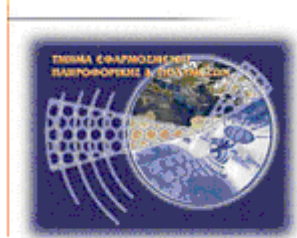




Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής & Πολυμέσων



Πτυχιακή εργασία

Τίτλος:

«Μελέτη πρωτοκόλλων δρομολόγησης εφαρμοσμένων σε γνωστικά δίκτυα»

Κασκαντίρη Ευγενία ΑΜ:2344

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μπουρδένα Αθηνά

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν σε αυτή. Κατά κύριο λόγο οφείλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα μου από το Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης, την κυρία Μπουρδένα Αθηνά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία στον επιστημονικό τομέα που επιθυμούσα. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για τη διάθεσή της να με βοηθήσει και να μου λύσει οποιαδήποτε απορία κάθε στιγμή που το χρειαζόμουν. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω αυτούς που με στήριξαν κατά τη διάρκεια της πτυχιακής αυτής εργασίας.

Ηράκλειο, Μάιος 2012

Ευγενία Κασκαντίρη

Περίληψη

Τα γνωστικά δίκτυα (Cognitive Radio Networks - CRNs) είναι δίκτυα επόμενης γενιάς τα οποία εξασφαλίζουν βελτιωμένη επικοινωνία και δυναμική χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος. Είναι έξυπνα συστήματα τα οποία μπορούν να αντιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και να προσαρμόζουν κατάλληλα τις δικές τους παραμέτρους. Τα CRNs βρίσκονται στο επίκεντρο των ερευνών και των εξελίξεων ως η τεχνολογία που επιτρέπει την πρόσβαση στα επικαλούμενα TV White Spaces (TVWS), τα οποία είναι μεγάλα τμήματα του φάσματος στον χώρο των Ultra High Frequency/ Very High Frequency (UHF/VHF), τα οποία καθίστανται διαθέσιμα κατά γεωγραφική βάση, μετά την επιβαλλόμενη ψηφιακή μετάβαση. Την χρήση αυτής της μάντας συχνοτήτων μας την επιτρέπει η επέλαση της ψηφιακής τηλεόρασης και η ελευθέρωση δεσμευμένων συχνοτήτων λόγω αναλογικής μετάδοσης. Τα ad hoc δίκτυα έχουν την δυνατότητα να δημιουργούνται δυναμικά και αυτόνομα χωρίς να χρειάζονται την παρουσία άλλων ενεργών και μη ενεργών δικτυακών συσκευών. Είναι τα δίκτυα τα οποία μεταβάλλουν την τοπολογία τους καθώς νέοι κόμβοι μπαίνουν σ' αυτό ή αποχωρούν κάποιοι άλλοι. Για να είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ κόμβων σε αυτά τα δίκτυα υπάρχουν τα κατάλληλα πρωτόκολλα που έχουν δημιουργηθεί, υλοποιηθεί και προταθεί. Σκοπός λοιπόν της πτυχιακής αυτής είναι η μελέτη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε cognitive radio ad hoc networks κάνοντας χρήση των TVWS. Προτείνεται μια νέα προσέγγιση δρομολόγησης δίνοντας λύση στην επικοινωνία μεταξύ ετερογενών δικτύων. Πιο αναλυτικά, γίνεται μια εισαγωγή στα CR, τα TVWS στα ad hoc δίκτυα και στους αλγόριθμους δρομολόγησης όπου είναι βασισμένα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Έπειτα παρουσιάζονται αναλυτικά τα πιο διαδεδομένα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, πρωτόκολλα δρομολόγησης στα cognitive radio ad hoc networks. Στη συνέχεια ακολουθεί η προτεινόμενη προσέγγιση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης για τις τηλεοπτικές συχνότητες, το οποίο είναι βασισμένο στον αλγόριθμο AODV και αποσκοπεί στη βέλτιστη επικοινωνία των κόμβων. Τέλος, αναγράφονται τα συμπεράσματα της μελέτης των πρωτοκόλλων και η μελλοντική έρευνα στο προτεινόμενο πρωτόκολλο και τα cognitive radio ad hoc networks.

Abstract

The cognitive networks (Cognitive Radio Networks - CRNs) are next-generation networks that provide improved communications and dynamic use of licensed spectrum. It's smart systems that can perceive the characteristics of the environment and adapt its own parameters. The CRNs are the focus of research and developments in technology that allows access to the invoking of TV White Spaces (TVWS), which are large parts of the spectrum in the field of Ultra High Frequency / Very High Frequency (UHF / VHF), the which become available at a geographical basis, imposed after the digital transition. The use of this frequency band allows us the advent of digital television and the release of the bound analogue frequencies. The ad hoc networks have the ability to dynamically and autonomously without requiring the presence of other active and inactive network devices. They are networks that change their topology as new nodes enter it or leave others. To enable communication between nodes in these networks there are proper protocols have been developed, implemented and proposed. Aim of this thesis is the study of routing protocols in cognitive radio ad hoc networks using the TVWS. A new approach to routing solution providing communication between heterogeneous networks. Specifically, we introduce CR, the TVWS in ad hoc networks and routing algorithms which are based routing protocols. After detailing the most common, according to the literature, routing protocols in cognitive radio ad hoc networks. Then follows the approach proposed routing protocol for broadcasting frequencies, which is based on the algorithm AODV and aims to optimize communication between nodes. Finally, given the conclusions of the study protocols and future research in the proposed protocol and cognitive radio ad hoc networks.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Λίστα Εικόνων	vii
Λίστα Πινάκων	viii
Ακρωνύμια	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενική Περιγραφή	1
1.2 Παρούσα κατάσταση	1
1.3 Το πρόβλημα	2
1.4 Σκοπός και στόχος εργασίας	3
2. Γνωστικά Δίκτυα - Cognitive Radio	4
2.1. Οι έννοιες της Γνωστικής Ραδιοεπικοινωνίας(Cognitive Radio) του Γνωστικού Δικτύου (Cognitive Network) και του Γνωστικού δικτύου ραδιοεπικοινωνίας (Cognitive Radio Network)	4
2.1.1. Αρχιτεκτονικές Cognitive Radio	5
2.1.1.1. Αρχιτεκτονική Centralized	5
2.1.1.2. Αρχιτεκτονική Distributed με κοινό κανάλι ελέγχου.....	6
2.1.1.3. Αρχιτεκτονική Distributed χωρίς κοινό κανάλι ελέγχου.....	7
2.2. Τηλεοπτικά Λευκά Φάσματα - Television White Spaces (TVWS).....	8
2.3 Ορισμός και ιδιότητες των Ad hoc Δικτύων	10
2.3.1 Λειτουργία των Ad hoc Δικτύων	10
2.3.2 Χαρακτηριστικά των Ad hoc Δικτύων.....	11
2.3.3 Ποιότητα υπηρεσιών στα ad hoc δίκτυα	12
2.3.4 Προβλήματα, Προκλήσεις.....	13
2.4 Mobile ad hoc networks (MANET)	14
2.4.1 Χαρακτηριστικά των MANETS	15
2.4.1.1 Δυναμικές τοπολογίες	15
2.4.1.2 Συνδέσμους με χαμηλό εύρος ζώνης και μεταβαλλόμενη χωρητικότητα.....	15
2.4.1.3 Περιορισμούς σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας.....	15
2.4.1.4 Περιορισμένη ασφάλεια	16
2.5 Ασύρματα δίκτυα πλέγματος (Mesh Networks)	16
2.5.1 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα	17
3. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και υπάρχουσες προσεγγίσεις.....	18
3.1 Proactive και Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης	20
3.1.1. Proactive πρωτόκολλο δρομολόγησης Dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol (DSDV)	20
3.1.2. Reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης Ad hoc On Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV)	22
3.1.3 Dynamic Source Routing Protocol (DSR).....	25
3.2 Υπάρχουσες προσεγγίσεις πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	28
3.2.1. Ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης για multi-hop multi-radio multi-channel γνωστικά δίκτυα.	28
Route Discovery Process	28
Local Route Maintenance and Recovery	28

3.2.2. Το πρωτόκολλο BCCCS (Backup Channel and Cooperative Channel Switching On-Demand Routing Protocol)	29
Spectrum Sensing and control channel selection	30
Routing procedure	30
Route Discovery	31
Route Reply	31
Channel selection.....	31
3.2.3. CRP: A Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks	32
Probability of bandwidth availability	32
Variance in the number of bits sent over the link.....	32
Spectrum propagation characteristics	32
PU receiver protection:	32
Spectrum sensing consideration	33
3.2.4. An Opportunistic Service Differentiation Routing Protocol for Cognitive Radio Networks (OSDRP)	34
Route Discovery	34
Route Decision	35
Differentiated Transmission.....	35
3.2.5 Το SAMER πρωτόκολλο	36
Dynamic Candidate Mesh	37
Opportunistic Forwarding	37
3.2.6. Το SPEAR Πρωτόκολλο	38
4. Προτεινόμενο πρωτόκολλο	40
4.1 Περιγραφή προτεινόμενου πρωτόκολλου δρομολόγησης για τα Ad hoc cognitive radio	40
4.1.1 Route Discovery Process	42
4.1.2 Route reply	43
4.1.3 Route maintenance.....	43
4.2 Design of a routing protocol adopted in Ad-hoc CRN over TVWS.....	44
4.2.1. Αξιολόγηση πρωτοκόλλου	46
5. Αποτελέσματα	49
5.1 Συμπεράσματα	49
5.2 Μελλοντική εργασία και επεκτάσεις	49

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.	Απεικόνιση του πεδίου εφαρμογής του CR,CRN και CN στο LAN τμήμα ασυρμάτου δικτύου
Εικόνα 2.	Αρχιτεκτονική του DSAP
Εικόνα 3.	Οι διαπραγματεύσεις για το ραδιοφάσμα από το DOSS πρωτόκολλο
Εικόνα 4.	Ένα παράδειγμα ανοικτού συστήματος φάσματος που δείχνει την αδυναμία του ενός CCC
Εικόνα 5.	Κατανομή φάσματος στην Ευρωπαϊκή Ένωση
Εικόνα 6.	Ασύρματο ad-hoc δίκτυο
Εικόνα 7.	Δρομολόγηση μεταξύ των περιφερικών με την ετερογενή διάθεση ραδιοφάσματος
Εικόνα 8.	Μετάδοση του πακέτου αίτησης διαδρομής(RREQ)
Εικόνα 9.	Το μονοπάτι που ακολουθείται από το πακέτο απάντησης διαδρομής (RREP)
Εικόνα 10.	Κατασκευή του αρχείου διαδρομής κατά τη διάρκεια ανακάλυψης διαδρομής
Εικόνα 11.	Μετάδοση της απάντησης διαδρομής με το αρχείο διαδρομής
Εικόνα 12.	Το πλαίσιο του BCCCS
Εικόνα 13.	CFNs Selection
Εικόνα 14.	Cross-layer routing
Εικόνα 15.	Επικοινωνία μεταξύ των κόμβων S και D με SPEAR
Εικόνα 16.	Δρομολόγηση βάση της διαθεσιμότητας των TVWS
Εικόνα 17.	Διαδικασία επιλογής διαδρομής
Εικόνα 18.	Τελική διαδρομή
Εικόνα 19.	Η διαδρομή του ack
Εικόνα 20.	Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων του προτεινόμενου πρωτοκόλλου
Εικόνα 21.	Αποτελέσματα της αξιολόγησης των επιδόσεων που αντιπροσωπεύουν ποσοστό ζημιάς
Εικόνα 22.	Αποτελέσματα της αξιολόγησης των επιδόσεων που αντιπροσωπεύουν τη μέση καθυστέρηση αναμονής

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.	RREQ
Πίνακας 2.	RREP

Ακρωνύμια

ALM	Application Layer Metrics
AODV	Ad hoc On demand Distance Vector
CCC	Common Control Channel
CFN	Candidate forwarding nodes
CINFO	Channel INFo
CN	Cognitive Network
CNs	Cognitive Node
CR	Cognitive Radio
CREP	Channel REPLY
CREQ	Channel REQuests
CRID	Cognitive Radio Identifier
CRN	Cognitive Radio Network
DIMSUMnet	dynamic intelligent management of spectrum for ubiquitous mobile access network
DOSS	Dynamic Open Spectrum Sharing
DS	Distance Vector
DSA	Dynamic Spectrum Access
DSAP	Dynamic Spectrum Access Protocol
DTN	Distributed Transient Network
ETT	Expected Transmission Time
ETX	Expected transmission count
GPS	Global Positioning System
GSC	Global Standards Collaboration
IP	Internet Protocol
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
MANETS	Mobile Ad hoc Network
MEATT	Minimum Expected Available Transmission Time
MLM	MAC Layew Metrics
NLM	Network Layer Metrics
NPDU	Network Protocol Data Unit
ORTPC	Opportunistic Routing with Transmit Power Control
PDA	Personal Digital Assistan
PN	Primary Node
PRN	Primary Networks
PU	Primary users
QOS	Quality Of Service
REQ	Request
RERR	Route error
RREC	Route recovery
RREP	Route Reply

RREQ	Route Request
SOP	Spectrum Opportunities
SU	Secondary User
TTL	Time to live
TVWS	Television White Spaces
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
WiFi	Wireless Fidelity

1.Εισαγωγή

1.1 Γενική Περιγραφή

Η χρήση των laptop και των νέων εξελιγμένων κινητών τηλεφώνων έλυσε το πρόβλημα της φορητότητας των υπολογιστών και τα τελευταία χρόνια οι διαρκώς αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ασυρμάτων δικτύων έλυσαν το πρόβλημα της διασύνδεσης αυτών των υπολογιστών. Η χρήση ενός φορητού υπολογιστή με ασύρματη σύνδεση σε κάποιο τοπικό δίκτυο και κατ' επέκταση με το διαδίκτυο, είναι πλέον μια συνηθισμένη υπόθεση σε πάρα πολλούς χώρους. Εγκαταστάσεις τοπικών ασύρματων δικτύων υπάρχουν σε πάρα πολλούς δημόσιους χώρους, από αεροδρόμια και αίθουσες συνεδρίων μέχρι κοινόχρηστους χώρους πανεπιστημίων και εταιρειών. Επιπλέον, ασύρματες συνδέσεις ενώνουν απομακρυσμένα δίκτυα (π.χ. δύο κτίρια σε μια πόλη) δίνοντας λύσεις εκεί που τα καλώδια δεν μπορούν. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετηθεί μια ενδιαφέρουσα κατηγορία ασύρματων δικτύων, τα cognitive radio ad hoc networks over TVWS. Ο όρος "Cognitive radio" αρχικά αναφέρθηκε από τον Mitola [1] και ουσιαστικά θέτει σε εφαρμογή διάφορους τρόπους για την αποδοτική αξιοποίηση φάσματος. Μια από τις πρώτες και σημαντικές εφαρμογές του Cognitive radio φαίνεται να είναι η δυναμική πρόσβαση φάσματος. Μέσω των διάφορων τεχνικών που χρησιμοποιεί το Cognitive radio μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χρησιμοποίηση είτε διανομή φάσματος με ένα δυναμικό τρόπο. Ωστόσο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ουσιαστικά το Cognitive radio θα λειτουργεί στο καλύτερο διαθέσιμο κανάλι και με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το cognitive radio είναι μια αυτόνομη μονάδα σε ένα περιβάλλον επικοινωνιών όπου αρκετά συχνά ανταλλάσσει πληροφορίες με τα δίκτυα. Ο όρος "ad-hoc" χρησιμοποιείται για να δηλώσει μια μέθοδο διασύνδεσης η οποία συνήθως σχετίζεται με ασύρματα δίκτυα. Τα δίκτυα ad-hoc εντάσσονται σε μια ευρύτερη κατηγορία δικτύων DTN (Distributed Transient Network), η οποία ορίζεται σαν τα δίκτυα αυτά τα οποία είναι εν γένει αποκεντρωμένα και αποτελούνται κυρίως από κόμβους οι οποίοι δεν ανήκουν εξ ορισμού και διαρκώς στο δίκτυο αλλά έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται ή να αποχωρούν από αυτό, οποιαδήποτε στιγμή και από οποιοδήποτε σημείο του. Η απουσία σταθερής υποδομής καθιστά αυτά τα πολύ ευέλικτα δίκτυα κατάλληλα για επικοινωνία σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, σε δύσβατες περιοχές, δικτύωση μεταξύ αυτοκινήτων κλπ., δημιουργεί όμως και ένα σύνολο από νέες απαιτήσεις κατά το σχεδιασμό τους. Τα TVWS είναι τα τηλεοπτικά κανάλια σε κάθε γεωγραφική περιοχή που είναι αχρησιμοποίητα ή που χρησιμοποιούνται αναποτελεσματικά. Η χρήση των TVWS έγινε δυνατή μετά την επέλαση της ψηφιακής τηλεόρασης και την απελευθέρωση συχνοτήτων που ήταν δεσμευμένες από τους κανονισμούς που ίσχυαν για την αναλογική μετάδοση. Τα TVWS γίνονται διαθέσιμα κατά γεωγραφική βάση, μετά την επιβαλλόμενη μετάβαση από αναλογική σε ψηφιακή τηλεόραση. Τα TVWS αποτελούνται από μεγάλα τμήματα του φάσματος στον χώρο των Very High Frequency/Ultra High Frequency/ (VHF/UHF).

Επίσης θα μελετηθούν ειδικές κατηγορίες Ad Hoc δικτύων (MANETs, Mesh Networks), οι αλγόριθμοι δρομολόγησης και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που είναι βασισμένα στους αλγορίθμους. Τέλος θα γίνει αναφορά σε ένα νέο πρωτόκολλο το οποίο προτείνεται για την καλύτερη δυνατή δρομολόγηση σε CRNs που αξιοποιούν κομμάτι του τηλεοπτικού φάσματος, το οποίο ονομάζεται TVWS.

1.2 Παρούσα κατάσταση

Ο όρος "Cognitive Radio" (γνωσιακά δίκτυα) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1999 σε ένα άρθρο από τους Joseph Mitola III και Gerald Q. Maguire, Jr [2]. Αργότερα στη διδακτορική του διατριβή ο Mitola περιέγραψε το Cognitive Radio ως *"το σημείο όπου τα*

ασύρματα PDAs και τα σχετικά δίκτυα διαθέτουν αρκετή υπολογιστική ισχύ ώστε να γνωρίζουν για τους ασύρματους πόρους και την επικοινωνία από υπολογιστή σε υπολογιστή με σκοπό να: ανιχνεύουν τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες του χρήστη σε συνάρτηση με το περιβάλλον χρήσης, και να παρέχουν ασύρματους πόρους και υπηρεσίες πλέον κατάλληλες για αυτές τις ανάγκες."

Ωστόσο, επειδή πρόκειται για μία καινούρια τεχνολογία που βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της σύλληψης, είναι δύσκολο να βρεθεί ένας κοινά αποδεκτός ορισμός. Για παράδειγμα, η ομάδα Global Standards Collaboration (GSC) της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU) παρέχει έναν εναλλακτικό ορισμό [3]: Cognitive Radio: Ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που "αισθάνεται" και έχει συνείδηση του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί και μπορεί να εκπαιδευτεί ώστε να προσαρμόζει αναλόγως με δυναμικό και αυτόνομο τρόπο τις παραμέτρους λειτουργίας του.

Τέλος, ο Simon Haykin αντιλαμβάνεται το Cognitive Radio ως [4] " ένα ευφυές ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που είναι ενήμερο του περιβάλλοντός του (του έξω κόσμου) και χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία "κατανόηση μέσω δόμησης" (understanding -by-building), για να μάθει από το περιβάλλον και να προσαρμόσει τις εσωτερικές του καταστάσεις στις στατιστικές μεταβολές των εισερχόμενων ηλεκτρομαγνητικών ερεθισμάτων, κάνοντας κατάλληλες αλλαγές σε συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας (π.χ. ισχύ εκπομπής, φέρουσα συχνότητα, και στρατηγική διαμόρφωσης) σε πραγματικό χρόνο, έχοντας υπ' όψη δύο βασικούς στόχους:

- Επικοινωνία υψηλής αξιοπιστίας όποτε και όπου χρειάζεται.
- Αποδοτική χρησιμοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος."

Από μια πιο πρακτική σκοπιά, το Cognitive Radio μπορεί να θεωρηθεί ως η σύγκλιση των διάφορων βομβητών, PDAs, GPS, κινητών τηλεφώνων και πολλών άλλων συσκευών ειδικού σκοπού που χρησιμοποιούμε σήμερα. Όλα αυτά θα ενοποιηθούν μέσα στην επόμενη δεκαετία και θα μας εκπλήξουν με υπηρεσίες που μέχρι πρότινος ήταν διαθέσιμες μόνος σε λίγους εκλεκτούς, με την ασύρματη συνδεσιμότητα και το internet να κάνουν τα πάντα πιο εύκολα. Ίσως όμως μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη νέα αυτή τεχνολογία εξετάζοντας τις ιδιότητες που τη διέπουν.

Οι προτεινόμενες μέχρι σήμερα ερευνητικές λύσεις (state of the art) εισάγουν τους όρους spectrum sharing και spectrum trading και αξιοποιούνται στα δίκτυα CR. Όλες οι ερευνητικές προσπάθειες αυτές υπόσχονται πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διαχείριση του φάσματος με δυναμικούς μηχανισμούς, οι οποίοι βασίζονται στις θεωρίες της οικονομίας συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων των ασυρμάτων δικτύων.

1.3 Το πρόβλημα

Τα ασύρματα δίκτυα μέχρι σήμερα λειτουργούν αξιοποιώντας συχνότητες, οι οποίες τους έχουν εκχωρηθεί στατικά έτσι ώστε να γίνει εφικτή η παροχή υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Αν και η πολιτική εκχώρησης φάσματος με αυτόν τον τρόπο αξιοποιήθηκε αρκετά στο παρελθόν, η απαίτηση για παροχή πολλαπλών ετερογενών υπηρεσιών χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα αυξήθηκε δραματικά και δημιουργήθηκε η ανάγκη για νέες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη βέλτιστη χρήση/αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Οι ερευνητικές προσπάθειες αυτές έχουν σαν στόχο την εξεύρεση λύσεων, οι οποίες βασίζονται στην εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος φάσματος με τη χρήση μοντέλων της μικροοικονομίας. Στα πλαίσια αυτά και δεδομένης της συνεχούς απαίτησης για πολλαπλές υπηρεσίες, τα παραδοσιακά ασύρματα συστήματα θα μπορούσαν να ενισχυθούν με μηχανισμούς δυναμικής διαχείρισης φάσματος DSA (Dynamic Spectrum Access) ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των τελικών χρηστών αξιοποιώντας με αυτόν τον τρόπο πιο αποτελεσματικά το διαθέσιμο ασύρματο φάσμα. Αυτό το πρόβλημα διευθετείται από τον ερευνητικό τομέα της δυναμικής διαχείρισης φάσματος και

των δικτύων Cognitive Radio (CR) προτείνοντας πρωτοποριακούς μηχανισμούς οι οποίοι βασίζονται σε οικονομικά μοντέλα.

1.4 Σκοπός και στόχος εργασίας

Στην εποχή που ζούμε η τεχνολογία προχωράει με πολύ γρήγορους ρυθμούς έτσι λοιπόν στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν τα δίκτυα επόμενης γενιάς (Cognitive radio) τα ad hoc δίκτυα και η δρομολόγηση τους. Σκοπός της εργασίας είναι να γίνει γνωστή η ύπαρξη και η λειτουργία των δικτύων αυτών αλλά και των υπηρεσιών που παρέχουν. Η καινοτομία της πτυχιακής αυτής βασίζεται στην αξιοποίηση των ανεκμετάλλευτων TVWS προκειμένου να εφαρμοστεί ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταξύ κόμβων που επιθυμούν να επικοινωνήσουν, λαμβάνοντας υπόψη τις προκλήσεις που φέρουν στην επιφάνεια αυτές οι περιστασιακά ελεύθερες συχνότητες. Στόχος λοιπόν αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει μια νέα προσέγγιση για την δρομολόγηση των δεδομένων.

2. Γνωσιακά Δίκτυα - Cognitive Radio

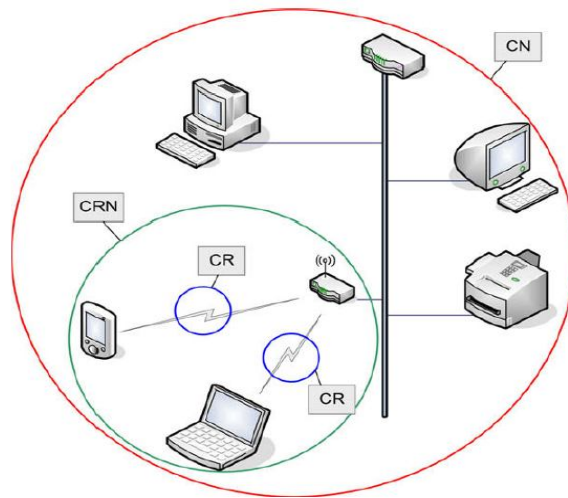
Τα Cognitive Radios είναι τα έξυπνα-ευφυή συστήματα τα οποία μπορούν να αντιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και να προσαρμόζουν κατάλληλα τις δικές τους παραμέτρους λειτουργίας τους με σκοπό την βελτίωση της επικοινωνίας. Τα Cognitive Radios έχουν προταθεί ως μέσο για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση του αδειοδοτημένου φάσματος, το οποίο σήμερα κάνει χρήση στατικής κατανομής φάσματος. Αυτή η στατική κατανομή δεν έχει ως αποτέλεσμα την βέλτιστη χρήση του φάσματος. Η κύρια λειτουργία των γνωσιακών Δικτύων (Cognitive Radios) είναι να κάνουν δυναμική χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των αδειοδοτημένων και μη-αδειοδοτημένων χρηστών.

2.1. Οι έννοιες της Γνωστικής Ραδιοεπικοινωνίας (Cognitive Radio) του Γνωστικού Δικτύου (Cognitive Network) και του Γνωστικού δικτύου ραδιοεπικοινωνίας (Cognitive Radio Network)

Το CN ορίζεται ως το δίκτυο με γνωστική ικανότητα που αισθάνεται το περιβάλλον, σχεδιάζει την δράση του σύμφωνα με τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και αποφασίζει για το σενάριο χρήσης που πρέπει να ακολουθήσει. Το σύστημα μαθαίνει από τις προηγούμενες πράξεις του και όλα αυτά ακολουθώντας τον προκαθορισμένο τελικό στόχο. Ο ρόλος του CR μπορεί να περιγραφεί ως μοντέλο με το οποίο ελέγχεται η συμπεριφορά καναλιού επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων (Εικ. 1) με χρήση του γνωστικού κύκλου και της προσαρμογής με ανάδραση. Μπορεί δηλαδή να αντιληφθεί τότε ένα ιδιαίτερο τμήμα του ραδιοφάσματος είναι σε χρήση, και να μεταπηδήσει σε άλλο προσωρινά αχρησιμοποίητο χωρίς να παρεμβάλλεται στην εκπομπή άλλων εξουσιοδοτημένων χρηστών. Ο στόχος της είναι να αυξήσει τη χρησιμοποίηση του φάσματος με την αξιοποίηση αχρησιμοποίητου και υπό χρησιμοποιημένου φάσματος σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η έννοια του CR εισήχθη για τη βελτίωση της χρήσης του φάσματος συχνοτήτων σε ασύρματα δίκτυα. Η βασική ιδέα είναι να επιτραπεί στους χρήστες χωρίς άδεια (unlicensed users) να κάνουν χρήση αδειοδοτημένων (licensed) συχνοτήτων, υπό την προϋπόθεση ότι μπορεί να εξασφαλιστεί η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τους πρωταρχικούς χρήστες. Ωστόσο, αφήνοντας περιθώριο για ευκαιριακή χρήση του ασύρματου φάσματος δημιουργούνται νέα προβλήματα, όπως η αρμονική συνύπαρξη με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, καθώς και η κατανόηση του μεγέθους της επίδρασης των παρεμβολών τις οποίες κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα μπορεί να δημιουργήσει στους αρχικούς χρήστες [5].

Το CRN έχει την ικανότητα να προσαρμόζει τις παραμέτρους της εκπομπής (π.χ. την ισχύ εκπομπής και την ραδιοσυχνότητα) βάσει της διαδραστικότητας (awareness) με το ράδιο περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί με δύο κύριους στόχους: την υψηλή πιστότητα της ραδιοεπικοινωνίας και την αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Η awareness αναφέρεται στους μηχανισμούς που κάνουν ικανό το CRN να γνωρίζει τα διαθέσιμα επικοινωνιακά μέσα σε δεδομένο τόπο και χρονική στιγμή. Τα μέσα αυτά περιλαμβάνουν την γεωγραφική τοποθεσία, τα τοπικά δίκτυα και τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Η διαφορά μεταξύ cognitive network (CN), cognitive radio (CR) και cognitive radio network (CRN) αφορά μόνο στο πεδίο εφαρμογής τους (Εικ. 1). Το CR εκτείνεται μόνο στο πεδίο της ασύρματης σύνδεσης ενώ το CRN εκτείνεται σε όλο το ασύρματο δίκτυο και σε όλα τα επίπεδα πρωτοκόλλου. Το CRN μπορεί να περιγραφεί ως δίκτυο των CR. Τέλος το CN είναι πιο γενικό και εκτείνεται σε ολόκληρο το σύστημα επικοινωνίας μαζί με το κεντρικό δίκτυο. Στο CN, οι αποφάσεις

παίρνονται προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις του δικτύου ως σύνολο, και όχι για τις επιμέρους συνιστώσες του δικτύου.

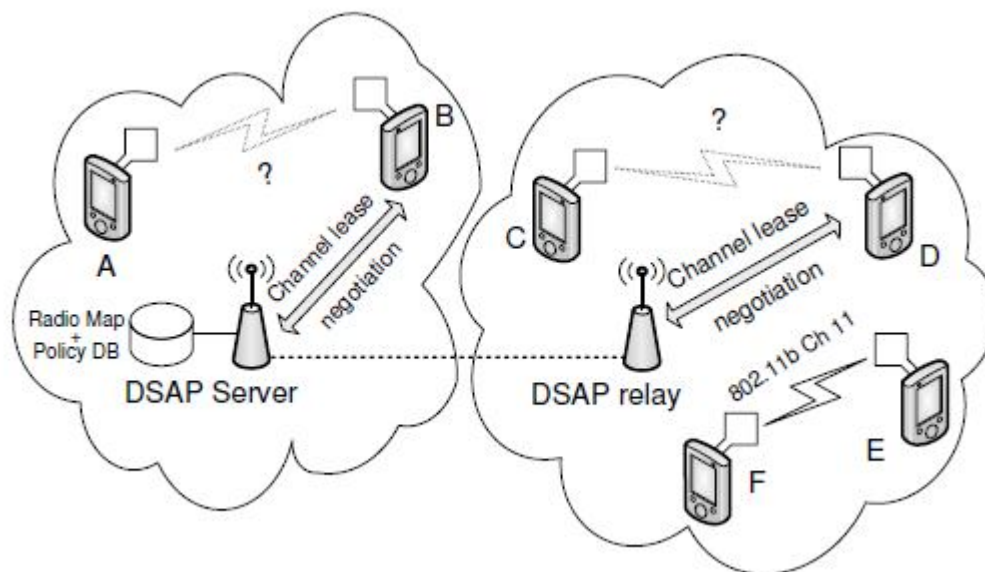


Εικόνα 1: Απεικόνιση του πεδίου εφαρμογής του CR, CRN και CN στο LAN τμήμα ασυρμάτου δικτύου

2.1.1. Αρχιτεκτονικές Cognitive Radio

2.1.1.1. Αρχιτεκτονική Centralized

Το DSAP (Dynamic Spectrum Access Protocol) επιτρέπει τη δυναμική πρόσβαση στο ραδιοφάσμα μέσω ενός κεντρικού φορέα συντονισμού και επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή των πόρων και του utilization σε ένα περιορισμένο γεωγραφικό περιβάλλον. Μια χαρακτηριστική αρχιτεκτονική DSAP παρουσιάζεται (Εικ. 2) [6]. Το DSAP αποτελείται από πελάτη, διακομιστή και αναμεταδότη. Ο DSAP πελάτης συγκεντρώνει τις τοπικές παρατηρήσεις της χρήσης του ραδιοφάσματος από την ανίχνευση του φάσματος και αναφέρει τις πληροφορίες στον DSAP διακομιστή. Από τις πληροφορίες που έλαβε από το φάσμα πελατών, ο DSAP διακομιστής κατασκευάζει μια συνολική εικόνα του δικτύου με την ονομασία RadioMap. Ο DSAP πελάτης δεν μπορεί να επιλέξει ένα ασύρματο κανάλι επικοινωνίας αυθαίρετα, αντίθετα πρέπει να ζητήσει κατάλληλη ανάθεση καναλιού από το διακομιστή DSAP. Ο DSAP διακομιστής δέχεται αιτήματα επικοινωνίας από τους πελάτες και βασίζονται σε διάφορους βελτιστοποιημένους στόχους και στο σύνολο των πολιτικών διαχείρισης και ο RadioMap προσδιορίζεται μια βέλτιστη κατανομή του ραδιοφάσματος μεταξύ των πελατών του δικτύου και αναδιαμορφώνει τους πελάτες ανάλογα. Σύμφωνα με διαφορετικούς στόχους βελτιστοποίησης, οι διάφοροι αλγόριθμοι και οι πολιτικές μπορούν να εφαρμοστούν κατά τη διαδικασία της απόκτησης της βέλτιστης κατανομής του ραδιοφάσματος. Μετά τη λήψη απόφασης εκχώρηση φάσματος, ο DSAP διακομιστής απαντά πίσω με ένα δεσμευτικό χρονοδιάγραμμα κατανομής του ραδιοφάσματος, την κλήση μίσθωσης. Η Μίσθωση μπορεί να ανακληθεί από τον διακομιστή, να παραιτηθεί από τον πελάτη ή να αποσυνδεθεί λόγω χρονικού ορίου. Ο DSAP server έχει τουλάχιστον δύο ασύρματες διεπαφές. Μία διεπαφή λειτουργεί πάντα σε προκαθορισμένο κοινό κανάλι ελέγχου (CCC), το οποίο χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή ελέγχου της κυκλοφορίας μεταξύ του διακομιστή και του πελάτη. Η άλλη διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται για την επίτευξη ενεργών πελατών. Ο DSAP αναμεταδότης επιτρέπει multi-hop επικοινωνία μεταξύ εξυπηρετητή και πελάτη που δεν βρίσκονται σε άμεση εμβέλεια.



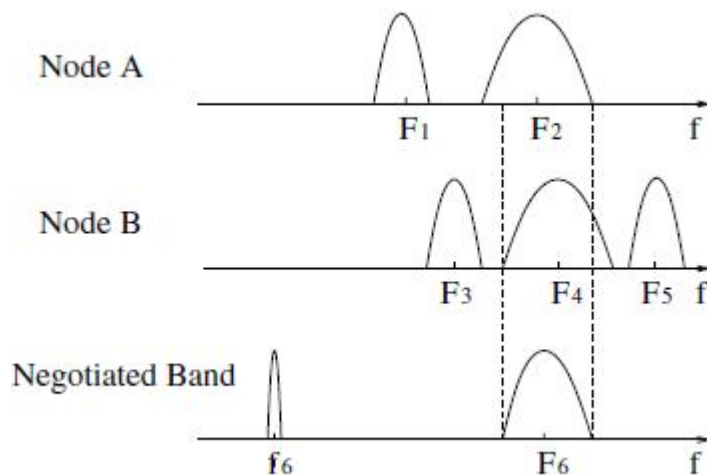
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική του DSAP

Μια τυπική διαδικασία για τον πελάτη DSAP να αποκτήσει μια νέα μίσθωση του ραδιοφάσματος ως εξής [6]. Ας υποθέσουμε ότι ένας πελάτης θέλει να ξεκινήσει την επικοινωνία με άλλο πελάτη τότε στέλνει αιτήματα στο κατάλληλο κανάλι από το διακομιστή DSAP. Το ChannelDiscover μήνυμα μεταδίδεται σε οποιονδήποτε διακομιστή DSAP στην περιοχή. Με βάση τους στόχους βελτιστοποίησης, της πολιτικές, και το RadioMap του, ο DSAP server θα απαντήσει με ένα ChannelOffer μήνυμα. Μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι από έναν διακομιστή DSAP στην περιοχή του πελάτη, για να αυξηθεί η αξιοπιστία, για παράδειγμα. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι κάθε διακομιστής κάνει ChannelOffer στον αιτούν πελάτη. Ως εκ τούτου, απαιτείται ο πελάτης να επιλέγει μόνο μία από αυτές τις προσφορές για δική του χρήση μέσω ενός μηνύματος ChannelRequest στον κατάλληλο διακομιστή, εμμέσως μειώνεται η προσφορά από όλους τους άλλους. Τέλος, ο DSAP server θα απαντήσει με ένα ChannelACK ότι επιβεβαιώνει (ή αρνείται) την αίτηση μίσθωσης καναλιού. Παρόμοια με το DSAP, το DIMSUMnet (dynamic intelligent management of spectrum for ubiquitous mobile access network) [7] αποτελεί επίσης κεντρικό μηχανισμό με βάση τη διαμεσολάβηση του φάσματος που διαχειρίζεται μεγάλα τμήματα του φάσματος και αναθέτει μερίδες σε μεμονωμένους τομείς ή χρήστες. Τα DSAP και DIMSUMnet είναι συμπληρωματικά μεταξύ τους, υπό την έννοια ότι οι πράξεις DSAP ως ιδιοκτήτης φάσματος για βαριά χρήση, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, ενώ τοπικές DIMSUMnet είναι για σχετικά μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.

2.1.1.2. Αρχιτεκτονική Distributed με κοινό κανάλι ελέγχου.

Το Doss (Dynamic Open Spectrum Sharing) προσφέρει σε πραγματικό χρόνο δυναμική κατανομή φάσματος και υψηλό βαθμό χρησιμοποίησης του φάσματος χωρίς βοήθεια οποιασδήποτε υποδομής [8]. Σε Doss, μετά την ανίχνευση της παρουσίας των βασικών χρηστών, τρία κανάλια θα πρέπει να είναι ρυθμισμένα σε ένα προκαθορισμένο κοινό κανάλι ελέγχου (CCC), ένα κανάλι δεδομένων και ένα πολυσύχναστο κανάλι τόνου. Το κοινό κανάλι ελέγχου για τη διαπραγμάτευση των εισερχόμενων δεδομένων στο κανάλι μετάδοσης. Ο έλεγχος της κυκλοφορίας ανταλλάσσεται μεταξύ των χρηστών μέσω του CCC. Το κανάλι του απασχολημένου τόνου είναι μια επέκταση [9] για την επίλυση του κρυφού και εκτεθειμένου προβλήματος στο τερματικό. Μια γραμμική ένα-προς-έναν χαρτογράφηση χρησιμοποιείται μεταξύ του καναλιού δεδομένων (υψηλό ρυθμό bit) και του κατειλημμένου σήματος (χαμηλό ρυθμό μετάδοσης bit). Το Doss απαιτεί τουλάχιστον δύο πομποδέκτες: έναν

για τα δεδομένα και το κανάλι ελέγχου και ένα αφιερωμένο για κατειλημμένο σήμα. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επιμερισμού του φάσματος Doss, τα μηνύματα ανταλλάσσονται μέσω των διαπραγματεύσεων με το κοινό κανάλι ελέγχου. Ο αποστολέας στέλνει ένα πακέτο REQ πάνω από το κοινό κανάλι ελέγχου προς τον προβλεπόμενο δέκτη. Ένα REQ πακέτο περιέχει τις παραμέτρους του καναλιού (συχνότητες, εύρος ζώνης, κλπ.) του διαθέσιμου φάσματος που παρατηρήθηκαν από τον αποστολέα. Ακούγοντας τους απασχολημένους τόνους μέσω του ειδικού πομποδέκτη και αναφερόμενος στο έργο της χαρτογράφησης του φάσματος, ο αποστολέας έχει πλήρη γνώση του φάσματος που χρησιμοποιείται για τα δεδομένα που λαμβάνουν στο πλαίσιο της γειτονιάς, με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να αποφύγει παρεμβολές σε άλλους δέκτες. Ο δέκτης συγκρίνει το διαθέσιμο φάσμα των αποστολέων με το δικό του διαθέσιμο φάσμα και παίρνει μια διασταύρωση που είναι διαθέσιμες και στα δύο. Ο δέκτης απαντά στη συνέχεια με την απόδειξη (που ονομάζεται REQ ACK), η οποία περιέχει τις παραμέτρους του καναλιού από το διαπραγματεύσιμο κανάλι δεδομένων, πάνω από το κανάλι ελέγχου. Εάν υπάρχουν πολλά δυναμικά διαθέσιμα κανάλια, ο δέκτης θα επιλέξει απλώς το ένα με μεγαλύτερη συχνότητα. Ο δέκτης αναφέρεται στη χαρτογράφηση του φάσματος για να βρει και να ενεργοποιήσει το αντίστοιχο κατειλημμένο σήμα στο ειδικό πομποδέκτη, λέγοντας στους γείτονές της να μην στείλει πάνω από αυτό το κανάλι δεδομένων. Με την παραλαβή των REQ και ACK, οι αποστολείς γνωρίζουν το δυναμικό κανάλι δεδομένων από τα οποία ο δέκτης είναι σε αναμονή για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων και χτυπά ο πομπός δεδομένων του σε αυτό το κανάλι για μετάδοση δεδομένων. Η Εικόνα 3 [8] δείχνει την διαδικασία της διαπραγμάτευσης φάσματος από το Doss πρωτόκολλο.

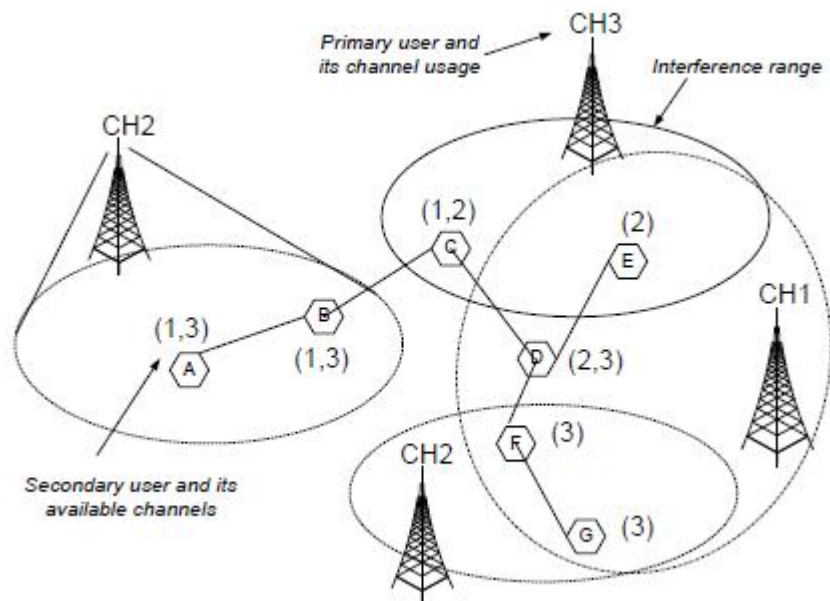


Εικόνα 3: Οι διαπραγματεύσεις για το ραδιοφάσμα στο Doss πρωτόκολλο: Ο κόμβος A είναι ο αποστολέας, και ο κόμβος B είναι ο δέκτης. Το κανάλι F6 είναι η τομή του διαθέσιμου φάσματος των A και B, και έχει επιλεγεί ως το κανάλι δεδομένων για τις εισερχόμενες μεταδόσεις δεδομένων. Το κανάλι F6 είναι το σήμα κατειλημμένου που έχει χαρτογραφηθεί από το Κανάλι F6.

2.1.1.3. Αρχιτεκτονική Distributed χωρίς κοινό κανάλι ελέγχου.

Οι προηγούμενες τεχνικές κατανομής φάσματος, χρησιμοποιούν ένα προκαθορισμένο CCC. Είναι σαφές ότι το CCC διευκολύνει πολλές λειτουργίες στη κοινή χρήση ραδιοφάσματος, όπως η χειραγία δεκτών, συσκευών αποστολής σημάτων, επικοινωνία με έναν κεντρικό φορέα ή αίσθηση της ανταλλαγής πληροφοριών. Ωστόσο, υπάρχουν εγγενή προβλήματα με το CCC: (1) δεδομένου ότι οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να παρατηρούν

την ετερογένεια φάσματος (δηλ. φάσματος είναι διαθέσιμο διαφορετικά στους διαφορετικούς χρήστες), είναι πιθανό ότι δεν υπάρχει κοινό κανάλι. Η Εικόνα 4 δείχνει ένα παράδειγμα συστήματος φάσματος όπου το CCC είναι αδύνατο (2) παρά το γεγονός ότι ορισμένες τεχνικές μείωσης του CCC σχεδιάστηκαν όπως στο Doss [8] σταθερό εύρος ζώνης κλιμάκωσης του CCC του DSA δικτύου από την άποψη της πυκνότητας συσκευής, της κυκλοφορίας, κλπ (3) το CCC είναι εύαλοτο σε επιθέσεις ασφαλείας και μπορεί να γίνει ένα μονό σημείο αποτυχίας. Μια απλή επίθεση παρεμβολών στ CCC θα διαταράξει το σύνολο του δικτύου DSA.



Εικόνα 4: Ένα παράδειγμα ανοικτού συστήματος φάσματος που δείχνει την αδυναμία του ενός CCC

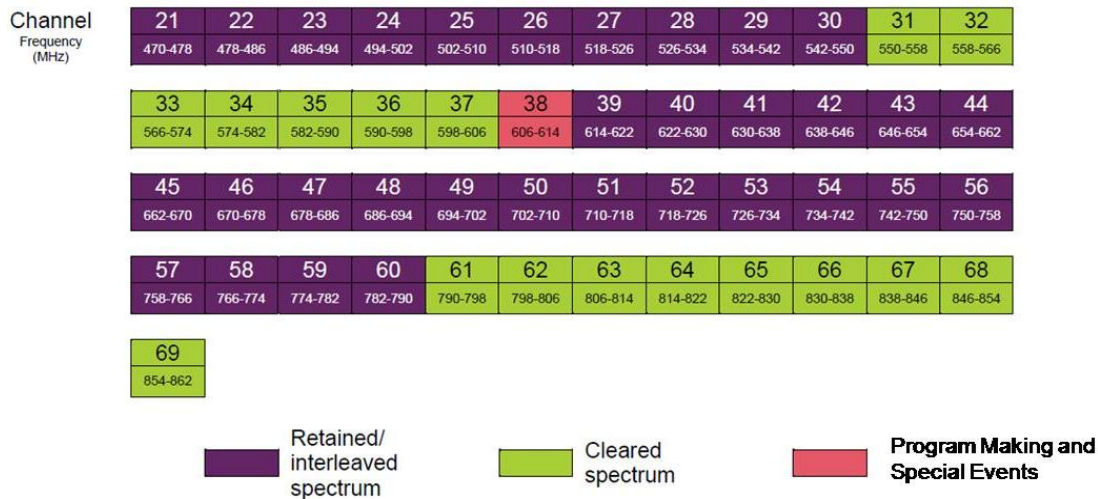
Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, έχουν διανεμηθεί τεχνικές μερισμού ραδιοφάσματος χωρίς CCC που έχουν προταθεί, όπως ετερογενή διανομή MAC (HDMAC) [10] και SWIFT [11].

2.2. Τηλεοπτικά Λευκά Φάσματα - Television White Spaces (TVWS)

Η τηλεόραση χρησιμοποιεί το φάσμα το οποίο είναι βασισμένο σε ένα πρότυπο 50 χρόνων, την εποχή όπου υπήρχαν πολύ λίγες εναλλακτικές χρήσεις αυτών των συχνοτήτων. Έχουν θεσπιστεί διάφορες σημαντικές καινοτομίες από τότε, όπως η έγχρωμη τηλεόραση και η κινητή τηλεφωνία, εντούτοις αυτό το σημαντικό κομμάτι του φάσματος χρησιμοποιείται ακόμα σύμφωνα με ένα σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του '50, με αποτέλεσμα την λανθασμένη αδειοδοτημένη χρήση του. Το φάσμα στην ζώνη μεταξύ 470-863 MHz χρησιμοποιούταν ευρέως για την ραδιοφωνική μετάδοση της τηλεόρασης λόγω της ευρύτερης και καλύτερης κάλυψης.

Τα TV White Spaces είναι επίσης γνωστά ως interleaved spectrum, διότι δεν γίνεται χρήση του φάσματος σε κάποια συγκεκριμένη χωροταξική τοποθεσία, εφόσον χρησιμοποιείται για την επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, έτσι υπάρχει ένα διαθέσιμο εύρος φάσματος για άλλες υπηρεσίες με μία κοινή, ή interleaved, βάση. Σε σύγκριση με άλλες μπάντες συχνοτήτων, η περιοχή του φάσματος που περιέχει τα TV White Spaces, έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες για αξιόπιστες επικοινωνίες δεδομένων [12].

Σκοπός της ύπαρξης αυτών των κενών σε μία interleaved βάση είναι η αποφυγή διακαναλικών παρεμβολών για την σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου. Τα κενά αυτά είναι κομμάτια φάσματος, τεμαχισμένα εξ ορισμού και στρατηγικά σκορπισμένα μέσα στην ζώνη συχνοτήτων.



Εικόνα 5: Κατανομή φάσματος στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα σημερινά ασύρματα συστήματα, ή αλλιώς χρήστες, ακολουθούν μια σταθερή πολιτική εκχώρησης φάσματος που οδηγεί τελικά σε αναποτελεσματική χρήση αυτού. Η έλλειψη φάσματος είναι ένα ζήτημα που απασχολεί τους φορείς εκμετάλλευσης για τις αναδυόμενες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και του μεγάλου αριθμού των χρηστών με ακόμη υψηλότερες απαιτήσεις χωρητικότητας. Αυτή η αναποτελεσματικότητα και η ανεπάρκεια στη χρήση του ράδιο-φάσματος απαιτεί ένα νέο πρότυπο για τις επικοινωνίες, όπως η χρήση διαθέσιμου φάσματος καιροσκοπικά. Τα Cognitive Radio είναι μια τεχνολογία ευρείας διάδοσης που έχει δυνατότητες να αυξήσει τη χρησιμοποίηση του ράδιο-φάσματος και να παρέχει επιθυμητή προστασία έναντι των παρεμβολών σε αδειοδοτημένα συστήματα με έναν ευκαιριακό τρόπο. Τα μη αδειοδοτημένα συστήματα πρέπει να εξυπηρετηθούν εξίσου, υπό όρους. [13]

Τα CRN είναι ευρέως αποδεκτά ως μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση για την επίλυση των προβλημάτων του φάσματος, καθώς έχουν προταθεί πολλά MAC (Medium Access Control) πρωτόκολλα για τα secondary συστήματα έτσι ώστε να επωφελούνται από τα αχρησιμοποίητα κανάλια που δεν καταλαμβάνονται από τους primary χρήστες, όσον αφορά στα δίκτυα βασισμένα σε TDMA (time division multiple access). Καθώς αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, στα Cognitive Radio Networks τα συστήματα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, οι οποίες είναι τα αδειοδοτημένα συστήματα και τα μη-αδειοδοτημένα συστήματα. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες έχει διαφορετικές υποχρεώσεις και διαφορετικά δικαιώματα.

Σε πρόσφατη πρότασή της η FCC συζητά τρεις πιθανές τεχνικές έτσι ώστε οι unlicensed χρήστες/συστήματα να μπορούν να διαπιστώσουν αν μέρος των White Spaces είναι ελεύθερα προς χρήση για μια δεδομένη θέση. [14]

1. **Passive sensing (“listen-before-talk”):** Τεχνική για να μπορέσει να ανιχνεύσει τυχόν παρουσία τηλεοπτικού σήματος. Ουσιαστικά, ανιχνεύει το κανάλι μετάδοσης και εφόσον δεν μεταδίδεται καμία πληροφορία, το καταλαμβάνει προς χρήση.
2. **Geolocation:** Με την χρήση GPS ή κάποιας άλλης τεχνολογίας εντοπισμού, καθώς επίσης και με έναν έλεγχο στις βάσεις δεδομένων για τον καθορισμό των συχνοτήτων εν χρήση.

3. **Use of separate beacon:** Με την βοήθεια ενός ξεχωριστού πομπού, ο οποίος θα επισημαίνει τι φάσμα είναι διαθέσιμο σε μια τοπική περιοχή.

2.3 Ορισμός και ιδιότητες των Ad hoc Δικτύων

Ένα **ad-hoc ασύρματο** τηλεπικοινωνιακό **δίκτυο** αποτελείται από δύο ή περισσότερους κινητούς κόμβους, υπολογιστικές συσκευές (φορητούς υπολογιστές, υπολογιστές χειρός, κινητά τηλέφωνα κ.τ.λ.), οι οποίοι έχουν δυνατότητα για ασύρματη μετάδοση και λήψη δεδομένων. Οι συσκευές μέσα σε ένα τέτοιο δίκτυο έχουν την δυνατότητα επικοινωνίας με οποιαδήποτε άλλη συσκευή, η οποία βρίσκεται στην εμβέλεια τους ή στην εμβέλεια μιας γειτονικής τους συσκευής. Στην πρώτη περίπτωση η επικοινωνία γίνεται απευθείας μεταξύ των δύο κόμβων, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η επικοινωνία γίνεται με τη χρήση ενός ή περισσότερων ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι αναλαμβάνουν την μεταγωγή των δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη.

Ένα ad-hoc ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο έχει την δυνατότητα να δημιουργείται δυναμικά και αυτόνομα χωρίς να χρειάζεται την παρουσία άλλων ενεργών και μη ενεργών δικτυακών συσκευών. Αυτό σημαίνει ότι έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την τοπολογία του καθώς νέοι κόμβοι μπαίνουν σ' αυτό ή αποχωρούν κάποιοι άλλοι. Οι ίδιοι οι κόμβοι αναλαμβάνουν την διαχείριση των πόρων και την επιτέλεση των λειτουργιών του. Ο όρος ad-hoc σημαίνει ότι το δίκτυο μπορεί να πάρει πολλές μορφές, να αποτελείται από κόμβους που κινούνται στο χώρο, να λειτουργεί αυτόνομα και να είναι διασυνδεδεμένο με κάποιο άλλο δίκτυο. Οι συσκευές που μετέχουν σε ένα τέτοιο δίκτυο, πρέπει να μπορούν να αντιλαμβάνονται την παρουσία άλλων συσκευών που θα μπορούσαν να συμμετέχουν στο ίδιο δίκτυο, καθώς και να μπορούν να ενεργοποιήσουν τις κατάλληλες διαδικασίες και πρωτόκολλα διασύνδεσης, ούτως ώστε να είναι αυτό εφικτό, με απώτερο σκοπό την επικοινωνία, την ανταλλαγή δεδομένων και την χρήση των υπηρεσιών του δικτύου.

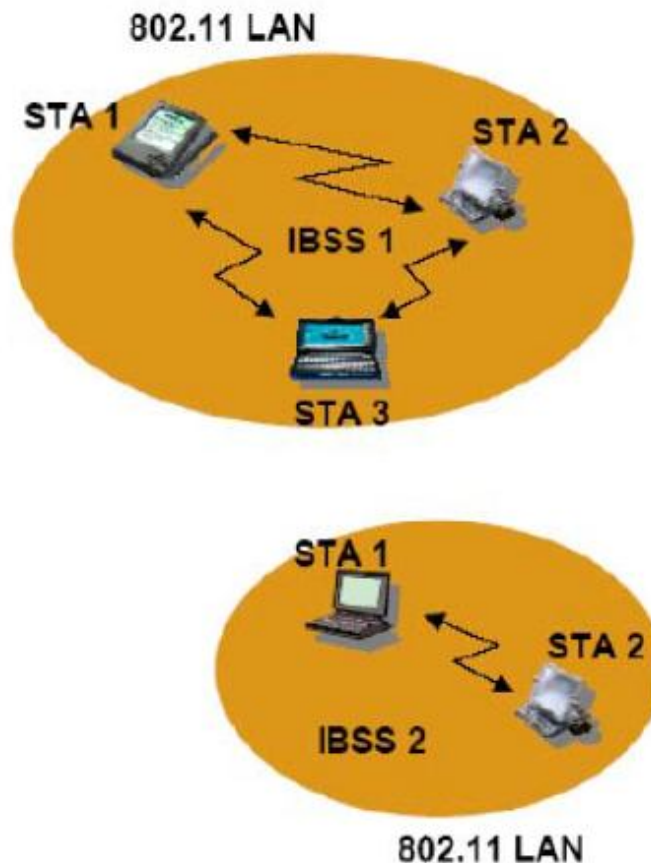
Τα ad hoc δίκτυα επιτρέπουν την εύκολη ανάπτυξη και λειτουργία τους σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση εξειδικευμένων εφαρμογών και η εκτέλεση διαχειριστικών λειτουργιών ή άλλων ενεργειών από τους χρήστες. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται η χρήση σταθερών δικτυακών υποδομών για τη λειτουργία του δικτύου ενώ η τοπολογία του δικτύου μπορεί να είναι δυναμική.

2.3.1 Λειτουργία των Ad hoc Δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc αποτελούνται από κινητούς κόμβους οι οποίοι πρέπει να επιτελέσουν επιπλέον έργο για να μπορέσει το δίκτυο να λειτουργήσει. Στην περίπτωση που μας αφορά, οι κόμβοι των δικτύων αυτών πρέπει να φροντίσουν να εκτελούνται οι βασικές λειτουργίες ενός δικτύου για τη μεταγωγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων του, εργασία που στα κλασσικά δίκτυα την επιτελούν οι δρομολογητές και τα άλλα ενεργά μη τερματικά στοιχεία του δικτύου. Η καταγραφή των βέλτιστων διαδρομών, μέσω των ενεργών συνδέσεων ενός δικτύου για την μεταφορά δεδομένων, είναι από τις βασικότερες λειτουργίες που πρέπει να έχει ένα δίκτυο υπολογιστών, αφού πολύ απλά χωρίς αυτή δεν είναι δυνατό να υπάρξει.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη πρωτοκόλλων διαθέσιμα σήμερα για την δρομολόγηση δεδομένων σε ένα δίκτυο υπολογιστών, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν αρκετά ικανοποιητικά. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι σχεδιασμένα να μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ad-hoc δίκτυο, το οποίο δεν έχει την υποδομή που έχουν τα κλασσικά δίκτυα. Πολλά από τα πρωτόκολλα που έχουμε διαθέσιμα, στα κλασσικά ενσύρματα δίκτυα, δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε δίκτυα χωρίς υποδομή. Για να είναι δυνατή η λειτουργία τους, είναι απαραίτητες κάποιες αλλαγές για να μπορέσουν να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά των ad-hoc δικτύων. Από παρατηρήσεις, πειράματα και προσομοιώσεις που έχουν γίνει, τα

πρωτόκολλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να έχουν την ίδια απόδοση με αυτή που έχουν όταν εφαρμόζονται στα κλασικά δίκτυα. Το γεγονός αυτό μας κάνει να πιστεύουμε ότι για να αντιμετωπίσουμε αποτελεσματικά το πρόβλημα της δρομολόγησης χρειαζόμαστε νέα πρωτόκολλα, τα οποία θα δημιουργηθούν για να λειτουργούν αποκλειστικά σε συνθήκες όπως αυτές που υπάρχουν στα ad-hoc δίκτυα.



Εικόνα 6. Ασύρματο Ad hoc δίκτυο

2.3.2 Χαρακτηριστικά των Ad hoc Δικτύων

Ένα ad hoc δίκτυο συνήθως αποτελείται από μικρό αριθμό κόμβων κάθε φορά, γεγονός όχι απόλυτο, οι οποίοι μπορεί να εισέρχονται και να εξέρχονται από το δίκτυο με εντελώς τυχαία συχνότητα. Το δίκτυο είναι ετερογενές, δεν αποτελείται δηλαδή από έναν τύπο συσκευών. Μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο PDA, κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών κτλ. τα οποία πρέπει να έχουν δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους. Η κατανομή των κόμβων αυτών στο χώρο καθορίζει και την τοπολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Αν για παράδειγμα όλες οι συσκευές βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη, είναι εφικτή μία σύνδεση απλού hop από κόμβο σε κόμβο. Αντίθετα αν το δίκτυο εκτείνεται σε μεγάλη γεωγραφική έκταση, απαιτείται multi-hop διασύνδεση μεταξύ των κόμβων. Η σημασία των ad hoc δικτύων είναι πολύ μεγάλη, κυρίως χάρη στην ευκολία και ταχύτητα με την οποία μπορούν να εγκατασταθούν, αφού δεν απαιτούν την ύπαρξη σταθερής υποδομής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της δυναμικής τους φύσης είναι η εύκολη προσθήκη και απομάκρυνση νέων κόμβων, καθώς και το γεγονός ότι κάθε κόμβος εξαρτάται μόνο από τους γειτονικούς του, με αποτέλεσμα την αυξημένη αξιοπιστία των δικτύων αυτών.

Τα ad hoc δίκτυα παρουσιάζουν σημαντική ανομοιογένεια, αφού κάθε κόμβος μπορεί να διαφέρει από τους υπόλοιπους σε πολλά χαρακτηριστικά, όπως την υπολογιστική ισχύ, την ακτίνα εκπομπής ή τη διάρκεια ζωής των μπαταριών (αν π.χ. είναι ένας φορητός υπολογιστής ή ένα PDA). Επιπλέον, τα διάφορα ad hoc δίκτυα μπορεί να διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους, όπως τους χρησιμοποιούμενους ρυθμούς επικοινωνίας, στο αν παρέχουν δυνατότητες broadcast ή multicast, στο αν συνυπάρχουν ή όχι με άλλα δίκτυα τα οποία έχουν κάποια σταθερή υποδομή ή τέλος, αν υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών και με τι ρυθμούς.

Σημαντικό ρόλο σε κάθε ad hoc δίκτυο παίζει η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων, τόσο μικρότερος θα είναι ο μέσος αριθμός μεταδόσεων που θα απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου από ένα κόμβο σε κάποιον άλλο. Από την άλλη μεριά, η μικρή ακτίνα εκπομπής των κόμβων μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων, καθώς και τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα εκπομπής, τόσο περισσότερες μεταδόσεις θα μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπρόσθετα, η ακτίνα μετάδοσης παίζει καθοριστικό ρόλο και στην κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου, η οποία είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στα περισσότερα ad hoc δίκτυα και συχνά η σημαντικότερη στα MANET. Έτσι, η ακτίνα μετάδοσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, φροντίζοντας όμως ταυτόχρονα να μην είναι τόσο μικρή που το δίκτυο να παύει να είναι συνεκτικό. Μια καλή επιλογή είναι, συνήθως, να επιλέγεται ακτίνα μετάδοσης, έτσι ώστε κάθε μετάδοση να “ακούγεται” από περίπου 6 κόμβους.

Οι Micah Adler και Christian Scheideler, προτείνουν ένα μοντέλο τριών επιπέδων για την περιγραφή ενός δικτύου ad-hoc. Αρχικά, έχουμε το επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου (Medium Access Control layer), το οποίο είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία από σημείο-σε-σημείο (node-to-node) στο φυσικό μέσο. Ακολούθως έχουμε το επίπεδο επιλογής διαδρομής, (route selection layer), το οποίο είναι υπεύθυνο για την εύρεση κατάλληλων διαδρομών για τα πακέτα. Τέλος, έχουμε το επίπεδο χρονοπρογραμματισμού (scheduling layer), που είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό της σειράς αποστολής των πακέτων.

2.3.3 Ποιότητα υπηρεσιών στα ad hoc δίκτυα

Η ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρει ένα δίκτυο, γίνεται αντιληπτή διαφορετικά από τον κάθε χρήστη. Αυτό είναι άμεσο αποτέλεσμα κυρίως των απαιτήσεων που έχει ο καθένας από τα εργαλεία-εφαρμογές που χρησιμοποιεί. Έτσι, ανάμεσα σε κάποιους χρήστες ενός δικτύου, ο πρώτος μπορεί να έχει απαίτηση για μεγάλο εύρος ζώνης από το δίκτυο-εφαρμογή του, ένας δεύτερος μπορεί ν' αποζητά πολύ μικρό χρονικό διάστημα από την αποστολή ενός μηνύματος μέχρι τη λήψη του, ενώ ένας τρίτος μπορεί να θέλει επιβεβαίωση ότι κάθε μήνυμα που στέλνει θα φτάσει στον προορισμό του.

Αυτές οι απαιτήσεις είναι πολύ γενικές για να αναλυθούν περαιτέρω. Έχουν ωστόσο κοινό παρονομαστή, την ποιότητα υπηρεσιών.

Είναι γνωστό ότι η ποιότητα υπηρεσιών που μπορεί να προσφέρει ένα δίκτυο σε μία διεργασία εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του δικτύου. Έτσι μπορούν να τεθούν κάποιες πρώτες αρχές:

1. Στις παραμέτρους του δικτύου:

- α) οι διαθέσιμοι πόροι
- β) η σταθερότητα των πόρων

2. Το πρωτόκολλο πρέπει να είναι πλήρως προσαρμοζόμενο στις γεωγραφικές αλλαγές του δικτύου, στη μεταβολή των διαθέσιμων πόρων αλλά και στη μικρή χωρητικότητα του δικτύου.

Οπότε είμαστε αναγκασμένοι, για ν' απλοποιήσουμε το πρόβλημα, να ορίσουμε κάποιες μετρικές ώστε να μπορούμε να έχουμε κάποια μέτρηση της ποιότητας υπηρεσιών που προσφέρεται. Αυτές μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- ALMs - Application Layer Metrics
- NLMs - Network Layer Metrics
- MLMs - MAC Layer Metrics

Οι MLM και NLM δίνουν μία εκτίμηση της ποιότητας των συνδέσεων, αλλά και τις ικανότητες τους να παράγουν διαδρομές με καλή ποιότητα και σε μικρό χρόνο. Η μετρική ALM διαλέγει το μονοπάτι που είναι πιθανότερο να συναντά τις απαιτήσεις της διεργασίας. Τέλος, θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα οι προαναφερόμενες μετρικές να μπορούν να προσαρμοστούν, αν αυτό χρειασθεί, σε δυναμικές ανάγκες και αλλαγές του δικτύου.

Μερικές από τις παραμέτρους που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τις μετρικές είναι οι εξής:

1. Για το application layer
 - α) η συνολική καθυστέρηση που επηρεάζει κυρίως real time εφαρμογές.
 - β) η ικανότητα μεταφοράς δεδομένων για εφαρμογές multimedia.
2. Για το network layer
 - α) η κατανάλωση ισχύος.
 - β) το μέγεθος του buffer.
 - γ) η σταθερότητα του ρυθμού μετάδοσης / λήψης δεδομένων.
 - δ) η δυνατότητα διόρθωσης λαθών με κώδικα μεταβλητού μήκους.
3. Για το επίπεδο MAC
 - α) το SNR.

Ακόμα θα πρέπει να αναφερθεί η δυνατότητα που υπάρχει για την παροχή δυναμικά μεταβαλλόμενης ποιότητας υπηρεσιών (dynamic QoS). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλου υλικού, που πλέον είναι διαθέσιμο.

2.3.4 Προβλήματα, Προκλήσεις

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα ad hoc δίκτυα είναι η δρομολόγηση. Ο λόγος είναι ότι οι περισσότεροι από τους γνωστούς αλγόριθμους δρομολόγησης έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν κάτω από συνθήκες οι οποίες είναι πολύ πιο ευνοϊκές από αυτές που ισχύουν σε ασύρματα δίκτυα. Μία από τις βασικότερες ιδιαιτερότητες που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων είναι η κινητικότητα των χρηστών, η οποία αλλάζει πολύ συχνά την τοπολογία του δικτύου, με αποτέλεσμα να απαιτείται η κατασκευή νέων διαδρομών. Επιπρόσθετα, εξαιτίας του περιορισμένου διαθέσιμου εύρους ζώνης στα ασύρματα δίκτυα, απαιτείται ο αριθμός των σχετικών με την δρομολόγηση μηνυμάτων να είναι περιορισμένος. Επίσης, στα ασύρματα δίκτυα το ποσοστό των πακέτων που χάνονται είναι αρκετά υψηλό, τόσο λόγω της αυξημένης πιθανότητας λαθών μετάδοσης, όσο και της αυξημένης πιθανότητας καταστροφής συνδέσμων (π.χ. εξαιτίας της μετακίνησης ενός κόμβου).

Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την διαφοροποίηση σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα των ιδιοτήτων που επιθυμούμε να έχουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης στα ad hoc δίκτυα. Έτσι, τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα θα πρέπει να είναι καταναμημένα, με κάθε κόμβο να είναι αρκετά "έξυπνος" ώστε να μπορεί να παίρνει αποφάσεις δρομολόγησης. Αυτό είναι απαραίτητο, αφού ένα κεντρικοποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν θα ήταν αξιόπιστο σε περίπτωση κίνησης των κόμβων. Επιπρόσθετα, το πρωτόκολλο θα πρέπει να δημιουργεί γρήγορα δρομολογήσεις, για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν αλλάξει η τοπολογία του δικτύου, διατηρώντας παράλληλα το επιπλέον φορτίο στο δίκτυο, για τους σκοπούς της δρομολόγησης, χαμηλό. Εκτός όλων αυτών, το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι

επιθυμητό να μπορεί να παίρνει αποφάσεις δρομολόγησης βασιζόμενες και στην ενεργειακή κατάσταση κάθε κόμβου, καθώς και στην πιθανή επίδραση αυτών των αποφάσεων σε αυτήν. Τέλος, κάθε σύνδεσμος μεταξύ κόμβων θα πρέπει να θεωρείται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης ως μίας κατεύθυνσης, αφού η επικοινωνία προς την μία κατεύθυνση μπορεί να περιορίζεται από φυσικούς παράγοντες ή και τη μορφολογία του χώρου, την ακτίνα εκπομπής κάθε κόμβου και άλλα.

Απ' όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η ύπαρξη πληθώρας διαθέσιμων πρωτοκόλλων δρομολόγησης θα πρέπει να είναι αναμενόμενη. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάλληλο για την πλειοψηφία των ad hoc δικτύων, αλλά σε κάθε ad hoc δίκτυο το πρωτόκολλο δρομολόγησης επιλέγεται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

Οι τρέχουσες προκλήσεις που τα ad hoc ασύρματα δίκτυα καλούνται ν' απαντήσουν είναι :

- 1) Multicast
- 2) QOS υποστήριξη
- 3) Power aware routing
- 4) Location aid routing

Όπως προαναφέρθηκε, το multicast είναι επιθυμητό ώστε να υποστηρίξει ασύρματες επικοινωνίες πολλαπλών χρηστών. Δεδομένου ότι η ιεραρχία multicast δεν είναι πλέον στατική (η τοπολογία του μεταβάλλεται στο χρόνο), το πρωτόκολλο δρομολόγησης multicast θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει με την κινητικότητα αυτή, συμπεριλαμβανομένου της δυναμικής multicast membership. Σε όρους QOS, είναι ανεπαρκές να θεωρηθεί το QOS μονάχα στο επίπεδο του δικτύου χωρίς να λάβει υπόψη του το υποκείμενο media access control layer. Λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα που συσχετίζονται με τη δυναμική των κόμβων, τα κρυμμένα τερματικά και τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά των επικοινωνιακών δεσμών, η υποστήριξη end to end QOS είναι θέμα που απαιτεί περισσότερη διερεύνηση. Προς το παρόν, υπάρχει η τάση για μια προσέγγιση ενός προσαρμόσιμου QOS από μια απλή μέθοδο συγκράτησης πόρων με QOS guarantees. Άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η περιορισμένη δυνατότητα παροχής ισχύος των φορητών συσκευών που μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στην μετάδοση των πακέτων σε ένα κινητό περιβάλλον ad hoc. Επιπλέον η δρομολόγηση του επικοινωνιακού φόρτου βασιζόμενη στις δυνατότητες ισχύος των κόμβων, είναι ένας τρόπος για το διαχωρισμό των δρομολογητών που έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από κάποιους άλλους. Τέλος αντί της χρήσης αναζήτησης μέσα από beaconing ή broadcast, η δρομολόγηση location-aided χρησιμοποιεί πληροφορίες αναφορικά με την τοποθεσία για να προκαθορίσει σχετιζόμενες περιοχές, ώστε η δρομολόγηση να είναι περιορισμένης έκτασης.

Οι υφιστάμενες ad hoc προσεγγίσεις δρομολόγησης έχουν εμφανίσει αρκετά νέα θέματα προς διερεύνηση, όπως είναι η διερεύνηση της ζήτησης του χρήστη και των παραμέτρων που έχουν να κάνουν με τη χρήση της τοποθεσίας, της ισχύος κλπ. Η δυνατότητα προσαρμογής και αυτορύθμισης είναι χαρακτηριστικά κλειδιά αυτών των προσεγγίσεων. Ωστόσο, η ευελιξία αποτελεί ακόμη ένα σημαντικό θέμα. Ένα ευέλικτο ad-hoc πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να συμπεριλάβει προσεγγίσεις table-driven και on-demand που βασίζονται σε δεδομένες καταστάσεις και επικοινωνιακές απαιτήσεις. Η συνύπαρξη των δύο προσεγγίσεων μπορεί να υφίσταται σε ομάδες που είναι spatially clustered, με intra cluster απασχόληση της table driven προσέγγισης και inter-cluster απασχόληση της demand driven απασχόλησης ή ανάποδα. Περισσότερη διερεύνηση απαιτείται για τις δυνατότητες και τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας των υβριδικών ad hoc προσεγγίσεων δρομολόγησης.

2.4 Mobile ad hoc networks (MANET)

Ένα κινητό ειδικό δίκτυο (Mobile Ad hoc Network), είναι ένα δίκτυο αυτόνομο και χωρίς σταθερή υποδομή. Μπορεί να αναπτυχθεί απλά και ευέλικτα σχεδόν σε κάθε

περιβάλλον, αλλά έχει περιορισμένη ασύρματη κάλυψη και η συνδεσιμότητά του περιορίζεται στα όρια του ίδιου του δικτύου. Η ταχεία ανάπτυξη του διαδικτύου καθώς και των υπηρεσιών και εφαρμογών του και η πορεία των ασύρματων δικτύων τέταρτης γενιάς προς την κατεύθυνση των δικτύων αποκλειστικής χρήσης (All-IP networks), έχουν οδηγήσει σε μια αυξανόμενη απαίτηση για τη δυνατότητα των κόμβων MANET να συνδέονται με το διαδίκτυο και να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές του. Οι κινητές IP διευθύνσεις και τα πρωτόκολλα κινητών IP επιτρέπουν σε έναν κινητό κόμβο να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο και ν' αλλάζει το σημείο πρόσβασής του χωρίς να χάνει τη σύνδεση. Ο κινητός κόμβος πρέπει να βρίσκεται μέσα στην ακτίνα κάλυψης του σημείου πρόσβασης και να έχει άμεση σύνδεση με αυτό. Έτσι, με τη συνεργασία μεταξύ των πρωτοκόλλων δρομολόγησης του MANET και του πρωτοκόλλου κινητών IP, η συνδεσιμότητα του διαδικτύου με τους κόμβους του δικτύου MANET μπορεί να επιτευχθεί. Πολλές λύσεις έχουν προταθεί για να καταστήσουν τα MANETs ικανά να συνδεθούν με το Διαδίκτυο χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα κινητών IP.

2.4.1 Χαρακτηριστικά των MANETS

Ένα MANET απαρτίζεται από κόμβους (για παράδειγμα ένα δρομολογητή με πολλαπλούς εξυπηρετητές και ασύρματες συσκευές), οι οποίοι κινούνται αυθαίρετα. Οι κόμβοι μπορεί να βρίσκονται πάνω σε αεροπλάνα, πλοία, φορτηγά, ίσως ακόμη και πάνω σε ανθρώπους ή πολύ μικρές συσκευές και μπορεί να υφίστανται πολλαπλοί εξυπηρετητές ανά δρομολογητή. Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί απομονωμένα ή διαμέσου πυλών (gateways) και να αλληλεπιδρά με ένα συμβατικό δίκτυο.

Τα MANETs έχουν ορισμένα αξιοπρόσεκτα χαρακτηριστικά όπως:

2.4.1.1 Δυναμικές τοπολογίες

Οι κόμβοι δύναται να μετακινούνται αυθαίρετα. Επομένως η τοπολογία του δικτύου, η οποία είναι τυπικά multihop, μπορεί να μεταβληθεί τυχαία και με ταχείς ρυθμούς σε απρόβλεπτους χρόνους και μπορεί να απαρτίζεται ταυτόχρονα από δεσμούς διπλής κατεύθυνσης και ασύμμετρους δεσμούς.

2.4.1.2 Συνδέσμους με χαμηλό εύρος ζώνης και μεταβαλλόμενη χωρητικότητα

Οι ασύρματοι σύνδεσμοι θα συνεχίσουν να διατηρούν σημαντικά χαμηλότερη χωρητικότητα από τους αντίστοιχους των συμβατικών δικτύων. Μια επίδραση των σχετικά χαμηλών χωρητικοτήτων των συνδέσμων, είναι ότι η συμφόρηση αποτελεί περισσότερο τον κανόνα παρά την εξαίρεση, δηλαδή η χωρητικότητα του δικτύου δεν πρόκειται να αγγίξει ή να ξεπεράσει τις συσσωρευμένες απαιτήσεις εφαρμογών. Δεδομένου ότι το κινητό δίκτυο αποτελεί συχνά προέκταση ενός σταθερού συμβατικού δικτύου, οι χρήστες των κινητών δικτύων θα έχουν παρόμοιες απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές θα συνεχίσουν να αυξάνονται καθώς οι αλληλεπιδραστικές εφαρμογές και οι εφαρμογές multimedia θα συνεχίσουν να πληθαίνουν.

2.4.1.3 Περιορισμούς σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας

Μερικοί ή όλοι οι κόμβοι σε ένα MANET μπορεί να στηρίζονται σε μπαταρίες για την παροχή ισχύος. Για τους κόμβους αυτούς, το θέμα της διαχείρισης ενέργειας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα θέματα βελτιστοποίησης κατά το σχεδιασμό του όλου συστήματος.

2.4.1.4 Περιορισμένη ασφάλεια

Τα κινητά ασύρματα δίκτυα είναι πιο ευάλωτα σε φυσικές απειλές απ' ό,τι τα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε θέματα υποκλοπών. Οι υφιστάμενες μέθοδοι ασφάλειας συνδέσμων εφαρμόζονται συχνά στα ασύρματα δίκτυα ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απειλές ασφάλειας. Ως πλεονέκτημα μπορεί να αναφερθεί, ότι η αποκεντρωτική φύση της διαχείρισης ενός MANET δικτύου, παρέχει μεγαλύτερη στιβαρότητα σε σχέση με περισσότερο συγκεντρωτικές μεθόδους διαχείρισης. Επιπλέον, ορισμένα δίκτυα (π.χ. κινητά στρατιωτικά δίκτυα ή δίκτυα ταχείας κυκλοφορίας) μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλα (δεκάδες ή εκατοντάδες κόμβοι ανά περιοχή δρομολόγησης). Η ανάγκη για εύκολη κλιμάκωση (scalability), αποτελεί κάτι το δεδομένο. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά, οι μηχανισμοί ώστε να επιτευχθεί η εύκολη κλιμάκωση θεωρούνται επίσης δεδομένοι. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δημιουργούν ένα σύνολο από υποθέσεις και θέματα αποδοτικότητας που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων που είναι πέρα από αυτά των συμβατικών δικτύων.

2.5 Ασύρματα δίκτυα πλέγματος (Mesh Networks)

Η εξέλιξη και η σημερινή μορφή των ασύρματων δικτύων μονοπωλείται σε μεγάλο βαθμό από τα μεγάλα εμπορικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (2ης και 3ης γενεάς). Πέρα από την αρχιτεκτονική τους, τα δίκτυα αυτά ελέγχονται από εταιρείες-οικονομικούς κολοσσούς που έχουν πραγματοποιήσει τεράστιες επενδύσεις σε υποδομές και αγορά φάσματος. Είναι προφανές ότι στο πεδίο των δραστηριοτήτων τους δεν υπάρχει χώρος για μικρές ή μικρομεσαίες εταιρείες. Όμως, αυτή η κυρίαρχη θέση που κατέχουν στον τομέα των κινητών επικοινωνιών δεν τους συνοδεύει στον τομέα των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων, γνωστών και ως WiFi ή δικτύων τεχνολογίας 802.11. Έχοντας πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα έχουν πολλά οικονομικά πλεονεκτήματα όπως π.χ. οικονομικό δικτυακό εξοπλισμό ασύρματης πρόσβασης, λειτουργία σε ελεύθερο από τέλη φάσμα και φυσικά σχεδιαστική ευελιξία και εύκολη επεκτασιμότητα.

Είναι προφανές ότι ένα τεχνολογικά εξελιγμένο δίκτυο κορμού, για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση που θα συνέδεε ασύρματα σημεία πρόσβασης τελικών χρηστών, θα μπορούσε να δώσει νέα ώθηση όχι μόνο στην τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών, αλλά και στην οικονομική τους δραστηριότητα, καθώς θα επέτρεπε σε μικρές και μικρομεσαίες επιχειρήσεις, ακόμη και σε ιδιώτες να συνενωθούν δημιουργώντας ένα ιδιότυπο ευρύτερο ασύρματο δίκτυο από πολλαπλούς παρόχους και χρήστες που μπορούν να κάνουν περιαγωγή μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού παροχών (μικρών ή μεγάλων). Βεβαίως, στο εναλλακτικό αυτό μοντέλο θα είχαν θέση και μάλιστα σημαντική και οι υπάρχοντες πάροχοι ενσύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών και διαδικτύου (ISPs), οι οποίοι θα είχαν τη δυνατότητα να διευρύνουν τις υπηρεσίες και το πελατολόγιό τους παρέχοντας, πέρα από τις συνήθειες, και υπηρεσίες καθολικής ευρυζωνικής πρόσβασης σε κινητούς χρήστες. Η πλέον υποσχόμενη τεχνολογία προς την κατεύθυνση αυτή είναι τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος (wireless mesh networks).

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος αποτελούνται από ομότιμους κόμβους πλέγματος (Mesh Nodes) που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ασύρματων ζεύξεων τεχνολογίας WiFi. Οι κόμβοι πλέγματος διαθέτουν πολλαπλές ασύρματες διεπαφές που επιτρέπουν τη διασύνδεση ενός κόμβου με πολλούς άλλους. Κάποιοι από τους κόμβους διαθέτουν ασύρματες διεπαφές για διασύνδεση τερματικών συσκευών (όπως φορητούς υπολογιστές ή υπολογιστές χειρός - PDAs), ενώ κάποιοι άλλοι διαθέτουν συνδέσεις με το διαδίκτυο. Θα μπορούσε κάποιος απλοϊκά να φανταστεί ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος σαν το διαδίκτυο, ένα πολύπλοκο δίκτυο πολλαπλών μονοπατιών και πολλαπλών συνδέσεων, μόνο που στην περίπτωση μας οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων είναι ασύρματες.

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος μπορούν να υλοποιηθούν τόσο σε συγκεντρωτική όσο και σε αποκεντρωτική μορφή. Οι πιο γνωστές προσεγγίσεις είναι αυτές των ασύρματων δικτύων πλέγματος υποδομής (Infrastructure wireless mesh networks), πελατών (Client wireless mesh networks) αλλά και τα υβριδικά (Hybrid wireless mesh networks). Η ερευνητική δραστηριότητα των δικτύων πλέγματος βρίσκεται σε εξέλιξη και έχουν ήδη προταθεί πολλά διαφορετικά πρωτόκολλα για την λειτουργία τους.

2.5.1 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- **Αυτοθεραπεύόμενο:** Με την άμεση επαναδιαμόρφωση των πινάκων των διαδρομών με επανυπολογισμό των διαδρομών ώστε να διατηρήσουν τη ροή της κίνησης
- **Αυτοδιαμορφώσιμο:** Η προσθήκη νέων κόμβων ή η επανατοποθέτηση υπαρχόντων κόμβων είναι πολύ απλή
- **Υψηλά προσαρμοζόμενο:** Με κόμβους επαναλήπτες καλύπτουμε τα κενά που υπάρχουν στο δίκτυο
- **Αξιοπιστία και πλεονασμός:** Κάθε κόμβος είναι ενωμένος με τους υπόλοιπους κόμβους και έτσι υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές που μπορεί ν' ακολουθήσει ένα μήνυμα για να φθάσει στο προορισμό του
- **Κλιμακούμενο:** Μπορεί ν' αντέξει εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους επειδή δεν είναι κεντρικοποιημένο, γεγονός το οποίο δίνει σταθερότητα
- Με την προσθήκη νέων κόμβων γίνεται ισχυρό το σήμα στο δέκτη και έτσι μπορούμε να λύσουμε πολύ απλά το πρόβλημα ενός αδύνατου σήματος ή μιας νεκρής ζώνης

Επίσης έχει και τα παρακάτω μειονεκτήματα:

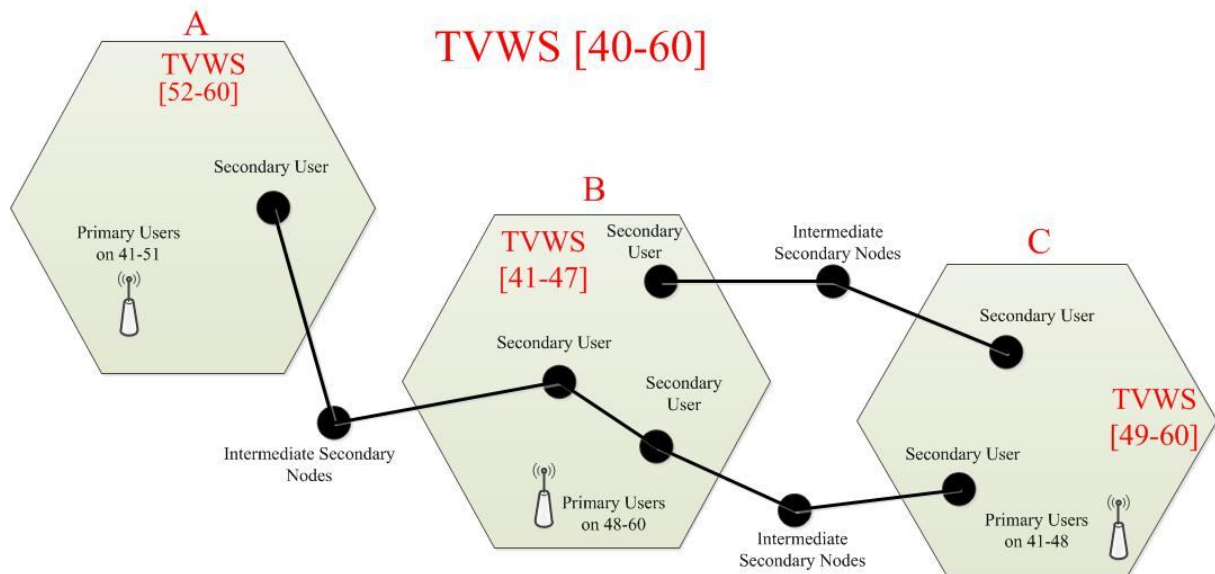
- Η τοπολογία είναι πολύ ακριβή επειδή χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός συρμάτων και συνδέσεων
- Όταν η σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων δεν είναι ισχυρή γι' αποστολή μεγάλων μηνυμάτων, αλλά στέλνονται μικρά μηνύματα και οι δύο κόμβοι πιστεύουν πως η σύνδεση είναι χρησιμοποιήσιμη
- Κάποια προϊόντα δικτύων mesh χρειάζονται ένα κεντρικό εξυπηρετητή στο να παίρνει σημαντικές αποφάσεις για την τοπολογία του δικτύου και των διαδρομών που ακολουθούνται στο δίκτυο. Τα κινητά δίκτυα πλέγματος απαιτούν προϊόντα τα οποία είναι ικανά να λειτουργούν αυτόνομα χωρίς κεντρικό εξυπηρετητή
- Δεν μπορούμε να έχουμε πολλαπλές ταυτόχρονες επικοινωνίες
- Το μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης μειώνεται με ένα ρυθμό $(1/2)^n$, όπου n είναι ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων που χρειάζεται να περάσει ένα πακέτο μηνυμάτων για να φθάσει στο προορισμό του
- Με το πρόβλημα του ανταγωνισμού μεταξύ των μηνυμάτων που στέλνονται από το ένα κόμβο στον άλλο, το εύρος ζώνης μειώνεται ακόμη περισσότερο.

3. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και υπάρχουσες προσεγγίσεις

Μια ερευνητική πρόκληση που πρέπει να διερευνηθεί σε αυτές τις δικτυακές αρχιτεκτονικές συνδέεται με τον τρόπο που καθιερώνονται τα μονοπάτια δρομολόγησης μεταξύ των CR κόμβων που βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές. Η Δρομολόγηση είναι μία σημαντική λειτουργία σε CR δικτυακές αρχιτεκτονικές με βάση το σχεδιασμό στο στρώμα δικτύου, επιτρέποντας για την συνεχή συνδεσιμότητα στους CR κόμβους, καθώς και την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ τους. Παράλληλα, σε δρομολόγηση CR δικτύων είναι καθοριστικής σημασίας άλλα θέματα του σχεδιασμού, όπως ο έλεγχος της ροής και τη διαχείριση του δικτύου κινητικότητας, οι οποίες είναι επίσης σημαντικές και πρέπει να αντιμετωπιστούν ως μελλοντικό ερευνητικό έργο.

Οι CR κόμβοι που βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές θεωρείται ότι έχουν μια δυναμική δυνατότητα πρόσβασης στο ραδιοφάσμα, σύμφωνα με την διαθεσιμότητα των TVWS σε μια συγκεκριμένη περιοχή και χρονική περίοδο. Κάθε CR κόμβος επιδιώκει και χρησιμοποιεί τα κανάλια των TVWS, όπως ένα πολυ-ραδιοφωνικό σύστημα και θα πρέπει να είναι σε θέση να διαβιβάσει τα πακέτα δεδομένων με ένα δικό του οργανωμένο τρόπο. Είναι επομένως σαφές ότι το κύριο θέμα της έρευνας μεταξύ των λειτουργιών του στρώματος δικτύου πρέπει να είναι η δρομολόγηση και η δημιουργία αποτελεσματικών διαδρομών μεταξύ διαφορετικών κόμβων των CR δικτύων αυτών. Τα δίκτυα αυτά χαρακτηρίζονται από δυναμικά μεταβαλλόμενα TVWS κανάλια σε κάθε κόμβο, στο πλαίσιο μιας multi-hop και ad-hoc λειτουργίας. Επίσης, λειτουργεί ως ένα δίκτυο συνεργασίας, το οποίο οι γνωστικοί δευτερεύοντες κόμβοι παίρνουν τη βοήθεια των γειτονικών κόμβων τους, προκειμένου να διαβιβάσουν τα δεδομένα στον προορισμό με βάση τη διαθεσιμότητα των TVWS. Αυτή η ευκαιριακή χρήση των TVWS εισάγει προκλήσεις όπως τη δημιουργία και τη συντήρηση του ασύρματου multi-hop μονοπατιού μεταξύ των δευτερευόντων κόμβων αποφασίζοντας τους κόμβους αναμετάδοσης τους και τα φασματικά ή TVWS κανάλια που πρέπει να χρησιμοποιούνται σε κάθε σύνδεση του μονοπατιού.

Η δρομολόγηση σε ένα δίκτυο με δευτερεύουσα χρήση του ραδιοφάσματος είναι προκλητική και διαφορετική από τη δρομολόγηση σε ένα συμβατικό ασύρματο δίκτυο. Μια βασική διαφορά είναι ότι η δρομολόγηση δεν βασίζεται σε ένα κοινό κανάλι ελέγχου, εφόσον δεν διασφαλίζεται ότι κάθε δευτερεύον κόμβος μπορεί να αποκτήσει την ίδια συχνότητα. Ως εκ τούτου, τα multi-hop συστήματα δρομολόγησης σε CR περιπτώσεις θα πρέπει να διερευνηθούν ούτως ώστε να παρέχουν αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων σε όλες τις περιφέρειες της διαφορετικής διαθεσιμότητάς των TVWS, ακόμα και όταν η σύνδεση δικτύου είναι περιοδική ή όταν μια end-to-end διαδρομή δεν είναι προσωρινά διαθέσιμη. Η Εικόνα 7 απεικονίζει την πρόκληση που απευθύνεται σε αυτό το μέρος της παράδοσης. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 7 απεικονίζει τρεις περιοχές (π.χ. περιοχή A, B και Γ), όπου τα πρωτεύοντα συστήματα έχουν παράγει τρεις περιοχές με ετερογενή διαθεσιμότητα φάσματος. Προκειμένου να δημιουργήσει multi-hop συνδέσεις μεταξύ των κόμβων ζευγών με διαφορετικό φάσμα, οι διαλείποντες κόμβοι γεφυρών πρέπει να κάνουν εναλλαγή μεταξύ πολλών καναλιών. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι σύνδεσμοι σε κάθε πορεία θα πρέπει να καθοριστούν σε διαφορετικά κανάλια TVWS ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του φάσματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή και χρονική περίοδο.



Εικόνα 7: Δρομολόγηση μεταξύ των περιφερειών με την ετερογενή διάθεση ραδιοφάσματος

Σε ένα γενικό πλαίσιο, η δρομολόγηση σε CR δίκτυο χρησιμοποιεί περιπτώσεις που αποτελούν ένα αρκετά σημαντικό, αλλά ακόμη ανεξερεύνητο πρόβλημα, ειδικά όταν μία multi-hop ασύρματη αρχιτεκτονική έχει θεωρηθεί. Ο σχεδιασμός ενός νέου πρωτοκόλλου δρομολόγησης επομένως απαιτείται το οποίο βασίζεται σε ένα συμβατικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, που τροποποιήθηκε ανάλογα, ώστε να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που ορίζονται ανωτέρω και δημιουργία -διατήρηση των βέλτιστων διαδρομών μεταξύ διαφορετικών CR κόμβων. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω χρησιμοποιημένη περίπτωση σεναρίου, το θέμα της ευαισθητοποίησης του φάσματος θα πρέπει να διερευνηθεί, σχετικά με τη δρομολόγηση σε ένα τέτοιο ad-hoc CR δίκτυο, όπου οι δευτερογενείς χρήστες απαγορεύεται να λειτουργούν σε ζώνες του ραδιοφάσματος που καταλαμβάνονται από τους πρωτογενείς χρήστες. Στόχος της δρομολόγησης των δικτύων αυτών είναι να εξασφαλίσει επικοινωνία υψηλής απόδοσης με τη βέλτιστη επιλογή της κατάλληλης διαδρομής μεταξύ των δευτεροβάθμιων χρηστών. Έτσι, multi-hop συνδέσεις πρέπει να δημιουργηθούν μεταξύ των δευτερευόντων ζευγών χρηστών με διαφορετική διαθεσιμότητας φάσματος και ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να σχεδιαστεί και εγκριθεί, επιτρέποντας δυνατότητες για την ανακάλυψη διαδρομής, λαμβάνοντας υπόψη το ετερογένο φάσμα σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Θέματα ποιότητας διαδρομής πρέπει επίσης να διερευνηθούν, δεδομένου ότι η πραγματική τοπολογία αυτών των multi-hop CR δικτύων επηρεάζεται πολύ από τη συμπεριφορά των βασικών χρηστών και των κλασικών τρόπων μέτρησης αξιολόγησης της ποιότητας των end-to-end διαδρομών (ονομαστικό εύρος ζώνης, ρυθμοαπόδοση, καθυστέρηση, η ενεργειακή απόδοση και η δικαιοσύνη) πρέπει να συνδυάζεται με νέα τα μέτρα για τη σταθερότητα στο μονοπάτι. Επιπλέον, η συντήρηση της διαδρομής είναι μια ζωτικής σημασίας πρόκληση για την παραπάνω χρησιμοποίηση αυτού του σεναρίου.

Η απρόβλεπτη εμφάνιση ενός πρωτεύοντος χρήστη σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι δυνατόν να γίνει ένα συγκεκριμένο κανάλι μη χρησιμοποιήσιμο σε τοπικό επίπεδο, με αποτέλεσμα απρόβλεπτες βλάβες στη διαδρομή, που μπορεί να απαιτούν συχνές επαναδρομολογήσεις είτε από την άποψη των κόμβων ή των χρησιμοποιούμενων καναλιών. Σε ένα γενικό πλαίσιο, δρομολόγησης σε TVWS βασιζόμενο σε ad-hoc CR δίκτυο αποτελεί μια μάλλον σημαντική, αλλά ακόμα ανεξερεύνητο πρόβλημα, ειδικά όταν μία multi-hop αρχιτεκτονική του δικτύου κρίνεται. Ο σχεδιασμός ενός νέου πρωτοκόλλου δρομολόγησης απαιτείται επομένως για την αντιμετώπιση προκλήσεων που ορίζονται ανωτέρω, προκειμένου

να καθιερώσουν και να διατηρήσουν τα βέλτιστα μονοπάτια δρομολόγησης μεταξύ δευτεροβάθμιων χρηστών με ετερογενείς διαθεσιμότητα των TVWS.

3.1 Proactive και Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης

Για τον συντονισμό μεταξύ των κόμβων ενός ad hoc δικτύου και τη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ οποιονδήποτε ζευγαριών από αυτούς, χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία ανακαλύπτουν διαδρομές μεταξύ των κόμβων αυτών. Τα ad hoc κινητά δίκτυα, έχουν όπως προαναφέρθηκε, αρκετά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία καθιστούν τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν σχεδιαστεί για ενσύρματα δίκτυα, ακατάλληλα γι' αυτά. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για ad hoc δίκτυα μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Table-driven (proactive) πρωτόκολλα
- On-demand (reactive) πρωτόκολλα

Τα ad-hoc πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν ως Proactive και Reactive. Τα πρώτα εξουσιοδοτούν τους κόμβους σε ένα ad-hoc κινητό δίκτυο ν' ανακαλύπτουν και να γνωρίζουν τις διαδρομές προς όλους τους πιθανούς προορισμούς του δικτύου έτσι ώστε, όταν πρέπει να διαβιβαστεί ένα πακέτο, να είναι ήδη γνωστή η διαδρομή που αυτό πρέπει ν' ακολουθήσει. Τα πρωτόκολλα της δεύτερης κατηγορίας υιοθετούν μια διαφορετική προσέγγιση με την οποία οι κόμβοι ανακαλύπτουν μόνο τις διαδρομές προς αυτούς τους προορισμούς, για τους οποίους γίνεται σχετική αίτηση εύρεσης μιας διαδρομής. Ένας κόμβος δεν χρειάζεται να γνωρίζει μια διαδρομή προς ένα προορισμό, παρά μόνο όταν πακέτα δεδομένων τα οποία πρέπει να προωθήσει, έχουν σαν τελικό προορισμό τους τον κόμβο αυτό. Τα proactive πρωτόκολλα έχουν το πλεονέκτημα ότι ένας κόμβος υπόκειται στην ελάχιστη καθυστέρηση για την απόκτηση μιας διαδρομής, αφού αυτή αν υπάρχει θα είναι διαθέσιμη στους πίνακες δρομολόγησης του συγκεκριμένου κόμβου. Εντούτοις τα πρωτόκολλα αυτά δεν είναι αποδοτικά σε όλες τις περιπτώσεις και σενάρια χρήσης, δεδομένου ότι χρησιμοποιούν ένα ουσιαστικό μέρος των πόρων του δικτύου για την διατήρηση και ανανέωση των πληροφοριών δρομολόγησης που γνωρίζουν οι κόμβοι. Για ν' αντιμετωπίσουν ακριβώς αυτό το μειονέκτημα, τα reactive πρωτόκολλα υιοθετούν την προσέγγιση της εύρεσης μιας διαδρομής για έναν προορισμό μόνο όταν αυτό απαιτείται. Τα reactive πρωτόκολλα καταναλώνουν πολύ λιγότερους πόρους σε σχέση με τα προηγούμενα, αλλά η αρχική καθυστέρηση εύρεσης μιας διαδρομής μπορεί να είναι σημαντικά μεγάλη και μπορεί να είναι, αν όχι μεγαλύτερη, συγκρίσιμη με τον χρόνο που απαιτείται για την μεταφορά των πραγματικών δεδομένων ανάμεσα σε δύο κόμβους. Εν συντομία, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι κανένα πρωτόκολλο δεν είναι υλοποιημένο να λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά και αποτελεσματικά σε όλα τα πιθανά δικτυακά περιβάλλοντα και γι' αυτό έχουν γίνει προτάσεις που χρησιμοποιούν υβριδικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

3.1.1. Proactive πρωτόκολλο δρομολόγησης Dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol (DSDV)

Ο DSDV βασίζεται στον κλασικό αλγόριθμο δρομολόγησης των Bellman-ford, με κάποιες βελτιώσεις. Σύμφωνα με το DSDV, κάθε κινητός κόμβος του δικτύου διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης, στον οποίο αποθηκεύει όλους τους πιθανούς προορισμούς, τον απαιτούμενο αριθμό των hops για κάθε προορισμό και τον sequence number, ο οποίος έχει οριστεί από τον προορισμό. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν οι παλιές διαδρομές από τις νεώτερες και έτσι αποφεύγεται η δημιουργία loops. Οι κόμβοι μεταδίδουν περιοδικά τους πίνακες δρομολόγησης τους στους άμεσους γείτονές τους, έτσι ώστε να διατηρείται η συνέπεια των πινάκων. Επίσης μεταδίδουν τους πίνακές δρομολόγησης τους αν

συμβεί κάποια σημαντική αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου (και επομένως στους πίνακες τους), στο χρόνο μεταξύ των περιοδικών μεταδόσεων. Για να μειωθεί η πιθανά μεγάλη κίνηση στο δίκτυο που μπορεί να προκληθεί από τέτοιου είδους ενημερώσεις των πινάκων δρομολόγησης, οι ενημερώσεις αυτές μπορούν να σταλούν με δύο είδη πακέτων. Το πρώτο είδος, είναι γνωστό σαν “full dump” πακέτα, περιέχουν ολόκληρους τους πίνακες δρομολόγησης και μπορεί ν’ απαιτήσουν πολλαπλές μονάδες δεδομένων του πρωτοκόλλου του δικτύου (NPDUs). Το δεύτερο είδος είναι τα πακέτα επαύξησης (incremental packets), τα οποία χρησιμοποιούνται για να σταλούν μόνο εκείνες οι εγγραφές των πινάκων δρομολόγησης που έχουν αλλάξει από την τελευταία ενημέρωση και πρέπει να χωρούν σε ένα NPDU και έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται το ποσό της κίνησης που παράγεται. Αν υπάρχει χώρος στα πακέτα επαύξησης, τότε μπορούν να συμπεριληφθούν και οι εγγραφές εκείνες των οποίων έχει αλλάξει ο sequence number. Όταν το δίκτυο είναι σχετικά σταθερό, στέλνονται πακέτα επαύξησης, έτσι ώστε ν’ αποφευχθεί η επιπλέον κίνηση, ενώ τα πακέτα “full dump” είναι σχετικά σπάνια. Σ’ ένα δίκτυο που αλλάζει συχνά, τα πακέτα επαύξησης μπορεί να μεγαλώσουν, επομένως τα πακέτα “full dump” θα είναι πιο συχνά. Κάθε πακέτο ενημέρωσης, περιέχει τη διεύθυνση του προορισμού, τον αριθμό των hops για να φτάσουμε στον προορισμό αυτό, το sequence number των πληροφοριών που ελήφθησαν σε σχέση με τον προορισμό αυτό, όπως επίσης και ένα sequence number το οποίο είναι μοναδικό για την εκπομπή. Η διαδρομή με το μεγαλύτερο sequence number, δηλαδή η πιο πρόσφατη, είναι αυτή που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που δύο διαδρομές έχουν το ίδιο sequence number, τότε η διαδρομή με την καλύτερη μετρική, δηλαδή η μικρότερη διαδρομή, χρησιμοποιείται. Όταν κάποιος κόμβος A αντιληφθεί ότι η διαδρομή μέχρι τον προορισμό D έχει πάψει να είναι έγκυρη, τότε αυξάνεται ο αριθμός hop-count της διαδρομής αυτής. Έτσι, την επόμενη φορά που ο A θα κοινοποιήσει στους γείτονές του τον πίνακα δρομολόγησης του, θα δώσει στη διαδρομή προς τον D, άπειρο hop-count και ένα sequence number που είναι μεγαλύτερος από πριν. Οι κόμβοι υπολογίζουν επίσης το χρόνο εγκατάστασης μιας διαδρομής, δηλαδή το μέσο χρόνο κατά τον οποίο κυμαίνονται οι διαδρομές για έναν προορισμό, μέχρι να ληφθεί η καλύτερη διαδρομή. Έτσι καθυστερούν την εκπομπή μιας ενημέρωσης διαδρομής κατά ένα ποσό χρόνου ίσο με το χρόνο εγκατάστασης, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την κίνηση του δικτύου και βελτιστοποιώντας τις διαδρομές, αφού εξαλείφονται οι εκπομπές αυτές οι οποίες θα συνέβαιναν αν μια καλύτερη διαδρομή βρισκόταν πολύ σύντομα.

Πλεονεκτήματα:

- Εγγυάται ότι δεν υπάρχουν loops στους πίνακες δρομολόγησης χρησιμοποιώντας τα sequence numbers για να διαχωρίσει τις παλιές από τις νέες διαδρομές.
- Ενώ παρέχει μόνο ένα μονοπάτι για κάθε προορισμό επιλέγει το μικρότερο μονοπάτι βασισμένος στον αριθμό των hops για τον προορισμό.
- Παρέχει δύο είδη πακέτων ενημέρωσης, το ένα από τα οποία είναι σημαντικά μικρότερο από το άλλο και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενημερώσεις επαύξησης έτσι ώστε να μη χρειάζεται να σταλεί ολόκληρος ο πίνακας δρομολόγησης για κάθε αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου.
- Διατηρεί ενημερωμένες διαδρομές χρησιμοποιώντας τα sequence numbers

Μειονεκτήματα:

Ο DSDV είναι μη αποδοτικός γιατί:

- Απαιτεί εκπομπή περιοδικών ενημερώσεων ανεξάρτητα από τον αριθμό των αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου, το οποίο έχει ως σαν συνέπεια να περιορίζεται ο αριθμός

των κόμβων που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο, αφού το συνολικό κόστος του δικτύου αυξάνεται.

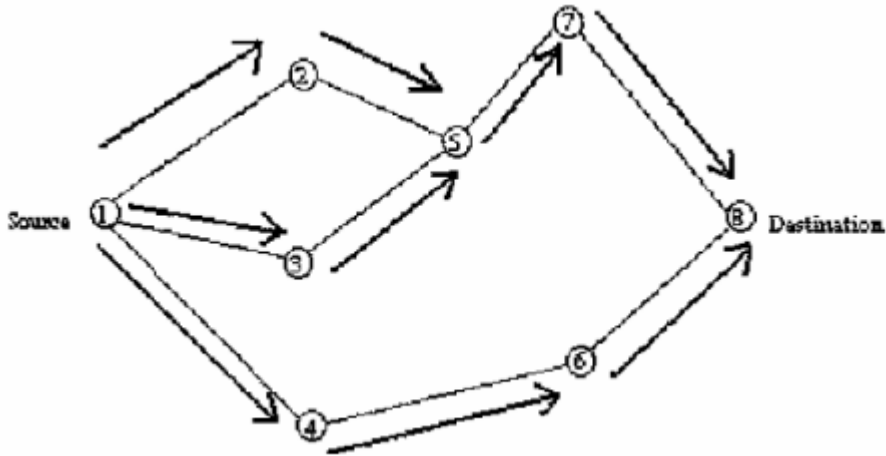
- Χρειάζεται κάποιο χρόνο έτσι ώστε να συγκλίνει πριν χρησιμοποιηθεί κάποια διαδρομή. Αυτός ο χρόνος σύγκλισης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος σ' ένα στατικό δίκτυο, όπου η τοπολογία δεν αλλάζει και τόσο συχνά, αλλά στα ad hoc δίκτυα η τοπολογία περιμένουμε να μεταβάλλεται πολύ συχνά. Έτσι ο χρόνος αυτός σύγκλισης μπορεί να σημαίνει ότι ένας μεγάλος αριθμός πακέτων έχουν απορριφθεί προτού βρεθεί μια κατάλληλη διαδρομή.

3.1.2. Reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης Ad hoc On Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV)

Το AODV πρωτόκολλο δρομολόγησης δημιουργείται με βάση τον DS αλγόριθμο. Το AODV είναι μια βελτίωση του DSDV, αφού τυπικά ελαχιστοποιεί τον αριθμό των εκπομπών που απαιτούνται, δημιουργώντας διαδρομές όταν απαιτούνται, σε αντίθεση με τον DSDV που διατηρεί μια πλήρη λίστα των διαδρομών. Οι συγγραφείς του AODV το κατατάσσουν σαν ένα απλό σύστημα απόκτησης διαδρομής όταν απαιτείται, αφού οι κόμβοι που δε βρίσκονται στο επιλεγμένο μονοπάτι δε διατηρούν πληροφορίες δρομολόγησης, ούτε συμμετέχουν σε ανταλλαγές πινάκων δρομολόγησης. Κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί ένα πίνακα Δρομολόγησης, κάθε εγγραφή του οποίου περιέχει τις ακόλουθες πληροφορίες:

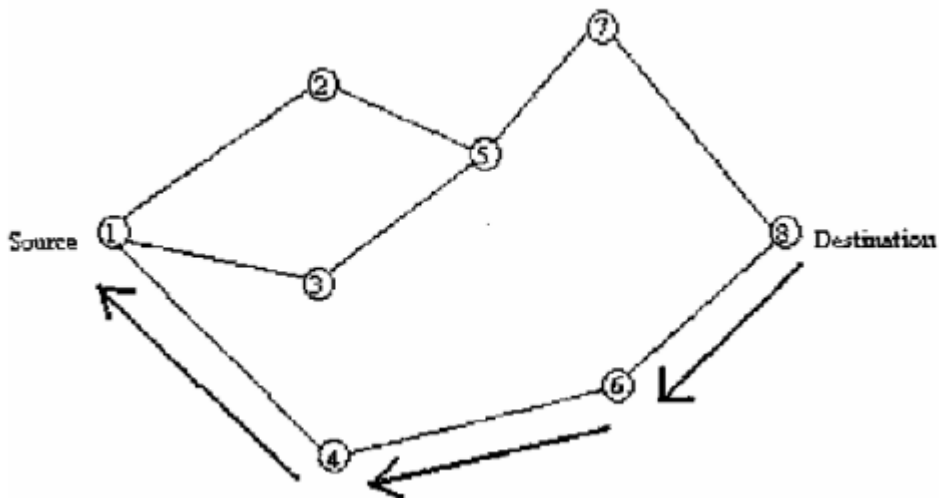
- Την IP διεύθυνση του προορισμού
- Τον sequence number του προορισμού
- Τον αριθμό των hops μέχρι τον προορισμό
- Το επόμενο βήμα-κόμβο, το οποίο έχει επιλέγει για την αποστολή πακέτων στον προορισμό μέσω αυτής της διαδρομής
- Το χρόνο για τον οποίο η διαδρομή θεωρείται έγκυρη (lifetime)
- Τους γειτονικούς κόμβους, οι οποίοι χρησιμοποιούν ενεργά αυτή τη διαδρομή
- Ένα buffer (Request Buffer), ο οποίος εξασφαλίζει ότι μια αίτηση επεξεργάζεται μόνο μια φορά

Όταν ένας κόμβος-πηγή επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα σε κάποιον κόμβο-προορισμό, για να βρει ένα μονοπάτι για τον προορισμό αυτό, ξεκινά μια διαδικασία ανεύρεσης μονοπατιού για να τον εντοπίσει. Εκπέμπει ένα πακέτο αίτησης διαδρομής (RREQ) στους γείτονές του. Αυτοί με τη σειρά τους προωθούν την αίτηση στους γείτονές τους και ούτω καθεξής, μέχρι να φτάσει σε έναν ενδιάμεσο κόμβο που έχει μια πρόσφατη διαδρομή για τον προορισμό, ή μέχρι να φτάσει στον προορισμό όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Ένας κόμβος πετά ένα πακέτο αίτησης διαδρομής που έχει ξαναδεί. Ο AODV χρησιμοποιεί τους sequence numbers των προορισμών (οι οποίοι αλλάζουν όταν συμβεί κάτι στην περιβάλλουσα περιοχή) για να εξασφαλίσει ότι όλες οι διαδρομές δε περιέχουν βρόχους (loop-free) και περιέχουν τις πιο πρόσφατες πληροφορίες διαδρομών. Κάθε κόμβος διατηρεί ένα δικό του sequence number, καθώς και ένα ID εκπομπής. Το ID αυτό αυξάνεται για κάθε RREQ που ξεκινά ο κόμβος και μαζί με την IP διεύθυνση του κόμβου, προσδιορίζουν μοναδικά ένα RREQ. Μαζί με το δικό του sequence number και το ID εκπομπής, ο κόμβος-πηγή συμπεριλαμβάνει στο RREQ τον πιο πρόσφατο sequence number που έχει για τον προορισμό. Ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν ν' απαντήσουν στο RREQ μόνο αν έχουν μια διαδρομή για τον προορισμό, της οποίας ο αντίστοιχος sequence number του προορισμού είναι μεγαλύτερος ή ίσος με αυτόν που περιέχεται στο RREQ.



Εικόνα 8. Μετάδοση του πακέτου αίτησης διαδρομής (RREQ)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της προώθησης του RREQ, οι ενδιάμεσοι κόμβοι καταγράφουν στον πίνακα δρομολόγησής τους τη διεύθυνση του γείτονα από τον οποίο ήρθε το πρώτο αντίγραφο της αίτησης. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αντίστροφου μονοπατιού για το πακέτο απάντησης διαδρομής (RREP). Όταν το RREQ φτάσει στον προορισμό ή σε έναν ενδιάμεσο κόμβο με μια αρκετά “φρέσκια” διαδρομή, ο προορισμός ή ο ενδιάμεσος κόμβος απαντά μεταδίδοντας ένα RREP πακέτο πίσω προς το γείτονα από τον οποίο έλαβε αρχικά το RREQ. Όσο το RREP προωθείται προς τα πίσω κατά μήκος του αντιστρόφου μονοπατιού, οι κόμβοι κατά μήκος του μονοπατιού αυτού δημιουργούν στους πίνακες δρομολόγησής τους εγγραφές διαδρομών προς τα μπρος, που δείχνουν προς τον κόμβο από τον οποίο ήρθε το RREP. Αυτές οι εγγραφές διαδρομών δείχνουν την ενεργή διαδρομή προς τα μπρος. Με κάθε εγγραφή διαδρομής είναι συσχετισμένο ένα χρονόμετρο διαδρομής, το οποίο θα προκαλέσει τη διαγραφή της αντίστοιχης εγγραφής, αν αυτή δε χρησιμοποιείται μέσα στον προκαθορισμένο χρόνο ζωής. Επειδή το RREP προωθείται κατά μήκος του μονοπατιού που έχει εγκατασταθεί από το RREQ, ο AODV υποστηρίζει μόνο τη χρήση συμμετρικών συνδέσεων. Αν η απάντηση (RREP) δεν φτάσει μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ο κόμβος μπορεί να επαναλάβει την αποστολή του RREQ μηνύματος, ή να υποθέσει ότι δεν υπάρχει κάποια διαδρομή προς τον απαιτούμενο προορισμό.



Εικόνα 9. Το μονοπάτι που ακολουθείται από το πακέτο απάντησης διαδρομής (RREP)

Οι διαδρομές διατηρούνται ως εξής: Αν ένας κόμβος-πηγή μετακινηθεί, τότε μπορεί να ξαναρχίσει το μηχανισμό ανακάλυψης διαδρομής, για να βρει μια νέα διαδρομή για τον προορισμό. Αν ένας ενδιάμεσος κόμβος κατά μήκος της διαδρομής μετακινηθεί, τότε ο προηγούμενος γείτονάς του παρατηρεί τη μετακίνηση (την αποτυχία της σύνδεσης) και μεταδίδει ένα μήνυμα ειδοποίησης αποτυχίας σύνδεσης (ένα RREP με άπειρη μετρική) σε κάθε έναν από τους ενεργούς προηγούμενους γείτονές του, για να τους ενημερώσει για την εξάλειψη αυτού του τμήματος της διαδρομής. Αυτοί οι κόμβοι με τη σειρά τους, μεταδίδουν το μήνυμα ειδοποίησης στους προηγούμενους γείτονές τους και ούτω καθεξής μέχρι να φτάσει στον κόμβο-πηγή. Η πηγή μπορεί τότε να επιλέξει να ξαναρχίσει την ανακάλυψη διαδρομής για τον προορισμό αυτό, αν η διαδρομή είναι ακόμα επιθυμητή.

Μια επιπλέον άποψη του πρωτοκόλλου είναι η χρήση των “hello” μηνυμάτων (ένα ειδικό τύπο RREP μηνύματος), τα οποία στέλνονται περιοδικά από ένα κόμβο προς όλους τους άμεσους γείτονές του. Αυτά τα μηνύματα έχουν σα στόχο τη διαρκή ενημέρωση κάθε κόμβου για άλλους κόμβους που βρίσκονται στη γειτονιά του. Οι γείτονες που χρησιμοποιούν διαδρομές μέσω του συγκεκριμένου κόμβου θα εξακολουθήσουν να θεωρούν τις διαδρομές σαν έγκυρες. Τα “hello” μηνύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διατηρηθεί η τοπική συνδετικότητα ενός κόμβου. Παρόλα αυτά, η χρήση τους δεν απαιτείται. Οι κόμβοι ελέγχουν τη μετάδοση πακέτων δεδομένων έτσι ώστε να επιβεβαιώσουν ότι μπορούν ακόμη να φτάσουν στον επόμενο κόμβο. Αν μια τέτοια μετάδοση δεν “ακουστεί”, ο κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε από έναν αριθμό τεχνικών, συμπεριλαμβανομένης και της λήψης “hello” μηνυμάτων, έτσι ώστε να καθορίσει αν ο επόμενος κόμβος βρίσκεται εντός της ακτίνας επικοινωνίας. Αν τα “hello” μηνύματα σταματήσουν να φτάνουν από ένα συγκεκριμένο κόμβο, τότε οι γείτονές του μπορούν να υποθέσουν ότι έχει απομακρυνθεί εκτός ακτίνας επικοινωνίας και να σημαδέψουν τη σύνδεση αυτή σα σπασμένη. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να γνωστοποιηθεί η αποτυχία της σύνδεσης αυτής σε όλους τους επηρεαζόμενους κόμβους. Τα “hello” μηνύματα μπορούν να δημιουργήσουν μια λίστα των κόμβων από τους οποίους έχει ακούσει ένας κόμβος, αποδίδοντας έτσι μεγαλύτερη γνώση της συνδετικότητας του δικτύου.

Πλεονεκτήματα:

- Πλεονεκτεί σε σχέση με τους κλασσικούς αλγόριθμους δρομολόγησης, όπως ο Distance Vector και ο Link State, στο ότι έχει περιορίσει σημαντικά τον αριθμό των μηνυμάτων δρομολόγησης μέσα στο δίκτυο.
- Με τη χρήση των sequence numbers εξασφαλίζεται ότι μια διαδρομή είναι πρόσφατη και δεν περιέχει βρόχους (loops).
- Προσθέτει τη δυνατότητα multicast, η οποία αυξάνει την απόδοση σημαντικά όταν ένας κόμβος επικοινωνεί με πολλούς.
- Το πρωτόκολλο είναι κατανεμημένο, αφού δεν εξαρτάται από κάποιον κεντρικοποιημένο κόμβο.
- Διατηρεί χαμηλό το overhead δρομολόγησης, αφού τόσο τα πακέτα αναζήτησης διαδρομής, όσο και τα πακέτα απάντησης διαδρομής, περιέχουν μικρό όγκο πληροφοριών.
- Με την αποστολή “hello” μηνυμάτων μπορεί να διατηρηθεί η τοπική συνδετικότητα του κάθε κόμβου.

Μειονεκτήματα:

- Η χρήση των sequence numbers μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, αν για παράδειγμα πάψουν να είναι συγχρονισμένοι
- Υποστηρίζει μόνο μια διαδρομή για κάθε προορισμό.

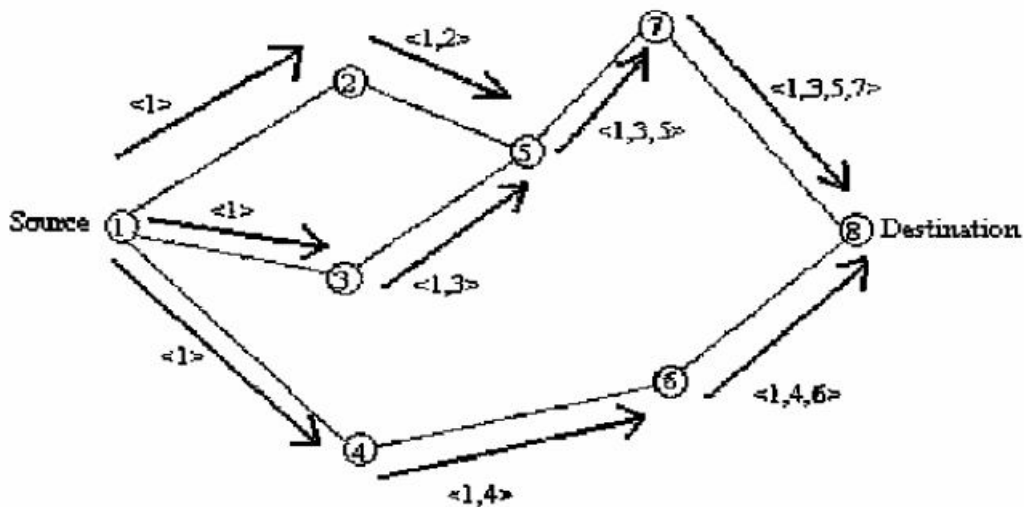
- Απαιτεί συμμετρικές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων και για το λόγο αυτό δε μπορεί να χρησιμοποιήσει διαδρομές με μη-συμμετρικές συνδέσεις.
- Αν προκύψει μια αποτυχία σύνδεσης κατά μήκος ενός μονοπατιού, ο αλγόριθμος ανακάλυψης διαδρομής πρέπει να ξανακληθεί από την πηγή για να βρεθεί ένα νέο μονοπάτι για τον προορισμό. Δε γίνεται καμιά προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί τμηματική ανάκτηση διαδρομής, δηλαδή να επιτραπεί στους ενδιάμεσους κόμβους να προσπαθήσουν να ξαναφτιάξουν μόνοι τους τη διαδρομή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους ανακατασκευής διαδρομής.

Όμως η προσπάθεια και η αποτυχία ενός ενδιάμεσου κόμβου να ξαναφτιάξει μια διαδρομή, θα προκαλέσει μεγαλύτερη καθυστέρηση απ' ό,τι αν ο κόμβος-πηγή είχε προσπαθήσει να την ξαναφτιάξει αμέσως μόλις αντιλήφθηκε τη σπασμένη σύνδεση.

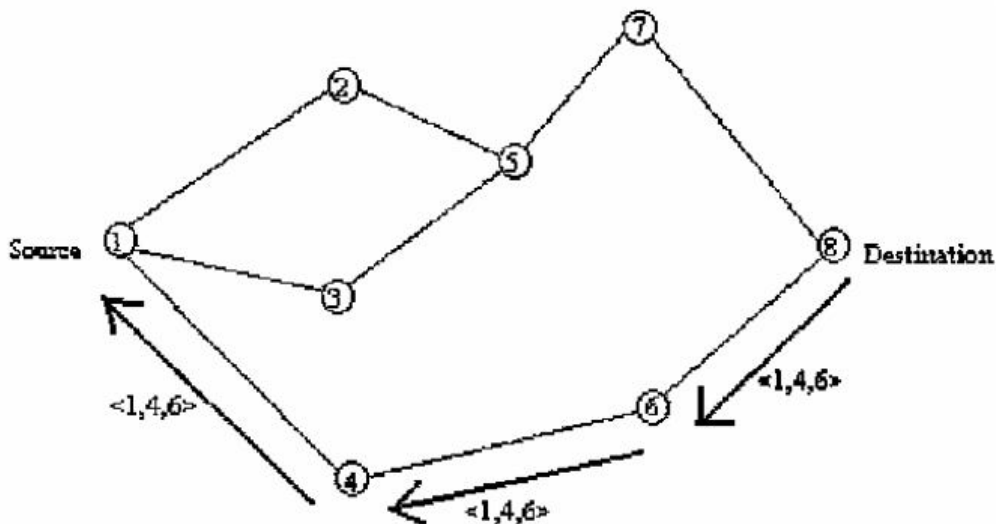
2.6.1.3 Dynamic Source Routing Protocol (DSR)

Το DSR πρωτόκολλο, είναι ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο βασίζεται στην έννοια της δρομολόγησης πηγής. Κάθε κόμβος χρειάζεται να διατηρεί κρυφές μνήμες διαδρομών, οι οποίες περιέχουν τις διαδρομές πηγής για τις οποίες είναι ενήμερος. Οι εγγραφές στην κρυφή μνήμη διαδρομών ενός κόμβου ενημερώνονται συνεχώς, καθώς αυτός μαθαίνει για νέες διαδρομές. Κάθε εγγραφή στην κρυφή μνήμη διαδρομών έχει συσχετισμένη με αυτή μια περίοδο λήξης, μετά την οποία η εγγραφή διαγράφεται από την κρυφή μνήμη. Το πρωτόκολλο αποτελείται από δύο κύριες φάσεις: την ανακάλυψη διαδρομής και τη διατήρηση διαδρομής. Όταν ένας κινητός κόμβος θέλει να στείλει ένα πακέτο σε κάποιον προορισμό, ελέγχει την κρυφή μνήμη διαδρομών του για να καθορίσει αν ήδη έχει μια διαδρομή για τον προορισμό αυτό. Αν βρει ότι υπάρχει μια διαδρομή για τον προορισμό που δεν έχει λήξει, χρησιμοποιεί τη διαδρομή αυτή για να στείλει το πακέτο. Αν όμως ο κόμβος δεν έχει μια τέτοια διαδρομή, τότε ξεκινάει τη διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής εκπέμποντας ένα πακέτο αίτησης διαδρομής. Αυτό το πακέτο αίτησης διαδρομής, περιέχει τη διεύθυνση της πηγής και του προορισμού και ένα μοναδικό αριθμό αναγνώρισης ταυτότητας. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει το πακέτο αυτό, ελέγχει αν ξέρει μια διαδρομή για τον προορισμό. Αν δεν ξέρει μια τέτοια διαδρομή, προσαρτά τη διεύθυνσή του στο αρχείο διαδρομής του πακέτου και στη συνέχεια προωθεί το πακέτο στους γείτονές του. Για να μειωθεί ο αριθμός των αιτήσεων διαδρομής που μεταδίδονται, ένας κόμβος προωθεί το πακέτο αίτησης διαδρομής μόνο αν δεν έχει δει ήδη το πακέτο αυτό και η διεύθυνσή του δεν εμφανίζεται ήδη στο αρχείο διαδρομής του πακέτου.

Μια απάντηση διαδρομής παράγεται όταν το πακέτο αίτησης διαδρομής φτάσει είτε στον ίδιο τον προορισμό, είτε σε έναν ενδιάμεσο κόμβο που περιέχει στην κρυφή μνήμη διαδρομών του μια διαδρομή για τον προορισμό που δεν έχει λήξει. Ένα πακέτο αίτησης διαδρομής που φτάνει σε έναν από αυτούς τους κόμβους, ήδη περιέχει στο αρχείο διαδρομής του την ακολουθία των βημάτων (κόμβων) που έγιναν από την πηγή μέχρι τον κόμβο αυτό.



Εικόνα 10. Κατασκευή του αρχείου διαδρομής κατά τη διάρκεια της ανακάλυψης διαδρομής



Εικόνα 11. Μετάδοση της απάντησης διαδρομής με το αρχείο διαδρομής

Καθώς το πακέτο αίτησης διαδρομής μεταδίδεται διαμέσου του δικτύου, σχηματίζεται το αρχείο διαδρομής. Αν η απάντηση διαδρομής παράγεται από τον προορισμό, τότε αυτός τοποθετεί το αρχείο διαδρομής, που περιέχεται στο πακέτο αίτησης διαδρομής, στο πακέτο απάντησης διαδρομής. Αν όμως ο κόμβος που παράγει την απάντηση διαδρομής είναι ένας ενδιάμεσος κόμβος, τότε αυτός προσαρτά την αποθηκευμένη του διαδρομή για τον προορισμό στο αρχείο διαδρομής του πακέτου αίτησης διαδρομής και το τοποθετεί στη συνέχεια (το αρχείο διαδρομής) στο πακέτο απάντησης διαδρομής.

Για να επιστρέψει το πακέτο απάντησης διαδρομής, ο κόμβος που απαντά θα πρέπει να έχει μια διαδρομή για την πηγή. Αν έχει μια τέτοια διαδρομή στην κρυφή μνήμη διαδρομών του, μπορεί να τη χρησιμοποιήσει. Αλλιώς, αν υποστηρίζονται οι συμμετρικές συνδέσεις, μπορεί να χρησιμοποιήσει την αντίστροφη διαδρομή του αρχείου διαδρομής. Στην περίπτωση που δεν υποστηρίζονται οι συμμετρικές συνδέσεις, ο κόμβος μπορεί να ξεκινήσει τη δική του διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής και να “φορτώσει” την απάντηση διαδρομής στη νέα αίτηση διαδρομής.

Η διατήρηση διαδρομής επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης δύο ειδών πακέτων: τα πακέτα Λάθους Διαδρομής και τις Αναγνωρίσεις. Ένα πακέτο Λάθους Διαδρομής παράγεται σε ένα κόμβο, όταν το στρώμα Ζεύξης Δεδομένων αντιμετωπίσει ένα μοιραίο πρόβλημα μετάδοσης. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο Λάθους Διαδρομής, μετακινεί το hop για το λάθος αυτό από την κρυφή μνήμη διαδρομών του και όλες οι διαδρομές που περιέχουν το βήμα αυτό προς το λάθος, περικόπτονται σε αυτό το σημείο. Επιπρόσθετα με τα πακέτα Λάθους Διαδρομής, χρησιμοποιούνται και πακέτα Αναγνώρισης για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας των συνδέσεων των διαδρομών. Τέτοιες Αναγνωρίσεις περιλαμβάνουν και παθητικές αναγνωρίσεις, στις οποίες ο κόμβος είναι σε θέση να “ακούσει” τον επόμενο κόμβο να προωθεί το πακέτο κατά μήκος της διαδρομής.

Πλεονεκτήματα:

- Ένα πλεονέκτημά του σε σχέση με τα υπόλοιπα on-demand πρωτόκολλα, είναι ότι δε χρησιμοποιεί περιοδικά μηνύματα δρομολόγησης και έτσι μειώνεται το πρόσθετο κόστος στο δίκτυο, εξοικονομώντας ενέργεια στους κόμβους καθώς και πολύτιμο εύρος ζώνης επικοινωνίας. Έτσι το πρωτόκολλο δεν επιφέρει οποιοδήποτε overhead όταν δεν υπάρχουν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου και επιπλέον μπορεί να τεθεί σε κατάσταση sleep mode.
- Χρησιμοποιεί το σημαντικό πλεονέκτημα της δρομολόγησης από την πηγή. Έτσι, οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν χρειάζεται να διατηρούν ενημερωμένες πληροφορίες για τις διαδρομές έτσι ώστε να δρομολογούν τα πακέτα που προωθούν.
- Η μάθηση των διαδρομών γίνεται με τον έλεγχο της πληροφορίας που περιέχεται στα πακέτα που λαμβάνει κάθε κόμβος. Αυτή η μορφή ενεργούς μάθησης είναι πολύ χρήσιμη, αφού μειώνει το πρόσθετο κόστος του δικτύου.
- Παρέχει υποστήριξη για αμφίδρομες συνδέσεις, με τη χρήση νέων αιτήσεων διαδρομής από τον τελικό προς τον αρχικό κόμβο.
- Δεν απαιτεί τη χρήση συμμετρικών συνδέσεων και μπορεί να χρησιμοποιήσει μη-συμμετρικές συνδέσεις όταν δεν είναι διαθέσιμες συμμετρικές.
- Επιτρέπει στους κόμβους να διατηρούν πολλαπλές διαδρομές για έναν προορισμό στην κρυφή τους μνήμη. Έτσι, όταν σπάσει μια σύνδεση σε μια διαδρομή, η πηγή μπορεί να ελέγξει την κρυφή της μνήμη για μια άλλη έγκυρη διαδρομή.
- Είναι loop-free πρωτόκολλο.
- Το πρωτόκολλο είναι κατανεμημένο, αφού δεν εξαρτάται από κάποιον κεντρικοποιημένο κόμβο.

Μειονεκτήματα:

- Κάθε πακέτο στον DSR έχει ένα μικρό πρόσθετο κόστος, αφού πρέπει να περιέχει τη διαδρομή μέχρι τον αρχικό κόμβο που έστειλε το πακέτο. Το πρόσθετο αυτό κόστος αυξάνεται όταν το πακέτο πρέπει να περάσει από πολλά hops μέχρι να φτάσει στον προορισμό του.
- Τα πακέτα απάντησης διαδρομής είναι επίσης μεγαλύτερα (σε σχέση με τον AODV), αφού περιέχουν τη διεύθυνση κάθε κόμβου κατά μήκος της διαδρομής, με αποτέλεσμα να παράγεται μεγαλύτερο overhead ελέγχου.
- Το overhead μνήμης είναι μεγαλύτερο στον DSR (σε σχέση με τον AODV), αφού κάθε κόμβος πρέπει να θυμάται ολόκληρες διαδρομές.
- Λόγω της υπόθεσης που έγινε, ότι η διάμετρος του δικτύου είναι σχετικά μικρή και της απαίτησης της δρομολόγησης από την πηγή, ο DSR δεν κλιμακώνεται σε μεγάλα δίκτυα.

- Αν προκύψει μια αποτυχία σύνδεσης κατά μήκος ενός μονοπατιού, ο αλγόριθμος ανακάλυψης διαδρομής πρέπει να ξανακληθεί από την πηγή για να βρεθεί ένα νέο μονοπάτι για τον προορισμό. Δε γίνεται καμιά προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί τμηματική ανάκτηση διαδρομής, δηλαδή να επιτραπεί στους ενδιαμέσους κόμβους να προσπαθήσουν να ξαναφτιάξουν μόνοι τους τη διαδρομή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους ανακατασκευής διαδρομής.

Όμως η προσπάθεια και η αποτυχία ενός ενδιαμέσου κόμβου να ξαναφτιάξει μια διαδρομή, θα προκαλέσει μεγαλύτερη καθυστέρηση από ότι αν ο κόμβος-πηγή είχε προσπαθήσει να την ξαναφτιάξει αμέσως μόλις αντιλήφθηκε τη σπασμένη σύνδεση.

3.2 Υπάρχουσες προσεγγίσεις πρωτοκόλλων δρομολόγησης

3.2.1. Ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης για multi-hop multi-radio multi-channel γνωστικά δίκτυα.

Route Discovery Process

Η προτεινόμενη δρομολόγηση είναι ένα on-demand protocol το οποίο είναι παρόμοιο με το AODV protocol. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το Weighted Cumulative ETT (WCETT). Το WCETT είναι μια επέκταση του ETT η οποία προτείνει να υπολογιστεί η πορεία ως κάτι περισσότερο από ακριβώς το σύνολο των μετρικών τιμών των μεμονωμένων συνδέσεων που ανήκουν σε αυτήν την πορεία. Η διαδικασία δρομολόγησης αρχίζει όταν χρειάζεται μια διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων. Ο κόμβος πηγής μεταδίδει ένα μήνυμα route request (RREQ) μέσα το δίκτυο. Το RREQ το πακέτο που διαβιβάζεται από έναν κόμβο X στο κανάλι i περιέχει το WCETT και τα κανάλια που χρησιμοποιούνται κατά μήκος της πορείας. Επιπλέον, κάθε κόμβος καλεί έναν πίνακα PrimaryListTable (PLT) επιτρέποντας να διαχειριστεί την αρχή των αρχικών χρηστών στη φάση συντήρησης και αποκατάστασης διαδρομών. Ο κόμβος προωθεί το RREQ εάν:

- Ο αριθμός ακολουθίας του RREQ είναι νέος. Σε εκείνη την περίπτωση, η αξία WCETT της πορείας αποθηκεύεται σε έναν τοπικό πίνακα.
- Ο αριθμός ακολουθίας του RREQ δεν είναι νέος, το οποίο σημαίνει ότι ένα RREQ με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας έχει υποβληθεί σε επεξεργασία, αλλά η αξία WCETT της είναι μικρότερη από ένα από προηγούμενο RREQ με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας. Αυτός ο όρος θα βοηθήσει την πιθανότητα της εύρεσης διαδρομής χαμηλότερου κόστους.

Όταν ο κόμβος προορισμού λαμβάνει ένα RREQ, στέλνει πίσω μία απάντηση διαδρομών (RREP) εάν το λαμβανόμενο κόστος του RREQ είναι μικρότερο από το προηγούμενο λαμβανόμενο RREQ με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας. Η πηγή θα χρησιμοποιήσει τελικά την πορεία που έχει το χαμηλότερο κόστος για τη μετάδοση δεδομένων και αποθηκεύει τοπικά τις άλλες καλύτερες πορείες.

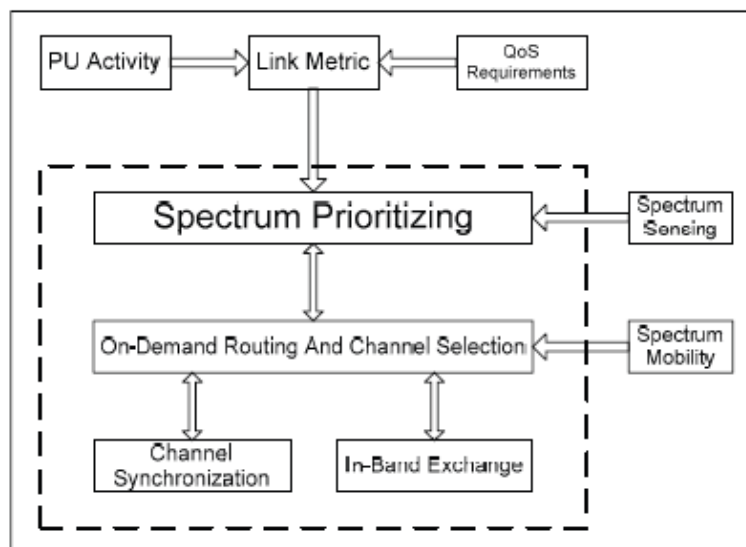
Local Route Maintenance and Recovery

Η υπερίσχυση της ξαφνικής αρχής του PUs (primary user PU) είναι ευθύνη της διαδικασίας ανάκαμψης διαδρομών που είναι κρίσιμη στο πρωτόκολλό μας δεδομένου ότι PUs διακόπτει συχνά τις τρέχουσες δευτεροβάθμιες μεταδόσεις. Επομένως, το μήνυμα

λάθους διαδρομών (route error message RERR) σε AODV επεκτείνεται για να ανακτήσει μια διακεκομμένη σύνδεση από PU. Υποθέτουμε ότι μόνο ένα κανάλι διακόπτεται σε έναν χρόνο. Όταν ένας secondary user SU (αποκαλούμενο ανιχνευτή) ανιχνεύει τη δραστηριότητα του PU σε ένα συγκεκριμένο κανάλι, θα εκτελέσει μια τοπική αποκατάσταση ως εξής. Ο ανιχνευτής στέλνει ένα RERR περιέχοντας το PrimaryListTable (PLT) στην πηγή της πορείας. PLT έχει έναν κατάλογο όλων των χρησιμοποιημένων καναλιών από τον ανιχνευτή και τους άμεσους γείτονές του. Μόλις ανιχνευθεί μια PU δραστηριότητα, PLT ενημερώνεται με τον καθορισμό του κατελημμένου καναλιού σε -1. Κατόπιν, η πηγή διαβιβάζει τα πακέτα δεδομένων πέρα από τη δεύτερη διαθέσιμη καλύτερη πορεία στον τοπικό πίνακά της έως ότου ανακτάται η σπασμένη πορεία. Επίσης, ο ανιχνευτής θα μεταδώσει ένα άλλο μήνυμα RERR σε όλους τους άμεσους γείτονές του για να ενημερώσει PLT τους. Τα μηνύματα συντήρησης και αποκατάστασης διαδρομών στέλνονται από τις μεταστρεφόμενες διεπαφές και παραλαμβάνονται από τις σταθερές διεπαφές. Επομένως, εάν ένας κόμβος γειτόνων διαβιβάζει σε ένα κανάλι που έχει τεθεί -1 από τον ανιχνευτή, αυτός ο γείτονας πρέπει να αλλάξει το κανάλι με το να εκτελέσει τη διαδικασία ανακάλυψης διαδρομών. Κατόπιν, ο γείτονας ενημερώνει το PLT του και δηλώνει τον ανιχνευτή για το πρόσφατα επιλεγμένο κανάλι του. Ο ανιχνευτής θα στείλει έπειτα ένα νέο RREP με τις νέες πληροφορίες καναλιών στην πηγή που θα είναι σε θέση κατόπιν να επαναχρησιμοποιήσει την αλλοιωμένη πορεία χωρίς διατάραξη PU.

Αυτό το πρωτόκολλο είναι μία on-demand routing λύση για multi-hop multi-channel multi-radio cognitive radio networks. Η βασική έννοια σε αυτό το πρωτόκολλο είναι να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και να χρησιμοποιηθούν τα πολλαπλά διαθέσιμα κανάλια και συνδέει μέσω μιας ικανής στρατηγικής ανάθεσης και μιας επαρκούς διαδρομής. Επιπλέον, ένας ελαφρύς και τοπικός μηχανισμός συντήρησης αποκατάστασης έχει προταθεί. Αξιολογήθηκε το προτεινόμενο CR-AODV από την προσομοίωση σε μια τυχαία τοπολογία για τις γενικές δοκιμές απόδοσης. Στο μέλλον, θα εστιαστεί στο πώς να εισαχθεί η καθυστέρηση μετατροπής της μετατρέψιμης διεπαφής στο πρωτόκολλο και στην ελαχιστοποίηση των ραδιοφωνικών μεταδόσεων RERR για να μειωθούν τα γενικά έξοδα.

3.2.2. Το πρωτόκολλο BCCCS (Backup Channel and Cooperative Channel Switching On-Demand Routing Protocol)



Εικόνα 12: Το Πλαίσιο of BCCCS

Αρχικά εξηγούμε τη λύση στα τονισμένα προβλήματα. Με την υπόθεση του ενιαίου πομποδέκτη υπάρχει το έμφυτο κρυμμένο πρόβλημα κόμβων στο περιβάλλον πολλαπλών καναλιών λόγω της συχνής μετατροπής των καναλιών μεταξύ των διαφορετικών καναλιών στον ενιαίο πομποδέκτη [15]. Για να αποφύγουμε το πρόβλημα κώφωσης έχουμε υιοθετήσει τον απλουστευμένο περιορισμό στους μη επιτρέποντας στους διαδοχικούς κόμβους να αποκτήσουν περισσότερα από ένα κανάλια για την ίδια ροή.

Για να αποφύγουμε τη διαδικασία επαν-διαδρομών λόγω του απρόσιτου καναλιών προτείνουμε τον εφεδρικό μηχανισμό καναλιών δηλαδή όποιοι κόμβοι είναι σε προχωρημένη γνώση για το κανάλι να μεταβούν σε μια κατάσταση όπου το κανάλι αυτήν την περίοδο που χρησιμοποιείται γίνεται μη διαθέσιμο λόγω της δραστηριότητας του αρχικού χρήστη. Ο εφεδρικός μηχανισμός των καναλιών επιτρέπει τη συνεταιριστική μετατροπή καναλιών που αποδεικνύει μια αποδοτική λύση για τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν λόγω της ετερογένειας των καναλιών [16]. Οι γειτονικοί γνωστικοί κόμβοι μεταπηδούν σε ένα ενιαίο κανάλι κατά τρόπο συνεταιριστικό και επιτρέπουν σε έναν διαβιβάζοντας κόμβο για να βρει το ίδιο σύνολο γειτόνων σε ένα διαφορετικό κανάλι με τον όρο ότι αυτοί οι γείτονες μπορούν επίσης να συντονίσουν στο ίδιο δευτεροβάθμιο κανάλι.

Στο multi-hop cognitive radio ad hoc network, κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν ενιαίο γνωστικό πομποδέκτη με τις ικανότητες της συνειδητοποίησης και της ικανότητας αναδιαμόρφωσης φάσματος και όλοι οι κόμβοι καθορίζονται στη θέση. Η κινητικότητα στο δίκτυό μας αναφέρεται στο φάσμα handoff λόγω της αρχικής δραστηριότητας των χρηστών στην εξουσιοδοτημένη ζώνη του. Το διάγραμμα φραγμών (Εικ.12) περιγράφει το διαγώνιο πλαίσιο στρώματός μας και η μεγαλύτερη μέρος της εστίασής μας είναι στις δραστηριότητες στο ορθωμένο ορθογώνιο. Η προτεραιότητα του φάσματος γίνεται βάσει των μετρικών συνδέσεων. Η επιλογή καναλιών και της διαδρομής περιγράφονται παρακάτω.

Spectrum Sensing and control channel selection

Κάθε κόμβος αισθάνεται το φάσμα, διαιρεί τη διαθέσιμη ζώνη μέσα στα χρησιμοποιήσιμα κανάλια, σώζει τον κατάλογο των διαθέσιμων καναλιών και προτείνει τα κανάλια ανάλογα με την καταλληλότητά τους σύμφωνα με τις συνδέσεις ενάντια στις απαιτήσεις του QOS/application. Αυτός ο κατάλογος καναλιών ενημερώνεται περιοδικά και κάθε κόμβος επιλέγει επίσης ένα κανάλι ελέγχου και παραμένει συντονισμένο στο επιλεγμένο ελεγχόμενο κανάλι όταν δεν περιλαμβάνεται σε οποιαδήποτε μετάδοση και εάν ο κόμβος περιλαμβάνεται στη μετάδοση τότε συντονίζει για να ελέγξει το κανάλι περιοδικά μεταξύ της αλλαγής του καναλιού για να ελέγξει για οποιεσδήποτε πληροφορίες ελέγχου. Οι ασύρματες συσκευές απαιτούν 150μs με 200μs για να αλλάξουν ένα κανάλι που είναι αρκετά μικρό όταν συγκρίνεται με τη μεταβλητού μήκους μετάδοση μεταξύ των συσκευών

Routing procedure

Κάθε γνωστικός κόμβος στέλνει τις πλέον σημαντικές πληροφορίες καναλιών του σε όλους τους γειτονικούς κόμβους του για όλα τα διαθέσιμα κανάλια και αναγγέλλει το κανάλι ελέγχου του. Τώρα όλοι οι γείτονες γνωρίζουν το κανάλι ελέγχου του και μπορούν να έρθουν σε επαφή όποτε χρειάζεται on demand. Στην αρχική διαδικασία οργάνωσης Τα αιτήματα καναλιών (CREQ), η απάντηση καναλιών (CREP) και τα μηνύματα πληροφορίας των καναλιών (CINFO) ανταλλάσσονται μεταξύ όλων των κόμβων σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια. Αυτά τα μηνύματα περιέχουν τις πλέον σημαντικές πληροφορίες καναλιών συμπεριλαμβανομένου ενός αρχικού καναλιού χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και δευτεροβάθμιος ως εφεδρικό κανάλι. Κάθε κόμβος τώρα εκ των προτέρων γνωρίζει δύο

κανάλια για την επικοινωνία με κάθε έναν από το γειτονικό κόμβο του. Τα σχήματα μηνυμάτων είναι τα ακόλουθα:

- Αιτήματα καναλιών (CREQ): Το αίτημα για το μήνυμα καναλιών περιέχει το προσδιοριστικό (CRID) του αποστολέα του γειτονικού κόμβου.
- Απάντηση καναλιών (CREP): η απάντηση περιέχει CRID και του λήπτη και του αποστολέα, συνδέει το μετρικό και τον σημαντικό κατάλογο καναλιών.
- Πληροφορίες καναλιών (CINFO): Τα μηνύματα CINFO στέλνονται σε όλους τους γειτονικούς κόμβους σε όλα τα κανάλια όταν υπάρχει αλλαγή σε οποιοδήποτε κανάλι, καθώς αυτό είναι συνεχής διαδικασία για να ανανεώσει τα αισθητά κανάλια και κρατά στον κατάλογο μόνο αυτά τα κανάλια που είναι διαθέσιμα για να χρησιμοποιηθούν και τους δίνεται προτεραιότητα.

Route Discovery

Αρχικά όταν ένας κόμβος θέλει να αρχίσει μετάδοση, στέλνει το μήνυμα RREQ σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια σε όλους τους γείτονές του. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα αίτησης διαδρομής το διαβιβάζει σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια του και σώζει τις πληροφορίες για αυτήν την διαδρομή που ανακαλύφθηκε για τον καθορισμένο χρόνο και AODV χρησιμοποιείται χωρίς οποιαδήποτε αλλαγή για την καθιέρωση διαδρομών και το σκοπό συντήρησης. Η αντίστροφη πορεία καθιερώνεται κατά αυτόν τον τρόπο όπως όλος ο κόμβος αποθηκεύει τις πληροφορίες σχετικά με το αίτημα διαδρομών, τον δημιουργημένο κόμβο, τις πληροφορίες του previous hop και συνδέει τις πληροφορίες στο RREQ.

Route Reply

Το μήνυμα απάντησης διαδρομών στέλνεται μόνο από τον κόμβο προορισμού ή από τον κόμβο που έχει την είσοδο διαδρομών για τον κόμβο προορισμού. Η διαδρομή καθιερώνεται όπως στο AODV και τα κανάλια επιλέγονται βάση στη μετρική σύνδεση, την απαίτηση ροής και με το στόχο να αυξηθεί η ικανότητα δικτύων του ασύρματου δικτύου με την εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας των καναλιών.

Channel selection

Η απόφαση της ανάθεσης καναλιών πρέπει να ικανοποιήσει το στόχο μας την ικανότητα του δικτύου με την εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας των καναλιών και επίσης η παρέμβαση πρέπει να αποφευχθεί από τις συγκρούσεις ελεύθερης τοπολογίας. Για αυτόν το λόγο ένας πίνακας καναλιών χρησιμοποιείται, ο οποίος καταγράφει τους μετρητές για όλα τα διαθέσιμα κανάλια στο δίκτυο και κάθε ενημέρωση των κόμβων που παρουσιάζουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προώθησης του RREQ.

Κάθε κόμβος στην πορεία από την πηγή στον κόμβο προορισμού αυξάνεται ο μετρητής του συγκεκριμένου καναλιού από ένα εάν εκείνος ο κόμβος έχει ορίσει εκείνο το κανάλι σε οποιαδήποτε τρέχουσα ροή και όταν φθάνει το RREQ στον κόμβο προορισμού, αυτό έχει τις πληροφορίες του καναλιού που ορίζεται για τον τρόπο. Ο κόμβος προορισμού επιλέγει το λιγότερο χρησιμοποιημένο κανάλι για την προηγούμενη επικοινωνία και διαβιβάζει τις πληροφορίες στον προηγούμενο κόμβο, ο οποίος αποφάσισε έπειτα το κανάλι του βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών. Οι κύριοι σκοποί για τις αναθέσεις καναλιών είναι αυξημένη ικανότητα δικτύων με την εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας και με τη της ελεύθερης τοπολογίας που μειώνει την παρέμβαση.

3.2.3. CRP: A Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks

Η οργάνωση της διαδρομής στο πρωτόκολλο CRP αποτελείται από δύο στάδια (i) the spectrum selection stage, και (ii) next hop selection stage. Ο κόμβος πηγής μεταδίδει το RREQ πέρα από το κανάλι ελέγχου, και αυτό το πακέτο διαδίδεται στον προορισμό. Κάθε ενδιάμεσος προωθητής προσδιορίζει την καλύτερη δυνατή ζώνη φάσματος, και τα προτεινόμενα κανάλια μέσα σε εκείνη την ζώνη κατά τη διάρκεια της επιλογής φάσματος. Για να επιτρέψουμε αυτό, έχουμε προτείνει διάφορες μοναδικές CR μετρικές που είναι σταθμισμένες κατάλληλα σε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης για την επιλογή του φάσματος. Επιπλέον η λειτουργία γίνεται διαφορετικά για κάθε μια κατηγορία CR διαδρομής. Για παράδειγμα, για τη διαδρομή κατηγορίας I, η end-to-end latency των CR δικτύων είναι το βασικό μέλημα. Εδώ, το φάσμα που επιλέγεται από έναν υποψήφιο προωθητικό κόμβο πρέπει (i) να υποστηρίζει την υψηλότερη απόσταση διάδοσης, με τη (ii) μεγαλύτερη επιτρεπόμενη διάρκεια για τη διαβίβαση δεδομένων των προγραμμάτων ανίχνευσης των γειτονικών κόμβων. Συνεπώς, η λειτουργία βελτιστοποίησης για την κατηγορία I προσπαθεί να μεγιστοποιήσει αυτούς τους δύο παράγοντες κατά τη διάρκεια του σταδίου επιλογής φάσματος. Οι CR μετρικές για την επιλογή του φάσματος είναι:

Probability of bandwidth availability

Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού μιας νέας διαδρομής, η πηγή διευκρινίζει το επιθυμητό μέσο εύρος ζώνης (ψD) στο πακέτο RREQ. Υποθέτουμε ότι τα εύρη ζώνης καναλιών μπορούν να καθοριστούν διαφορετικά για κάθε μια από τις πιθανές ζώνες φάσματος N_s . Οι υποψήφιοι CR χρήστες αξιολογούν εάν η επιλεγμένη ζώνη φάσματος μπορεί πιθανότατα να εγγυηθεί τη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης.

Variance in the number of bits sent over the link

Τα πρόσφατα πειράματα στο στρώμα μεταφορών στα CR έχουν καταδείξει τη δυσκολία στην προσαρμογή στις μεγάλες διακυμάνσεις εύρους ζώνης [17] όταν αλλάζει η διαθεσιμότητα φάσματος. Στο CRP, τα κανάλια που επιλέγονται στο φάσμα μπορούν, κατά περιόδους να γίνουν μη διαθέσιμα και αυτό οδηγεί στην ανεπιθύμητη end-end απόδοση. Η γενική διαφορά στον αριθμό των bits που στέλνονται πέρα από τη σύνδεση (V kB) είναι μια συλλογική λειτουργία του εύρους ζώνης των επιλεγμένων καναλιών για το φάσμα K , και η τρέχουσα διαθεσιμότητά τους για τη CR μετάδοση.

Spectrum propagation characteristics

Οι συχνότητες στη χαμηλότερη σειρά MHz έχουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά διάδοσης όπου η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ταξιδεύει μακρύτερα με τη χαμηλότερη μείωση. Αυτό το φαινόμενο βοηθά επίσης στη μείωση της per-hop απόστασης με τέτοιον τρόπο που επιτρέπει στον προορισμό για να επιτευχθεί σε λιγότερους hops που βελτιώνει τη end-to-end καθυστέρηση. Όταν η καθυστέρηση είναι παράγοντας, τα CR δίκτυα πρέπει να προτιμήσουν το φάσμα με τα καλύτερα χαρακτηριστικά διάδοσης.

PU receiver protection:

Οι CR χρήστες αποφασίζουν σχετικά με τη διαθεσιμότητα του φάσματος βασισμένου στην ανίχνευση του PU σήματος. Κατά συνέπεια, στηρίζονται πρώτιστα στην ανίχνευση συσκευών αποστολής σημάτων, και δεν αποτελούν την πιθανή παρέμβαση με PU δέκτες. Αν και έχουν υπάρξει μερικές αρχικές προσπάθειες προς την ανίχνευση δεκτών βασισμένη στη

δύναμη διαρροής, τέτοιες τεχνικές δεν είναι εγγυημένες για να είναι εφαρμόσιμες σε γενικά σενάρια. Επιπλέον, το φάσμα που αισθάνεται πάσχει από τα περιστασιακά γεγονότα που χάνουν την ανίχνευση που μπορούν σοβαρά να υπονομεύσουν τη PU προστασία. Για να χαμηλώσουν την πιθανότητα της παρέμβασης, οι διαδρομές για το CR δίκτυο μπορούν να επιλεχθούν έτσι που περνούν μέσω των περιοχών που έχουν την ελάχιστη επικάλυψη μεταξύ της μετάδοσης των περιοχών κάλυψης των CR χρηστών και των PUs. Η περιοχή της επικάλυψης αντιπροσωπεύει την περιοχή όπου οι PU δέκτες μπορούν να είναι παρόντες, και επομένως πρέπει να ελαχιστοποιηθούν σε κάθε προώθηση CR χρήστη στην επιλεγμένη διαδρομή για την προστασία αυτών των δεκτών.

Spectrum sensing consideration

Οι CR χρήστες αναλαμβάνονται το φάσμα σε περιοδικά διαστήματα για να διατηρήσουν ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με την κατοχή φάσματος. Κατά τη διάρκεια της αντίληψης, ειδικά για τις συνήθως χρησιμοποιούμενες τεχνικές ενεργειακής ανίχνευσης, οι παρακείμενοι CR χρήστες πρέπει να σιωπήσουν. Κατά συνέπεια, η καθυστέρηση στη πορεία επηρεάζεται αρκετά όταν οι CR χρήστες κατά μήκος του πακέτου που διαβιβάζει την πορεία είναι ανίκανοι να διαβιβάσουν εξ αιτίας της επιβολής της ζώνης σιωπής. Η αποτελεσματική διάρκεια κατά την οποία η μετάδοση επιτρέπεται στον υποψήφιο προωθητικό τον κόμβο, για μια δεδομένη επιλογή του φάσματος, είναι ως εκ τούτου ένα σημαντικό κριτήριο για τη end-to-end καθυστέρηση του CR δικτύου.

Το επόμενο στάδιο είναι the next hop selection stage, όπου οι υποψήφιοι CR χρήστες ταξινομούνται ανάλογα με την επιλογή του φάσματος και των τοπικών δικτύων και φυσικών περιβαλλοντικών συνθηκών. Αυτές οι τάξεις καθορίζουν ποιοι CR χρήστες παίρνουν την πρωτοβουλία στον επόμενο σχηματισμό διαδρομών.

Για παράδειγμα, στο σχήμα, οι PU πομποί αποστολής σήματος i και j χωρίζονται από την απόσταση $D_{PU\ iX}$. Οι σκιασμένοι κύκλοι δείχνουν τις σειρές κάλυψής τους στις οποίες PU οι δέκτες μπορούν να είναι παρόντες, αν και οι θέσεις τους είναι άγνωστες στους CR χρήστες x , y , και z .

Σημειώστε ότι ο χρήστης x έχει τη μεγαλύτερη επικάλυψη της ακτίνας μετάδοσής του, που δίνεται από το D_k με τις περιοχές κάλυψης των PU συσκευών αποστολής σημάτων, το οποίο υπονοεί την υψηλότερη δυνατότητα της παρέμβασης με τους PU δέκτες. Συνεπώς, έχει επίσης μια χαμηλότερη πρωτοβουλία από το z για την αποστολή των πακέτων. Υποθέστε ότι το RREQ μεταδίδεται από τον CR χρήστη y , και λαμβάνεται και από τους χρήστες x και z . Δεδομένου ότι ο CR χρήστης z έχει την υψηλότερη πρωτοβουλία σε σύγκριση με το x , έχει επίσης μια χαμηλότερη καθυστέρηση αποστολής. Ως εκ τούτου, διαβιβάζει το RREQ νωρίτερα από το χρήστη x . Οι χρόνοι άφιξης των RREQs στον προορισμό (κατά τη διάρκεια αρκετών, ενδεχομένως χωριστών πορειών) εξαρτώνται από τις καθυστερήσεις. Ως εκ τούτου, η προηγούμενη άφιξη των RREQs αντιπροσωπεύει επίσης τις πορείες που περνούν μέσω των περιοχών που προτιμώνται για τη CR λειτουργία.

Αυτή η μέθοδος μειώνει τα γενικά έξοδα της διαμόρφωσης των διαδρομών σε όλα τα πιθανά κανάλια πέρα από διάφορες διαφορετικές ζώνες φάσματος. Προσπαθεί επίσης να χαρτογραφήσει τα χαρακτηριστικά φάσματος στους ενδιάμεσους hops στους χρόνους άφιξης RREQ, με αυτόν τον τρόπο μειώνοντας και την ανάγκη για μεταφορά μεγάλου όγκου πληροφοριών του κόμβων πέρα από το πακέτο RREQ, και την τελική υπολογιστική πολυπλοκότητα στον προορισμό.

Σε αυτήν την εργασία, υποθέτουμε ότι η δικτυακή αρχιτεκτονική αποτελείται από τις στάσιμες PU συσκευές αποστολής σημάτων με τις γνωστές θέσεις και τις μέγιστες σειρές κάλυψης, όπως βλέπει στην περίπτωση για τους πύργους τηλεοπτικής μετάδοσης. Στο σχήμα, αυτό υπονοεί τις θέσεις του PU i και το j είναι γνωστές, και η σειρά r_k^1 να είναι καθορισμένη.

Οι CR χρήστες είναι κινητοί, ενήμεροι, και δεν έχουν καμία γνώση από τους PU δέκτες. Επιπλέον, η στατιστική γνώση της διαθεσιμότητας καναλιών υποτίθεται για τις διαφορετικές ζώνες φάσματος.

Προτείνεται αυτό το πρωτόκολλο δρομολόγησης CRP το οποίο συγκεκριμένα εξετάζει τα προβλήματα της προστασίας των PU δεκτών, διαφοροποίηση υπηρεσιών στις CR διαδρομές, και κοινή επιλογή διαδρομών φάσματος. Το πρωτόκολλο επιτρέπει δύο κατηγορίες διαδρομών – κατηγορία I που παρέχουν την καλύτερη απόδοση CR δικτύων ενώ η κατηγορία II στοχεύει να επιτύχει ένα υψηλότερο μέτρο της προστασίας για τους PUs. Η αξιολόγηση απόδοσής παρουσιάζει την ανταλλαγή που υφίσταται στην CR απόδοση για να μειώσει την παρέμβαση στους PU δέκτες, με αυτόν τον τρόπο παρακινώντας τις χωριστές κατηγορίες δρομολόγησης που βασίζονται στα διευκρινισμένα όρια λειτουργικότητας του CR δικτύου.

3.2.4. An Opportunistic Service Differentiation Routing Protocol for Cognitive Radio Networks (OSDRP)

Route Discovery

Η ανακάλυψη διαδρομών αρχίζει από τη διαβίβαση κόμβου μέσω της μετάδοσης των πακέτων RREQ. Οι διαδρομές αποθηκεύονται στις κρύπτες διαδρομών στους κόμβους και ελέγχονται για μια έγκυρη διαδρομή πριν αρχίζουν την ανακάλυψη διαδρομών. Κάθε πακέτο RREQ περιέχει ένα αρχείο που απαριθμεί το κανάλι διευθύνσεων και συχνότητας κάθε ενδιάμεσου κόμβου μέσω του οποίου αυτό το ιδιαίτερο αντίγραφο του μηνύματος RREQ έχει διαβιβαστεί. Το σχήμα του πακέτου ανακαλύψεων διαδρομών τροποποιήθηκε από την έκδοση DSR για να περιλάβει δύο πρόσθετους τομείς, «delay» και «MEATT».

Κάθε κόμβος, επάνω στη λήψη ενός πακέτου RREQ, επισυνάπτει τη διεύθυνση και τη συχνότητα του καναλιού στο αρχείο διαδρομών στο πακέτο RREQ και ενημερώνει την καθυστέρηση και το MEATT και τις ξανά μεταδίδει το πακέτο στους γείτονές του εάν δεν έχει διαβιβάσει ήδη ή εάν ο κόμβος δεν είναι ο κόμβος προορισμού. Η καθυστέρηση σε κάθε κόμβο αποτελείται από δύο συστατικά, την καθυστέρηση αλλαγής και την καθυστέρηση αναμονής. Switching delay d_{switch} (καθυστέρηση αλλαγής)

Η καθυστέρηση αλλαγής τίθεται μηδέν εάν ένας κόμβος N_i λαμβάνει συχνότητα καθορίζεται στο ίδιο κανάλι με τον προηγούμενο κόμβο N_{i-1} που διαβιβάζει τη συχνότητα. Διαφορετικά, η καθυστέρηση μετατροπής τίθεται ως $d_{\text{switch}} = t_d$ ms.

Average queuing delay d_{queue}

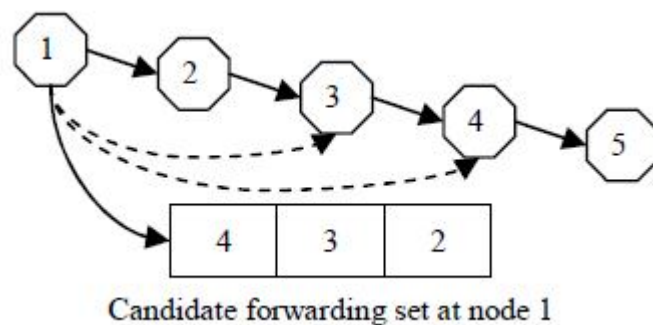
Το στρώμα της MAC του N_i κόμβου παρακολουθεί τη στιγμή όταν παραλαμβάνεται ένα πακέτο και τη στιγμή όταν στέλνεται. Αφήνει τη στιγμή όταν ένα πακέτο i παραλαμβάνεται είναι t_{receive} , και τη στιγμή που το πακέτο στέλνεται να είναι t_{send} . Επομένως, η μέση καθυστέρηση $d_{\text{queue}} = \sum t_{\text{send}} - t_{\text{receive}} / n$, αναμονής όπου το n είναι το μέγεθος παραθύρων των δειγμάτων.

Όταν ο κόμβος προορισμού λαμβάνει το πακέτο RREQ, το Route Reply ή ένα πακέτο RREP θα παραχθεί με ένα αντίγραφο του συσσωρευμένου αρχείου διαδρομών από το πακέτο RREQ. Η απάντηση θα είναι στέλνει στον κόμβο πηγής μέσω της αντίστροφης διαδρομής που το πακέτο RREQ είχε διαβεί. Όταν το πακέτο RREP παραλαμβάνεται από τον κόμβο πηγής, οι πληροφορίες διαδρομής, η καθυστέρηση και οι πληροφορίες MEATT μέσα σε αυτό, θα χρησιμοποιηθούν για να ενημερώσουν την κρύπτη διαδρομών. Οι πληροφορίες καθυστέρησης μέσα στο πακέτο RREP απεικονίζουν το ποσό των καθυστερήσεων που προκαλούνται με την αλλαγή και την αναμονή για κάθε κόμβο κατά μήκος της διαδρομής και

ορίζονται ως $Delay(n_0, n_h) = \sum h(d_{switch} + d_{queue})$ όπου το h είναι ο αριθμός των hops μεταξύ των n_0 και του n_h . Τέλος, οι πληροφορίες διαδρομών θα ταξινομηθούν κατά σειρά ανόδου της καθυστέρησης. Η συντήρηση διαδρομών εκτελείται για κάθε έγκυρη διαδρομή στην κρύπτη. Ο τομέας MEATT κάθε διαδρομής μειώνεται μέχρι 1 κάθε δευτερόλεπτο. Μια φορά η αξία των τομέων MEATT πέφτει στο μηδέν, η διαδρομή εισόδου θα διαγραφεί από την κρύπτη.

Route Decision

Η ελάχιστη καθυστέρηση - η μέγιστη διαδρομή σταθερότητας επιλέγεται μεταξύ των ταξινομημένων πληροφοριών διαδρομών. Μια διαδρομή είναι σταθερή όταν MEATT του είναι μεγαλύτερο από τον απαραίτητο χρόνο ροής t_{flow} της εξεταζόμενης κυκλοφοριακής ροής. Από τον κατάλογο διαδρομών με $MEATT > t_{flow}$, αυτός με την ελάχιστη καθυστέρηση θα επιλεγεί.



Εικόνα 13: CFNs Selection

Differentiated Transmission

Η διαφοροποιημένη υπηρεσία επιτυγχάνεται μέσω ORTPC. Θεωρούμε ότι οι κυκλοφοριακές ροές έχουν 3 διαφορετικές προτεραιότητες κυκλοφορίας c_1 , c_2 και c_3 με το αντίστοιχο ελάχιστο απαραίτητο μέγεθος στοιχείων 24, 12 και 6 Mbps, αντίστοιχα. Με ένα δεδομένο $BER(\leq 10^{-5})$, ένα n_i κόμβων που διαβιβάζει την κυκλοφορία σε έναν άλλο κόμβο n_j με το c_t προτεραιότητας μπορείτε να υπολογίσετε την απαραίτητη δύναμη p_i συσκευών αποστολής σημάτων βασισμένη στο ελάχιστο απαραίτητο ποσοστό t_t , αντίστοιχο SINR κατώτατο όριο γτ στοιχείων χρησιμοποιώντας $SINR_{ij} = P_i G_{ij} / (N_0 + \text{Noise}) \geq \gamma_0$ όπου G_{ij} δείχνει το κέρδος συνδέσεων από το n_i κόμβων στον κόμβο n_j , το N_0 δείχνει το θερμικό θόρυβο του κόμβου n_j και ο θόρυβος είναι ο μετρημένος θόρυβος λόγω άλλων πηγών στο n_j .

Η κυκλοφορία υψηλής προτεραιότητας είναι πιθανό να απαιτήσει τη μεγαλύτερη δύναμη μετάδοσης και μια αντίστοιχη αύξηση στη σειρά μετάδοσης. Το OSDRP χρησιμοποιεί αυτό το γεγονός για να ποικίλει τη σειρά της επιλογής CFNs σύμφωνα με την προτεραιότητα κυκλοφορίας. Παραδείγματος χάριν, για να επιλέξει το CFNs για την κυκλοφορία με το CT προτεραιότητας, ο n_i κόμβος εξετάζει την υπόλοιπη διαβαίνοντας πορεία για να προσδιορίσει τους κόμβους μέσα σε έναν ορισμένο hop count (n_i+1 , n_i+2 , ..., $n_i+\text{range}$). Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα, όπου ο κόμβος 1 διαβιβάζει την κυκλοφορία στον κόμβο 5. Ο υποψήφιος που τίθεται στον κόμβο 1 είναι 4, 3 και 2 για μια επιλογή κυμαίνονται 3 hops.

Η CFN στρατηγική επιλογή έχει τρία οφέλη έναντι των πρωτοκόλλων OR. Αρχικά, η επιλογή CFNs είναι απλούστερη όπως μόνο οι κόμβοι περαιτέρω κατά μήκος της επιλεγμένης πορείας εξετάζονται. Αφετέρου, οι υποψήφιοι κόμβοι είναι σειρά που περιορίζεται σύμφωνα με την προτεραιότητα κυκλοφορίας και αυτό μπορεί να παρέχει τη διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Τέλος, οι διπλές μεταδόσεις ελαχιστοποιούνται δεδομένου ότι οι κόμβοι δεν θα επιλεγούν στις ενδεχόμενες πορείες απόκλισης.

Για να εξασφαλίσουμε ότι μόνο ο κόμβος ο κοντινότερος στον προορισμό εκτελεί την αποστολή, εφαρμόζουμε το πλέον σημαντικό σχέδιο αναγνώρισης [18] όπου οι υπονήφιοι κόμβοι αναγνωρίζουν την επιτυχή υποδοχή ενός πακέτου με έναν πλέον σημαντικό τρόπο σύμφωνα με την ακολουθία που υποδεικνύεται στο πακέτο, δηλ. ένας κόμβος υπονηφίων με την πιο υψηλή προτεραιότητα θα στείλει την αναγνώρισή του ενώπιον οποιωνδήποτε χαμηλότερων υπονηφίων προτεραιότητας. Για το παράδειγμα στην (Εικ. 13), ο κόμβος 4 θα στείλει την αναγνώρισή του πριν από τον κόμβο 3, και ο κόμβος 3 θα στείλει την αναγνώρισή του πριν από τον κόμβο 2.

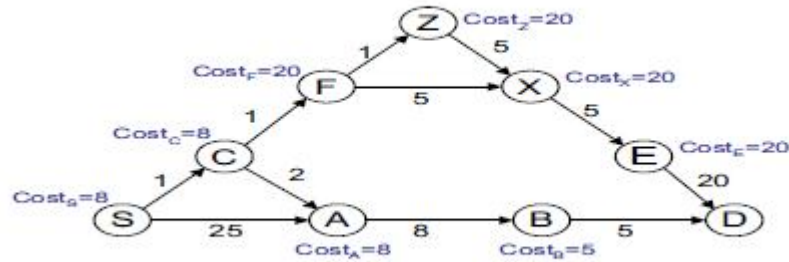
Η ανάλυση πολυπλοκότητας για OSDRP είναι παρόμοια με DSR. Για ένα δίκτυο που αποτελείται από τους N κόμβους και τη διάμετρο d , η χρονική πολυπλοκότητα για την αρχικοποίηση διαδρομών είναι $O(2d)$. Δεδομένου ότι OSDRP διατηρεί τις πολλαπλάσιες διαδρομές στον ίδιο προορισμό, η χρονική πολυπλοκότητα μετά από μια αποτυχία συνδέσεων είναι θ για μια κρύπτη και το $O(2d)$. Οι περιπλοκές επικοινωνίας και για την έναρξη και μετά από μια αποτυχία συνδέσεων είναι και τα δύο $O(2N)$.

Το σχέδιό χρησιμοποιεί την πολύ-μετρική δρομολόγηση μαζί με την εκτίμηση SOP της διαθεσιμότητας για να ανακαλύψει την ελάχιστη καθυστέρηση - μέγιστη διαδρομή σταθερότητας. Επιπλέον, TPC και OR εκτελείται για να παρέχει τη διαφοροποιημένη υπηρεσία για τις διαφορετικές προτεραιότητες κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το προτεινόμενο σχέδιο OSDRP μπορεί να παρέχει μια χαμηλότερη end-to-end καθυστέρηση για τις κυκλοφοριακές ροές σε διαφορετικά επίπεδα διαθεσιμότητας φάσματος πέρα από διαφορετικό PRNs. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης επίσης δείχνουν ότι το OSDRP μπορεί να παρέχει τις σαφείς διαφοροποιήσεις υπηρεσιών για τις διαφορετικές κατηγορίες κυκλοφορίας κάτω από τα διάφορα σενάρια.

3.2.5 Το SAMER πρωτόκολλο

Εδώ παρουσιάζεται το πρωτόκολλο Samer, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για cognitive radio mesh networks, των οποίων στόχος είναι να χρησιμοποιεί καιροσκοπικά το φάσμα του δικτύου, με το να δρομολογεί σε μονοπάτια με υψηλότερη διαθεσιμότητα φάσματος, ενώ ταυτόχρονα, επιτυγχάνει τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα με το να μην αποκλίνει από το συντομότερο hop-count μονοπάτι.

Το Samer δημιουργεί ένα προωθητικό πλέγμα το οποίο προσαρμόζεται περιοδικά σύμφωνα με την ένταση του φάσματος, και περιστασιακά δρομολογεί πακέτα σ' αυτό το πλέγμα. Το πλέγμα είναι συγκεντρωμένο γύρω από τη μακροπρόθεσμη συντομότερη διαδρομή (βάση του hopcount), αλλά περιστασιακά επεκτείνεται ή συρρικνώνεται κατά περιόδους για να εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο φάσμα. Εν ολίγοις, το πρωτόκολλο Samer επιλέγει μία προσέγγιση δρομολόγησης δύο επιπέδων και "ισορροπεί" μεταξύ της μακροπρόθεσμης βέλτιστης χρήσης (με βάση το hop count) και του βραχυπρόθεσμου μικρότερου ευκαιριακού κέρδους (με βάση την μεγαλύτερη διαθεσιμότητα φάσματος). Το Samer έχει δύο κύριες συνιστώσες:



Εικόνα 14: Cross-layer routing

Dynamic Candidate Mesh

Κάθε κόμβος στο δίκτυο υπολογίζει ένα κόστος για τον προορισμό D (για κάθε προορισμό κάθε κόμβος υπολογίζει ένα διαφορετικό κόστος). Το κόστος αυτό αντικατοπτρίζει τη διαθεσιμότητα του φάσματος από το μονοπάτι με το υψηλότερο φάσμα των οποίων το μήκος είναι μικρότερο από H hops. Το H αυξάνεται έως ότου βρει στον κόμβο i ένα κόστος όπου θα ισχύει το $Cost_i \leq C_{max}$. Το C_{max} θεωρείται το μέγιστο επιτρεπόμενο κόστος στον προορισμό. Επίσης, κάθε κόμβος φτιάχνει ένα σύνολο υποψηφίων προωθητικών κόμβων προς τον D, περιλαμβάνοντας όλους τους γειτονικούς κόμβους του των οποίων το κόστος είναι λιγότερο από ένα όριο C. Έτσι, το πλέγμα είναι χτισμένο γύρω από το συντομότερο hop count και προσαρμόζεται δυναμικά στις αλλαγές του φάσματος.

Opportunistic Forwarding

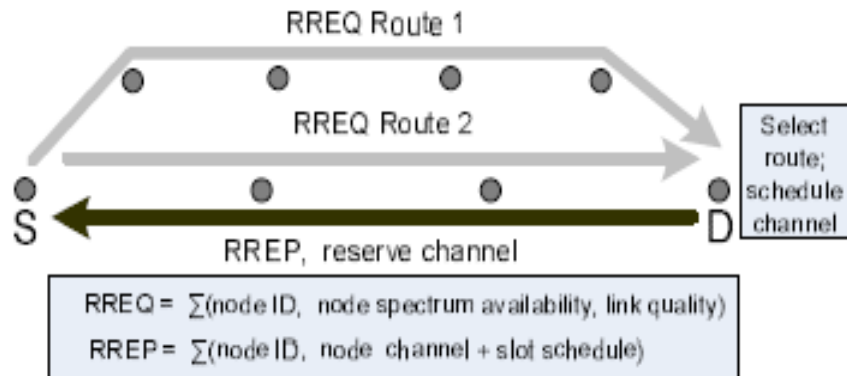
Το Sameer περιστασιακά προωθεί πακέτα σε όλες τις κατευθύνσεις με το υψηλότερο διαθέσιμο φάσμα. Μετά την λήψη ενός πακέτου, ο κόμβος προώθησης επιλέγει από τις κατευθύνσεις που περιλαμβάνονται, αυτή με την υψηλότερη διαθεσιμότητα φάσματος. Για τον υπολογισμό του διαθέσιμου φάσματος χρησιμοποιούμε το PSA όπως ορίζεται στο IV-B. Στόχος του PSA είναι να συλλάβει 1) την τοπική διαθεσιμότητα φάσματος σε έναν κόμβο i η οποία εξαρτάται α) από τον αριθμό των διαθέσιμων φασματικών φραγμών στον i και από το εύρος ζώνης τους και β) από τη διαμάχη των δευτερευόντων χρηστών. 2) Την ποιότητα του φράγματος των φραγμών. Η ποιότητα του αναφέρεται στο ποσοστό του εύρους ζώνης και τις απώλειες. Το ποσοστό της απώλειας εξαρτάται από τη συχνότητα και από τις παρεμβάσεις των χρηστών.

Το Sameer επιτυγχάνει την ισορροπία μεταξύ της μακροπρόθεσμης σταθερότητας καθώς οι διαδρομές για τον προορισμό δεν εκτρέπουν πολύ από την συντομότερη διαδρομή και βραχυπρόθεσμη περιστασιακή αξιοποίηση του φάσματος.

Προτείνεται το Sameer γιατί είναι αναμφισβήτητο το πρώτο πρωτόκολλο δρομολόγησης που ασχολείται με δύο νέα θέματα δρομολόγησης στα CRNET: τη δυναμική διάθεση φάσματος χωρίς την έννοια του «channelization» στα παραδοσιακά δίκτυα πλέγματος και τις ανταλλαγές μεταξύ μακροπρόθεσμων σταθερών διαδρομών και βραχυπρόθεσμων περιστασιακών δρομολογήσεων. Ο τελικός στόχος είναι να παρέχει το βέλτιστο φάσμα δρομολόγησης μακροπρόθεσμα. Οι αξιολογήσεις μας έχουν δείξει πως το Sameer είναι μια λύση στη δρομολόγηση που μπορεί να παρέχει καλύτερη απόδοση σε CRNET.

3.2.6. Το SPEAR Πρωτόκολλο

Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε λεπτομερώς το πρωτόκολλο SPEAR δείχνοντας το υψηλό επίπεδο λειτουργίας του. Για την εύκολη κατανόηση του πρωτοκόλλου χρησιμοποιούμε το παρακάτω παράδειγμα.



Εικόνα 15: Επικοινωνία μεταξύ των κόμβων S και D με SPEAR

Όπως φαίνεται στην Εικ.15, ο κόμβος S ξεκινά μία multi-hop διαδρομή χωρίς παρεμβολές προς τον κόμβο D.

Αρχικά ο κόμβος S ξεκινά μια σύνδεση με τον D εκτελώντας Spectrum-aware Route Discovery. Στέλνει ένα μήνυμα για να ανακαλύψει ποιοι είναι οι γειτονικοί κόμβοι, όπως γίνεται στον AODV [19]. Εκτός από τον εντοπισμό της διαδρομής που οδηγεί στον D, αυτά τα μηνύματα μεταφέρουν πληροφορίες για τα διαθέσιμα κανάλια κάθε κόμβου (αυτά που δεν χρησιμοποιούνται από τους χρήστες και αυτά που δεν είναι κατειλημμένα από άλλες ροές). Σε αντίθεση με το AODV, το SPEAR επιτρέπει πολλαπλές διαδρομές για να φτάσει στον τελικό προορισμό. Για να αποφευχθεί η συμφόρηση, οι κόμβοι μειώνουν τις διαδρομές και χρησιμοποιούν per-flow state για να περιορίσει τον αριθμό των μονοπατιών που ανακαλύφθηκαν.

Ύστερα, ο κόμβος D χρησιμοποιεί το Route Selection and Scheduling όπου συλλέγεται ο αριθμός των διαδρομών που έχουν βρεθεί και επιλέγει τη βέλτιστη διαδρομή, με βάση το μέγιστο end-to-end throughput, το hop count, και άλλες πιθανές μεταβλητές [20]. Στην συνέχεια ο D υπολογίζει τη βέλτιστη επιλογή καναλιών για την διαδρομή και ενσωματώνει την επιλογή των καναλιών και το πρωτόκολλο MAC για να τα χρησιμοποιήσει σαν απάντηση προς τον S για το μήνυμα που έχει σταλεί. Έπειτα, κατά τη διαδρομή, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί το Route Setup and Channel Reservation αναλύοντας τις πληροφορίες στο απαντητικό μήνυμα του D, το οποίο καθορίζει ποια κανάλια θα χρησιμοποιηθούν, προωθώντας έτσι ένα σαφές μήνυμα προς όλους τους γείτονες για το κανάλι που θα ακολουθηθεί. Τέλος, τυχόν μεταβολές στη διαθεσιμότητα των καναλιών από τους χρήστες, θα προσαρμοστούν από τους κόμβους τροποποιώντας την αρχική τους κατάσταση, για να διατηρήσουν τη συνδεσιμότητα. Αν αποτύχει η προσαρμογή, το πρωτόκολλο SPEAR επικαλείται μηχανισμούς επιδιόρθωσης διαδρομής για την αποκατάσταση του μονοπατιού.

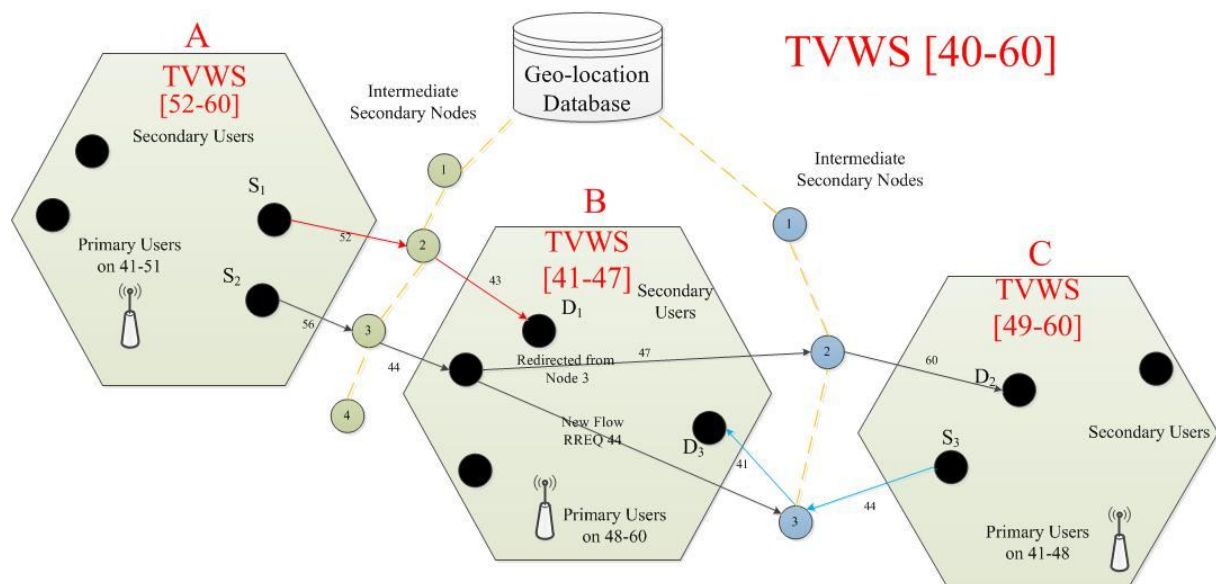
Προτείνεται το νέο πρωτόκολλο SPEAR (SPEctrum-Aware Routing), το οποίο υποστηρίζει τη μετάδοση πακέτων με μεγάλο throughput παρουσία ετερογενούς φάσματος. Ενσωματώνει την ανακάλυψη φάσματος με την ανακάλυψη διαδρομών για να αντιμετωπιστεί η ετερογένεια του φάσματος και να αφήσει τους κόμβους να συντονιστούν για να ορίσουν τα κανάλια έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η παρέμβαση και να επιτυγχάνεται βέλτιστο throughput και γενικά βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων καναλιών. Η ανακάλυψη της

διαδρομής και ο συντονισμός των καναλιών, διανέμει και υφίσταται χαμηλή υπολογιστική και επικοινωνιακή πολυπλοκότητα.

4. Προτεινόμενο πρωτόκολλο

4.1 Περιγραφή προτεινόμενου πρωτόκολλου δρομολόγησης για τα Ad hoc cognitive radio

Αυτό το επιμέρους κεφάλαιο αναλύει την περιγραφή ενός σεναρίου με βάση το φάσμα των κοινών μοντέλων αναφοράς CR να λειτουργήσει ως βάση για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης για να ξεπεράσουν τις προκλήσεις της έρευνας που περιγράφεται ανωτέρω. Στο πλαίσιο αυτό, η Εικόνα 16 απεικονίζει ένα σενάριο προσομοίωσης, όπου υπάρχουν δευτερεύοντες χρήστες διάσπαρτα σε τρεις γεωγραφικές περιοχές (π.χ. A, B και C στην Εικόνα 16) με διαφορετική TVWS διαθεσιμότητα. Οι δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονται στην πρώτη γεωγραφική περιοχή καιροσκοπικά λειτουργούν με τη χρήση καναλιών από 52 έως 60, ενώ τα υπόλοιπα κανάλια αποκλειστικά για χρήση από τους βασικούς χρήστες. Επίσης, οι δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονται στη δεύτερη και τρίτη γεωγραφική περιοχή είναι σε θέση να μεταδώσουν στα κανάλια 41-47 και 49-60, αντίστοιχα. Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης, οι δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονται εκτός των περιοχών αυτών, είναι σε θέση να λειτουργούν με όλα τα διαθέσιμα κανάλια (δηλ. κανάλια 40-60) και να ενεργούν ως συντονιστές κόμβοι (ενδιάμεσοι δευτερεύοντες κόμβοι στην Εικόνα 16). Αυτοί οι κόμβοι έχουν ενισχυθεί με έναν μηχανισμό συντονισμού που να επιτρέπει να προσδιοριστεί δρομολόγηση μονοπάτια μεταξύ δευτερεύοντων χρηστών με διαφορετική διαθεσιμότητα TVWS στις ζώνες A, B και C. Οι κόμβοι συντονισμού έχουν δυνατότητες ανίχνευσης και συνδέονται με μια βάση δεδομένων Γεω-τοποθεσίας που περιλαμβάνουν την TVWS διαθεσιμότητα για όλες τις γεωγραφικές τοποθεσίες.

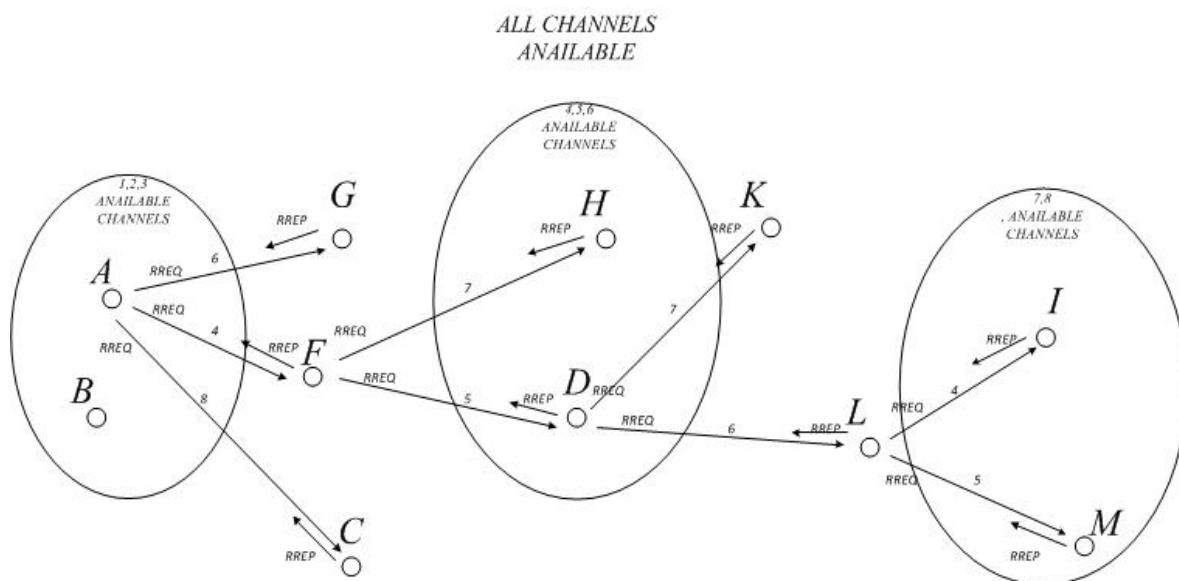


Εικόνα 16: Δρομολόγηση βάση της διαθεσιμότητας των TVWS

Αυτό το σενάριο προσομοίωσης περιλαμβάνει τρεις δευτεροβάθμιους χρήστες πηγής (δηλαδή S1, S2 και S3 χρήστες στην Εικόνα 16) που επιθυμούν να παραδώσουν τη ροή δεδομένων προς τον προορισμό που αντιστοιχούν στους δευτερεύοντες χρήστες (δηλαδή D1, D2 και D3 χρήστες στην Εικόνα 16) που βρίσκονται σε γεωγραφικές περιοχές με ετερογενή TVWS διαθεσιμότητα. Η κύρια πρόκληση σε μία τέτοια ad-hoc CR δικτύου αρχιτεκτονική είναι η ετερογένεια του φάσματος των διαθέσιμων TVWS μεταξύ γειτονικών περιοχών, που απαγορεύει στους δευτεροβάθμιους χρήστες να επικοινωνούν, εφόσον δεν υπάρχει CCC. Σε

μια τέτοια περίπτωση, οι κόμβοι συντονισμού θα λειτουργούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι μεταξύ πηγής και προορισμού των δευτερευόντων χρηστών, συντονίζοντας τη ροή δεδομένων και θα αποφασίζουν το βέλτιστο μονοπάτι δρομολόγησης που πρέπει να ακολουθηθεί. Σύμφωνα με το σενάριο προσομοίωσης που απεικονίζεται στην Εικόνα 16, όταν ο δευτερεύων χρήστης S1 επιθυμεί να μεταδώσει τις ροές δεδομένων προς τον δευτερεύων χρήστη D1, επικοινωνεί πρώτα με τον κόμβο συντονισμού 2 στο κανάλι 52, το οποίο είναι υπεύθυνο για να δρομολογήσει τη ροή δεδομένων στο D1 επιτρέποντας την αλλαγή στο κανάλι 43. Επιπλέον, ο δευτερεύων χρήστης S2, επιθυμεί, την ίδια στιγμή να μεταδώσει τις ροές δεδομένων προς τον δευτερεύων χρήστη D2 (Εικ. 16). Στην περίπτωση αυτή, ο συντονιστής του κόμβου 3 βρίσκεται μεταξύ γεωγραφικών περιοχών B και C δεν είναι σε θέση να επεξεργαστεί τις ροές δεδομένων από την S2, αφού εξυπηρετεί την ίδια στιγμή ροές δεδομένων που προέρχονται από τους δευτερεύων χρήστες S3 με προορισμό τους δευτερεύων χρήστες D3. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι ροές δεδομένων κατευθύνονται προς τον κόμβο συντονισμού 2, το οποίο είναι στη συνέχεια υπεύθυνο για να επικοινωνούν με τον D2 στο κανάλι 60. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι όλοι οι κόμβοι συντονισμού που συνδέονται με την TVWS βάση δεδομένων Γεωτοποθεσίας, μέσω του CCC (δηλαδή το κανάλι 40).

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο είναι ένα on-demand protocol το οποίο είναι βασισμένο στο πρωτόκολλο Dynamic Source Routing DSR και στο Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) protocol. Στα γνωστικά δίκτυα, μια από τις προκλήσεις είναι πώς να βρει ένα κοινό κανάλι ελέγχου για να διαβιβάσει τα μηνύματα RREQ, στο παράδειγμα μας θα δείξουμε πώς γίνεται η μετάδοση μηνυμάτων σε διαφορετικά κανάλια. Η διαδικασία δρομολόγησης αρχίζει όταν χρειάζεται να επικοινωνήσουν δύο κόμβοι, οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικό κανάλι. Έχοντας μερικές πληροφορίες, από τη μελέτη πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα cognitive radio, για τις δυνατότητες που μπορούν να έχουν οι κόμβοι, με ώθηση να προτείνω ένα πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση της δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί με βάση την επιλογή του συντομότερου μονοπατιού από την πηγή στον προορισμό, την επιλογή με την υψηλότερη διαθεσιμότητα φάσματος, την απομνημόνευση του μονοπατιού μεταξύ των κόμβων για ενδεχόμενη επικοινωνία στο μέλλον και άλλα που θα αναλυθούν παρακάτω.

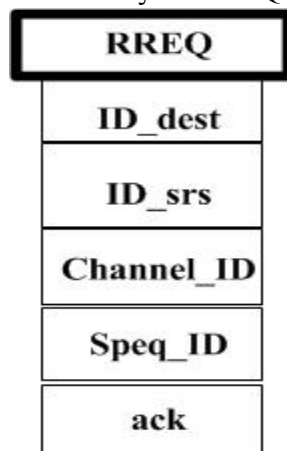


Εικόνα 17: Διαδικασία επιλογής διαδρομής

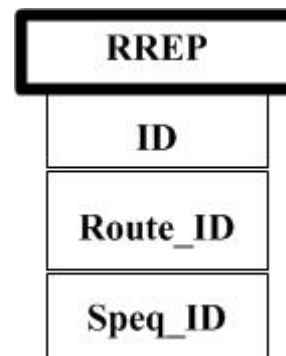
4.1.1 Route Discovery Process

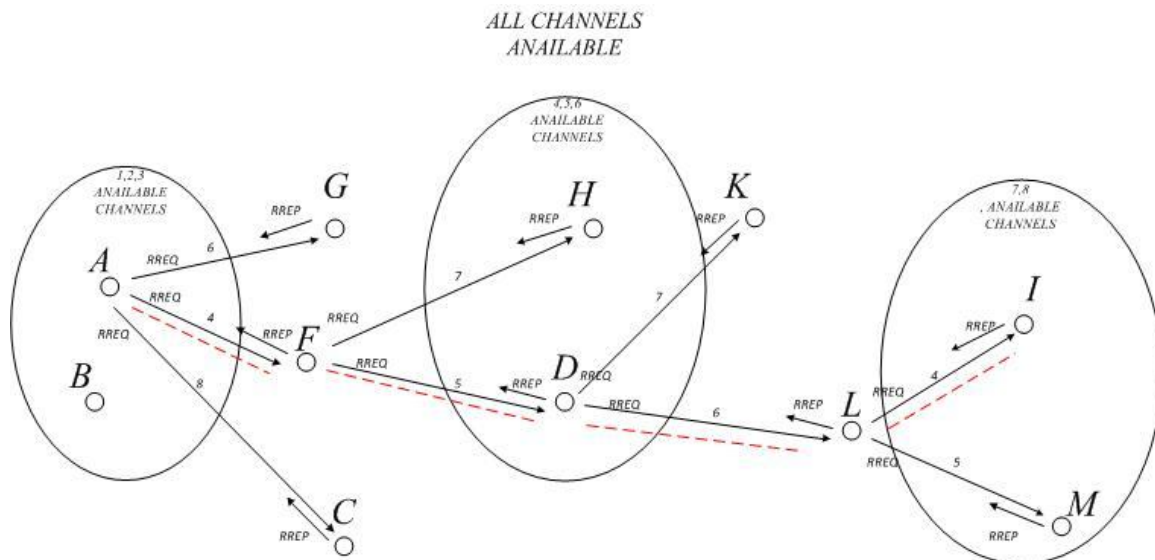
Ο κόμβος πηγής A μεταδίδει ένα μήνυμα route request (RREQ) μέσα στο δίκτυο πέρα από το κανάλι ελέγχου, και αυτό το πακέτο πρέπει να φτάσει στον τελικό προορισμό. Κάθε ενδιαμέσος προωθητής προσδιορίζει την καλύτερη δυνατή ζώνη φάσματος, και τα προτεινόμενα κανάλια μέσα σε εκείνη την ζώνη κατά τη διάρκεια της επιλογής φάσματος. Η διαδικασία της δρομολόγησης ξεκινάει με ένα RREQ μήνυμα από τον κόμβο πηγής A προς τον κόμβο προορισμού I. Κάθε RREQ αποτελείται από έναν πίνακα (πίνακας 3) όπου μέσα υπάρχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό ID του αποστολέα και του παραλήπτη. Επίσης υπάρχει ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών channel_ID της περιοχής που προέρχεται (αυτών που δεν χρησιμοποιούνται από τους χρήστες και αυτών που δεν είναι κατειλημμένοι από άλλες ροές), έναν αριθμό speq_ID που αντικατοπτρίζει την διαθεσιμότητα του φάσματος και ένα ack (acknowledgment) αίτημα το οποίο αναφέρεται στον κόμβο προορισμού. Μόλις δηλαδή φτάσει στον προορισμό, ο κόμβος αυτός στέλνει το ack στον αποστολέα. Αυτές οι αναφορές διαμορφώνονται ως απλά μηνύματα επιστροφής από το δέκτη πίσω στον αποστολέα. Το RREQ πακέτο διαβιβάζεται από τον κόμβο πηγής A με διαθέσιμα κανάλια στην περιοχή 1,2,3 και έχει προορισμό όλους τους γειτονικούς κόμβους με απαραίτητη προϋπόθεση να έχουν κοινό κανάλι Εικ 17. Όταν το RREQ πακέτο φτάσει στους γειτονικούς κόμβους G,F,C τότε κάθε κόμβος στέλνει πίσω ένα απαντητικό μήνυμα (RREP). Το RREP αποτελείται και αυτό από έναν πίνακα (πίνακας 2) όπου μέσα υπάρχει το μοναδικό αναγνωριστικό ID του κόμβου, ο αριθμός της απόστασης που έχει διανύσει route_ID για να φτάσει από τον ένα κόμβο στον άλλο και έναν αριθμό speq_ID που αντικατοπτρίζει την διαθεσιμότητα του φάσματος. Με αυτό το απαντητικό μήνυμα ενημερώνει τον αποστολέα με το ID για να δει αν ο κόμβος αυτός είναι ο παραλήπτης, την απόσταση του κόμβου από τον αποστολέα και το διαθέσιμο φάσμα. Αν κανένας από αυτούς τους γειτονικούς κόμβους δεν είναι ο παραλήπτης όπως φαίνεται στην εικόνα 1ο αποστολέας θα επιλέξει τον ενδιαμέσο κόμβο που θα έχει την μικρότερη απόσταση από τον αποστολέα βάση του αριθμού route_ID και τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα φάσματος βάση του αριθμού speq_ID. Ο Ενδιάμεσος κόμβος που έχει επιλεγεί στο παράδειγμα μας είναι ο F. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από τον κόμβο F προς τους γείτονές με τον ίδιο τρόπο, μέχρι να βρεθεί ο κόμβος προορισμού I Εικ. 18.

Πίνακας 1: RREQ



Πίνακας 2: RREP:

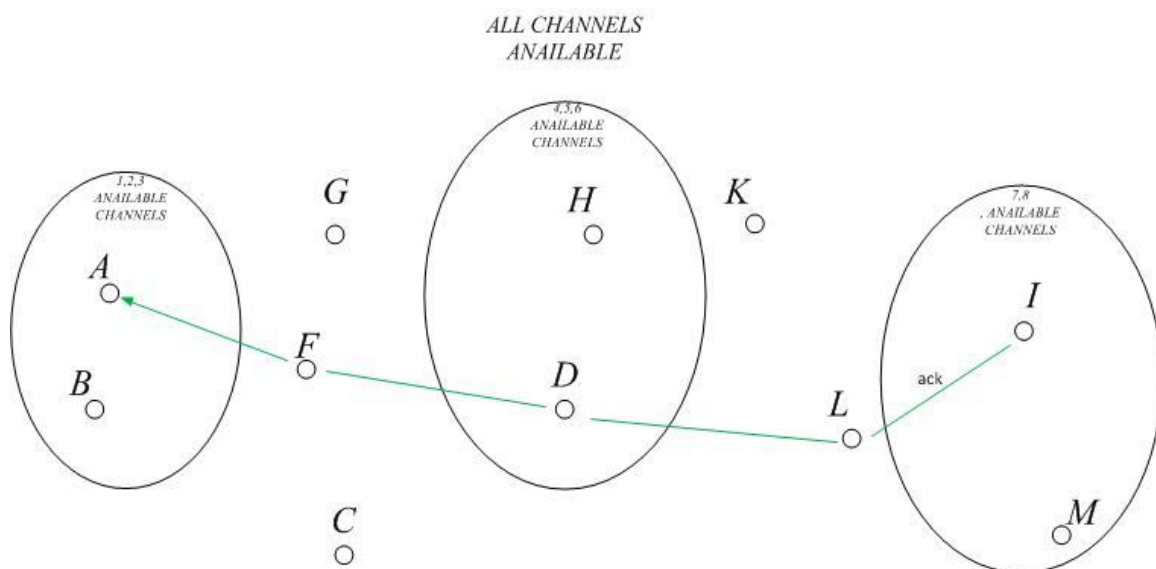




Εικόνα 18: Τελική διαδρομή

4.1.2 Route reply

Μόλις οριστεί η διαδρομή, ο κόμβος προορισμού στέλνει το ack πίσω στην πηγή περνώντας από τους ενδιάμεσους κόμβους με προορισμό τον κόμβο A Εικ. 19. Το ack χρησιμεύει στην ενημέρωση των ενδιάμεσων κόμβων και του αποστολέα ότι το μήνυμα το έχει λάβει ο παραλήπτης έτσι ώστε οι κόμβοι να διαγράψουν μηνύματα (RREQ, RREP κτλ) για να μην καλυφθεί ποτέ η χωρητικότητα του buffer που διατηρεί κάθε κόμβος και να μην έχουμε περιττές πληροφορίες στο δίκτυό μας.



Εικόνα 19: Η διαδρομή του ack

4.1.3 Route maintenance

Το πρωτόκολλο μας περιλαμβάνει και μια ικανότητα απομνημόνευσης διαδρομής. Αυτό γίνεται σε κάθε κόμβο πηγή βάση του ack αιτήματος. Δηλαδή, όταν στο τέλος ο κόμβος προορισμού I στέλνει το ack αίτημα στον αποστολέα A συλλέγει τα IDs των ενδιάμεσων κόμβων και αποθηκεύονται στον A μέσω ενός πίνακα που θα ονομάζεται με το όνομα της

διαδρομής, στο παράδειγμά μας θα είναι ένας πίνακας A-I, έτσι ώστε αν χρειαστεί να επικοινωνήσουν ξανά ο A με τον I να μην χρειαστεί η διαδικασία των RREQ και RREP μηνυμάτων. Στην περίπτωση όμως που κάποιος ενδιάμεσος κόμβος δεν μπορεί να ανταπεξέλθει για οποιονδήποτε λόγο τότε στέλνει πίσω στον αποστολέα ένα RERR με το οποίο ενημερώνει ότι αδυνατεί να ανταπεξέλθει και έτσι ο A πρέπει ξανά να ξεκινήσει τη διαδικασία που αναφέραμε στο Route Discovery Process. Το RERR αποτελείται από 2 πεδία, το ID του κόμβου και το Channel_ID με το οποίο ενημερώνει τον αποστολέα ποιος κόμβος αδυνατεί να συνεχίσει τη διαδικασία και σε ποιο κανάλι βρίσκεται.

Προτείνεται μία on-demand routing λύση για multi-channel cognitive radio networks. Η βασική έννοια σε αυτό το πρωτόκολλο είναι να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και να χρησιμοποιηθούν τα πολλαπλά διαθέσιμα κανάλια, συνδέοντας τους κόμβους που θέλουν να επικοινωνήσουν μέσω μιας ικανής στρατηγικής ανάθεσης και μιας επαρκούς διαδρομής βάση τη διαθεσιμότητας του φάσματος και της συντομότερης διαδρομής. Επιπλέον, τοπικός μηχανισμός συντήρησης-ικανότητα απομνημόνευσης και αποκατάστασης διαδρομής έχει προταθεί. Τέλος διαθέτει το αίτημα ack όπου δίνει στον αποστολέα τη σιγουριά της παράδοσης μηνυμάτων και τη δυνατότητα εκκαθάρισης των RREQ και RREP μηνυμάτων από τους κόμβους-μεσολαβητές.

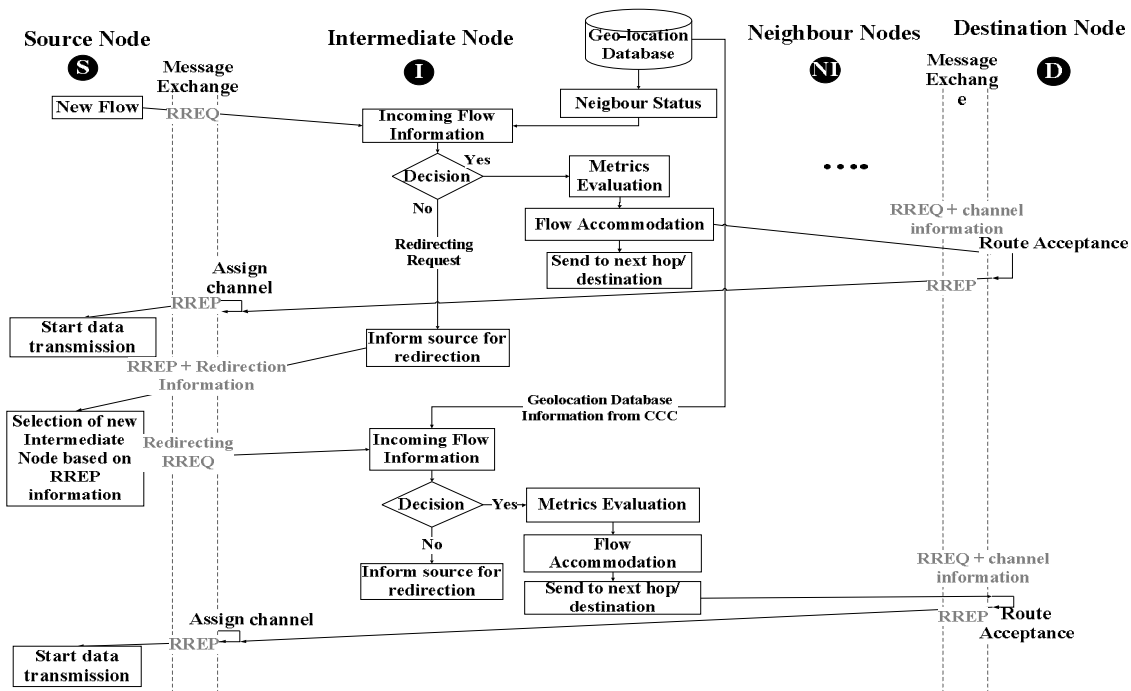
4.2 Design of a routing protocol adopted in Ad-hoc CRN over TVWS

Η δυνατότητα για μια αποτελεσματική μετάβαση των δεδομένων μεταξύ της πηγής και των χρηστών προορισμών τους, στο παραπάνω σενάριο προσομοίωσης, ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και αξιολογήθηκε υπό ελεγχόμενες συνθήκες προσομοίωσης. Αυτό το πρωτόκολλο δρομολόγησης βασίζεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων όπως στο AODV μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών, περιλαμβανομένων δύο σημαντικών βημάτων (ανακάλυψη διαδρομής και απάντηση διαδρομής). Κατά τη διάρκεια της ανακάλυψης διαδρομής, ένα RREQ (αίτηση διαδρομής) μήνυμα, συμπεριλαμβανομένων της TVWS διαθεσιμότητας των κόμβων έχει σταλεί από την πηγή να αποκτήσει μία πιθανή διαδρομή μέχρι τον προορισμό του χρήστη. Μόλις ο χρήστης προορισμού λαμβάνει το μήνυμα RREQ, έχει πλήρη επίγνωση σχετικά με τη διαθεσιμότητα του ραδιοφάσματος κατά μήκος της διαδρομής από τον χρήστη πηγή. Ο χρήστης επιλέγει τον προορισμό και στη συνέχεια, τη βέλτιστη διαδρομή δρομολόγησης, σύμφωνα με μια σειρά από μετρήσεις απόδοσης (π.χ. καθυστέρηση, αλλαγή καθυστέρησης, καθυστέρηση από ουρές, τον αριθμό των hops, απόδοση) και εκχωρεί ένα κανάλι για κάθε δευτερεύον χρήστη κατά μήκος της διαδρομής. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι η αξιολόγηση των μετρήσεων των επιδόσεων διεξάγεται, από κάθε ενδιάμεσο κόμβο κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης του RREQ μηνύματος. Στο επόμενο βήμα, ο χρήστης στέλνει πίσω στον προορισμό ένα RREP (απάντηση διαδρομής) μήνυμα στη πηγή που περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με εκχώρηση καναλιών, έτσι ώστε κάθε κόμβος κατά μήκος της διαδρομής να μπορεί να ρυθμίσει αναλογικά την κατανομή των καναλιών. Μόλις το RREP παραληφθεί από την πηγή, ξεκινά τη μετάδοση των χρήσιμων δεδομένων.

Η Εικόνα 20 παρουσιάζει τη λεπτομερή διαδικασία του προτεινόμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης για το χειρισμό των δύο RREQ και RREP μηνυμάτων. Η πηγή ξεκινά μια ροή (δηλ. νέα ροή στην Εικόνα 20), μεταδίδει ένα μήνυμα RREQ με ενδιάμεσο κόμβο που βρίσκεται σε γειτονική τοποθεσία. Ο ενδιάμεσος κόμβος ενημερώνεται από την βάση δεδομένων Γεω-τοποθεσίας για την TVWS διαθεσιμότητα των γειτονικών κόμβων του και καθορίζει αν είναι ικανή ή όχι να φιλοξενήσει την εισροή από την πηγή. Αν είναι σε θέση,

τότε αξιολογεί τις μετρήσεις απόδοσης, φιλοξενεί, και τελικά τη διαβιβάζει στο επόμενο hop ή στο χρήστη προορισμού, διαβιβάζοντας το μήνυμα RREQ. Μόλις ο χρήστης προορισμού λαμβάνει το RREQ μήνυμα, έχει πλήρη επίγνωση της διαθεσιμότητας καναλιού κατά μήκος της διαδρομής από τον κόμβο πηγής. Ο χρήστης προορισμού στέλνει τότε ένα μήνυμα RREP στη πηγή. Το μήνυμα αυτό περιέχει πληροφορίες σχετικά με εκχώρηση καναλιών, έτσι ώστε οι δευτερεύοντες χρήστες κατά μήκος της διαδρομής να μπορούν να ρυθμίσουν αναλογικά την κατανομή καναλιών. Μόλις η πηγή λαμβάνει το RREP, η διαδρομή δρομολόγησης έχει συσταθεί και η μετάδοση των χρήσιμων δεδομένων ξεκινά.

Στην περίπτωση που ο ενδιάμεσος κόμβος δεν είναι σε θέση να φιλοξενήσει την εισερχόμενη ροή (δηλαδή νέα ροή στην Εικόνα 20), ένας μηχανισμός συντονισμού (διαδικασία ανακατεύθυνση στην Εικόνα 20) είναι υπεύθυνος για την ενημέρωση της πηγής, για τον γειτονικό κόμβο που θα μπορούσε πιθανόν να λειτουργήσει ως εναλλακτική ενδιάμεσου κόμβου. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο ενδιάμεσος κόμβος στέλνει ένα μήνυμα RREP στην πηγή, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών ανακατεύθυνσης. Μόλις ο χρήστης πηγή λάβει αυτό το μήνυμα, θα μεταδώσει ένα μήνυμα RREQ ανακατεύθυνσης στον επόμενο δυνατό ενδιάμεσο κόμβο, ο οποίος είναι στη συνέχεια υπεύθυνος για να αποφασίσει εάν είναι εφικτό να φιλοξενήσει τη ροή δεδομένων, αξιολογεί τις μετρήσεις απόδοσης και τις διαβιβάζει στο next hop. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης καθορίζει μια διαδρομή μόνο όταν ένας χρήστης πηγή επιθυμεί να στείλει μια ροή δεδομένων σε ένα χρήστη προορισμού. Οι διαδρομές διατηρούνται για όσο διάστημα είναι αναγκαίες για την πηγή και η εκμετάλλευση των αριθμών ακολουθίας στα μηνύματα που ανταλλάσσουν εγγυώνται μία loop-free διαδικασία δρομολόγησης. Επιπλέον, το προτεινόμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης ως αντιδραστικό, δημιουργεί και συντηρεί δρομολόγια μόνο εάν είναι απαραίτητο, με βάση τη ζήτηση. Οι διαδρομές διατηρούνται σε πίνακες δρομολόγησης, όπου κάθε εγγραφή περιέχει πληροφορίες σχετικά με τον προορισμό των χρηστών, το επόμενο άλμα, τον αριθμό των αλμάτων, τον αύξων αριθμό του προορισμού, ενεργεί τους γειτονικούς κόμβους για αυτό το χρόνο διαδρομής και λήξης της ροής. Ο αριθμός των μηνυμάτων RREQ όπου μία πηγή μπορεί να στείλει ανά δευτερόλεπτο είναι περιορισμένη, ενώ κάθε RREQ μήνυμα μεταφέρει ένα χρόνο να ζωής (TTL) που καθορίζει τον αριθμό των φορών που το μήνυμα αυτό πρέπει να αναμεταδοθεί. Αυτή η τιμή έχει οριστεί σε μια προκαθορισμένη τιμή κατά την πρώτη μετάδοση και αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της αναμετάδοσης, το οποίο προκύπτει, εάν δεν έχουν ληφθεί απαντήσεις.



Εικόνα 20: Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων του προτεινόμενου πρωτοκόλλου

4.2.1. Αξιολόγηση πρωτοκόλλου

Προς επαλήθευση της ισχύος του προτεινόμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης, πολλές πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες (π.χ. προσομοιώσεις). Πιο συγκεκριμένα, σε ένα τέτοιο σενάριο οι ενδιαμέσοι κόμβοι λαμβάνουν ταυτόχρονα ροές δεδομένων, που απορρέουν από άλλους δευτερεύων χρήστες, με αποτέλεσμα την αύξηση των καθυστερήσεων. Σύμφωνα με αυτό το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, ένας αριθμός ροών δεδομένων βρίσκονται αντιμέτωπες για να περάσουν μέσα από τον ίδιο ενδιαμέσο κόμβο, έτσι η αξιολόγηση των καθυστερήσεων είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική υλοποίηση της προτεινόμενης διαδρομής (*queuing*). Η εναλλαγή της καθυστέρησης εμφανίζεται όταν ένας δευτερεύων χρήστης κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης αλλάζει από το ένα κανάλι στο άλλο, ενώ η μέση καθυστέρηση πρόσβασης, δηλαδή backoff καθυστέρηση, βασίζεται στα συστήματα πρόσβασης MAC που χρησιμοποιούνται σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Η μέση καθυστέρηση ορίζεται ως ο χρόνος από τη στιγμή που η ροή των δεδομένων είναι έτοιμη να διαβιβαστεί μέχρι τη στιγμή της διαβίβασης δεδομένων έχει γίνει με επιτυχία. Η καθυστέρηση ουράς βασίζεται στην ικανότητα μετάδοσης εξόδου του δευτερεύων χρήστη σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Πιο συγκεκριμένα, η καθυστέρηση ουράς αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για μια ροή δεδομένων να περιμένει στην ουρά μέχρι να μπορέσει να επεξεργαστεί.

Σύμφωνα με το σενάριο προσομοίωσης ένα συστήματα αναμονής ιδρύθηκε, αξιοποιώντας ένα $M / M / 1 / K$ Kendall μοντέλο που χρησιμοποιεί την ώρα άφιξης (δηλαδή πρώτα M της $M / M / 1 /$ μοντέλο K), καθώς και μια διαμονή του χρόνου (π.χ. τη δεύτερη M της $M / M / 1 / K$ μοντέλο) η εκθετική κατανομή βασίζεται στο ποσοστό του φορτίου (π.χ. ρ). Η ικανότητα του συστήματος (ή ο αριθμός των ροών μπορούν να εξυπηρετηθούν) ορίστηκε σε $K = 1$, ενώ το ποσοστό ρ υπηρεσίας εξαρτάται από τις λ και μ παραμέτρους. Το λ δηλώνει τον αριθμό των ροών δεδομένων, που φθάνουν κάθε δευτερόλεπτο και το μ δηλώνει τον αριθμό των ροών δεδομένων που φιλοξενούνται κάθε δευτερόλεπτο. Το ποσοστό του φορτίου είναι ίσο με λ / μ και κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης το φορτίο δοκιμή κυμάνθηκε από

0,05 έως 0,45 αξιολογώντας την ουρά αναμονής του κόμβου κάτω από διαφορετικά φορτία. Η διαμόρφωση της μέσης αναμονής D_{queuing} και το ποσοστό απωλειών P_{block} απεικονίζεται παρακάτω:

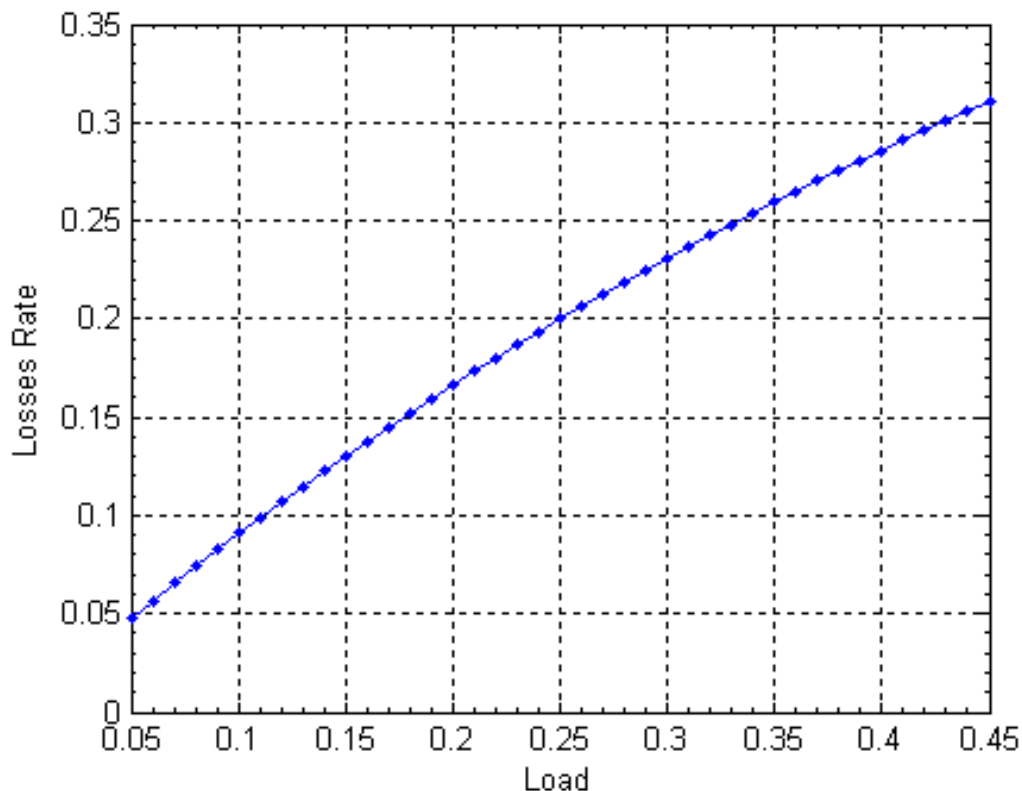
$$D_{\text{queuing}} = \rho / \mu - \lambda \quad (1) \quad P_{\text{block}} = (1-\rho)\rho^k / 1-\rho^{k-1} \quad (2)$$

Επιπλέον, η αξιολόγηση των $D_{\text{switching}}$ και D_{backoff} είναι ζωτικής σημασίας σε ένα τέτοιο σενάριο προσομοίωσης. Στη συνέχεια, η σωρευτική καθυστέρηση σε ενδιάμεσο κόμβο i βασίζεται σε αυτές και υπολογίζεται ως εξής:

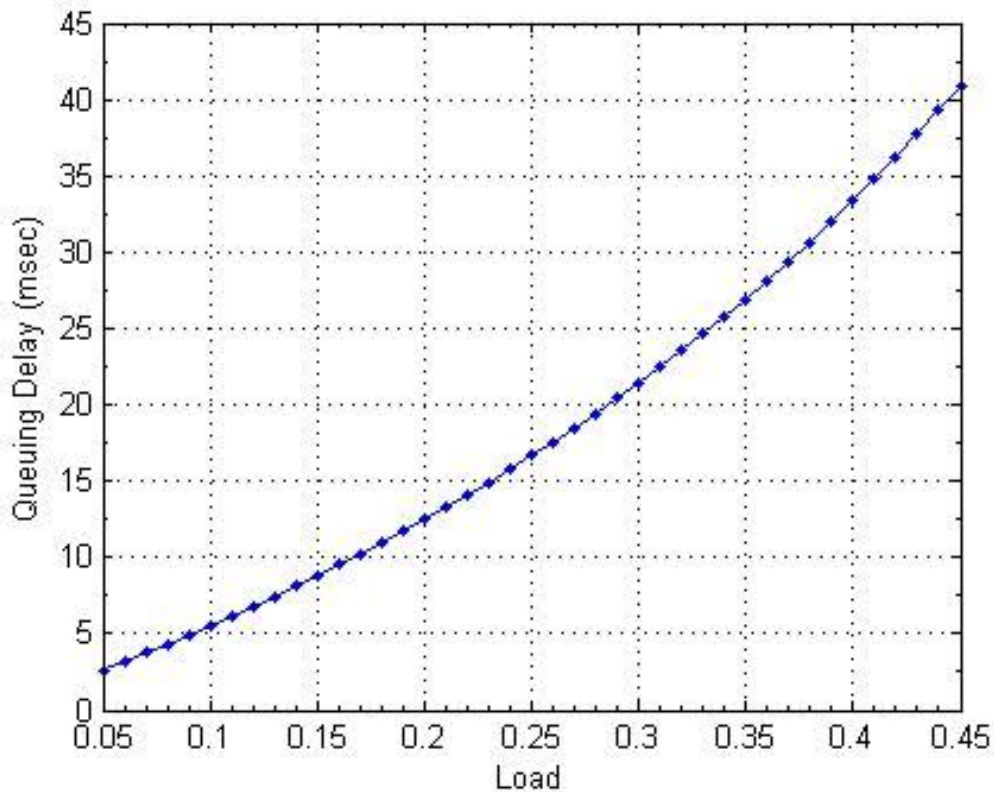
$$ND = \sum (D_{\text{switching}} + D_{\text{backoff}}) \quad (3)$$

Τέλος η end to end καθυστέρηση από την πηγή έως τον προορισμό υπολογίζεται ως το συνολικό ποσό των D_{queuing} και ND :

$$D_{\text{End-to-End}} = D_{\text{queuing}} + ND \quad (4)$$



Εικόνα 21: Αποτελέσματα της αξιολόγησης των επιδόσεων που αντιπροσωπεύουν ποσοστό ζημιάς



Εικόνα 22: Αποτελέσματα της αξιολόγησης των επιδόσεων που αντιπροσωπεύουν τη μέση καθυστέρηση αναμονής

Με βάση τις μετρήσεις που ορίζονται παραπάνω από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των επιδόσεων που αντιπροσωπεύουν ποσοστό ζημιάς (βλ. Εικ 21) και η μέση καθυστέρηση αναμονής (βλ. Εικ 22), για διαφορετικές τιμές ρυθμού εξυπηρέτησης (δηλαδή φορτίου). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τόσο στο ποσοστό απωλειών και στην καθυστέρηση αναμονής αυξάνεται όταν το ποσοστό υπηρεσιών κυμαίνεται από 0,05 έως 0,45, επιβεβαιώνοντας την σωστή λειτουργία των ενδιάμεσων κόμβων προσκρουστήρων όταν το Kendall M/M/1/K μοντέλο υιοθετείται.

5. Αποτελέσματα

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ενημέρωση, η παρουσίαση, η έρευνα και κυρίως η γνώση για τα ήδη υπάρχοντα συστήματα στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Τα CR μπορούν να εξυπηρετήσουν ολοένα και περισσότερες ανάγκες των χρηστών τους, καθώς η εξέλιξη τους είναι πολύ γρήγορη. Μέσω αυτής της εργασίας μπορεί να επωφεληθεί ο σπουδαστής ο οποίος την ολοκλήρωσε, οι επόμενοι σπουδαστές και μπορεί να γίνει η αρχή για μία ακόμη έρευνα αφού έχει προταθεί μία νέα «λύση» στο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα CR.

5.1 Συμπεράσματα

Τα CR, τα δίκτυα επόμενης γενιάς, μπορεί να υποστηρίξουν υπηρεσίες ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών της εκάστοτε εποχής, αν και διακρίνονται προβλήματα τα οποία με έρευνα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν. Μελετήθηκε και αναφέρθηκε ένας μεγάλος αριθμός πρωτοκόλλων όπου είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία μεταξύ χρηστών στα CR και θέτουν τις δικές τους ρυθμίσεις. Επίσης προτάθηκε ένα νέο πρωτόκολλο όπου μπορεί να καλύψει μερικές από τις ανάγκες των χρηστών όπως την ευκολία εύρεσης μονοπατιού και την απομνημόνευσή του.

5.2 Μελλοντική εργασία και επεκτάσεις

Τα δίκτυα αυτά χρειάζονται περαιτέρω μελέτη και έρευνα καθώς συνεχώς βγαίνουν καινούριες λύσεις, συνεπώς η έρευνα δεν σταματάει σε αυτή την εργασία είναι όμως μία καλή αρχή και δίνει τη δυνατότητα σε επόμενους σπουδαστές να επεκτείνουν το προτεινόμενο πρωτόκολλο και να βρεθεί μία καινούρια λύση που ίσως στο μέλλον βοηθήσει πολύ την επικοινωνία μεταξύ χρηστών.

Βιβλιογραφία

- [1] Joseph Mitola III, Cognitive Radio an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio
- [2] Mitola, j., III; “Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio”, 2000
- [3] Fette, B. (Editor) , “Cognitive Radio Technology”, Newnes, 2006
- [4] Haykin, S., “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications”, Feb. 2005 Selected Areas in Communications, IEEE Journa
- [5] Emerging cognitive radio technology: Principles, challenges and opportunities {Lamia Khalid, Alagan Anpalagan} WINCORE Laboratory, Ryerson University, Toronto, Canada.
- [6] V. Brik, E. Rozner, S. Banerjee, and P. Bahl. DSAP: a protocol for coordinated spectrum access. In New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pages 611 {614, Nov. 2005.
- [7] M. Buddhikot, P. Kolodzy, S. Miller, K. Ryan, and J. Evans. DIMSUMnet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum. In World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a, pages 78 {85, June 2005.
- [8] L. Ma, X. Han, and C.-C. Shen. Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks. In New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pages 203 {213, Nov. 2005.
- [9] Z. J. Haas and J. Deng. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a multiple access control scheme for ad hoc networks. Communications, IEEE Transactions on, 50(6):975 {985, 2002.
- [10] J. Zhao, H. Zheng, and G.-H. Yang. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. In New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pages 259 {268, Nov. 2005.
- [11] H. Rahul, N. Kushman, D. Katabi, C. Sodini, and F. Edalat. Learning to share: narrowband-friendly wideband networks. In V. Bahl, D. Wetherall, S. Savage, and I. Stoica, editors, SIGCOMM, pages 147 {158. ACM, 2008.
- [12] KNOWS: Kognitiv Networking over TVWS {Yuan Yuan, Paramvir Bahl, Ranveer Chandra, Philip A. Chou, John Ian Ferrell, Thomas Moscibroda, Srihari Narlanka, Yunnan Wu} Microsoft Research, Redmond USA.
- [13] Collaborative spectrum sensing for cognitive radio.
- [14] Unlicensed Cognitive Sharing of TV Spectrum : The controversy at the FCC { *Michael J. Marcus* }
- [15] J. So, N. Vaidya, Multi-channel MAC for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver, in: ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), May 2004, pp. 222–233.
- [16] M. Ma and D. Tsang, “Impact of channel heterogeneity on spectrum sharing in cognitive radio networks,” in Proc. IEEE ICC, 2008, pp. 2377–2382.
- [17] K. R. Chowdhury, M. D. Felice and I. F. Akyildiz, “TP-CRAHN: A transport protocol for cognitive radio ad-hoc networks,” *Proc. IEEE Infocom*, April 2009.
- [18] S. Biswas and R. Morris, "ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 35, No.4, 2005, pp. 133-144
- [19] PERKINS, C., AND ROYER, E. Ad hoc on-demand distance vector routing. In *Proc. of WMCSA* (February 1999), ACM.

- [20] DRAVES, R., PADHYE, J., AND ZILL, B. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *Proc. of SIGCOMM* (August 2004).
- [21] Καραμπότση Νικολέτα Πτυχιακή Εργασία “Ασύρματα Ad Hoc Δίκτυα: Πρωτόκολλα – Εφαρμογές“
- [22] Spectrum Sharing In Dynamic Spectrum Access Networks WPE-II Written Report Changbin Liu Department of Computer and Information Science University of Pennsylvania Philadelphia, PA 19104
- [23] An on-demand routing protocol for multi-hop multi-radio multi-channel cognitive radio networks Ahmed Chehata, Wessam Ajib, Halima Elbiaze Computer science department Universit´e du Qu´ebec `a Montr´eal, Canada
- [24] Backup Channel and Cooperative Channel Switching On-Demand Routing Protocol for Multi-Hop Cognitive Radio Ad Hoc Networks (BCCCS) Muhammad Zeeshan, Muhammad Fahad Manzoor, Junaid Qadir School of Electrical Engineering and Computer Science, NUST, H-12 Islamabad, Pakistan
- [25] CRP: A Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks Kaushik R. Chowdhury, Member, IEEE, and Ian F. Akyildiz, Fellow, IEEE
- [26] An Opportunistic Service Differentiation Routing Protocol for Cognitive Radio Networks Kiam Cheng How¹, Maode Ma¹, and Yang Qin² ¹School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore ²HIT ShenZhen Graduate School, China
- [27] SAMER: Spectrum Aware Mesh Routing in Cognitive Radio Networks SHORT PAPER Ioannis Pefkianakis¹, Starsky H.Y. Wong² and Songwu Lu¹ Dept. of Computer Science UCLA 4732 Boelter Hall, Los Angeles CA 900251 IBM T.J. Watson Research Center 19 Skyline Hawthorne, NY 105322
- [28] High Throughput Spectrum-aware Routing for Cognitive Radio Networks Ashwin Sampath, Lei Yang, Lili Cao, Haitao Zheng, Ben Y. Zhao Computer Science Department, University of California at Santa Barbara