC '07*, Mar. 2007.
- [57] A. Motamedi and A. Bahai, “Mac protocol design for spectrum-agile wireless networks: Stochastic control approach,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Apr. 2007.
- [58] H. Nan, T.-I. Hyon, and S.-J. Yoo, “Distributed coordinated spectrum sharing mac protocol for cognitive radio,” in *Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Apr. 2007.
- [59] H. Su and X. Zhang, “Cross-layer based opportunistic mac protocols for qos provisioning over cognitive radio wireless networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 118–129, Jan. 2008.
- [60] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen, “HC-MAC: A hardware-constrained cognitive mac for efficient spectrum management,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 106–117, Jan. 2008.
- [61] A. V. Adamis, K. N. Maliatsos, and P. Constantinou, “Methods For Reducing Interference Caused To Licensed Systems By Overlay-CSMA/CA Cognitive Radios,” in

- Proceedings of the 3d International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, May 2008.
- [62] J. Shu, X. Yang, and X. Guo, “Disruptive csma with credit payback (cp) protocols for multi-radio network,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Aug. 2007.
- [63] J. L. Welch and N. Lynch, “A new fault-tolerant algorithm for clock synchronization.” *Information and Computation*, vol. 77, no. 1, pp. 1–36, 1988.
- [64] P. Ashton, D. of Computer Science, and U. of Canterbury, *Algorithms for off-line clock synchronization*. Dept. of Computer Science, University of Canterbury, 1995.
- [65] A. Duda, G. Harrus, Y. Haddad, and G. Bernard, “Estimating global time in distributed systems,” in *Proc. 7th Int. Conf. on Distributed Computing Systems, Berlin*, vol. 18, 1987.
- [66] D. L. Mills, “Improved algorithms for synchronizing computer network clocks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 3, no. 3, pp. 245–254, 1995.
- [67] —, “Internet time synchronization: The network time protocol,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 39, no. 10, pp. 1482–1493, 1991.
- [68] M. D. Lemmon, J. Ganguly, and L. Xia, “Model-based clock synchronization in networks with drifting clocks,” in *Dependable Computing, 2000. Proceedings. 2000 Pacific Rim International Symposium on*, Los Angeles, CA, 2000, pp. 177–184.
- [69] R. Ostrovsky and B. Patt-Shamir, “Optimal and efficient clock synchronization under drifting clocks,” in *Proceedings of the eighteenth annual ACM symposium on Principles of distributed computing*. ACM New York, NY, USA, 1999, pp. 3–12.
- [70] T. K. Srikanth and S. Toueg, “Optimal clock synchronization,” *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 34, no. 3, pp. 626–645, 1987.
- [71] F. Cristian, “Probabilistic clock synchronization,” *Distributed Computing*, vol. 3, no. 3, pp. 146–158, 1989.
- [72] L. Lamport and P. M. Melliar-Smith, “Synchronizing clocks in the presence of faults,” *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 32, no. 1, pp. 52–78, 1985.
- [73] L. Lamport, “Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system,” *Communications of the ACM*, vol. 21, no. 7, pp. 558–565, 1978.
- [74] F. Babich and L. Deotto, “Formal methods for specification and analysis of communication protocols,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 4, no. 1, pp. 2–20, Third Quarter Third Quarter 2002.

- [75] ITU-T, “Recommendation Z.100 (11/99)- specification and description language (SDL),” 2000.
- [76] “Proceedings.” [Online]. Available: <http://sdl-forum.org/Publications/Proceedings/Proceedings.htm>
- [77] J. Ellsberger, D. Hogrefe, and A. Sarma, *SDL Formal Object Oriented Language for Communication Systems*. Prentice Hall.
- [78] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, no. 3, pp. 535–547, Mar. 2000.
- [79] E. Ziouva and T. Antonakopoulos, “CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis,” *Elsevier: Computer Communications*, vol. 25, pp. 313–321, 2002.
- [80] H. Wu, F. Zhu, Q. Zhang, and Z. Niu, “WSN02-1: analysis of IEEE 802.11 DCF with hidden terminals,” in *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, 2006, pp. 1–5.
- [81] Z. Hadzi-Velkov and B. Spasenovski, “Saturation throughput - delay analysis of iee 802.11 dcf in fading channel,” in *International Conference on Communications, 2003. ICC '03.*, May 2003.
- [82] P. Latkoski, Z. Hadzi-Velkov, and B. Popovski, “Extended model for performance analysis of Non-Saturated IEEE 802.11 DCF in erroneous channel,” in *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006 IEEE International Conference on*, 2006, pp. 783–788.
- [83] K. Duffy, D. Malone, and D. Leith, “Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated conditions,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 715–717, Aug. 2005.
- [84] T. O. KIM, K. J. KIM, and B. D. CHOI, “Performance Analysis of IEEE802.11 DCF and IEEE802.11e EDCA in Non-saturation Condition,” *IEICE TRANS.COMMUN.*, vol. E91-B, no. 4, pp. 1122–1131, Apr. 2008.
- [85] J. Galtier, “Optimizing the IEEE 802.11b performance using Slow Congestion Window decrease,” in *Proceedings of 14th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Proceeding*, 2003.
- [86] Q. Ni, I. Aad, C. Barakat, and T. Turletti, “Modeling and Analysis of Slow CW Decrease for IEEE 802.11 WLAN,” in *Proceedings of 14th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Proceeding*, 2003.

- [87] I. Aad, Q. Ni, C. Barakat, and T. Turetletti, “Enhancing IEEE 802.11 MAC in congested environments,” in *Proceedings of 4th Workshop on Applications and Services in Wireless Networks (ASWN)*, 2004.
- [88] A. Papoulis and S. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 4th ed. McGraw Hill Higher Education, Jan 2002.
- [89] J. Weinmiller, M. Schlager, A. Festag, and A. Wolisz, “Performance study of access control in wireless LANs • IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 hiperlan,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 55–67, July 1997. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013255927445>
- [90] Part 11, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz Band,” *IEEE 802.11a WG*, 1999.
- [91] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. C. Peh, and A. T. Hoang, “Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 4, pp. 1326–1337, Apr. 2008.
- [92] Y. Pei, A. Hoang, and Y. Liang, “Sensing throughput tradeoff in cognitive radio network: How frequently should spectrum sensing be carried out?” in *Proceedings of the 18th Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communication*, Mar. 2007.
- [93] Y. Xu, J. Wang, and Q. Wu, “Interference - throughput tradeoff in dynamic spectrum access: Analysis based on discrete-time queuing subjected to bursty preemption,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Cogintive Radio Oriented Wireless Networks*, June 2009.
- [94] T. M. Schmidl and D. C. Cox, “Robust frequency and timing synchronization for ofdm,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 12, Dec. 1997.
- [95] M. Morelli and U. Mengali, “An improved frequency offset estimator for ofdm applications,” *IEEE Communications Letters*, vol. 3, no. 3, Mar. 1999.
- [96] J.-J. van de Beek, M. Sandell, and P. O. Borjesson, “ML estimation of time and frequency offset in ofdm systems,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, no. 7, July 1997.
- [97] K. Takahashi and T. Tsuboi, “Performance Improvement for IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF),” *IEICE TRANS.COMMUN.*, vol. E89-B, no. 5, pp. 1605–1612, May 2006.

## Βιβλιογραφία

- [98] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, “Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 8, no. 6, pp. 785–799, Dec. 2000.
- [99] —, “IEEE 802.11 protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 9, pp. 1774–1786, Sept. 2000.
- [100] M. Ibrahim and S. Alouf, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, ch. Design and Analysis of an Adaptive Backoff Algorithm for IEEE 802.11 DCF Mechanism, pp. 184–196.
- [101] H. Cho and S.-C. Park, “Modified Backoff Algorithm with Station Number Adaptiveness for (IEEE)802.11 Wireless LANs,” *IEICE TRANS.COMMUN.*, vol. E86-B, no. 12, pp. 3626–3629, Dec. 2003.
- [102] T and Amitabha, “A survey on MAC protocols in OSA networks,” *Computer Networks*, vol. 53, no. 9, pp. 1377–1394, June 2009. [Online]. Available: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6VRG-4VDS8NK-3&\\_user=10&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=999237594&\\_rerunOrigin=google&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=5457aafd29d9b01d09e52e89d62548e0](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VRG-4VDS8NK-3&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=999237594&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=5457aafd29d9b01d09e52e89d62548e0)
- [103] G. Heine, *GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation*. Artech House Publishers, Dec. 1998.



## Συντμήσεις

<b>2SCS</b>	:	Two State Carrier Sensing Mechanism	Μηχανισμός Ανίχνευσης Φέροντος Δύο Καταστάσεων
<b>3SCS-SW</b>	:	Three State Carrier Sensing Mechanism - Stop & Wait	Μηχανισμός Ανίχνευσης Φέροντος Τριών Καταστάσεων - Παύση και Αναμονή
<b>3SCS-I</b>	:	Three State Carrier Sensing Mechanism - Ideal	Μηχανισμός Ανίχνευσης Φέροντος Τριών Καταστάσεων - Ιδανικός
<b>AAPT</b>	:	Anticipated Air Propagation Time	Αντισταθμιζόμενη Καθυστερήση Διάδοσης
<b>ADC</b>	:	Analog to Digital Converter	Μετατροπέας από Αναλογικό σε Ψηφιακό
<b>ASIC</b>	:	Application Specific Integrated Circuits	Ολοκληρωμένα Κυκλώματα Καθορισμένα από την Υπηρεσία
<b>CCA</b>	:	Clear Channel Assessment	Αποτίμηση Κατάστασης του Μέσου
<b>CCC</b>	:	Common Control Channel	Κοινό Κανάλι Ελέγχου
<b>CCD</b>	:	Cell Channel Description	Κανάλι Περιγραφής Καναλιών Κυψέλης
<b>CSMA/CA</b>	:	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	Πολλαπλή Πρόσβαση Ανίχνευσης Φέροντος με Αποφυγή Συγκρούσεων
<b>CTS</b>	:	Clear To Send	Πλαίσιο Επιβεβαίωσης Αίτησης Αποστολής
<b>CW</b>	:	Contention Window	Παράθυρο Ανταγωνισμού
<b>DAC</b>	:	Digital to Analog Converter	Μετατροπέας από Ψηφιακό σε Αναλογικό

<b>DCF</b>	:	Distributed Coordination Function	Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου
<b>DFS</b>	:	Data Fragments Sequence	Ακολουθία Τεμαχίων Δεδομένων
<b>DIFS</b>	:	DCF IFS	Διάστημα Σιγής της DCF
<b>DAC</b>	:	Digital to Analog Converter	Μετατροπέας από Ψηφιακό σε Αναλογικό
<b>DSDMA</b>	:	Distributed Slot Division Multiple Access	Κατανεμημένη Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρονοσχιμής
<b>DSA</b>	:	Dynamic Spectrum Access	Δυναμική Χρήση Φάσματος
<b>DSP</b>	:	Digital Signal Processor	Ψηφιακός Επεξεργαστής Σήματος
<b>DTB</b>	:	Data Band	Ζώνη Δεδομένων
<b>DUB-MAC</b>	:	Dual Unlicensed Band - MAC	MAC με χρήση διπλής/παράλληλης μη αδειοδοτημένης φασματικής ζώνης
<b>EEM</b>	:	Exhaustive Enumeration Method	Εξοντωτική Μέθοδος Απαρίθμησης
<b>EIFS</b>	:	Extended IFS	Διευρυμένο Διάστημα Σιγής
<b>FCCH</b>	:	Frequency Correction Channel	Κανάλι Διόρθωσης Συχνότητας
<b>FCS</b>	:	Frame Check Sequence	Ακολουθία Ελέγχου Πλαισίου
<b>FES</b>	:	Frame Exchange Sequence	Ακολουθία Ανταλλαγής Πλαισίων
<b>GSM</b>	:	Global System for Mobile Communication	
<b>HoL</b>	:	Head of Line	Όταν το πλαίσιο βρίσκεται πρώτο στην ουρά εξυπηρέτησης του υποστρώματος MAC
<b>iDCF</b>	:	Intermittent DCF	Διακοπτόμενη Λειτουργία Κατανεμημένου Ελέγχου
<b>IF</b>	:	Intermediate Frequency	Ενδιάμεση Συχνότητα
<b>IFS</b>	:	Inter - Frame Space	Διάστημα Σιγής
<b>ITR</b>	:	Interference Time Ratio	Ποσοστό Χρόνου Παρεμβολής
<b>NAV</b>	:	Network Allocation Vector	Διάνυσμα Φασματικής Διαθεσιμότητας

## Συντμήσεις

<b>PLCP</b>	:	Physical Layer Convergence Protocol	Πρωτόκολλο Σύγκλισης Στο Φυσικό Στρώμα
<b>RF</b>	:	Radio Frequency	Ραδιο - Συχνότητα
<b>RKRL</b>	:	Radio Knowledge Representation Language	Γλώσσα Αναπαράστασης Γνώσης Ραδιοσυστημάτων
<b>RTS</b>	:	Request To Send	Πλαίσιο Αίτησης Αποστολής
<b>SCB</b>	:	Signaling & Control Band	Ζώνη Σηματοδοσίας & Ελέγχου
<b>SCH</b>	:	Synchronization Channel	Κανάλι Συγχρονισμού
<b>SDR</b>	:	Software Defined Radio	Πομποδέκτης Ορισμένος από Λογισμικό
<b>SDU</b>	:	Service Data Unit	Μονάδα Δεδομένων Υπηρεσίας
<b>SIR</b>	:	Signal to Interference Ratio	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή

Συντηρήσεις



# Βιογραφικό Σημείωμα

Επώνυμο: Αδάμης  
Όνομα: Αθανάσιος  
Όνομα πατρός: Βασίλειος  
Ημερ. Γεννήσεως: 23 Ιουλίου 1979  
Τόπος Γεννήσεως: Αθήνα  
Διεύθυνση: Ρ. Γκάλλι 64-66, Ηλιούπολη  
Τηλέφωνο (οικίας) 210 9954300  
e-mail: adamis@mobile.ntua.gr

## Σπουδές

Ανώτατη Εκπαίδευση: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών (1997-2002).  
Βαθμός Πτυχίου: 8,26 (“Άριον Καλώς”)

Μεταπτυχιακές Σπουδές: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών (2003-Σήμερα). Εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής

## Ξένες Γλώσσες

- Αγγλικά, First Certificate in English (Cambridge)
- Ισπανικά, Diploma Basico de Espanol como Lengua Extranjera • Instituto Cervantes, Universidad de Salamanca

## Συμμετοχή σε Προγράμματα

- “Software Defined Radio: Βέλτιστη χρησιμοποίηση Ραδιο-τηλεπικοινωνιακών πόρων και τερατικά πολλαπλών ασύρματων διεπαφών (multiple air interface terminals)” - ΠΕΝΕΔ 2003 - Γ.Γ.Ε.Τ.
- IST-2000-30173 ““STINGRAY (Space Time codING for Reconfigurable wireless Access Systems.)”” - Συμμετοχή στις μετρήσεις κατά τη διπλωματική εργασία
- COST Action 2100 ““ Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications””
- “Μετρήσεις, Χαρακτηρισμός και μοντελοποίηση ευρυζωνικής ψηφιακής ζεύξης σε μικτό περιβάλλον στεριάς • θάλασσας” - Συμμετοχή σε Μετρήσεις - intracom
- “Μελέτη Η/Μ Εναρμόνισης και εκχώρηση συχνοτήτων Ραδιομικροφώνων κατά τη διάρκεια Ολυμπιακών Αγώνων Αθήνα 2004” - ΥΜΕ
- “Καταγραφή Ραδιοφάσματος και μετρήσεις εναρμόνισης ραδιομικροφώνων πριν και κατά τη διάρκεια Ολυμπιακών και Παραολυμπιακών Αγώνων 2004” - ΥΜΕ
- “Εκπόνηση Μελέτης α) Ηλεκτρομαγνητικής Εναρμόνισης, β) Πλάνου Ραδιοσυχνοτήτων και γ) Ικανοποίησης Αιτημάτων για Ασύρματα Μικρόφωνα για τις ανάγκες του Τελικού Πρωταθλητριών Ομάδων Ευρώπης” - Ε.Ε.Τ.Τ
- “Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας για 2000 Μικροκυματικούς Σταθμούς” - ΟΤΕ
- “VERSANT • Εικονικά Περιβάλλοντα Μάθησης για Άτομα με Ειδικές Ανάγκες” - Γ.Γ.Ε.Τ.

## Άλλες Δραστηριότητες

- Μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας από το 2003
- Μέλος του Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Ηλεκτρολόγων • Μηχανολόγων από το 2003
- Μέλος του IEEE από το 2005
- Μέλος του IEICE από το 2006

□

# Δημοσιεύσεις του συγγραφέα

## Σε Περιοδικά

- Athanassios V. Adamis, Konstantinos Maliatsos and Prof. Philip Constantinou, *Throughput and Packet Delay Analysis of the Intermittent DCF for Overlay Access Networks*, IEICE Transactions On Communications, Vol.E92-B, No.11, pp.-, No-v.2009
- Athanassios V. Adamis, Konstantinos Maliatsos, George Cambourakis and Prof. Philip Constantinou, *Throughput Analysis of the Intermittent DCF for Opportunistic Spectrum Access*, International Journal on Wireless Personal Communications, Springer, 2009, DOI: 10.1007/s11277-009-9817-x

## Σε Βιβλίο

- Athanassios V. Adamis, Prof. Philip Constantinou, *Performance Study of the Intermittent DCF for Cognitive Radios forming Overlay Access Networks* chapter accepted for publishing in the book "Cognitive Radio Systems", ISBN 978-953-7619-25-1, In-Tech, Sept. 2009

## Σε συνέδρια

- A. Adamis, K. Maliatsos, P. Constantinou, *Throughput Analysis of Overlay CSMA/CA for Secondary Networks*, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, WiMob"2008, October 2008, Avignon, France.
- Maliatsos, Konstantinos, Adamis Athanassios, Constantinou, Philip, *Efficient receiver design for OFDMA Systems with subband carrier allocation strategy* Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2008. SPAWC 2008. IEEE 9th Workshop on, July 2008
- Konstantinos Maliatsos, Athanassios Adamis, Philip Constantinou, *SNR degradation due to Timing and Frequency Synchronization Errors for OFDMA Systems with*

*Subband Carrier Allocation*, European Wireless, 2008 Prague

- Konstantinos Maliatsos, Athanassios Adamis, Philip Constantinou, *Receiver Architectures for OFDMA Systems with Subband Carrier Allocation*, European Wireless 2008 Prague
- A. Adamis, K. Maliatsos, P. Constantinou, *Methods for Reducing Interference caused to Licensed Systems by Overlay-CSMA/CA Cognitive Radios*, The 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008, May 15-17, Singapore
- A. Adamis, P. Constantinou, *Performance Study Of CSMA/CA Over Spectrum Pooling Environment for Cognitive Radios*, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, WiMob"2007, October 2007, New York, USA.
- A. Adamis, P. Constantinou, *Intermittent CSMA/CA for Unlicensed Dynamic Spectrum Access*, International Scientific Conference, eRA-2, 22-23 Sept 2007, Athens, Greece
- K. Maliatsos, A. Adamis, P. Constantinou, *Frequency Synchronization, Receiver Architectures and Polyphase Filters for OFDMA Systems with Subband Carrier Allocation*, COST 2100, September 2007, Duisburg, Germany
- A. Adamis, K. Maliatsos, P. Constantinou, *A New Medium Access Control Protocol with Control Channel Auto-Discovery for Self-Deployed Cognitive Radio Networks*, European Wireless "07, April 2007, Paris, France.
- K. Maliatsos, A. Adamis, P. Vouddas, E. Katimertzoglou, N. Rittas, P. Constantinou. *A New Methodology for Frequency Coordination of Wireless Microphone Systems over occupied TV-Spectrum*, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, WiMob"2005, August 2005 Montreal Canada

□



