



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη Θεωρίας Κοινωνικών Δικτύων Και Δυνατότητες
Εφαρμογής Τους Στα Ad Hoc Δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ Β. ΓΩΓΟΥΒΙΤΗΣ

**Επιβλέπων : Ευστάθιος Δ. Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Οκτώβριος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη Θεωρίας Κοινωνικών Δικτύων Και Δυνατότητες Εφαρμογής Τους Στα Ad Hoc Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ Β. ΓΩΓΟΥΒΙΤΗΣ

Επιβλέπων : Ευστάθιος Δ. Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Ε. Δ. Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Ε. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Ε. Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2006

.....

Σπυρίδων Β. Γωγουβίτης

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

Copyright © Σπυρίδων Β. Γωγουβίτης
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής ήταν μία μελέτη των ad hoc δικτύων, δικτύων δηλαδή που δεν απαιτούν κάποια υποδομή για να λειτουργήσουν, αλλά βασίζονται στην αυτοδιάθρωση. Αφού αναγνωρίστηκε ότι το βασικότερο, ίσως, στοιχείο τους όσο αφορά την απόδοσή τους είναι η αποτελεσματικότητα της δρομολόγησης των πακέτων, μελετήθηκαν οι υπάρχουσες τεχνικές δρομολόγησης. Αν θεωρήσουμε ότι τις ασύρματες συσκευές θα τις χειρίζονται άνθρωποι, τότε η τοπολογία του δικτύου θα εξαρτάται από τις κινήσεις, τις συνήθειες και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους. Για αυτό το λόγο, μελετήθηκαν οι τεχνικές που υπάρχουν για την ανάλυση κοινωνικών δικτύων. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται κατά κύριο λόγο στον τομέα των πολύπλοκων δικτύων (complex networks). Τα πολύπλοκα δίκτυα μελετήθηκαν σε θεωρητική βάση και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα φαινόμενα της προνομιακής προσάρτησης και μικρών κόσμων. Παρόλο που η θεωρία των πολύπλοκων δικτύων δεν έχει εφαρμοστεί προς το παρόν στον τομέα των ad hoc δικτύων, εν τούτοις έχουν γίνει κάποιες αναλύσεις στον τρόπο χρήσης των ασυρμάτων δικτύων με μεθόδους δανεισμένες από αυτόν τον τομέα. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι η κίνηση των χρηστών δεν είναι τυχαία, αλλά παρουσιάζει χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα κοινωνικά δίκτυα. Έτσι, είναι δυνατόν χρησιμοποιηθούν τεχνικές και αποτελέσματα των πολύπλοκων δικτύων και ιδιαιτέρως της ανάλυσης κοινωνικών γράφων στην ανάπτυξη πρωτοκόλλων, τόσο δρομολόγησης όσο και ανώτερων στρωμάτων, για χρήση στα ασύρματα ad hoc δίκτυα.

Λέξεις Κλειδιά

Δίκτυα Ad Hoc, δρομολόγηση, εύρεση υπηρεσιών, πολύπλοκα δίκτυα, συντελεστής συσσώρευσης, προνομιακή προσάρτηση, φαινόμενο μικρού κόσμου.

Abstract

The purpose of this thesis was the study of the area of ad hoc networks, i.e. networks that need no infrastructure to function, but rely on self-configuration. It was recognized that the key element in a network's success is its routing performance and therefore various ad hoc routing protocols were studied. Assuming that in most cases the wireless devices of an ad hoc network are carried by users, it follows that the network's topology will be largely affected by the users' mobility pattern, habits and interaction. Therefore, the methods for analysis of social networks were studied. These are based on the theory of complex networks, which were studied and special care was given to the phenomena of preferential attachment and small world effect. Even though the theory of complex networks has not been used, as a whole, in the field of ad hoc networks, statistical studies of the usage of structured wireless networks have been made using some of its methods. These show that user mobility is not random, but rather appears to have characteristics of social networks. It is, therefore, possible to use methods and results from the theory of complex networks, and particularly the area of social network analysis, to develop routing as well as higher level protocols for use in ad hoc networks.

Keywords

Ad Hoc networks, routing, service discovery, clustering, clustering coefficient, preferential attachment, small world effect.

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των δυνατοτήτων που δίνει η θεωρία των κοινωνικών δικτύων για τον σχεδιασμό αποδοτικών ασυρμάτων ad hoc δικτύων. Για το λόγο αυτό απαιτήθηκε η μελέτη τόσο των δικτύων ad hoc όσο και της θεωρίας των πολύπλοκων δικτύων. Έτσι η παρούσα διπλωματική έχει την εξής δομή.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στα ad hoc δίκτυα και στη θεωρία των πολύπλοκων δικτύων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά των ad hoc δικτύων και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους δρομολόγησης που έχουν προταθεί, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μεθόδου. Επίσης γίνεται αναφορά στις τεχνικές που έχουν προταθεί για εύρεση υπηρεσιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η θεωρία των πολύπλοκων δικτύων, τα χαρακτηριστικά που τα δίκτυα αυτά έχουν καθώς και τα μοντέλα δημιουργίας συνθετικών πολύπλοκων δικτύων που προσομοιάζουν πραγματικά δίκτυα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μελέτες που προσπαθούν να συνδιάσουν τους δύο αυτούς τομείς. Γίνεται στατιστική προσέγγιση της χρήσης ενός ασυρμάτου δικτύου με μεθόδους δανεισμένες από την θεωρία των πολύπλοκων δικτύων και μελετάται ένα μοντέλο κινητικότητας που βασίζεται σε κοινωνικά δίκτυα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνονται προτάσεις για το πώς θα μπορούσε η θεωρία των πολύπλοκων δικτύων να εφαρμοστεί στην υλοποίηση ενός ad hoc δικτύου και τι οφέλη θα μπορούσε αυτό να έχει.

Έχοντας, πλέον, τελειώσει την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου απέναντι στον καθηγητή μου κ. Συκά για τη στήριξη που μου παρείχε. Δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου και στον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Τσιούρη, καθώς οι γνώσεις, επί παντός επιστητού, που μου μετέδωσε είναι ανεκτίμητες. Πιο σημαντικό, όμως, θεωρώ το γεγονός ότι στο πρόσωπό του βρήκα έναν φίλο και σύμβουλο. Εύχομαι να θυμάται τον τελευταίο χρόνο όπως θα τον θυμάμαι εγώ. Ένα ταπεινό ευχαριστώ δεν είναι δυνατόν να εκφράσει τα συναισθήματά μου για την οικογένειά μου, η οποία μου έχει προσφέρει ότι πιο πολύτιμο υπάρχει και χωρίς αυτή τίποτα δεν θα ήταν δυνατό. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω και την Ζ.Χ. η οποία, γνωρίζοντάς το ή μη, τα τελευταία χρόνια με γέμιζε χαρά και ενέργεια και ήταν πάντα μία νησίδα ηρεμίας.

Σπυρίδων Β. Γωγουβίτης

Αθήνα, 2006

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	5
ABSTRACT	6
KEYWORDS	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ AD HOC ΔΙΚΤΥΩΝ.....	15
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ AD HOC ΔΙΚΤΥΩΝ.....	15
2.2 ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ	16
2.2.1 ΠΛΗΜΜΥΡΑ	18
2.2.2 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ	18
2.2.2.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV).....	18
2.2.3 ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ	19
2.2.3.1 Dynamic Source Routing (DSR)	19
2.2.3.2 Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV).....	20
2.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	20
2.2.5 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ – ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ZONE ROUTING PROTOCOL (ZRP).....	21
2.2.6 ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΜΑΔΩΝ.....	22
2.3 ΕΥΡΕΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	22
2.3.1 ΚΟΝΑΡΚ.....	23
2.3.1.1 Αρχιτεκτονική.....	23
2.3.1.2 Διαδικασία εύρεσης υπηρεσιών.....	24
2.3.1.3 Μορφή του ιεραρχικού δέντρου	25
2.3.1.4 Μορφή της γλώσσας προσδιορισμού της υπηρεσίας.....	25
2.3.2 DEAPSPACE.....	26
2.3.2.1 Προϋποθέσεις	26
2.3.2.2 Μηχανισμός εύρεσης υπηρεσιών.....	26
2.3.2.3 Σύγκριση του DEAPspace με ένα απλό πρωτόκολλο εκπομπής.....	26
2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	28
3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	31
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	32
3.2.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΚΟΣΜΟΥ	32
3.2.2 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΤΗΤΑ Ή ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ	33
3.2.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΜΒΩΝ	34
3.2.4 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ	36
3.2.5 ΎΠΑΡΞΗ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ	37
3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	39
3.3.1 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΚΟΣΜΟΥ	39
3.3.1.1 Συντελεστής Συσώρευσης	42
3.3.1.2 Κατανομή βαθμού κόμβων.....	42
3.3.1.3 Μέση απόσταση μεταξύ κόμβων.....	43
3.3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΠΟΥΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	43
3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	47
4 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΑ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ.....	49
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΤΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	49
4.2.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	49
4.2.2 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ	50
4.2.3 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ	51
4.2.4 ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ	52
4.2.5 ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ	53

4.2.6	ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ.....	54
4.3	ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΥΠΑΡΞΗ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ	56
4.3.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ	56
4.3.2	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ	58
4.3.3	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΟ	59
4.3.4	ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	59
4.3.4.1	Επιλογή αρχικού στόχου.....	59
4.3.4.2	Επιλογή επόμενων στόχων	59
4.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	62
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	63
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι. DYNAMIC SOURCE ROUTING.....	67
I.1	ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	67
I.2	ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ.....	68
I.3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΦΥΛΑΣΣΟΝΤΑΙ ΣΕ ΚΑΘΕ ΚΟΜΒΟ	68
I.4	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ.....	69
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ. DESTINATION SEQUENCED DISTANCE VECTOR PROTOCOL (DSDV)..	71
II.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ	71
II.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ	72
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ. AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR PROTOCOL (AODV).....	75
III.1	ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (ROUTE DISCOVERY).....	75
III.2	ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (ROUTE MAINTENANCE).....	76
III.3	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ	77
III.3.1.	<i>Expanding Ring Search</i>	77
III.3.2.	<i>Query Localization</i>	78
III.3.3.	<i>Τοπική Διόρθωση</i>	79
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV. ZONE ROUTING PROTOCOL (ZRP)	81
IV.1	ΖΩΝΕΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	81
IV.2	ΕΝΔΟΖΩΝΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ	82
IV.3	ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ	82

1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των Ad Hoc δικτύων συγκεντρώνει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον από ερευνητές και θεωρείται ως τεχνολογία αιχμής στον τομέα των ασυρμάτων δικτύων. Παρόλα αυτά, η ιδέα αυτοδιαρθρώσιμων ασύρματων δικτύων δεν είναι καινούρια. Όταν η τεχνολογία μεταγωγής πακέτου ξεκίνησε με την δημιουργία του ARPANET το 1969, το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ συνειδητοποίησε την προοπτική ενός ασύρματου δικτύου μεταγωγής πακέτου και ξεκίνησε το πρόγραμμα DARPA, δίνοντας το έναυσμα για την μελέτη των δυνατοτήτων των ασυρμάτων ad hoc δικτύων, δηλαδή δικτύων που προορίζονται για περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει υποδομή ή η χρήση της δεν είναι αποδοτική.

Η IETF δίνει τον εξής ορισμό:

“A "mobile ad hoc network" (MANET) is an autonomous system of mobile routers (and associated hosts) connected by wireless links--the union of which form an arbitrary graph. The routers are free to move randomly and organize themselves arbitrarily; thus, the network's wireless topology may change rapidly and unpredictably. Such a network may operate in a standalone fashion, or may be connected to the larger Internet.”

Τα δίκτυα ad hoc μπορούν να βρουν εφαρμογή οπουδήποτε υπάρχει ελλειψείς ή καθόλου υποδομή. Δίνουν τη δυνατότητα να προστίθενται και να αφαιρούνται κόμβοι κατά το δοκούν χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου. Οι εφαρμογές που μπορεί να βρει ένα ad hoc δίκτυο είναι ποικίλες και εκτείνεται από μεγάλης κλίμακας, κινητά, ιδιαιτέρως δυναμικά δίκτυα, έως μικρά στατικά δίκτυα που περιορίζονται από τη χρήση ενέργειας. Μερικά παραδείγματα είναι:

Στρατιωτικές εφαρμογές. Ένα ad hoc δίκτυο μπορεί να βρει εφαρμογή σε πολλές στρατιωτικές εφαρμογές όπως τη διασύνδεση μεταξύ στρατιωτών, οχημάτων και κέντρα συλλογής πληροφοριών. Είναι προφανές ότι στρατιωτικές μονάδες που επιχειρούν σε εχθρικό περιβάλλον είναι αδύνατο να κάνουν χρήση κάποιας προεγκατεστημένης υποδομής. Παράλληλα όμως, η ανάπτυξη ενός ad hoc δικτύου σε φίλιο χώρο έχει το

πλεονέκτημα ότι οι επικοινωνίες δεν μπορούν να καταστραφούν από την στόχευση κάποιων μεμονωμένων σταθμών επικοινωνιών.

Κοινωνικός τομέας. Τα ad hoc δίκτυα μπορούν να φανούν ιδιαίτερος σημαντικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει έκτακτη ανάγκη λόγω κάποιας φυσικής καταστροφής, όπως σεισμός ή πυρκαγιά, καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις είναι συνήθης η απουσία υποδομής και η ανάγκη για άμεση ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών είναι μεγάλη. Η επικοινωνία μπορεί να γίνεται με μικρές συσκευές και σε μέρη όπου δεν θα μπορούσε να υπάρχει επικοινωνία μέσω κάποιου σταθμού βάσης. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν επικοινωνίες μεταξύ πλοίων ή δυνάμεων τήρησης της τάξης.

Τοπικό επίπεδο. Τα ad hoc δίκτυα μπορούν να συνδέσουν αμέσως φορητούς υπολογιστές ή PDA για τη δημιουργία ενός δικτύου πολυμέσων. Αυτό μπορεί να φανεί ιδιαίτερος χρήσιμο σε αίθουσες διδασκαλίας ή συνεδρίων. Γενικότερα, σε οποιαδήποτε περίπτωση συναθροίζονται πολλοί άνθρωποι για μικρό χρονικό διάστημα είναι δυνατή η εύκολη αναταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης υποδομής που μπορεί να είναι οικονομικά ασύμφορη.

Ασύρματες προσωπικές επικοινωνίες. Ένα μικρό ad hoc δίκτυο μπορεί να απλοποιήσει τη διασύνδεση μεταξύ πολλών φορητών συσκευών, όπως φορητό υπολογιστή, PDA, κινητό τηλέφωνο, συσκευές μουσικής κ.ά.. Είναι π.χ. δυνατό να γίνονται κλήσεις μέσω του τηλεφώνου και αν υπάρχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο, οι κλήσεις αυτές να γίνονται μέσω VoIP χωρίς να παρεμβάλλεται ο χρήστης.

Δίκτυα αισθητήρων. Η αποδοτική ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων με χρήση ad hoc μεθόδων διασύνδεσης έχει γίνει αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματα που μπορεί να έχει. Έτσι είναι δυνατή η διασκόρπιση πολλών μικρών αισθητήρων σε μία περιοχή για την μελέτη φυσικών ή άλλων φαινομένων με μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, κύριο στοιχείο για το χρόνο ζωής των αισθητήρων.

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ad hoc δικτύων κάνουν την υλοποίησή τους αρκετά δύσκολη και απαιτούν εκτενή έρευνα για μπορέσουν να γίνουν αποδοτικές προτάσεις. Μία μέθοδος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, αφενός μεν για γίνουν κατανοητά τα ad hoc δίκτυα, αφετέρου δε για να προταθούν νέες τεχνικές που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις που τίθενται, είναι η στατιστική μελέτη των κοινωνικών δικτύων που σχηματίζουν μεταξύ τους οι άνθρωποι. Η μελέτη τέτοιων και παρομοίων

δικτύων έχει γεννήσει των τομέα των μαθητικών που ασχολείται με τα πολύπλοκα δίκτυα. Ως τέτοια αναφέρονται πολλά πραγματικά δίκτυα, όπως είναι τα κοινωνικά δίκτυα, ο παγκόσμιος ιστός και το Διαδίκτυο, τα οποία, ενώ εξ' αρχής μοιάζουν να έχουν τυχαία εξέλιξη λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας που έχουν, εμφανίζουν χαρακτηριστικά που είναι απόντα από τυχαία δίκτυα και τα οποία έχουν άμεση σχέση με τη δομή και την ανάπτυξή τους. Αφού λοιπόν, σε πάρα πολλές περιπτώσεις, οι κόμβοι ενός ad hoc δικτύου είναι άνθρωποι που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με διάφορες ασύρματες συσκευές, η μελέτη των χαρακτηριστικών της κίνησης και συμπεριφοράς των ανθρώπων οδηγεί στη βαθύτερη κατανόηση των δομών και των χαρακτηριστικών του ad hoc δικτύου. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για να υλοποιηθούν μέθοδοι που λύνουν εγγενή προβλήματα των ad hoc δικτύων. Παράλληλα, οι κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης θεωρούν τα δίκτυα στατικά χωρίς να εξετάζουν τη δυναμική τους συμπεριφορά. Ο τρόπος, όμως, που ένα δίκτυο αναπτύσσεται έχει άμεσες συνέπειες στη δομή και τα χαρακτηριστικά του. Η θεωρία των πολύπλοκων δικτύων δίνει τη δυνατότητα να μελετηθεί η ανάπτυξη ενός δικτύου και να καθοριστούν παράγοντες που το επηρεάζουν.

2 Μελέτη των Ad Hoc δικτύων

2.1 Χαρακτηριστικά Ασύρματων Ad Hoc δικτύων

Τα ad hoc δίκτυα παρουσιάζουν πολλά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν αρκετά από τα συνηθισμένα ασύρματα δίκτυα. Τα σημαντικότερα από αυτά συνοψίζονται παρακάτω.

Κινητικότητα: Το γεγονός ότι οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να κινούνται ελεύθερα είναι ο λόγος ύπαρξης των ad hoc δικτύων. Η κίνηση των κόμβων μπορεί να έχει πολλά χαρακτηριστικά, αναλόγως του περιβάλλοντος που το δίκτυο καλείται να λειτουργήσει. Έτσι, είναι δυνατό να υπάρχει ατομική τυχαία κίνηση, ομαδική κίνηση, κίνηση μέσω προδιαγεγραμμένων οδών, κ.α. Το μοντέλο κινητικότητας των κόμβων μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην επιλογή των προδιαγραφών του δικτύου.

Μετάδοση πολλών αλμάτων: Ένα δίκτυο πολλών αλμάτων είναι ένα δίκτυο όπου η διαδρομή από την πηγή της πληροφορίας προς τον προορισμό περνάει μέσα από πολλούς ενδιάμεσους κόμβους. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό καθώς η εμβέλεια των ασύρματων μέσων είναι συνήθως αρκετά περιορισμένη.

Αυτοδιάρθρωση: Ένα ad hoc δίκτυο πρέπει να έχει τη δυνατότητα να καθορίζει αυτόνομα τα χαρακτηριστικά της διάρθρωσής του όπως την διευθυνσιοδότηση, τη δρομολόγηση, την δημιουργία ομάδων, τον έλεγχο ισχύος κ.ά. Σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατό να υπάρχουν ειδικοί κόμβοι, στους οποίους να ανατίθενται κάποιες αρμοδιότητες ελέγχου. Η επιλογή των κόμβων αυτών θα πρέπει να γίνεται αυτόνομα από το δίκτυο, όπως αυτόνομα θα πρέπει να λαμβάνονται και τα μέτρα που απαιτούνται όταν αυτοί αποσυνδέονται από το δίκτυο.

Κλιμάκωση: Η κλιμάκωση ενός ad hoc δικτύου μαζί με την κινητικότητα, είναι τα δύο χαρακτηριστικά που δημιουργούν τα μεγαλύτερα προβλήματα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ιεραρχικές δομές που χρησιμοποιούνται στα σταθερά δίκτυα για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της κλιμάκωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα ad hoc δίκτυα. Για αυτό το λόγο πρέπει να βρεθούν νέοι μέθοδοι που να του επιτρέπουν να μεγαλώνει σε μεγάλα μεγέθη.

Ασφάλεια: Οι προκλήσεις της ασύρματης ασφάλειας είναι γνωστές και πολλές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται επεκτείνονται και στα ad hoc δίκτυα. Εν τούτοις τα τελευταία είναι περισσότερο ευάλωτα από ότι τα δίκτυα με υποδομή και για αυτό το λόγο απαιτούνται εξελιγμένες μέθοδοι και τεχνικές για να αντιμετωπιστούν οι επιθέσεις που ένα ad hoc δίκτυο μπορεί να δεχθεί.

2.2 Δρομολόγηση

Η δρομολόγηση των πακέτων στα ad hoc δίκτυα παρουσιάζει μεγάλα προβλήματα και είναι, ίσως, το πιο σημαντικό στοιχείο για τις βασικές λειτουργίες του δικτύου. Τα προβλήματα οφείλονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι ένα καλό πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται στις συνεχείς αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου. Επίσης, το πρωτόκολλο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του το περιορισμένο εύρος ζώνης και να προσπαθεί να επιφέρει το χαμηλότερο δυνατό φόρτο στο δίκτυο.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για κινητά δίκτυα ad hoc μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει της στρατηγικής που ακολουθούν για τη δρομολόγηση πακέτων. Κατ' αρχάς υπάρχουν τα πρωτόκολλα τα οποία είναι καθαρά *δρομολόγησης διανύσματος αποστάσεων (distance vector)*, όπως ο κατανεμημένος αλγόριθμος Bellman-Ford και το Routing Internet Protocol (RIP). Τα πρωτόκολλα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ad hoc δίκτυα λόγω της πολύ αργής σύγκλισής τους και του προβλήματος του *μετρήματος προς το άπειρο (count-to-infinity)*. Για αυτό το λόγο έχουν προταθεί πρωτόκολλα τα οποία τροποποιούν τον αλγόριθμο διανύσματος αποστάσεων ώστε να μπορεί να γίνει χρήση τους σε ad hoc δίκτυα. Σημαντικότερο εξ αυτών θεωρείται το πρωτόκολλο Destination Sequence Distance Vector (DSDV) [3].

Άλλη κατηγορία πρωτοκόλλων είναι αυτά τα οποία βασίζονται σε αλγόριθμους *κατάστασης ζεύξεων (link state)*. Παραδείγματα τέτοιων αποτελούν τα Global State Routing (GSR) [15], Fisheye State Routing (FSR) [16], Optimized Link State Routing (OLSR) [17] και Landmark Ad Hoc Routing (LANMAR) [18].

Οι παραπάνω ομάδες πρωτοκόλλων μπορούν να χαρακτηριστούν ως προληπτικές (proactive). Από την άλλη πλευρά υπάρχουν πρωτόκολλα τα οποία είναι κατ' απαίτηση (*on-demand*). Τα πρωτόκολλα αυτά έχουν προταθεί μόνο για Ad Hoc δίκτυα και χαρακτηριστικό τους είναι το γεγονός ότι κάθε κόμβος δεν διατηρεί κάποιου είδους διαδρομή για κάθε προορισμό συνεχώς. Αντιθέτως οι διαδρομές ανακαλύπτονται μόνο όταν

αυτές ζητηθούν. Ο γενικός μηχανισμός των πρωτοκόλλων αυτών είναι ο εξής: Όταν η πηγή θέλει να αποστείλει ένα πακέτο στον προορισμό πλημμυρίζει το δίκτυο με ένα πακέτο ανακάλυψης διαδρομής. Όταν ο προορισμός λάβει τις αιτήσεις για ανακάλυψη διαδρομής επιλέγει την κατάλληλη βάσει κάποιου αλγορίθμου επιλογής και απαντάει στην πηγή μέσω της επιλεγείσας διαδρομής. Θετικό στοιχείο των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων είναι η μείωση των απαιτούμενων μηνυμάτων ελέγχου, αφού δεν είναι απαραίτητη η περιοδική ανταλλαγή πληροφορίας, αλλά αυτή συμβαίνει όταν τούτο είναι απαραίτητο. Κύριοι αντιπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι το Ad-Hoc On Demand Distance Vector (AODV) [6], το Temporarily Ordered Routing Algorithm (TORA) [19] και το Dynamic Source Routing (DSR) [4]. Άλλα μέλη είναι τα Associativity-Based Routing (ABR) [20] και Signal Stability-Based (SSA) [21].

Μία άλλη κατηγορία πρωτοκόλλων είναι αυτή στην οποία οι κόμβοι έχουν γνώση της θέσης τους, συνήθως μέσω της χρήσης GPS. Καθώς η θέση κάθε κόμβου είναι γνωστή η δρομολόγηση μπορεί να επιτευχθεί αρκετά πιο εύκολα, με κόστος την ανάγκη ανταλλαγής πληροφοριών θέσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) [22], Location-Aided Routing (LAR) [23] και Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [24].

Μία κατηγορία πρωτοκόλλων η οποία παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον, τόσο λόγω των δυσκολιών που εμφανίζονται στην υλοποίησή τους, όσο κυρίως λόγω των δυνατοτήτων που αυτά δίνουν για την ανάπτυξη ανώτερων λειτουργιών, είναι τα πρωτόκολλα τα οποία βασίζονται σε ομάδες (clusters). Σε αυτά οι κόμβοι ομαδοποιούνται βάσει κάποιου αλγορίθμου με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ιεραρχικές δομές, οι οποίες αν χρησιμοποιηθούν σωστά, μπορούν να έχουν πολλαπλά οφέλη. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα Cluster Based Routing Protocol (CBRP) [25], Weighted Clustering Algorithm (WCA) [26] και (α, t) - Protocol [27].

Αναφορά θα πρέπει επίσης να γίνει στο Zone Routing Protocol (ZRP) [13], το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως υβριδικό, καθώς σε αυτό κάθε κόμβος χρησιμοποιεί διαφορετικό αλγόριθμο για τους κόμβους που βρίσκονται κοντά του (κάποιο προληπτικό πρωτόκολλο) και άλλο για αυτούς που βρίσκονται μακριά (on-κατ' απαίτηση πρωτόκολλο).

Κατά την μελέτη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης θεωρούμε ότι ο γράφος που αντιπροσωπεύει το δίκτυο είναι μη κατευθυνόμενος. Αυτό δεν είναι απολύτως σωστό καθώς συνήθως υπάρχουν αρκετές ζεύξεις μίας κατεύθυνσης. Αν και αυτό δεν είναι

απολύτως σωστό, η προσέγγιση δεν είναι εσφαλμένη καθώς υπάρχουν εμπειρικά [1] και θεωρητικά [2] στοιχεία που δείχνουν ότι η χρήση ζεύξεων μίας κατεύθυνσης δεν προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

2.2.1 Πλημμύρα

Η χρήση της πλημμύρας είναι ο πιο εύκολος τρόπος για να μεταφερθούν δεδομένα μεταξύ δύο απομακρυσμένων κόμβων. Στην πλημμύρα η πηγή απλώς εκπέμπει το πακέτο στο δίκτυο. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο το επαναεκπέμπει μόνο την πρώτη φορά που το λαμβάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μοναδικών ταυτοτήτων για κάθε πακέτο και διασφαλίζει ότι η διαδικασία θα τερματιστεί και δεν θα δημιουργηθούν βρόγχοι.

Είναι προφανές ότι μία τέτοια τεχνική σπαταλά ασκόπως μεγάλο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποδοτική δρομολόγηση πακέτων. Εν τούτοις, υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως π.χ. στην περίπτωση κατά την οποία η κινητικότητα των κόμβων είναι τόσο υψηλή όπου το πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν μπορεί να ακολουθήσει τη διαρκώς μεταβαλλόμενη τοπογραφία του δικτύου.

2.2.2 Προληπτική δρομολόγηση

Στην προληπτική δρομολόγηση διατηρούνται διαδρομές μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων, είτε αυτές χρησιμοποιούνται είτε όχι. Έτσι, όταν ζητείται η προώθηση ενός πακέτου προς κάποιο προορισμό η διαδρομή είναι γνωστή και έτοιμη προς χρήση. Επίσης είναι δυνατό να βρεθούν τα ελάχιστα μονοπάτια μεταξύ κόμβων δεδομένου κάποιου μεγέθους. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε αυτά που βασίζονται σε διανύσματα αποστάσεων και σε αυτά που βασίζονται σε καταστάσεις ζεύξεων. Ένα παράδειγμα προληπτικού πρωτοκόλλου παρουσιάζεται παρακάτω.

2.2.2.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

Το DSDV [3] ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων διανύσματος αποστάσεων και είναι ένα προληπτικό πρωτόκολλο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος έχει μία διαδρομή για κάθε άλλο κόμβο όποτε του ζητηθεί. Η βασική ιδέα του DSDV είναι η χρήση αυξόντων αριθμών προορισμού για να εγγυηθεί η μη δημιουργία βρόγχων χωρίς κάποιο συντονισμό μεταξύ των κόμβων. Κάθε κόμβος διατηρεί έναν αύξοντα αριθμό για τον εαυτό του. Επίσης διατηρεί τον μεγαλύτερο γνωστό αριθμό για κάθε κόμβο του πίνακα δρομολόγησής του. Οι

πληροφορίες για την απόσταση μεταξύ των κόμβων, οι οποίες ανταλλάσσονται μέσω περιοδικών ενημερώσεων δρομολόγησης, φέρουν τον αντίστοιχο αύξοντα αριθμό προορισμού. Οι αριθμοί χρησιμεύουν για να μπορεί να προσδιορισθεί το πόσο νέες είναι οι πληροφορίες που έχει ένας κόμβος (ο κόμβος με το μεγαλύτερο αύξοντα αριθμό για κάποιο προορισμό έχει τα πιο νέα δεδομένα). Εκτός από τις περιοδικές ανταλλαγές πινάκων δρομολόγησης, οι κόμβοι στο DSDV αποστέλλουν και ενημερώσεις αν αντιληφθούν σημαντικές αλλαγές στη τοπολογία του δικτύου.

2.2.3 Δρομολόγηση κατ' απαίτηση

Η δρομολόγηση κατ' απαίτηση είναι αρκετά διαφορετική από την προληπτική δρομολόγηση. Η βασική ιδέα είναι να βρεθούν και να διατηρηθούν μόνο οι διαδρομές που χρειάζονται. Το προφανές πλεονέκτημα μιας τέτοιας μεθόδου είναι ότι δεν σπαταλάει εύρος ζώνης για να βρεθούν και να διατηρηθούν διαδρομές που δεν χρησιμοποιούνται. Ακριβώς όμως επειδή οι διαδρομές δημιουργούνται τη στιγμή που χρειάζονται, τα πακέτα εμφανίζουν καθυστέρηση στην προώθηση προς τον προορισμό. Δύο πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενώς παρουσιάζονται παρακάτω:

2.2.3.1 Dynamic Source Routing (DSR)

Το πρωτόκολλο DSR [4], [5] χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται δρομολόγηση πηγής, δηλαδή η πηγή γνωρίζει την ακριβή διαδρομή προς τον προορισμό, την οποία και εισάγει στα πακέτα δεδομένων.

Όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει δεδομένα προς κάποιο προορισμό για τον οποίο δεν έχει διαδρομή, χρησιμοποιεί μία διαδικασία εύρεσης διαδρομής για να την ανακαλύψει δυναμικά. Η εύρεση διαδρομής λειτουργεί πλημμυρίζοντας το δίκτυο με πακέτα αίτησης (ή ερώτησης) διαδρομής. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα τέτοιο πακέτο το προωθεί, εκτός και αν είναι ο προορισμός ή έχει μία διαδρομή για τον προορισμό. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος απαντάει στην πηγή με ένα πακέτο απάντησης διαδρομής. Η απάντηση προωθείται μέσω της διαδρομής που έχει συλλέξει το μήνυμα αίτησης διαδρομής. Η απάντηση περιέχει την διαδρομή προς τον προορισμό, η οποία και αποθηκεύεται στην πηγή. Αν κάποια ζεύξη σταματήσει να λειτουργεί στέλνεται ένα μήνυμα σφάλματος στην πηγή και η όλη διαδικασία ξεκινάει από την αρχή, εκτός και αν η πηγή έχει αποθηκεύσει και κάποια εναλλακτική διαδρομή προς τον προορισμό, την οποία και χρησιμοποιεί αμέσως. Επειδή τα μηνύματα ελέγχου περιέχουν όλη τη διαδρομή είναι πολύ εύκολο να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα δημιουργίας βρόγχων. Αν και έχουν προταθεί διάφορες βελτιστοποιήσεις για

το πρωτόκολλο, είναι σημαντικό να αναφερθεί μία εξ αυτών. Το πρωτόκολλο δίνει, λοιπόν, τη δυνατότητα στους κόμβους να αποθηκεύουν τις διαδρομές που μαθαίνουν από διάφορα πακέτα ελέγχου που προωθούν, ακόμα και αν δεν χρειάζονται κάποια διαδρομή προς κάποιο προορισμό. Έτσι αν υπάρξει αυτή η ανάγκη σε σύντομο χρονικό διάστημα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν απ' ευθείας την διαδρομή που έχουν αποθηκεύσει.

2.2.3.2 Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV)

Το πρωτόκολλο AODV [6], [7] είναι επίσης ένα πρωτόκολλο κατ' απαίτηση όπως το DSR, αλλά χρησιμοποιεί έναν διαφορετικό μηχανισμό για δρομολόγηση. Στο AODV οι κόμβοι έχουν ένα πίνακα δρομολόγησης με ένα στοιχείο για κάθε προορισμό, σε αντίθεση με το DSR, όπου ο κάθε κόμβος μπορεί να έχει πολλαπλές διαδρομές για έναν προορισμό. Επειδή δεν χρησιμοποιείται δρομολόγηση πηγής το AODV βασίζεται στις καταχωρήσεις των πινάκων των ενδιάμεσων κόμβων για να προωθηθεί ένα μήνυμα απάντησης διαδρομής προς την πηγή και έτσι να δημιουργηθεί η διαδρομή από την πηγή στον προορισμό. Το AODV χρησιμοποιεί αύξοντες αριθμούς όπως το DSDV για να αποφευχθεί η δημιουργία βρόγχων και να μπορεί να προσδιορισθεί πόσο νέα είναι μία διαδρομή. Οι αριθμοί αυτοί υπάρχουν σε όλα τα πακέτα.

2.2.4 Σύγκριση μεταξύ προληπτικής και κατ' απαίτηση δρομολόγησης

Εύλογα δημιουργείται το ερώτημα για το ποια από τις δύο μεθόδους δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Για το ζήτημα αυτό έχουν γίνει πολλές μελέτες, τόσο βασισμένες σε προσομοιώσεις [8], [9], [10], [11], όσο και σε θεωρητικό επίπεδο [12] χωρίς να μπορεί να δοθεί μία σαφής απάντηση υπέρ της μίας ή της άλλης μεθόδου.

Βασικά μεγέθη που έχουν άμεση σχέση με την απόδοση ενός πρωτοκόλλου είναι η ρυθμαπόδοση (throughput) και η διατερματική καθυστέρηση (end-to-end delay). Η ρυθμαπόδοση είναι άμεσα εξαρτημένη από την απόρριψη πακέτων. Η απόρριψη πακέτων συμβαίνει, είτε λόγω συμφόρησης του δικτύου, είτε λόγω του ότι δεν υπάρχει διαδρομή. Ένα καλό πρωτόκολλο μειώνει τον πρώτο λόγο με το να δημιουργεί τη λιγότερη δυνατή κίνηση για θέματα ελέγχου, ενώ το δεύτερο με το να μπορεί να ακολουθεί τις συνεχείς αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου.

Η διατερματική καθυστέρηση εξαρτάται από την καθυστέρηση για ανακάλυψη διαδρομής, καθυστερήσεις στους ενδιάμεσους κόμβους και τον αριθμό των συνολικών βημάτων (αλμάτων) από την πηγή στον προορισμό. Σε ένα δίκτυο με χαμηλό φόρτο οι

καθυστερήσεις στους ενδιάμεσους κόμβους δεν είναι υψηλές, οπότε ο καθοριστικός παράγοντας είναι η αρχική καθυστέρηση στην πηγή για την ανακάλυψη της διαδρομής. Προφανώς, σε αυτή την περίπτωση τα προληπτικά πρωτόκολλα υπερτερούν. Σε συνθήκες, όμως, μέσου και υψηλού φόρτου η καθυστέρηση δεν οφείλεται τόσο πολύ στην αρχική καθυστέρηση για την εύρεση της διαδρομής, οπότε δεν υπάρχουν διαφορές στις δύο μεθόδους. Αυτό που παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η επιπλέον κίνηση που δημιουργεί το πρωτόκολλο.

Ένας άλλος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο είναι η ποικιλότητα της κίνησης, δηλαδή πώς κατανέμεται η κίνηση στο δίκτυο. Η μέθοδος της κατ' απαίτησης δρομολόγησης είναι περισσότερο προσαρμοστική στην ποικιλότητα της κίνησης και έτσι ο επίφορτος αυξάνεται ανάλογα με την ποικιλότητα. Από την άλλη πλευρά η προληπτική μέθοδος δρομολόγησης σπαταλά αρκετό εύρος ζώνης σε αυτήν την περίπτωση καθώς διατηρούνται διαδρομές που δεν χρησιμοποιούνται.

Ένα πλεονέκτημα της προληπτικής μεθόδου είναι ότι μπορεί πολύ εύκολα να χρησιμοποιεί τα βέλτιστα μονοπάτια, πράγμα που δεν ισχύει για την κατ' απαίτηση δρομολόγηση. Η χρήση μη βέλτιστων μονοπατιών αυξάνει το φόρτο του δικτύου καθώς γίνονται περισσότερες εκπομπές από όσες απαιτούνται.

2.2.5 Υβριδική δρομολόγηση – Το πρωτόκολλο Zone Routing Protocol (ZRP)

Κανείς θα μπορούσε να υποθέσει ότι ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων μεθόδων θα μπορούσε να είναι καλύτερος από ότι κάθε μέθοδος ξεχωριστά. Παραδείγματος χάριν, ένα κατ' απαίτηση πρωτόκολλο, όπως το AODV, θα μπορούσε να τροποποιηθεί ώστε να ανανεώνει ανά τακτά χρονικά διαστήματα τις ενεργές διαδρομές λύνοντας έτσι το πρόβλημα των μη βέλτιστων διαδρομών. Μία άλλη πρόταση θα ήταν η δρομολόγηση να γίνεται προληπτικά για κοντινούς κόμβους και κατ' απαίτηση για μακρινούς. Ακριβώς αυτή είναι και η κεντρική ιδέα του ZRP [13], [14]. Για κάθε κόμβο X ορίζεται μία περιοχή η οποία περιέχει όλους τους κόμβους των οποίων η απόσταση είναι μικρότερη από κάποιο μέγεθος. Οι κόμβοι που βρίσκονται ακριβώς σε αυτήν την απόσταση καλούνται *συνοριακοί κόμβοι*. Ένα προληπτικό πρωτόκολλο είναι υπεύθυνο να διατηρεί πλήρη στοιχεία για όλους τους κόμβους μέσα στη περιοχή του. Αν ο κόμβος θελήσει να επικοινωνήσει με κάποιον που βρίσκεται εκτός της περιοχής του, προωθεί ένα μήνυμα ερώτησης διαδρομής στους συνοριακούς του κόμβους. Αν ο ζητούμενος κόμβος δεν βρίσκεται μέσα στην περιοχή του συνοριακού κόμβου, αυτός προωθεί το αίτημα στους

δικούς του συνοριακούς κόμβους και ούτω καθ' εξής έως ότου βρεθεί ο κόμβος. Το ZRP έχει αρκετά πλεονεκτήματα, αλλά ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής της ακτίνας της περιοχής κάθε κόμβου είναι δύσκολος και επηρεάζει κατά πολύ την επίδοση του πρωτοκόλλου.

2.2.6 Ιεραρχική δρομολόγηση με χρήση ομάδων

Ένα από τα σημαντικά σχεδιαστικά ζητήματα ενός ad hoc δικτύου είναι η ικανότητα του να κλιμακώνεται σε μεγάλους αριθμούς κόμβους. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι θεμιτό να επιτευχθεί μία μείωση στον αριθμό των κόμβων που διαχειρίζεται το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί με την εισαγωγή ιεραρχικών δομών στο δίκτυο. Κατ' αυτό τον τρόπο το δίκτυο χωρίζεται σε ομάδες και πλέον είναι δυνατό να εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές σε διαφορετικά επίπεδα της ιεραρχίας. Παραδείγματος χάρη, αν ένας κόμβος επιθυμεί να επικοινωνήσει με ένα κόμβο που ανήκει σε διαφορετική ομάδα, μπορεί να έχει μία διαδρομή αποτελούμενη από ομάδες και όχι κόμβους. Κάθε ομάδα που λαμβάνει το μήνυμα θα πρέπει να το προωθήσει στην επόμενη ομάδα, έως ότου το μήνυμα φτάσει στην ομάδα του προορισμού και εν τέλει στον ίδιο τον προορισμό. Τα πρωτόκολλα με ιεραρχική δομή επωφελούνται από το γεγονός ότι αναμένονται αρκετά λιγότερες αλλαγές στην τοπολογική σχέση μεταξύ των ομάδων, παρά μεταξύ μεμονωμένων κόμβων. Έτσι, χρειάζονται λιγότερες λειτουργίες εύρεσης διαδρομής, καθώς οι διαδρομές είναι πιο σταθερές. Στα μειονεκτήματα αυτού του είδους πρωτοκόλλων συγκαταλέγονται το κριτήριο με το οποίο γίνεται η ομαδοποίηση και το επιπλέον φορτίο που χρειάζεται για την δημιουργία και συντήρηση των ομάδων.

2.3 Εύρεση υπηρεσιών

Ένας από τους βασικούς λόγους ύπαρξης των Ad Hoc δικτύων είναι η χρήση διαφόρων υπηρεσιών που προσφέρουν οι κόμβοι στο δίκτυο. Με τον όρο υπηρεσία νοείται κάθε μορφής λογισμικό και υλισμικό που προσφέρεται προς χρήση. Στα συνήθη δίκτυα η λειτουργία της εύρεσης υπηρεσιών υλοποιείται συνήθως μέσω ενός κεντρικού εξυπηρετητή ο οποίος λειτουργεί ως μία βάση δεδομένων. Έτσι όταν κάποιος κόμβος έχει να προσφέρει κάποια υπηρεσία το γνωστοποιεί στην βάση. Στη συνέχεια όταν κάποιος αναζητά μία υπηρεσία ρωτά τη βάση και μέσω αυτής μαθαίνει για το ποιος κόμβος παρέχει κάθε υπηρεσία. Όπως είναι προφανές, αυτή η σχεδίαση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε Ad Hoc δίκτυα καθώς δεν μπορεί να υπάρξει κάποιος κόμβος που να παίζει αυτόν τον κεντρικό ρόλο. Και αυτό γιατί δεν υπάρχει η εγγύηση ότι κάποιος θα είναι συνεχώς διαθέσιμος ή ότι

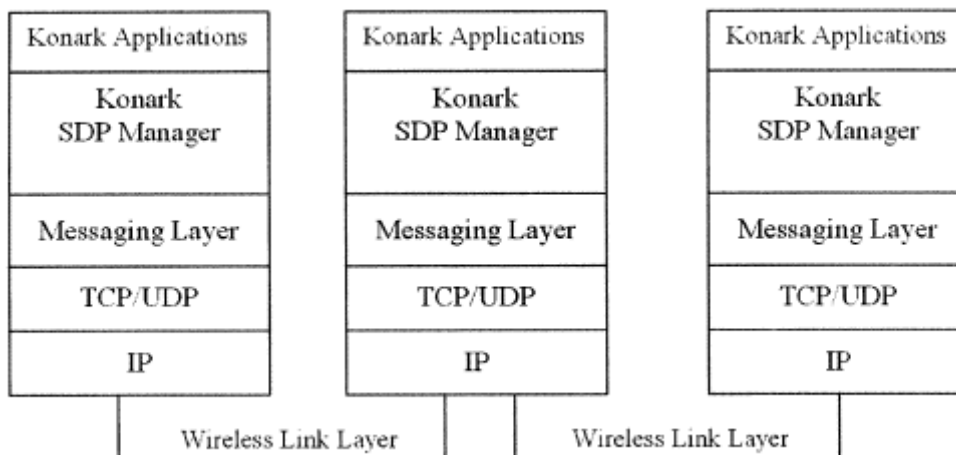
θα επαρκεί ο αποθηκευτικός του χώρος. Για αυτό το λόγο όλες οι προσπάθειες που αφορούν την εύρεση υπηρεσιών σε Ad Hoc δίκτυα βασίζονται σε αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές. Σε αυτές υπάρχουν δύο μοντέλα. Το ένα κατά το οποίο οι πάροχοι υπηρεσιών γνωστοποιούν κατά τακτά χρονικά διαστήματα τις υπηρεσίες τους (push model) και το δεύτερο κατά το οποίο οι χρήστες αναζητούν στο δίκτυο τις υπηρεσίες που επιθυμούν, συνήθως μόλις τις χρειαστούν (on demand pull model).

2.3.1 Konark

Το Konark [28] αποτελεί ένα πρωτόκολλο για την εύρεση και χρήση υπηρεσιών σε ad hoc περιβάλλοντα. Το Konark αποτελείται από δύο μέρη. Την εύρεση υπηρεσιών και τη χρήση τους. Όσο αναφορά την εύρεση αυτή γίνεται αποκεντρωμένα, μέσω peer-to-peer δομών, εφαρμόζοντας και τα δύο μοντέλα για την εύρεση υπηρεσιών (push και pull), δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να αναζητούν υπηρεσίες, αλλά και στους παρόχους να διαφημίζουν αυτές που παρέχουν. Λειτουργεί πάνω από οποιοδήποτε πρωτόκολλο δρομολόγησης, αρκεί τούτο να προσφέρει δυνατότητες πολλαπλής αποστολής. Οι υπηρεσίες περιγράφονται μέσω XML και δομούνται ιεραρχικά σε μορφή δέντρου.

2.3.1.1 Αρχιτεκτονική

Η δομή του πρωτοκόλλου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 1. Δομή πρωτοκόλλου Konark.

Όπως είναι προφανές κάθε κόμβος υλοποιεί τον Konark SDP Manager ο οποίος είναι υπεύθυνος να μεταφέρει την πληροφορία αναζήτησης και εύρεσης ανάμεσα στις εφαρμογές και στο στρώμα μηνυμάτων. Κάθε κόμβος οφείλει να εγγραφεί σε μία ομάδα πολλαπλής αποστολής (π.χ. 239.255.0.0/16). Επίσης κάθε κόμβος υλοποιεί μία βάση στην

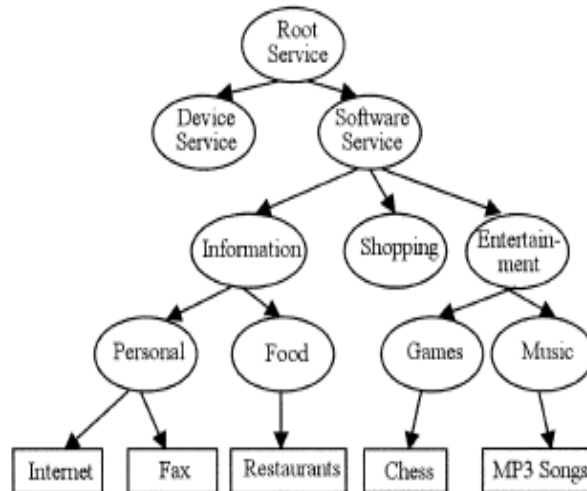
οποία αποθηκεύει τόσο τις υπηρεσίες που αυτός προσφέρει αλλά και αυτές που μαθαίνει ότι υπάρχουν στο δίκτυο. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι αυτή η βάση είναι ένα ιεραρχικό δέντρο. Κάθε επίπεδο του κόμβου αποτελεί εξειδίκευση του προηγούμενου, ενώ οι πραγματικές υπηρεσίες βρίσκονται μόνο στα φύλλα του δέντρου. Τα πλεονεκτήματα αυτής της δομής θα γίνουν εμφανή παρακάτω. Κάθε υπηρεσία που προστίθεται στο δέντρο έχει και ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο είναι έγκυρη (TTL), πέραν του οποίου η υπηρεσία διαγράφεται από το δέντρο.

2.3.1.2 Διαδικασία εύρεσης υπηρεσιών

Η διαδικασία εύρεσης μίας υπηρεσίας έχει ως εξής: Όταν ένας κόμβος θέλει να χρησιμοποιήσει μία υπηρεσία στέλνει ένα μήνυμα ανεύρεσης σε προκαθορισμένη διεύθυνση πολλαπλής αποστολής. Το μήνυμα αυτό περιέχει τα εξής πεδία: service path, λέξεις κλειδιά, διεύθυνση IP και αριθμός πόρτας. Τα δύο τελευταία πεδία (διεύθυνση IP και αριθμός πόρτας) χρησιμοποιούνται για να απαντήσει κάποιος κόμβος με πληροφορίες. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα αντιστοιχεί το service path με το δικό του δέντρο, λαμβάνοντας όλες τις υπηρεσίες που βρίσκονται κάτω από αυτό. Στη συνέχεια ελέγχονται οι λέξεις κλειδιά κάθε μίας από αυτές τις υπηρεσίες με αυτά που περιέχει το μήνυμα ώστε να γίνει πιο σωστή αναγνώριση της ζητούμενης υπηρεσίας. Μετά από αυτό, απαντάει με ένα μήνυμα service advertisement για όλες τις υπηρεσίες που αυτός γνωρίζει. Το μήνυμα περιέχει τα εξής πεδία: όνομα της υπηρεσίας, service path, λέξεις κλειδιά, URL και TTL. Το URL αποτελεί το μέρος στο οποίο θα πρέπει να αναζητηθούν περισσότερες πληροφορίες όσο αναφορά την υπηρεσία ενώ μέσω του TTL γίνεται γνωστό έως πότε θα είναι δυνατή η χρήση της. Όταν ο αρχικός κόμβος λάβει το μήνυμα μπορεί πλέον να επιλέξει ποια υπηρεσία θα ήθελε να χρησιμοποιήσει και να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες για αυτήν στο δεδομένο URL. Μία σημαντική διαδικασία που περιέχεται στο πρωτόκολλο είναι η εξής: Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα αναζήτησης δεν στέλνει αμέσως την απάντηση του αλλά περιμένει κάποιο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ακούει τις δημοσιεύσεις των άλλων κόμβων και τις αποθηκεύει. Στη συνέχεια ως απάντηση δεν αποστέλλει όλες τις υπηρεσίες που έχει βρει αλλά μόνο όσες δεν υπήρχαν σε κάποιο από τα μηνύματα τα οποία άκουσε. (Τα μηνύματα αυτά αποκαλούνται delta messages). Έτσι λύνεται το πρόβλημα που δημιουργείται καθώς όλοι οι κόμβοι απαντούν ταυτόχρονα σε μία αναζήτηση με τις ίδιες πληροφορίες σπαταλώντας έτσι εύρος ζώνης.

2.3.1.3 Μορφή του ιεραρχικού δέντρου

Σημαντικό στοιχείο του πρωτοκόλλου αποτελεί ο ιεραρχικός τρόπος με τον οποίο γίνεται η αποθήκευση των υπηρεσιών σε κάθε κόμβο. Παράδειγμα ενός δέντρου που δημιουργείται φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2. Δομή ιεραρχικού δέντρου υπηρεσιών στο Konark.

Η αναζήτηση μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε επίπεδο του δέντρου. Έτσι κανείς μπορεί να αναζητήσει τόσο μία συγκεκριμένη υπηρεσία, όσο και μία ομάδα υπηρεσιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η αναζήτηση υπηρεσιών. Παράλληλα, είναι πιο εύκολη η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη, αν αυτό είναι δυνατό.

2.3.1.4 Μορφή της γλώσσας προσδιορισμού της υπηρεσίας

Όπως ειπώθηκε και πρωτύτερα κάθε υπηρεσία περιγράφεται στον κόμβο που την διαθέτει από ένα αρχείο XML. Το αρχείο έχει σαν ρίζα τη ταυτότητα της υπηρεσίας. Σαν πρώτο παιδί έχει το όνομα της υπηρεσίας ενώ σαν δεύτερο την κατηγορία του. Το τρίτο παιδί είναι οι λέξεις κλειδιά. Τα τρία αυτά πεδία είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κατά την αναζήτηση και εύρεση της υπηρεσίας. Στη συνέχεια ακολουθούν τα πεδία τα οποία χρησιμοποιούνται για να δώσουν ένα πλήρη ορισμό της υπηρεσίας. Αυτά είναι το πεδίο *Ιδιότητες* και το πεδίο *Συναρτήσεις* (Functions). Στο πεδίο *Ιδιότητες* εμπεριέχονται όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να την περιγράψουν και μπορούν να παίρνουν και διάφορες τιμές. Το πεδίο *Συναρτήσεις* περιέχει τις πραγματικές συναρτήσεις που μπορεί να καλεί ο πελάτης για τη χρήση της υπηρεσίας.

2.3.2 DEAPspace

Το DEAPspace [29] είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο έχει προταθεί από το Τμήμα Ανάπτυξης της IBM. Βάσει αυτού η εύρεση υπηρεσιών επιτυγχάνεται μέσω της εκπομπής ανά τακτά χρονικά διαστήματα των υπηρεσιών που κάθε κόμβος γνωρίζει.

2.3.2.1 Προϋποθέσεις

Το πρωτόκολλο έχει τις εξής προϋποθέσεις:

- Κάθε κόμβος διατηρεί μία λίστα με περιγραφές υπηρεσιών
- Οι κόμβοι συμμετέχουν στην διαφήμιση των υπηρεσιών μέσω εκπομπών
- Κάθε υπηρεσία περιγράφεται με κάποιον τρόπο ο οποίος πρέπει να περιλαμβάνει οπωσδήποτε ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο η υπηρεσία είναι ενεργή (time-to-live) και την διεύθυνση του κόμβου που την προφέρει.

2.3.2.2 Μηχανισμός εύρεσης υπηρεσιών

Οι εκπομπές ορίζονται να γίνονται κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων χρονικών «παραθύρων». Τα παράθυρα αυτά είναι σαφώς ορισμένα και επαναλαμβανόμενα. Σε κάθε «παραθύρο» εκπέμπει μόνο ένας κόμβος. Ο κόμβος αυτός επιλέγεται με μία διαδικασία τυχαίας οπισθοχώρησης (random back-off). Εάν κάποιος κόμβος παρατηρήσει ότι ο χρόνος από κάποια από τις υπηρεσίες του θα λήξει σύντομα επιλέγει κάποιον συντομότερο χρονικό διάστημα για να εκπέμψει, έτσι ώστε να μην θεωρηθεί ότι η υπηρεσία είναι εκτός λειτουργίας στους υπόλοιπους κόμβους. Επίσης πριν εκπέμψει κάποιος κόμβος αρχικοποιεί εκ νέου το χρόνο κατά τον οποίο θα είναι διαθέσιμες οι υπηρεσίες του (time-to-live).

Όταν ένας κόμβος δεχτεί μία λίστα με υπηρεσίες από κάποιον γείτονά του τις προσθέτει στην δικιά του λίστα και ενημερώνει το χρόνο που οι υπηρεσίες είναι ενεργές.

2.3.2.3 Σύγκριση του DEAPspace με ένα απλό πρωτόκολλο εκπομπής.

Σύμφωνα με τους ερευνητές το πλεονέκτημα του DEAPspace είναι ότι πετυχαίνει να έχουν όλοι οι κόμβοι μία εικόνα για όλες τις διαθέσιμες υπηρεσίες συντομότερα από ότι ένα απλό πρωτόκολλο που βασίζεται σε εκπομπές. Αυτό ισχύει κυρίως για το χρόνο που χρειάζεται ένας καινούριος κόμβος, που μόλις συνδέεται στο δίκτυο, να μάθει τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Από την άλλη πλευρά το DEAPspace μοιάζει να έχει χειρότερες επιδόσεις όσο αναφορά το χρόνο που χρειάζεται το δίκτυο να μάθει για τις καινούριες υπηρεσίες που παρέχει ο νέος κόμβος. Εκεί που το DEAPspace μοιάζει να λειτουργεί

αρκετά καλύτερα από ένα απλό πρωτόκολλο είναι όταν παρέχεται σε αυτό, από χαμηλότερο επίπεδο, η πληροφορία ότι ένας καινούριος κόμβος έχει προστεθεί στο δίκτυο.

2.4 Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Marina, M. K., Das, S. R., *Routing Performance of in the Presence of Unidirectional Links in Multihop Wireless Networks*, Proceedings of ACM MobiHoc, pages 12-23, 2002
- [2] Blough, D. M., et al., *On the Symmetric Range Assignment Problem in Wireless Ad Hoc Networks*, Proceedings of IFIP Conference on Theoretical Computer Science, pages 71–82, 2002.
- [3] Perkins, C. E. and Bhagwat, P., *Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers*, Proceedings of ACM SIGCOMM, pages 234–244, 1994.
- [4] Johnson, D., Maltz, D., *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*, T. Imielinski and H. Korth, editors, Mobile computing, chapter 5. Kluwer Academic, 1996.
- [5] Johnson, D., Maltz, D. A., Hu, Y., and Jetcheva, J. G., *The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)*, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>, July 2004. IETF Internet Draft (work in progress).
- [6] Perkins, C. E., Royer, E. M., *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing*, Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA), pages 90–100, 1999.
- [7] Perkins, C. E., Belding-Royer, E. and Das, S. R., *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, July 2003. RFC 3561.
- [8] Broch, J., Maltz, D., Johnson, D., Hu, Y-C., Jetcheva, J., *A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols*, Proceedings of IEEE/ACM MobiCom, pages 85–97, 1998.
- [9] Das, S. R., Castaneda, R., Yan, J., *Simulation-based Performance Evaluation of Routing Protocols for Mobile Ad hoc Networks*, ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications (MONET), 5(3): 179–189, 2000.
- [10] Johansson, P., Larsson, T., Hedman, N., Mielczarek, B., Degermark, M., *Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks*, Proceedings of IEEE/ACM MobiCom, pages 195–206, 1999.
- [11] Boppana, R. V., Marina, M. K. and Konduru, S. P., *An Analysis of Routing Techniques for Mobile and Ad Hoc Networks*, Proceedings of International Conference on High Performance Computing (HiPC), pages 239–245, 1999.
- [12] Santivanez, C., McDonald, B., Stavrakakis, I., and Ramanathan, R., *On the Scalability of Ad Hoc Routing Protocols*, Proceedings of IEEE Infocom, pages 1688–1697, 2002.
- [13] Haas, Z. and Pearlman, M., *The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol*, IEEE/ACM Transactions on Networking, 9(4):427–38, 2001.

- [14] Pearlman, M. and Haas, Z., *Determining the Optimal Configuration for the Zone Routing Protocol*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(8): 1395–1414, 1999.
- [15] Chen, W., Gerla, M., *Global state routing: A new routing scheme for ad-hoc wireless networks*, Proceedings of IEEE ICC'98, June 1998.
- [16] Pei, G., Gerla, M., Chen, T.-W., *Fisheye state routing in mobile ad hoc networks*, in Proc. ICDCS '00, Taipei, Taiwan, Apr. 2000, pp. 71--78.
- [17] Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., Viennot, L., *Optimized link state routing protocol for ad hoc networks*, Proceedings of the 5th IEEE Multi Topic Conference (INMIC 2001).
- [18] Gerla, M., Hong X., Pei, G., *Landmark routing for large ad hoc wireless networks*, Proceedings of IEEE GLOBECOM 2000.
- [19] Park V., Corson, M., *Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA): Version 1 Functional Specification*. Internet-Draft, IETF, July 2001. draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt.
- [20] Toh, C.-K. *Associativity based routing for ad hoc mobile networks*. Wireless Personal Communications Journal, Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems, 4(2):103--139, March 1997.
- [21] Dube, Rohit; Rais, Cynthia D., Wang, Kuang-Yeh, Tripathi, Satish K., *Signal Stability Based Adaptive Routing (SSA) for Ad-Hoc Mobile Networks*, IEEE Personal Communication, Feb. 1997, pp. 36-45.
- [22] Basagni, S., Chlamtac, I., Syrotiuk, V., Woodward, B., *A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)*, in: Proceedings of ACM MobiCom (Oct. 1998).
- [23] Ko Y., Vaidya, N. H., *Location-Aided Routing (LAR) Mobile Ad Hoc Networks*, Proc. of Mobicom, pp. 66-75, Oct.1998.
- [24] Karp, B., Kung, H. T., *GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks*, In International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 243--254, 2000.
- [25] Jiang, M., Li, J., Tay, Y., *Cluster Based Routing Protocol (CBRP) Functional Specification*. Internet-Draft, IETF, August 1998. draft-ietfmanet-cbrp-spec-00.
- [26] Chatterjee, M., Das, S.K., Turgut, D., *WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad hoc Networks*, Journal of Cluster Computing (Special Issue on Mobile Ad hoc Networks), Vol. 5, No. 2, pp. 193-204, April 2002.
- [27] McDonald, A. B., Znati, T. F., *A Mobility-Based Framework for Adaptive Clustering in Wireless Ad Hoc Networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 17, No. 8, August 1999.

[28] Helal, S., Desai, N., Lee, C., Verna, V., *Konark - A Service Discovery and Delivery Protocol for Ad-hoc Networks*, Proc. of the 3rd IEEE Conference on Wireless Communication Networks, (WCNC), New Orleans, Louisiana, March, 2003.

[29] Nidd, M., *Service discovery in DEAPspace*, IEEE Personal Communications, 8(4):39--45, 2001.

3 Μελέτη της θεωρίας των πολύπλοκων δικτύων

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει σημαντικό ενδιαφέρον για μία κατηγορία δικτύων που ονομάζονται πολύπλοκα δίκτυα. Ως πολύπλοκο δίκτυο (complex network) αναφέρεται ένα δίκτυο (ή γράφος), το οποίο έχει μη τετριμμένα τοπολογικά χαρακτηριστικά. Τα περισσότερα δίκτυα τα οποία εμφανίζονται στη φύση μπορούν να χαρακτηριστούν ως τέτοια, καθώς παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που δεν εμφανίζονται στα απλά δίκτυα. Παραδείγματα είναι ο παγκόσμιος ιστός [1], τα κοινωνικά δίκτυα που δημιουργούνται μεταξύ ανθρώπων [2] ή ακόμα και τα βιολογικά δίκτυα που δημιουργούνται μέσα σε οργανισμούς. Η προσπάθεια που γίνεται είναι στο να γίνει κατανοητό ποιες είναι οι στατιστικές ιδιότητες των πραγματικών δικτύων, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε απαντήσεις για τις καίριες ερωτήσεις του πώς δημιουργούνται τα δίκτυα και ποια είναι η γενικότερη συμπεριφορά τους, αντιμετωπίζοντάς τα ως μία ολότητα και όχι κοιτώντας αποσπασματικά συγκεκριμένους κόμβους ή ακμές. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα τα οποία περιγράφουν τις γενικότερες μακροσκοπικές ιδιότητες πραγματικών δικτύων.

Οι δύο βασικές κατηγορίες δικτύων είναι τα δίκτυα απουσίας κλίμακας (scale-free networks) και τα δίκτυα μικρών κόσμων (small world networks). Και οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τα οποία απουσιάζουν στα απλά δίκτυα. Τέτοια χαρακτηριστικά, τα οποία θα αναλυθούν περαιτέρω αργότερα, είναι κατανομή βαθμού που ακολουθεί νόμο δύναμης (power law), υψηλό βαθμό συντελεστή συσσώρευσης (clustering coefficient), ύπαρξη κοινοτήτων και ιεραρχική δομή. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατανοήσει κανείς τη βαθύτερη δομή των δικτύων αυτών έτσι ώστε να μπορεί να τα χρησιμοποιήσει προς όφελός του.

3.2 Χαρακτηριστικά δικτύων

Το πιο απλό μοντέλο δικτύου είναι ο τυχαίος γράφος. Σε αυτό το μοντέλο τοποθετούνται πλευρές μεταξύ των n κόμβων για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο στο οποίο κάθε μία από τις $\frac{1}{2}n(n-1)$ δυνατές πλευρές υπάρχει με πιθανότητα p . Ο βαθμός των κόμβων ακολουθεί διωνυμική κατανομή. Το μοντέλο αυτό, παρότι έχει μελετηθεί εκτενώς, αδυνατεί να παρουσιάσει τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα πραγματικά δίκτυα. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών που εμφανίζονται σε πολλά διαφορετικά είδη πραγματικών δικτύων, χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να φανούν ιδιαιτέρως χρήσιμα στον τομέα των ad hoc δικτύων.

3.2.1 Το φαινόμενο του μικρού κόσμου

Ως φαινόμενο του μικρού κόσμου αναφέρεται η ιδιότητα που έχουν πολλά δίκτυα κατά την οποία τα περισσότερα ζεύγη κόμβων συνδέονται μεταξύ τους με ένα μονοπάτι λίγων ακμών, σε σχέση με το μέγεθος του δικτύου. Αναλυτικά ορίζεται ως l η μέση γεωδαιτική (δηλ. ελάχιστη) απόσταση μεταξύ ζεύγων κόμβων του δικτύου :

$$l = \frac{1}{\frac{1}{2}n(n+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}$$

όπου d_{ij} είναι η γεωδαιτική απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j . Είναι προφανές ότι στο άθροισμα προστίθενται και η απόσταση από κάθε κόμβο στον εαυτό του (η οποία είναι μηδενική), αλλά το σφάλμα είναι μικρό, οπότε προτιμάται ο παραπάνω ορισμός για λόγους απλότητας.

Η ποσότητα l έχει βρεθεί σε πολλά δίκτυα ότι είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μέγεθος n του δικτύου. Συγκεκριμένα, δίκτυα θεωρούνται ότι εμφανίζουν το φαινόμενο του μικρού κόσμου αν το l αυξάνει λογαριθμικά (ή και πιο αργά) καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνει ενώ ο μέσος βαθμός των κόμβων παραμένει σταθερός. Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι τα τυχαία δίκτυα παρουσιάζουν το φαινόμενο του μικρού κόσμου, αλλά κανένα άλλο από τα χαρακτηριστικά των πραγματικών δικτύων.

Η σημασία του φαινομένου έγκειται στο γεγονός ότι η διάδοση της πληροφορίας σε δίκτυα που εμφανίζουν το φαινόμενο γίνεται πολύ γρήγορα, σε σχέση με δίκτυα που δεν εμφανίζουν το φαινόμενο. Καθώς το ελάχιστο μονοπάτι είναι σχετικά μικρό η απόσταση

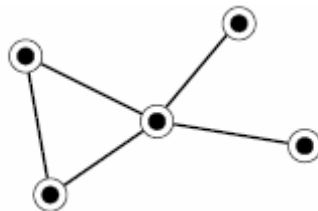
που πρέπει να διανυθεί είναι μικρότερη από την διάμετρο του δικτύου. Χαρακτηριστικά το l για το Διαδίκτυο είναι 2.5 και για ένα υποσύνολο του παγκόσμιου ιστού 16.18.

3.2.2 Μεταβατικότητα ή συσσώρευση

Μία βασική διαφορά ανάμεσα στους τυχαίους γράφους και τα πραγματικά δίκτυα είναι η ιδιότητα της μεταβατικότητας (transitivity) ή συσσώρευσης (clustering) που παρουσιάζουν τα τελευταία. Συγκεκριμένα, σε πολλά δίκτυα έχει βρεθεί ότι, αν ο κόμβος A είναι συνδεδεμένος με τον κόμβο B και ο κόμβος B με το κόμβο Γ, τότε υπάρχει αυξημένη πιθανότητα ο A να είναι συνδεδεμένος με τον Γ. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός «τριγώνων» στο δίκτυο, δηλαδή ομάδες τριών κόμβων όπου τα μέλη τους είναι ανά δύο συνδεδεμένα. Η ποσοτικοποίηση αυτής της ιδιότητας μπορεί να γίνει μέσω του ορισμού του συντελεστή συσσώρευσης, ο οποίος είναι:

$$C = \frac{3 \times \text{αριθμός τριγώνων στο δίκτυο}}{\text{αριθμός συνδεδεμένων τριάδων}}$$

όπου «συνδεδεμένη τριάδα» ονομάζεται ένας κόμβος με πλευρές προς ένα ζευγάρι. Παραδείγματος χάρη στο σχήμα



υπάρχει ένα τρίγωνο και οχτώ συνδεδεμένες τριάδες και, άρα, έχει συντελεστή συσσώρευσης $3 \times 1/8 = 3/8$.

Στην ουσία ο C αποτελεί το ποσοστό των τριάδων που είναι «πλήρεις», δηλαδή είναι τρίγωνα. Προφανώς ισχύει $0 \leq C \leq 1$. Με άλλους όρους, ο C είναι η μέση πιθανότητα δύο κόμβοι που γειτνιάζουν με τον ίδιο κόμβο να γειτνιάζουν και οι ίδιοι. Άλλος ορισμός είναι ο

$$C = \frac{6 \times \text{αριθμός τριγώνων στο δίκτυο}}{\text{αριθμός μονοπατιών μεγέθους δύο}}$$

ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως στην κοινωνιολογία.

Ένας ορισμός, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως, έχει προταθεί από τους Watts και Strogatz [3] είναι ο εξής:

$$C_i = \frac{\text{αριθμός τριγώνων συνδεδεμένων στον κόμβο } i}{\text{αριθμός τριάδων με κέντρο τον κόμβο } i}$$

ο οποίος ορίζεται τοπικά για κάθε κόμβο. Ο συντελεστής για όλο το δίκτυο δίνεται από το άθροισμα :

$$C = \frac{1}{n} \sum_i C_i$$

Γενικά, οποιοσδήποτε ορισμός και να χρησιμοποιηθεί, οι τιμές του συντελεστή συσσώρευσης είναι πολύ μεγαλύτερες σε διάφορα πραγματικά δίκτυα, όπως είναι τα κοινωνικά δίκτυα, από ότι σε τυχαίους γράφους [4]. Αυτό, απλουστευτικά, σημαίνει ότι οι άνθρωποι συνηθίζουν να δημιουργούν ομάδες μέσα στις οποίες οι σχέσεις μεταξύ των μελών είναι ισχυρές.

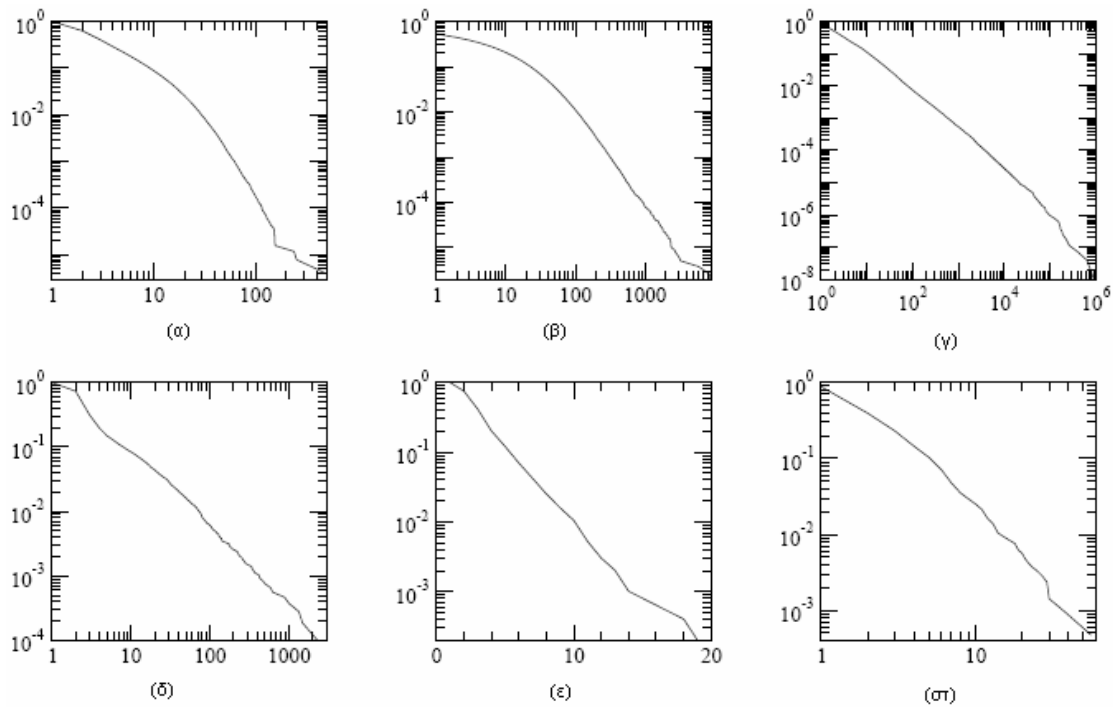
3.2.3 Κατανομή βαθμού κόμβων

Ως γνωστών βαθμός ενός κόμβου είναι ο αριθμός των πλευρών του. Ως p_k ορίζεται το ποσοστό των κόμβων του γράφου που έχουν βαθμό ίσο με k . Ισοδύναμα, p_k είναι η πιθανότητα ένας κόμβος που έχει επιλεγεί τυχαία να έχει βαθμό k . Μία γραφική παράσταση του p_k μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός ιστογράμματος. Το ιστόγραμμα είναι η κατανομή του βαθμού των κόμβων. Σε ένα τυχαίο γράφο, κάθε πλευρά υπάρχει ή δεν υπάρχει με ίση πιθανότητα, επομένως η κατανομή είναι διωνυμική. Αντίθετα τα πραγματικά δίκτυα δεν εμφανίζουν τέτοιας μορφής κατανομές, αλλά αντίθετα ασύμμετρες κατανομές με μακριές δεξιά ουρές. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα κόμβων με μεγάλο βαθμό δεν είναι αμελητέα.

Η μέτρηση αυτού του χαρακτηριστικού είναι αρκετά δύσκολη υπόθεση. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται συνήθως η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής

$$P_k = \sum_{k'=k}^{\infty} p_{k'}$$

η οποία είναι η πιθανότητα ο βαθμός του κόμβου να είναι μεγαλύτερος ή ίσος από k . Μερικά παραδείγματα φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 1. Αθροιστική κατανομή βαθμού κόμβων για έξι διαφορετικά δίκτυα. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο βαθμός κόμβου k και ο κατακόρυφος άξονας αναπαριστά την αθροιστική κατανομή πιθανότητας. Τα δίκτυα είναι: (α) το δίκτυο συνεργασίας μαθηματικών [5], (β) αναφορές σε δημοσιεύσεις μεταξύ 1981 και 1997 [6], (γ) ένα υποσύνολο του παγκόσμιου ιστού μεγέθους 300 εκατομμυρίων κόμβων του 1999 [7], (δ) το διαδίκτυο σε επίπεδο αυτόνομων συστημάτων το 1999 [8], (ε) το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας των δυτικών Ηνωμένων Πολιτειών [3], (στ) το δίκτυο αλληλεπίδρασης πρωτεϊνών για το μεταβολισμό του *S. Cerevisiae* [9]. Από αυτά τα δίκτυα τα (γ), (δ) και (στ) ακολουθούν εμφανώς ένα νόμο δύναμης, καθώς η γραφική παράσταση είναι μία ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα. Το δίκτυο (ε) ακολουθεί εκθετική κατανομή, καθώς ο οριζόντιος άξονας είναι γραμμικός. Το δίκτυο (β) έχει μορφή νόμου δύναμης μόνο για μεγάλο βαθμό, ενώ το δίκτυο (α) ακολουθεί πιθανώς νόμους δύναμης με διαφορετικό εκθέτη σε διαφορετικές περιοχές του.

Όμως φαίνεται και στο σχήμα, κάποια πραγματικά δίκτυα ακολουθούν νόμο δύναμης δηλαδή $p_k \sim k^{-a}$ για κάποιο σταθερό εκθέτη a , ενώ άλλα ακολουθούν εκθετικό νόμο. Η διαφορά μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή από τα γραφήματα, καθώς όσα ακολουθούν νόμο δύναμης εμφανίζουν μία ευθεία γραμμή σε αμφιλογαριθμική κλίμακα (π.χ. τα (γ), (δ) και (στ) στο σχήμα), ενώ όσα ακολουθούν εκθετικό νόμο εμφανίζονται ως μία ευθεία γραμμή σε ημιλογαριθμική κλίμακα (π.χ. το (ε) στο σχήμα).

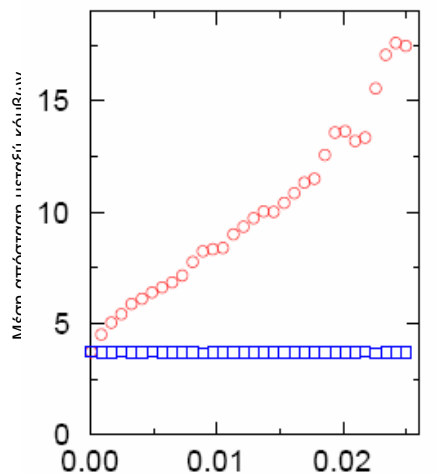
Τα δίκτυα των οποίων η κατανομή του βαθμού των κόμβων ακολουθεί κάποιο νόμο δύναμης αναφέρονται συχνά με τον όρο «απούσης κλίμακας» (scale-free networks). Ο ορισμός προέρχεται από τον τομέα της φυσικής, όπου μία συνάρτηση αποκαλείται απούσης κλίμακας όταν είναι της μορφής $f(x) = cx^{-(a+1)}$, καθώς ικανοποιούν την εξής ιδιότητα: $f(ax) = g(a)f(x)$. Αυτό σημαίνει ότι μία αύξηση στο μέγεθος του δικτύου δεν αλλάζει τη

μορφή του γραφήματος παρά μόνο κατά κάποια πολλαπλασιαστική σταθερά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το παγκόσμιο δίκτυο [10] και το Διαδίκτυο [8].

3.2.4 Ανθεκτικότητα δικτύου

Στα διάφορα δίκτυα δεδομένων είναι πολύ σημαντική η ανθεκτικότητα του δικτύου απέναντι σε διαφόρων ειδών βλάβες ή επιθέσεις. Βλέποντας το κανείς από την πλευρά των γράφων, κάτι τέτοιο ισοδυναμεί με την απομάκρυνση κόμβων ή πλευρών του δικτύου. Ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στην απομάκρυνση κόμβων από το δίκτυο, καθώς τότε εμφανίζονται τα μεγαλύτερα προβλήματα. Όπως είναι προφανές, αφαιρώντας κόμβους το μέγεθος των μονοπατιών θα αυξηθεί, με αποτέλεσμα να αυξηθεί και ο χρόνος που απαιτείται να για να διαδοθεί ένα μήνυμα, έως ότου το δίκτυο αρχίσει να αποτελείται από απομονωμένες ομάδες. Τα διάφορων ειδών δίκτυα διαφέρουν ως προς την ανθεκτικότητά τους στην αφαίρεση κόμβων.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι με τον οποίο μπορεί να γίνει η απομάκρυνση των κόμβων: τυχαία και στοχευόμενα. Σημαντική έρευνα στον συγκεκριμένο τομέα έχει γίνει από τους Albert και άλλοι [11], όπου γίνεται μελέτη της απομάκρυνσης κόμβων από ένα δίκτυο 6000 κόμβων, το οποίο προσομοιάζει το Διαδίκτυο σε επίπεδο αυτόνομων συστημάτων, καθώς και σε ένα δίκτυο 326000 κόμβων, το οποίο είναι ένα υποσύνολο του παγκόσμιου ιστού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, και τα δύο δίκτυα εμφανίζουν κατανομές βαθμού κόμβων που ακολουθούν νόμο δύναμης. Οι συγγραφείς μέτρησαν πώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ κόμβων καθώς αφαιρούνται διαδοχικά κόμβοι, τόσο τυχαία, όσο και με την αφαίρεση κατά σειρά των κόμβων με τον υψηλότερο βαθμό. Στο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματά τους όσο αναφορά το διαδίκτυο. Είναι προφανές ότι η στοχευόμενη αφαίρεση επιφέρει δραματικά αποτελέσματα στο δίκτυο. Η απόσταση αυξάνει ραγδαία, ενώ μικρό σχετικά ποσοστό κόμβων πρέπει να αφαιρεθεί πριν διακοπεί πλήρως η επικοινωνία στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, η τυχαία αφαίρεση κόμβων έχει πάρα πολύ μικρή επίδραση στο δίκτυο (σχεδόν μηδενική), πράγμα το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς οι περισσότεροι κόμβοι έχουν μικρό βαθμό και άρα μικρός αριθμός μονοπατιών περνάει από αυτούς. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν γενικευτεί για πολλά είδη δικτύων. Έτσι τα περισσότερα δίκτυα είναι ανθεκτικά απέναντι σε τυχαία αφαίρεση κόμβων, αλλά ευάλωτα



Ποσοστό κόμβων που έχουν αφαιρεθεί

σε στοχευόμενη.

3.2.5 Ύπαρξη κοινοτήτων

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι τα περισσότερα κοινωνικά δίκτυα εμφανίζουν «δομές κοινοτήτων», δηλαδή ομάδες κόμβων οι οποίες έχουν υψηλή πυκνότητα πλευρών μεταξύ

των μελών τους και σχετικά χαμηλή πυκνότητα μεταξύ ομάδων. Είναι αρκετά σημαντικό να μπορεί κανείς να αναγνωρίσει αυτές τις κοινότητες, καθώς οι κοινότητες δημιουργούνται βάσει κάποιου κοινού χαρακτηριστικού και έχουν την τάση να παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά σε διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα.

Ο κλασικός τρόπος για την εύρεση κοινοτήτων είναι η ανάλυση ομάδων (cluster analysis). Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι οι ακμές έχουν κάποιο βάρος το οποίο υποδηλώνει τη σημαντικότητα της σύνδεσης. Επίσης η απουσία ακμής μεταξύ δύο κόμβων μπορεί να παρασταθεί με μία ακμή μηδενικού βάρους. Ο αλγόριθμος ξεκινά με ένα σύνολο n κόμβων χωρίς ακμές και διαδοχικά προστίθενται οι ακμές κατά σειρά μεγαλύτερου βάρους. Ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει οποιαδήποτε στιγμή και κανείς μπορεί να εξετάσει τις ομάδες που έχουν δημιουργηθεί. Οι ομάδες θεωρείται ότι είναι οι κοινότητες του δικτύου. Όταν προστεθούν όλες οι ακμές, όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και το δίκτυο αποτελείται από μία μεγάλη κοινότητα. Έτσι, είναι ιδιαίτερος σημαντικό να μπορεί κανείς να κατανοήσει σε ποιο στάδιο θα πρέπει να σταματήσει ο αλγόριθμος.

Μία άλλη μέθοδος ή οποία έχει προταθεί από τον Girvan and Newman [12] βασίζεται στην «ενδιαμεσότητα» (betweenness) των ακμών, η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των γεωδαιτικών μονοπατιών που περνούν από μία ακμή. Η ιδέα είναι ότι σε ένα δίκτυο με ισχυρό το χαρακτηριστικό των κοινοτήτων θα υπάρχουν κάποιες ακμές οι οποίες θα συνδέουν τις διάφορες ομάδες. Προφανώς, οι ακμές αυτές θα έχουν υψηλή τιμή ενδιαμεσότητας. Βρίσκοντας και αφαιρώντας αυτές τις ακμές το δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε κοινότητες.

Η ποσότητα αυτή μπορεί να υπολογισθεί σε $O(mn)$ χρόνο για ένα δίκτυο με n κόμβους και m ακμές. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την ενδιαμεσότητα κάθε ακμής σε κάθε βήμα και αφαιρεί από το δίκτυο την ακμή με την υψηλότερη τιμή, έως ότου αφαιρεθούν όλες οι ακμές. Ο αλγόριθμος μπορεί, όπως και προηγούμενα, να σταματήσει σε οποιοδήποτε σημείο, στο οποίο και μπορεί κανείς να διακρίνει τις διαφορετικές κοινότητες.

Είναι, λοιπόν, σημαντικό να βρεθεί κάποιος τρόπος ο οποίος να δείχνει αν ο χωρισμός που έχει επιτευχθεί είναι ικανοποιητικός, ώστε να σταματάει ο αλγόριθμος. Για τον λόγο αυτό οι συγγραφείς προτείνουν το μέτρο της τμηματικότητας (modularity). Για μία διαίρεση του δικτύου που αποτελείται από g ομάδες ορίζεται ένας πίνακας e μεγέθους $g \times g$, όπου κάθε στοιχείο e_{ij} είναι το ποσοστό των ακμών του αρχικού δικτύου που συνδέουν

τους κόμβους της ομάδας i με αυτούς της ομάδας j . Σε αυτή τη περίπτωση η τμηματικότητα ορίζεται ως:

$$Q = \sum_i e_{ii} - \sum_{ijk} e_{ij}e_{ki} = \text{Tr}e - \|e^2\|$$

όπου $\|x\|$ είναι το άθροισμα όλων των στοιχείων του x . Πρακτικά το Q είναι το ποσοστό των ακμών που βρίσκονται ανάμεσα σε κοινότητες μείον την αναμενόμενη τιμή της ίδιας ποσότητας για ένα δίκτυο με τα ίδια χαρακτηριστικά με τη διαφορά ότι οι ακμές είναι τυχαίες. Μία τιμή $Q = 0$ δείχνει ότι η εκτιμώμενη δομή κοινοτήτων δεν είναι καλύτερη από έναν τυχαίο γράφο. Τοπικά μέγιστα του μέτρου δείχνουν μία καλή εκτίμηση για τις ομάδες. Έτσι λοιπόν με χρήση του μέτρου της τμηματικότητας είναι δυνατό να γίνεται μία εκτίμηση για την ποιότητα των ομάδων σε κάθε βήμα και ο αλγόριθμος να σταματάει όταν βρεθεί μία ικανοποιητική διαίρεση του δικτύου. Σοβαρό μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι απαιτεί στη χειρότερη περίπτωση $O(m^2n)$, αν και έχουν προταθεί παραλλαγές που έχουν πολυπλοκότητα $O(n^2)$ [13]

Η δυνατότητα εύρεσης κοινοτήτων σε δίκτυα, ίσως να αποδειχθεί ιδιαίτερος σημαντική σε πάρα πολλούς τομείς, καθώς δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν ιεραρχικές δομές, οι οποίες παρέχουν μία μορφή αφαίρεσης σε πολλά προβλήματα, «μειώνοντας» πρακτικά το μέγεθος του δικτύου. Παραδείγματος χάριν, στα ad hoc δίκτυα, όπου η κινητικότητα των κόμβων δημιουργεί το μεγαλύτερο αριθμό των προβλημάτων, είναι δυνατό, μέσω της ανακάλυψης ισχυρών κοινοτήτων, πολλές λειτουργίες να γίνονται σε επίπεδο ομάδων οι οποίες είναι, συνήθως, αρκετά πιο στατικές από ότι μεμονωμένοι κόμβοι.

3.3 Μοντέλα δημιουργίας δικτύων

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια για να αναπτυχθούν μοντέλα τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν δίκτυα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί κυρίως στην ανάπτυξη μοντέλων που θα δίνουν δίκτυα που εμφανίζουν το φαινόμενο του μικρού κόσμου και δίκτυα απύθμενης κλίμακας. Κάποια παραδείγματα αναφέρονται παρακάτω.

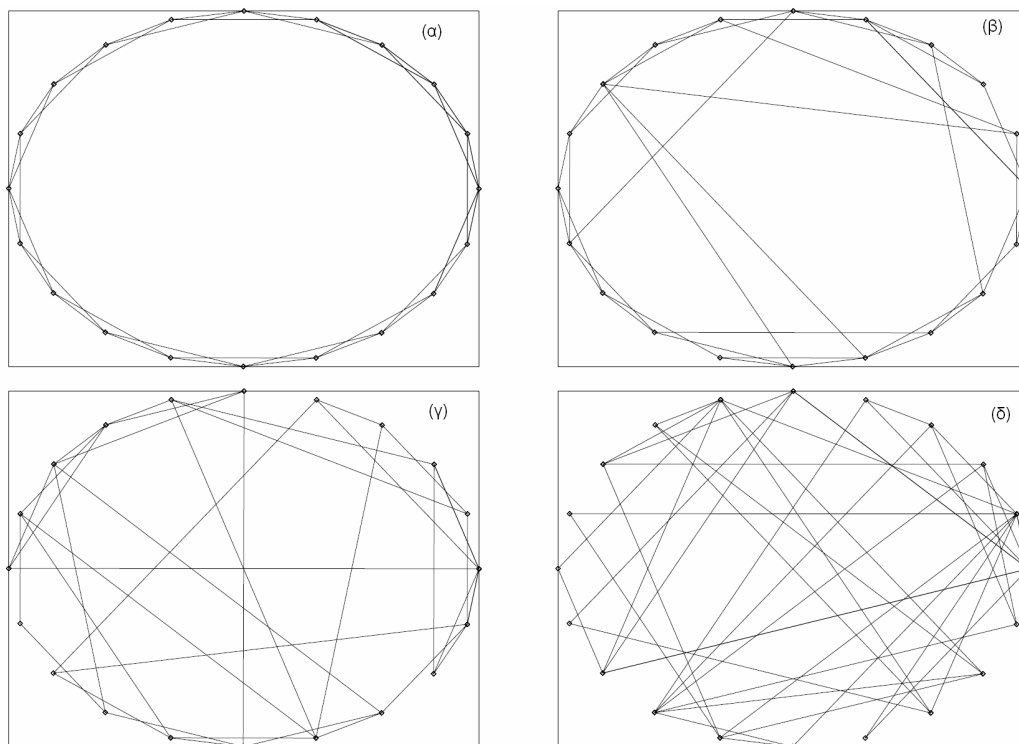
3.3.1 Το μοντέλο των δικτύων μικρού κόσμου

Το δίκτυα μικρού κόσμου έχουν μεγάλη σημασία για την παρούσα εργασία, καθώς έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την μελέτη και μοντελοποίηση κοινωνικών δικτύων [14], [15], [16]. Η σημασία τους για την παρούσα εργασία έγκειται ότι η μοντελοποίηση της

συμπεριφοράς των ανθρώπων-χρηστών μπορεί να βοηθήσει στην πιο αποτελεσματική σχεδίαση πρωτοκόλλων και στην επίλυση προβλημάτων που εμφανίζονται στα ad hoc δίκτυα.

Είναι λογικό να υποθέσει κανείς ότι τα δίκτυα μπορεί να έχουν και μία γεωγραφική συνιστώσα στη φάση της δημιουργίας τους, καθώς οι κόμβοι βρίσκονται κατά κύριο λόγο στο χώρο και άρα είναι πιθανό η γειτνίασή τους ή όχι με άλλους κόμβους να παίζει ρόλο στη διαδικασία επιλογής με ποιους κόμβους θα συνδεθούν. Βλέποντάς κανείς από την αντίθετη πλευρά, η σχέση που έχουν δύο κόμβοι μπορεί να επηρεάζει τη χωρική τους θέση.

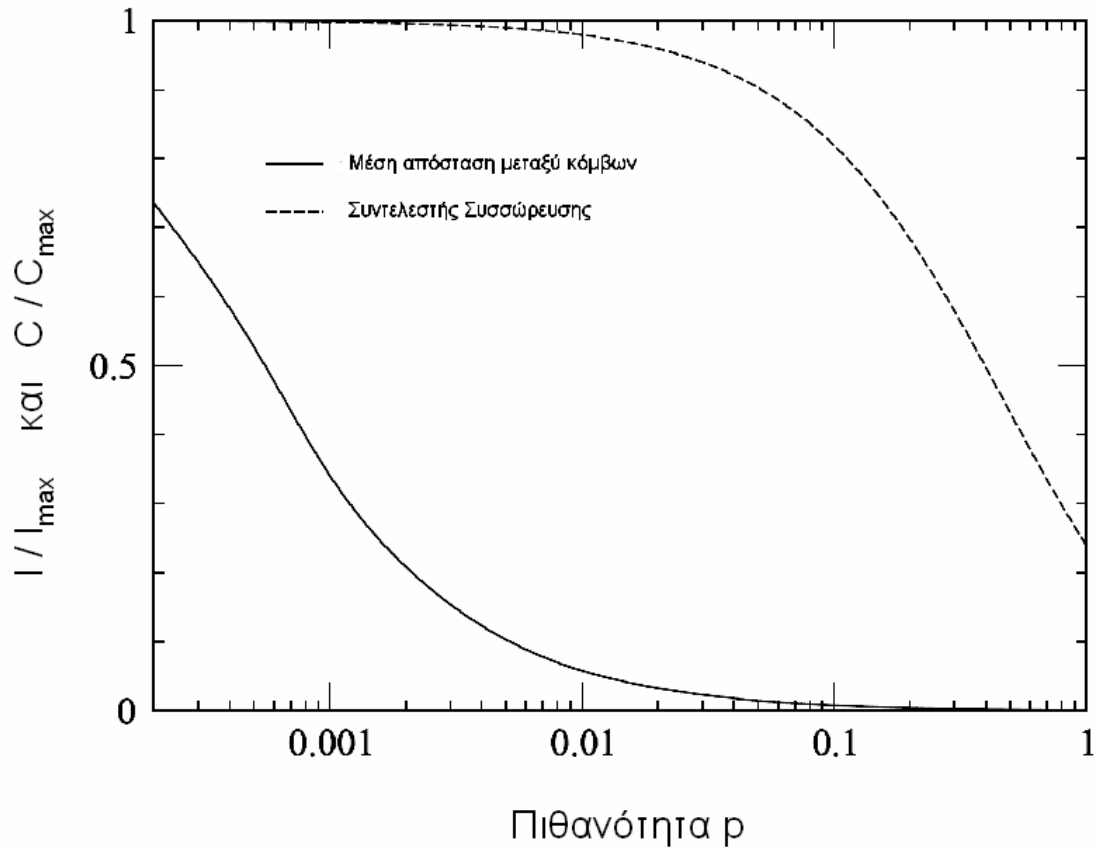
Το μοντέλο για τη δημιουργία δικτύων μικρού κόσμου όπως έχει προταθεί από τους Watts και Strogatz [17], [3] βασίζεται σε αυτή ακριβώς την ιδέα, ξεκινάει δηλαδή με ένα πλέγμα διάστασης ένα (1-lattice) με L κόμβους και ενώνει κάθε κόμβο με όλους τους γείτονές του που απέχουν k ή λιγότερα βήματα. Έτσι το δίκτυο έχει Lk ακμές. Στη συνέχεια κάθε ακμή του δικτύου αναδρομολογείται με πιθανότητα p . Αυτό σημαίνει ότι κάθε ακμή έχει πιθανότητα p να αλλάξει το ένα σημείο της και να ενώνει έτσι ένα κόμβο με κάποιον που βρίσκεται μακρύτερα από k . Μοναδικοί περιορισμοί είναι ότι απαγορεύονται διπλές ακμές (δηλαδή δύο κόμβοι να ενώνονται με περισσότερες της μίας ακμές) και ακμές που ξεκινούν και τελειώνουν στον ίδιο κόμβο. Ένα παράδειγμα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3. Δημιουργία δικτύου βάσει του μοντέλου των Watts και Strogatz με $k=2$, $L=20$. (α) $p = 0$, (β) και (γ) ενδιάμεσες τιμές για το p , (δ) $p = 1$.

Η διαδικασία της αναδρομολόγησης επιτρέπει στο μοντέλο να μεταπίπτει από ένα κανονικό πλέγμα σε ένα δίκτυο με χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός τυχαίου γράφου. Για $p = 0$ έχουμε ένα κανονικό πλέγμα. Εύκολα βρίσκεται ότι ο συντελεστής συσσώρευσης του κανονικού πλέγματος είναι $C = (3k - 3)/(4k - 2)$ το οποίο τείνει στο $3/4$ για k μεγάλο. Το πλέγμα όμως δεν εμφανίζει το φαινόμενο του μικρού κόσμου. Η μέση γεωδαιτική απόσταση τείνει στο $L/4k$ για μεγάλα L . Για $p = 1$ κάθε ακμή έχει αναδρομολογηθεί σε κάποιον καινούριο κόμβο και ο γράφος είναι σχεδόν τυχαίος με τυπικές γεωδαιτικές αποστάσεις της τάξης του $\log L / \log k$ αλλά με πολύ χαμηλό συντελεστή συσσώρευσης $C \approx 2k/L$. Οι Watts και Strogatz έδειξαν ότι υπάρχει μία μεγάλη περιοχή μεταξύ των δύο αυτών άκρων όπου τα δημιουργηθέντα δίκτυα παρουσιάζουν τόσο χαμηλές τιμές μέσης γεωδαιτικής απόστασης όσο και υψηλό συντελεστή συσσώρευσης.

Μία παραλλαγή του συγκεκριμένου μοντέλου έχει προταθεί από τον Monasson [18] όσο και από τους Newmann και Watts [19]. Σύμφωνα με αυτή οι ακμές δεν αναδρομολογούνται, αλλά καινούριες τοποθετούνται ώστε να ενωθούν τυχαίοι κόμβοι στο δίκτυο. Η πιθανότητα p εκλέγεται έτσι ώστε να δείχνει την πυκνότητα αυτών των «συντομεύσεων». Έτσι ο μέσος αριθμός «συντομεύσεων» είναι Lkp ενώ ο μέσος βαθμός κόμβου είναι $2k(1+p)$. Το μοντέλο αυτό έχει το θετικό στοιχείο ότι δεν υπάρχει περίπτωση κάποιος κόμβος να αποκοπεί από το δίκτυο. Παρακάτω θα μελετηθούν τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα δίκτυα που δημιουργούνται από τα παραπάνω μοντέλα.



Σχήμα 4. Η επίδραση που έχει η πιθανότητα p στον συντελεστή συσσώρευσης και στη μέση απόσταση μεταξύ κόμβων. Τα C_{\max} και l_{\max} είναι οι τιμές του συντελεστή συσσώρευσης και της μέσης απόστασης για $p = 0$.

Όπως είναι προφανές και από το σχήμα υπάρχει μία περιοχή τιμών του p για την οποία το δίκτυο εμφανίζει υψηλό συντελεστή συσσώρευσης ενώ ταυτόχρονα έχει χαμηλή μέση απόσταση μεταξύ κόμβων.

3.3.1.1 Συντελεστής Συσσώρευσης

Ο συντελεστής συσσώρευσης μπορεί να υπολογιστεί εύκολα και για τις δύο μορφές του. Οι Barabási και Weigt [20] απέδειξαν ότι $C = \frac{3(k-1)}{2(2k-1)}(1-p)^3$ για τον πρώτο ορισμό ενώ

ο Newman [21] απέδειξε ότι $C = \frac{3(k-1)}{2(2k-1) + 4kp(p+2)}$.

3.3.1.2 Κατανομή βαθμού κόμβων

Το μοντέλο δημιουργίας δικτύων που εμφανίζουν το φαινόμενο του μικτού κόσμου αδυνατεί, δυστυχώς, να αναπαράγει τις κατανομές βαθμού κόμβων των πραγματικών δικτύων. Για το μοντέλο χωρίς αναδρομολόγηση, κάθε κόμβος έχει βαθμό τουλάχιστο $2k$

συν ένα αριθμό επιπλέον συνδέσεων που ακολουθεί διωνυμική κατανομή. Άρα η πιθανότητα να έχει κάποιο κόμβος βαθμό ίσο με j είναι

$$P_j = \binom{L}{j-2k} \left[\frac{2kp}{L} \right]^{j-2k} \left[1 - \frac{2kp}{L} \right]^{L-j+2k}$$

για $j \geq 2k$.

3.3.1.3 Μέση απόσταση μεταξύ κόμβων

Τα μοντέλα για τη δημιουργία δικτύων με το χαρακτηριστικό του μικρού κόσμου αναπτύχθηκαν κυρίως για την εξέταση της μέσης γεωδαιτικής απόστασης (l). Παρόλα αυτά δεν έχει καταστεί δυνατό να βρεθεί μία ακριβής λύση για το l . Είναι γνωστό ότι για $p \rightarrow 0$ ισχύει $l = L/4k$, ενώ για l μεγάλο, $l \sim \log L$. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο άκρα υπάρχει κάποιο σημείο όπου γίνεται η μετάβαση από το ένα στο άλλο. Η ερευνητική προσπάθεια έχει επικεντρωθεί στο να βρεθεί μία συνάρτηση που να δίνει το l για το οποίο συμβαίνει αυτό.

3.3.2 Μοντέλα δημιουργίας δικτύων απούσης κλίμακας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πολλά δίκτυα εμφανίζουν το χαρακτηριστικό ότι ο αριθμός των ακμών των κόμβων ακολουθεί ένα νόμο δύναμης. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται απούσης κλίμακας. Οι Barabasi και Albert πρότειναν ένα μοντέλο το οποίο οδηγεί σε δίκτυα απούσης κλίμακας [22]. Το μοντέλο τους βασίζεται σε δύο παρατηρήσεις. Πρώτον, ότι τα δίκτυα αναπτύσσονται με τη συνεχή προσθήκη κόμβων σε αυτά και δεύτερον, ότι τα δίκτυα επιδεικνύουν προνομιακή προσάρτηση (preferential attachment), τέτοια ώστε η πιθανότητα σύνδεσης με ένα κόμβο να εξαρτάται από τον αριθμό των ακμών που έχει ήδη ο κόμβος. Το μοντέλο των ερευνητών προσπαθεί να αναπαραγάγει ακριβώς αυτό το στοιχείο. Ο αλγόριθμος ξεκινάει με ένα μικρό αριθμό κόμβων, m_0 , και σε κάθε βήμα προστίθεται ένας κόμβος ο οποίος έχει m ακμές που τον συνδέουν με ήδη υπάρχοντες κόμβους. Η πιθανότητα P με την οποία ο καινούριος κόμβος θα συνδεθεί με ένα κόμβο i εξαρτάται από τις ήδη υπάρχουσες συνδέσεις του i . Αν k_i είναι ο αριθμός των ακμών του i τότε $P(k_i) = k_i / \sum_j k_j$. Μετά από t βήματα ο αλγόριθμος οδηγεί σε ένα τυχαίο δίκτυο αποτελούμενο από $t + m_0$ κόμβους και mt ακμές. Η μελέτη του μοντέλου οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το δίκτυο οδηγείται σε μία μορφή όπου ακολουθεί νόμο δύναμης με

εκθέτη $\gamma = 2.9 \pm 0.1$ το οποίο είναι ανεξάρτητο του m , της μοναδικής παραμέτρου του μοντέλου.

Αν και το μοντέλο των Barabasi και Albert αναπαράγει δίκτυα απούσης κλίμακας, στερείται εξηγήσεως για τους εκθέτες των κατανομών των πραγματικών δικτύων, οι οποίοι κυμαίνονται μεταξύ 1 και 3 [23], και επιπλέον, δεν ενσωματώνει μηχανισμούς δημιουργίας ακμών που έχουν παρατηρηθεί σε διάφορα δίκτυα. Για αυτό το λόγο πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να προσδιορίσουν την εξάρτηση του εκθέτη από διάφορες διαδικασίες που παρουσιάζουν πραγματικά δίκτυα.

Οι Krapivsky, Render και Leyntraz μελέτησαν την επιρροή μη γραμμικής $P(k)$ στη δυναμική του συστήματος, αντικαθιστώντας την πιθανότητα με την οποία ένας κόμβος συνδέεται σε ένα κόμβο i με βαθμό k_i με $P(k) \sim k^a$ [24]. Βρήκαν ότι για μη γραμμική προνομιακή προσάρτηση ($a \neq 1$) δεν υπάρχει δημιουργία δικτύου απούσης κλίμακας και ότι αυτό συμβαίνει μόνο για ασυμπτωτικά γραμμική προσάρτηση.

Οι Dorogovtsev, Mendes και Samukhin μελέτησαν την επιρροή της αρχικής ελκυστικότητας (initial attractiveness) αντικαθιστώντας την πιθανότητα με την οποία ένας κόμβος αποκτάει μία καινούρια εισερχόμενη ακμή με $P(k_i) \sim A + k_i$, όπου A είναι η αρχική ελκυστικότητα και περιγράφει την πιθανότητα ενός απομονωμένου κόμβου να αποκτήσει μία εισερχόμενη ακμή [25]. Στο μοντέλο των Barabasi και Albert η πιθανότητα ενός κόμβου χωρίς ακμές να αποκτήσει μία καινούρια είναι μηδενική, πράγμα το οποίο δεν ισχύει σε πραγματικά δίκτυα [26]. Οι Dorogovtsev, Mendes και Samukhin υπολόγισαν ότι στο μοντέλο που προτείνουν η κατανομή του βαθμού των κόμβων ακολουθεί νόμο δύναμης με εκθέτη $\gamma = 2 + A/m$ και άρα δημιουργείται όντως ένα δίκτυο απούσης κλίμακας στο οποίο η αρχική ελκυστικότητα επηρεάζει μόνο την τιμή του εκθέτη.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό το οποίο αδυνατεί να δημιουργήσει το μοντέλο των Barabasi και Albert είναι το γεγονός ότι ο ρυθμός με τον οποίο οι κόμβοι αυξάνουν τις ακμές τους δεν είναι ίδιος. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένοι κόμβοι αυξάνουν τις ακμές τους με πολύ ταχύτερους ρυθμούς από ότι άλλοι. Στο μοντέλο των Barabasi και Albert όλοι οι κόμβοι αυξάνουν τις ακμές τους με τον ίδιο ρυθμό και επομένως οι μεγαλύτεροι σε ηλικία κόμβοι έχουν τον μεγαλύτερο αριθμό από ακμές, πράγμα που δεν ισχύει ακριβώς. Για αυτό το λόγο οι Bianconi και Barabasi προτείνουν την εισαγωγή της έννοιας της επιδεξιότητας (*fitness*) [27]. Η επιδεξιότητα δείχνει την ικανότητα με την οποία οι κόμβοι μπορούν να αυξάνουν τον βαθμό τους. Η επιδεξιότητα ποσοτικοποιείται μέσω

της παραμέτρου επιδεξιότητας η_i . Κάθε καινούριος κόμβος έχει μία τιμή επιδεξιότητας η_i επιλεγμένη από μία κατανομή $p(\eta)$ και συνδέεται με m ακμές σε κόμβους που ήδη υπάρχουν στο δίκτυο με πιθανότητα ανάλογη του βαθμού επιδεξιότητας. Η πιθανότητα ενός καινούριου κόμβου να συνδεθεί στο κόμβο i είναι:

$$P_i = \frac{\eta_i k_i}{\sum_j \eta_j k_j}$$

Το μοντέλο επιλύθηκε αναλυτικά και βρέθηκε ότι η κατανομή του βαθμού των κόμβων ακολουθεί ένα γενικευμένο νόμο δύναμης με εκθέτη που εξαρτάται από την κατανομή $p(\eta)$ και με μία αντίστροφη λογαριθμική διόρθωση. Για παράδειγμα, για ομοιόμορφη κατανομή επιδεξιότητας η κατανομή του βαθμού των κόμβων είναι $P(k) \sim k^{-2.255}/\log(k)$. Οι Ergun και Rodgers [28] βρήκαν παρόμοια αποτελέσματα μελετώντας ένα μοντέλο δικτύου που ενσωματώνει αρχική ελκυστικότητα και επιδεξιότητα. Οι κατανομές των εισερχόμενων και εξερχόμενων ακμών ακολουθούν ένα νόμο δύναμης με αντίστροφες λογαριθμικές διορθώσεις.

Δυστυχώς, όλα τα παραπάνω μοντέλα έχουν το χαρακτηριστικό ότι ο συντελεστής συσσώρευσης μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η υψηλή τιμή του συντελεστή συσσώρευσης είναι χαρακτηριστικό πολλών πραγματικών δικτύων. Για αυτό το λόγο έχουν γίνει διάφορες προτάσεις έτσι ώστε να μπορέσει να εισαχθεί και αυτό το χαρακτηριστικό στα μοντέλα δημιουργίας δικτύων απούσης κλίμακας. Χαρακτηριστικά οι Holme και Kim επέκτειναν το μοντέλο των Barabasi και Albert ούτως ώστε να περιλαμβάνει και ένα βήμα σχηματισμού τριάδων με αποτέλεσμα το δίκτυο να ακολουθεί ένα νόμο δύναμης όσο αναφορά την κατανομή του βαθμού των κόμβων ενώ ταυτόχρονα ο συντελεστής συσσώρευσης προσεγγίζει μία σταθερή τιμή [29]. Το βήμα σχηματισμού τριάδων έχει ως εξής: Αν μία ακμή προστέθηκε μεταξύ των κόμβων u και w στο προηγούμενο βήμα προνομιακής προσάρτησης, τότε προστίθεται άλλη μία ακμή από το u προς ένα τυχαία επιλεγμένο γείτονα του w . Το βήμα αυτό εκτελείται με πιθανότητα P_t , ενώ δεν εκτελείται με πιθανότητα $1 - P_t$. Ο συντελεστής συσσώρευσης του παραγόμενου δικτύου προσεγγίζει μία σταθερή τιμή η οποία εξαρτάται από την τιμή P_t .

Η σπουδαιότητα των διαφόρων μοντέλων για τη δημιουργία δικτύων απούσης κλίμακας είναι πολύ μεγάλη για διάφορους λόγους. Κατ' αρχάς, μέσω αυτών έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε δίκτυα που προσεγγίζουν τα πραγματικά και άρα να έχουμε ρεαλιστικότερα σενάρια για τον έλεγχο διάφορων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων.

Επίσης, κατανοώντας τη δυναμική που κρύβεται πίσω από τη δημιουργία των δικτύων μπορεί κανείς να παράγει καινούριους αλγορίθμους, που να λαμβάνουν υπ' όψη τους αυτά τα χαρακτηριστικά και να τα χρησιμοποιούν προς όφελός τους.

3.4 Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Huberman, B. A., *The Laws of the Web*, MIT Press, Cambridge, MA (2001).
- [2] Rapoport, A. and Horvath, W. J., *A study of a large sociogram*, Behavioral Science 6, 279-291 (1961).
- [3] Watts, D. J. and Strogatz, S. H., *Collective dynamics of 'small-world' networks*, Nature 393, 440-442 (1998).
- [4] Ravasz, E. and Barabasi, A.-L., *Hierarchical organization in complex networks*, Phys. Rev. E 67, 026112 (2003).
- [5] Grossman, J. W. and Ion, P. D. F., *On a portion of the well-known collaboration graph*, Congressus Numerantium 108, 129-131 (1995).
- [6] Redner, S., *How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution*, Eur. Phys. J. B 4, 131-134 (1998).
- [7] Broder, A., Kumar, R., Maghoul, F., Raghavan, P., Rajagopalan, S., Stata, R., Tomkins, A., and Wiener, J., *Graph structure in the web*, Computer Networks 33, 309-320 (2000).
- [8] Chen, Q., Chang, H., Govindan, R., Jamin, S., Shenker, S. J., and Willinger, W., *The origin of power laws in Internet topologies revisited*, in Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE Computer Society (2002).
- [9] Jeong, H., Mason, S., Barabasi, A.-L., and Oltvai, Z. N., *Lethality and centrality in protein networks*, Nature 411, 41-42 (2001).
- [10] Albert, R., Jeong, H., and Barabasi, A.-L., *Diameter of the world-wide web*, Nature 401, 130-131 (1999).
- [11] Albert, R., Jeong, H., and Barabasi, A.-L., *Attack and error tolerance of complex networks*, Nature 406, 378-382 (2000).
- [12] Girvan, M. and Newman, M. E. J., *Community structure in social and biological networks*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 99, 8271-8276 (2002).
- [13] Radicchi, F., Castellano, C., Cecconi, F., Loreto, V., and Parisi, D., *Defining and identifying communities in networks*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101, 2658-2663 (2004).

- [14] Watts, D. J., *Small Worlds, The Dynamics of Networks between Order and Randomness*, Princeton Studies on Complexity. Princeton University Press, 1999.
- [15] Moore, C. and Newman, M. E. J., *Epidemics and percolation in small world networks*, Phys.Rev.E61, (2000).
- [16] Kleinberg, J., *Navigation in a small world*, Nature 406:845 (2000).
- [17] Watts, D. J., *Networks, dynamics, and the small world phenomenon*, Am. J. Sociol. 105, 493-592 (1999).
- [18] Monasson, R., *Diffusion, localization and dispersion relations on 'small-world' lattices*, Eur. Phys. J. B 12, 555-567 (1999).
- [19] Newman, M. E. J. and Watts, D. J., *Renormalization group analysis of the small-world network model*, Phys. Lett. A 263, 341-346 (1999).
- [20] Barrat, A. and Weigt, M., *On the properties of small world networks*, Eur. Phys. J. B 13, 547-560 (2000).
- [21] Newman, M. E. J., *The structure and function of networks*, Computer Physics Communications 147, 40-45 (2002).
- [22] Barabasi, A.-L., Albert, R., *Emergence of scaling in random networks*, Science 286, 509-512 (1999).
- [23] Albert, R., Barabasi, A.-L., *Statistical mechanics of complex networks*, Reviews of Modern Physics 74:47 (2002).
- [24] Krapivsky, P., Render, S., Leyvraz, F., *Connectivity of growing random networks*. Phys, Rev. Lett. 85:4629 (2000).
- [25] Dorogovtsev, S., Mendes, J., Samukhin, A., *Structure of growing networks: Exact solution of the Barabasi-Albert's model*, Phys. Rev. Lett. 85:4633 (2000).
- [26] Jeong, H., Mason, S., Barabasi, A., Oltvai, Z., *Measuring preferential attachment for evolving networks (2001)*, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0104131>.
- [27] Bianconi, G., Barabasi, A., *Competition and multiscaling in evolving networks.*, Europhy. Lett. 54:436-442 (2001).
- [28] Ergun, G., Rodgers, G., *Growing random networks with fitness*, Physica A 303:261 (2002).
- [29] Holme, P., Kim, B., *Growing scale-free networks with tunable clustering*, Phys. Rev. E 65 (2002).

4 Χρήση της θεωρίας των πολύπλοκων δικτύων στα Ad Hoc δίκτυα

4.1 Εισαγωγή

Πολλά εργαλεία και αποτελέσματα της θεωρίας των πολύπλοκων δικτύων έχουν ήδη εφαρμοστεί στον τομέα των ασυρμάτων ad hoc δικτύων. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι πιο σημαντικές τέτοιες εφαρμογές. Αρχικά, μελετάται η ανάλυση δεδομένων από ασύρματα δίκτυα με υποδομή που έχουν συλλέγει σε διαφορετικά πανεπιστήμια και αναφέρονται σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με τον τρόπο κίνησης των χρηστών. Κατά δεύτερο, μελετάται η δημιουργία ενός μοντέλου κινητικότητας των χρηστών το οποίο βασίζεται στην δημιουργία τεχνητών κοινωνικών δικτύων και την εύρεση κοινοτήτων σε αυτά.

4.2 Μελέτη κινητικότητας χρηστών βασισμένη σε πραγματικά δεδομένα

Όπως έχει ήδη τονιστεί, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά της κίνησης των χρηστών για να μπορούμε να σχεδιάσουμε αποτελεσματικά μία Ad Hoc αρχιτεκτονική, καθώς η κινητικότητα των τερματικών είναι αυτή που δημιουργεί τις περισσότερες διαφοροποιήσεις με τα κλασσικά δίκτυα και ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό των προβλημάτων. Δυστυχώς, όμως, μία μελέτη των χαρακτηριστικών της κίνησης και αλληλεπίδρασης των ανθρώπων είναι πολύ δύσκολο να γίνει. Εν τούτοις, είναι πολύ χρήσιμη μία μελέτη των δεδομένων που μπορούν να συλλεχθούν από υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα, καθώς τα δεδομένα αυτά, παρότι δεν προέρχονται από ένα ad hoc περιβάλλον, μπορούν να μας δώσουν αρκετές πληροφορίες για το πώς κινούνται και αλληλεπιδρούν οι χρήστες ασύρματων συσκευών. Μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα έχουν γίνει κυρίως από τους Balazinska και Castro [1], McNett και Voelker [2], Henderson, Kotz και Ayzon [3] και Wei-jen Hsu και Helmy [4].

4.2.1 Περιβάλλον και μέθοδος συλλογής δεδομένων

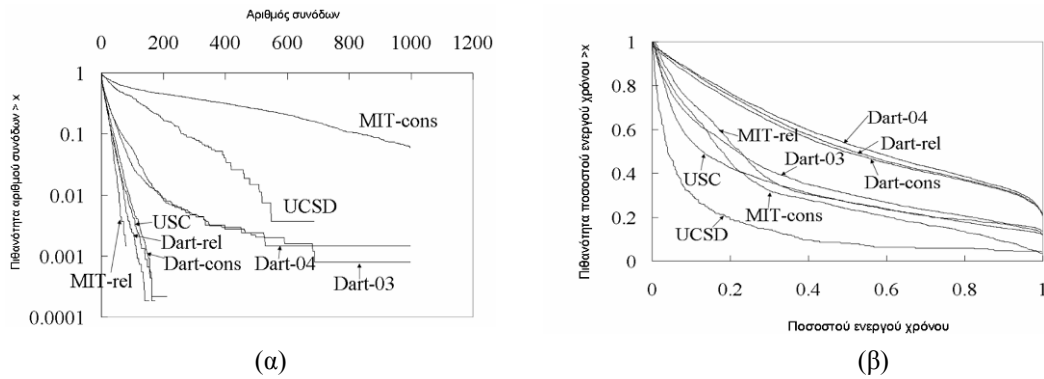
Όλες οι μελέτες που αναφέρονται παραπάνω έχουν διεξαχθεί σε πανεπιστημιούπολεις με ανεπτυγμένο ασύρματο δίκτυο 802.11. Συγκεκριμένα το [1]

αναφέρεται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πανεπιστήμιο του MIT, το [2] στο University of California San Diego (UCSD), το [3] στο Dartmouth College το 2003 και το [4] στο University of Southern California (USC) καθώς και σε δεδομένα από το Dartmouth College αλλά σε μεταγενέστερη περίοδο (2004) από αυτή του [3]. Όλα τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικές συσκευές (laptop, PDA και συσκευές VoIP) εκτός από τα δεδομένα του UCSD [2] το οποίο έγινε με συγκεκριμένες συσκευές PDA. Επίσης τα δεδομένα προέρχονται από όλο το ασύρματο δίκτυο του δικτύου, εκτός από τα δεδομένα από το MIT τα οποία προέρχονται από τρία συγκεκριμένα κτίρια.

Η μέθοδοι για την συλλογή των δεδομένων μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες: με περιοδικές ερωτήσεις οι οποίες καταγράφουν τη συσχέτιση ενός κινητού κόμβου με κάποιο Σημείο Πρόσβασης (ΣΠ) μέσω SNMP και μέσω μεθόδων που βασίζονται σε γεγονότα, οι οποίες καταγράφουν αν κάποιος κινητός κόμβος συνδέθηκε ή αποσυνδέθηκε από το δίκτυο. Γενικά θεωρείται ότι η δεύτερη μέθοδος παρέχει πιο έγκυρα στοιχεία. Για αυτόν το λόγο οι Wei-jen Hsu και Helmy προχώρησαν στην ανακατασκευή των δεδομένων του Dartmouth του 2004 (Dart-2004), τα οποία βασίζονται σε γεγονότα, και προσπάθησαν να εξομοιώσουν πως θα ήταν τα δεδομένα αν είχε χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος ερωτήσεων. Για τα ίχνη που βασίζονται σε ερωτήσεις πρέπει να γίνει κάποια υπόθεση για την κατάσταση του κινητού κόμβου ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ερωτήσεις. Έτσι μία συντηρητική υπόθεση είναι ότι ο κόμβος είναι συσχετισμένος με κάποιο ΣΠ μόνο μέχρι την αναμενόμενη επόμενη ερώτηση ενώ μία πιο χαλαρή θεωρεί ότι κάποιος κόμβος είναι συσχετισμένος με κάποιο συγκεκριμένο ΣΠ για τέσσερις περιόδους εκτός και αν υπάρξουν διαφορετικά στοιχεία. Έτσι οι Wei-jen Hsu και Helmy κατέληξαν σε δύο ίχνη, το ένα βασιζόμενοι σε μία συντηρητική προσέγγιση, Dart-cons και το δεύτερο σε μία περισσότερο χαλαρή Dart-rel.

4.2.2 Ενεργητικότητα χρηστών

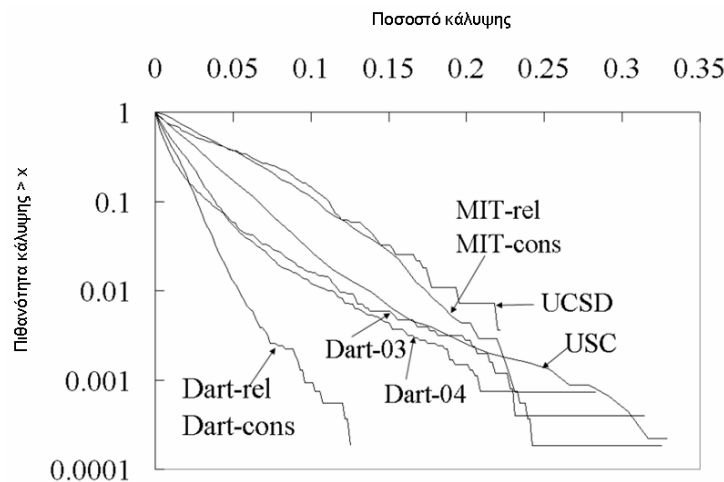
Μελετώντας τα δεδομένα από τα παραπάνω πανεπιστήμια είναι προφανές ότι οι χρήστες μικρών φορητών συσκευών ξεκινούν περισσότερες συνόδους, οι οποίες διαρκούν και λιγότερο από ότι οι χρήστες φορητών υπολογιστών. Αυτό φαίνεται συγκρίνοντας τα δεδομένα από το UCSD σε σχέση με τα υπόλοιπα πανεπιστήμια.



Σχήμα 1. Στα γραφήματα φαίνεται ο υψηλός αριθμός συνόδων των συσκευών PDA (α) και ο ταυτόχρονος μικρός χρόνος συνόδου (β). Η υψηλή τιμή των δεδομένων MIT-cons στο (α) οφείλεται σε σφάλμα στον χρόνο μεταξύ ερωτήσεων, καθώς πολλές φορές δεν εκτελείται η προγραμματισμένη ερώτηση.

4.2.3 Μακροχρόνια κινητικότητα χρηστών

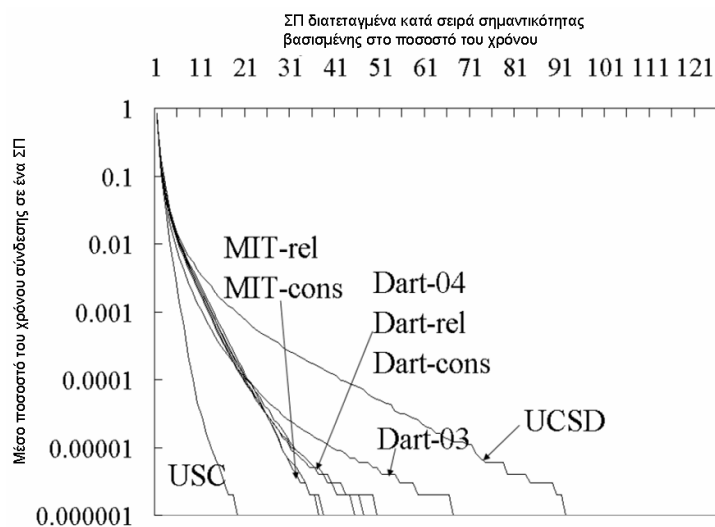
Η μακροχρόνια κινητικότητα των χρηστών αναφέρεται στον αριθμό των διαφορετικών ΣΠ που κάθε χρήστης χρησιμοποιεί σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και το ποσοστό του χρόνου που χρησιμοποιεί κάθε ΣΠ. Κάλυψη ενός χρήστη ονομάζεται το ποσοστό των ΣΠ με τα οποία συνδέεται ένας χρήστης κατά τη διάρκεια της μελέτης.



Σχήμα 2. Αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση κατανομής της κάλυψης των χρηστών.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα οι περισσότεροι χρήστες επισκέπτονται μακροχρόνια πολύ μικρό ποσοστό των συνολικών ΣΠ. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η μακροχρόνια κινητικότητα είναι ιδιαίτερος χαμηλή. Η χρήση συσκευών PDA εμφανίζει, όπως είναι λογικό, υψηλότερη κινητικότητα.

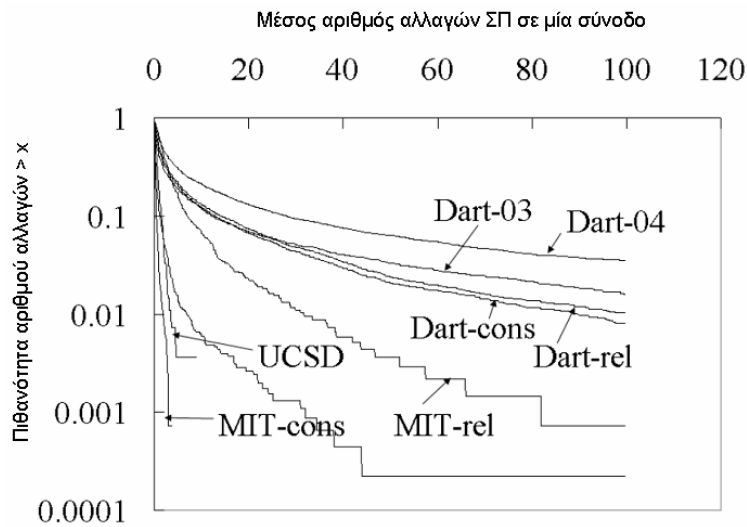
Ίσως ακόμα πιο ενδιαφέρον να είναι το ποσοστό του χρόνου που κάθε χρήστης περνάει συνδεδεμένος με κάποιο ΣΠ. Για το σκοπό αυτό τα ΣΠ ταξινομούνται κατά σειρά σημαντικότητας για κάθε κόμβο και στη συνέχεια εξάγεται το ποσοστό του χρόνου που ένας χρήστης είναι συνδεδεμένος με το πιο σημαντικό για αυτόν ΣΠ, με το δεύτερο πιο σημαντικό κλπ. Έτσι γίνεται εμφανές ότι ένας μέσος χρήστης περνάει το 65% του ενεργού του χρόνου με ένα ΣΠ και περισσότερο από το 95% με 5 ΣΠ. Άρα είναι προφανές ότι οι χρήστες σχετίζονται με πολύ μικρό ποσοστό των ΣΠ.



Σχήμα 3. Μέσο ποσοστό του συνολικού χρόνου σύνδεσης που ένας κόμβος είναι συνδεδεμένος με έναν ΣΒ. Για κάθε κόμβο η λίστα με τους ΣΒ ταξινομείται κατά σειρά σημαντικότητας πριν εξαχθεί ο μέσος όρος.

4.2.4 Βραχυχρόνια κινητικότητα χρηστών

Η βραχυχρόνια κινητικότητα των χρηστών αναφέρεται στην κινητικότητα που παρουσιάζουν οι χρήστες κατά της διάρκεια μίας συνόδου. Με άλλα λόγια πόσα ΣΠ αλλάζει ένας χρήστης ενώ χρησιμοποιεί το δίκτυο. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι οι περισσότεροι χρήστες είναι σχετικά σταθεροί, καθώς κατά τη διάρκεια μιας συνόδου εμφανίζουν μικρό αριθμό αλλαγών ΣΠ.

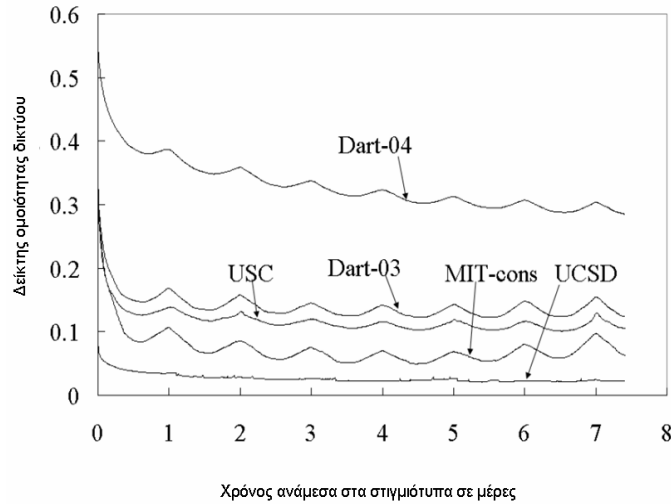


Σχήμα 4. Αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση κατανομής του μέσου αριθμού αλλαγών ΣΠ κατά μία σύνοδο.

Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι μία αλλαγή στη χρήση ΣΠ δεν είναι μόνο αποτέλεσμα κίνησης του χρήστη αλλά και λόγω αλλαγής στην ποιότητα της σύνδεσης. Έτσι η πραγματική κίνηση του χρήστη θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που εμφανίζεται.

4.2.5 Περιοδικότητα χρηστών

Η συμπεριφορά των χρηστών εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από την ώρα και τη μέρα καθώς οι άνθρωποι ακολουθούν συνήθως ημερήσια και εβδομαδιαία προγράμματα. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στη χρήση συγκεκριμένων ΣΠ. Ένας τρόπος να μετρηθεί το φαινόμενο αυτό είναι να πάρει κανείς στιγμιότυπα του δικτύου σε χρονικές στιγμές που ισαπέχουν και στη συνέχεια να υπολογίσει το ποσοστό των ζευγών στιγμιότυπων στα οποία ο χρήστης είναι συνδεδεμένος στο ίδιο ΣΠ. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται δείκτης ομοιότητας θέσης και υπολογίζεται για κάθε χρήστη. Ο μέσος δείκτης ομοιότητας θέσης για όλο το δίκτυο ονομάζεται δείκτης ομοιότητας δικτύου. Και οι δύο δείκτες ορίζονται για διαφορετικές χρονικές περιόδους που παίρνει κανείς τα στιγμιότυπα. Εφαρμόζοντας την παραπάνω τεχνική στα δεδομένα των παραπάνω μελετών προκύπτει το παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 5 Δείκτες ομοιότητας δικτύου. Οι κορυφές παριστάνουν διαστήματα κατά τα οποία εμφανίζεται υψηλή ομοιότητα.

Όπως είναι σχετικά αναμενόμενο, εμφανίζεται υψηλός δείκτης ομοιότητας δικτύου, πράγμα που σημαίνει ότι οι χρήστες ακολουθούν κύκλους ημέρας και εβδομάδας στις συνήθειές τους.

4.2.6 Σχέσεις μεταξύ των κόμβων

Εκτός από τη ατομική συμπεριφορά κάθε χρήστη, έχει γίνει και μελέτη των σχέσεων μεταξύ των χρηστών. Μεγάλη σημασία για τη μελέτη αυτή έχει ο ορισμός τριών δεικτών φιλίας. Οι δείκτες αυτοί ενδεχομένως να αποτυπώνουν τις πραγματικές κοινωνικές σχέσεις μεταξύ των χρηστών. Αναλυτικά έχουμε τους εξής ορισμούς:

- Δείκτης φιλίας βασιζόμενος στον χρόνο συνάντησης ορίζεται ως $Frd_t(A, B) = E_t(A, B) / OT(A)$, το οποίο είναι ο λόγος του αθροίσματος του χρόνου συνάντησης μεταξύ των κόμβων A και B προς τον συνολικό χρόνο που ο κόμβος A είναι ενεργός. Αυτός ο δείκτης το πόσο καλός φίλος είναι ο B για τον A βασιζόμενος στον χρόνο που έχουν περάσει μαζί οι δύο κόμβοι.
- Δείκτης φιλίας βασιζόμενος στις συναντήσεις ορίζεται ως $Frd_c(A, B) = E_c(A, B) / S(A)$ το οποίο είναι ο λόγος των συνεδριών του κόμβου A κατά τις οποίες συνάντησε τον κόμβο B προς τον συνολικό αριθμό συνεδριών του A .
- Δείκτης φιλίας βασιζόμενος στην τοποθεσία των επαφών ορίζεται ως $Frd_l(A, B) = E_l(A, B) / L(A)$ το οποίο ο λόγος των διαφορετικών τοποθεσιών όπου ο A έχει συναντήσει τον B προς τον συνολικό αριθμό των τοποθεσιών που έχει επισκεφτεί ο A .

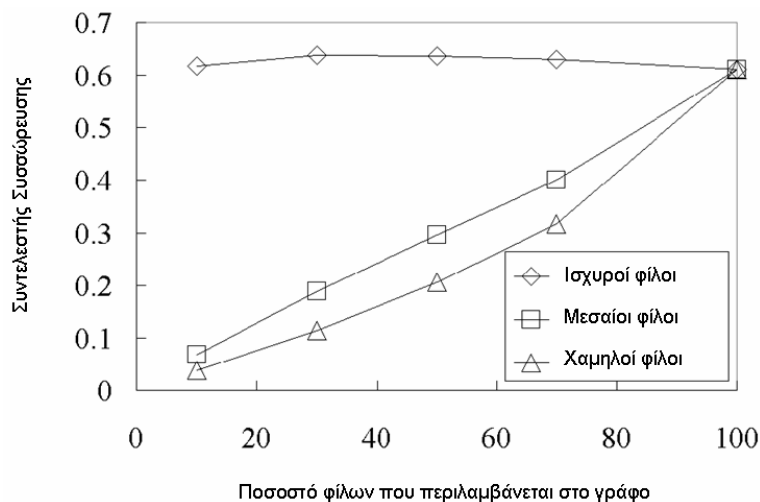
Στη συνέχεια είναι δυνατή η δημιουργία ενός γράφου ως εξής: Οι κόμβοι που ο A έχει συναντήσει διατάσσονται κατά το δείκτη φιλίας βασιζόμενο στο χρόνο $Frd_i(A, B)$. Στο γράφο περιλαμβάνονται κόμβοι που έχουν συναντήσει τον A τουλάχιστον μία φορά (μη αρνητικό $Frd_i(A, B)$) και επιλέγεται ένα ποσοστό από αυτούς. Στη συνέχεια κάθε κόμβος δημιουργεί ακμές με άλλους κόμβους ανάλογα με το δικό του δείκτη Frd_i για αυτούς τους κόμβους. Πρακτικά δημιουργείται ένας γράφος από τους φίλους ενός κόμβου και ερευνάται η σχέση μεταξύ αυτών. Είναι δυνατόν να επιλεγθούν κόμβοι που ανήκουν στους κόμβους με υψηλό, μέσο ή χαμηλό Frd_i . Στη συνέχεια κανείς μπορεί να υπολογίσει τον συντελεστή συσσώρευσης. Επειδή όμως $Frd_i(A, B) \neq Frd_i(B, A)$ θα πρέπει να τροποποιηθεί ο ορισμός του συντελεστή συσσώρευσης και να γίνει

$$C = \frac{\sum_{i=1}^M C(i)}{M}$$

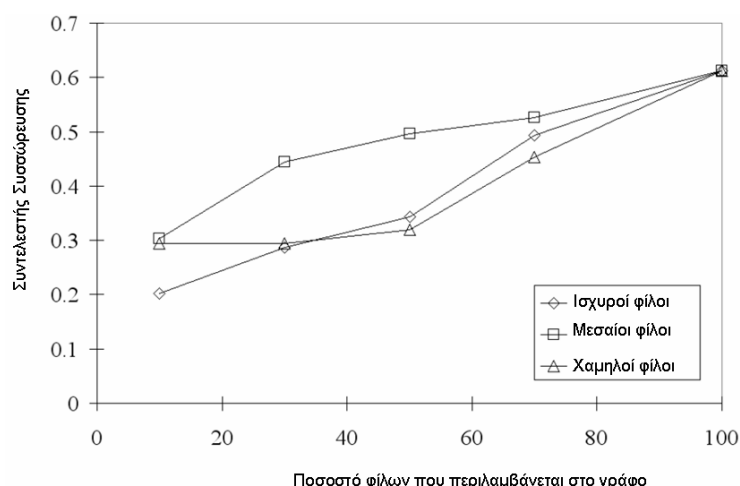
όπου

$$C(i) = \frac{\sum_{A \in F(i)} \sum_{B \in F(i)} A \in F(B)}{Frd(i)(Frd(i) - 1)}$$

και $Frd(i)$ είναι ο αριθμός των κόμβων που ο i έχει επιλέξει να συμπεριλάβει στο γράφο, $F(i)$ είναι το σύνολο των φίλων του i και M είναι ο συνολικός αριθμός κόμβων στο γράφο. Έτσι εξάγεται το παρακάτω γράφημα για τα δεδομένα από το USC.



Σχήμα 6. Συντελεστής συσσώρευσης για διαφορετικά ποσοστά φίλων που λαμβάνονται υπ' όψη στο γράφο για το δίκτυο του USC με χρήση του δείκτη φιλίας βασιζόμενος στον χρόνο



Σχήμα 7. Συντελεστής συσώρευσης για διαφορετικά ποσοστά φίλων που λαμβάνονται υπ' όψη στο γράφο για το δίκτυο του USC με χρήση του δείκτη φιλίας βασιζόμενος στην τοποθεσία των επαφών.

Είναι λοιπόν εμφανές ότι οι χρήστες έχουν την τάση να δημιουργούν ισχυρά συνδεδεμένες ομάδες με τους χρήστες με τους οποίους έχουν στενές σχέσεις. Η σχέση αυτή μπορεί να εξαχθεί είτε μέσω του χρόνου είτε μέσω της τοποθεσίας που βρίσκονται οι χρήστες.

4.3 Μοντέλο κινητικότητας βασισμένο σε ύπαρξη κοινοτήτων

Οι μελέτες που γίνονται για την υλοποίηση πρωτοκόλλων χρησιμοποιούν συνήθως συνθετικά τυχαία μοντέλα κίνησης για την εξέταση των αποτελεσματικότητάς τους [5]. Η πρακτική αυτή δεν είναι απολύτως σωστή. Για το λόγο αυτό εξετάζεται ένα μοντέλο κίνησης το οποίο βασίζεται σε κοινωνικές σχέσεις [6].

4.3.1 Μοντελοποίηση Κοινωνικών Σχέσεων

Ένας από τους κλασικούς τρόπους αναπαράστασης κοινωνικών δικτύων είναι μέσω γράφου με βάρη. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει ένα άτομο, οι ακμές αντιπροσωπεύουν τις σχέσεις τους, ενώ τα βάρη τη δύναμη κάθε σχέσης. Η σχέση μεταξύ δύο ατόμων μπορεί να θεωρείται διαφορετική για κάθε έναν, με αποτέλεσμα ο γράφος να είναι κατευθυνόμενος. Στο [6], όμως, οι συγγραφείς θεώρησαν συμμετρικές σχέσεις μεταξύ των ατόμων και άρα ο γράφος είναι μη κατευθυνόμενος. Η βασική ιδέα είναι ότι μία ισχυρή κοινωνική σχέση θα έχει ως αποτέλεσμα και κοντινή γεωγραφική θέση. Έτσι το βάρος της σχέσης μπορεί να θεωρηθεί ως μία μορφή της πιθανότητας να βρίσκονται κοντά τα δύο

άτομα. Ο βαθμός της σχέσης μεταξύ των ατόμων βαθμολογείται από το 0 μέχρι το 1, με το 0 να δείχνει μηδενική σχέση ενώ το 1 να δείχνει πολύ στενή κοινωνική σχέση.

Ο γράφος των σχέσεων μπορεί να παρασταθεί με ένα πίνακα **M**, ο οποίος ονομάζεται Πίνακας Αλληλεπίδρασης. Ένα παράδειγμα φαίνεται παρακάτω:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0,76 & 0,64 & 0,11 & 0,05 & 0 & 0 & 0,12 & 0,15 & 0 \\ 0,76 & 1 & 0,32 & 0 & 0,67 & 0,13 & 0,23 & 0,45 & 0 & 0,05 \\ 0,64 & 0,32 & 1 & 0,13 & 0,24 & 0 & 0 & 0,15 & 0 & 0 \\ 0,11 & 0 & 0,13 & 1 & 0,54 & 0,83 & 0,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,67 & 0,24 & 0,54 & 1 & 0,2 & 0,41 & 0,2 & 0,23 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0,83 & 0,2 & 1 & 0,69 & 0,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0,23 & 0 & 0,57 & 0,41 & 0,69 & 1 & 0,18 & 0 & 0,12 \\ 0,12 & 0,45 & 0,15 & 0 & 0,2 & 0,15 & 0,18 & 1 & 0,84 & 0,61 \\ 0,15 & 0 & 0 & 0 & 0,23 & 0 & 0 & 0,84 & 1 & 0,65 \\ 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 & 0,61 & 0,65 & 1 \end{bmatrix}$$

Το στοιχείο $m_{i,j}$ δείχνει την αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων i και j . Τα στοιχεία που βρίσκονται πάνω στη διαγώνιο δείχνουν τη σχέση ενός ατόμου με τον εαυτό του και τίθενται εξ ορισμού ίσα με ένα.

Ο παραπάνω Πίνακας Αλληλεπίδρασης χρησιμοποιείται για να εξαχθεί ένας Πίνακας Συνδεσιμότητας. Ο Πίνακας Συνδεσιμότητας είναι ένας δυαδικός πίνακας, στον οποίο ένα στοιχείο τίθεται ίσο με ένα αν το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα **C** είναι μεγαλύτερο από μία τιμή (π.χ. 0.25). Εδώ γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει κάποιο επίπεδο πάνω από το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι δύο άτομα αλληλεπιδρούν ισχυρά και άρα υπάρχει αυξημένη πιθανότητα αυτή η αλληλεπίδραση να επηρεάζει τη γεωγραφική τους τοποθέτηση. Από τον προηγούμενο πίνακα μπορούμε να εξάγουμε τον ακόλουθο:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Στο μοντέλο είναι δυνατή η απ' ευθείας εισαγωγή πινάκων από δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από ερωτηματολόγια ή με άλλους τρόπους. Παρόλα αυτά μία σημαντική ιδιότητα του μοντέλου είναι η δυνατότητα που δίνει για δημιουργία συνθετικών κοινωνικών δικτύων που πλησιάζουν τα πραγματικά. Για την ακρίβεια το μοντέλο υλοποιεί τον αλγόριθμο Caveman που έχει προτείνει ο Watts [7]. Σύμφωνα με αυτό, ο αλγόριθμος ξεκινάει από K ασύνδετες μεταξύ τους ομάδες των οποίων τα μέλη είναι πλήρως συνδεδεμένα. Στη συνέχεια κάθε ακμή του δικτύου αναδρομολογείται ώστε να δείχνει σε ένα κόμβο που ανήκει σε διαφορετική ομάδα με πιθανότητα p . Έτσι το τελικό δίκτυο αποτελείται από ομάδες που είναι πολύ στενά συνδεδεμένες στο εσωτερικό τους, ενώ υπάρχουν κάποιες, λίγες σε αριθμό, πλευρές που ενώνουν τις διαφορετικές ομάδες. Αυτό οδηγεί σε υψηλό συντελεστή συσσώρευσης και μικρή γεωδαιτική απόσταση. Φυσικά, σημαντική παράμετρος αποτελεί η πιθανότητα p της αναδρομολόγησης.

4.3.2 Αναγνώριση Κοινοτήτων

Το σενάριο της προσομοίωσης βασίζεται στην τοποθέτηση ομάδων κόμβων σε συγκεκριμένες περιοχές. Μετά τη δημιουργία του κοινωνικού γράφου, οι ομάδες που δημιουργούνται από τους στενά συνδεδεμένους κόμβους πρέπει να αναγνωριστούν και να απομονωθούν.

Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος των Newman και Girvan [8] για την αναγνώριση κοινοτήτων που έχει περιγραφεί και νωρίτερα. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τη έννοια της ενδιαμεσότητας των ακμών, δηλαδή τον αριθμό των ελάχιστων μονοπατιών που περνάει από κάποια ακμή. Οι ακμές οι οποίες ενώνουν ξεχωριστές κοινότητες θα έχουν μεγάλη τιμή ενδιαμεσότητας, καθώς όπως έχει παρατηρηθεί λίγες είναι

οι ακμές που ενώνουν κοινότητες. Έτσι, βρίσκοντας κανείς και αφαιρώντας αυτές τις ακμές σταδιακά από το γράφο μπορεί να διαχωρίσει τις διαφορετικές κοινότητες που υπάρχουν σε αυτόν.

Όπως έχει ήδη τονιστεί, μεγάλη σημασία για τον αλγόριθμο έχει ο μηχανισμός που χρειάζεται για να μπορεί να γίνει μία εκτίμηση της ποιότητας των κοινοτήτων που έχουν βρεθεί σε κάθε βήμα. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η έννοια της τμηματικότητας Q [22], η οποία είναι το ποσοστό των ακμών στο δίκτυο που ενώνουν κόμβους μέσα στην ίδια κοινότητα μείον την αναμενόμενη τιμή της ίδιας ποσότητας σε ένα δίκτυο με την ίδια διαίρεση κοινοτήτων, αλλά με τυχαίες συνδέσεις. Η τιμή του Q έχει βρεθεί μεταξύ 0.3 και 0.7 για πραγματικά δίκτυα. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την τμηματικότητα σε κάθε βήμα και σταματάει αν η τιμή της είναι χειρότερη από ότι ήταν στο προηγούμενο βήμα, καθώς όπως έχουμε ήδη πει, ένα τοπικό μέγιστο για το Q υποδηλώνει μία καλή διαίρεση του δικτύου σε κοινότητες.

4.3.3 Τοποθέτηση των κοινοτήτων στο χώρο

Μόλις οι κοινότητες αναγνωρισθούν, τοποθετούνται σε ένα τυχαίο τετράγωνο ενός πλέγματος, το μέγεθος το οποίο είναι παράμετρος του μοντέλου και μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Κάθε τετράγωνο του πλέγματος συμβολίζεται με $S_{p, q}$ δηλαδή το τετράγωνο βρίσκεται στη γραμμή p και τη στήλη q του πλέγματος.

4.3.4 Κινητικότητα των κόμβων

Αφού οι κόμβοι τοποθετηθούν σε κάποιο σημείο του πλέγματος επιλέγεται ένα σημείο το οποίο αποτελεί το στόχο κάθε κόμβου, δηλαδή ο κόμβος θα πρέπει να κινηθεί μέχρι αυτό το σημείο.

4.3.4.1 Επιλογή αρχικού στόχου

Ο πρώτος στόχος κάθε κόμβου επιλέγεται να βρίσκεται μέσα στο τετράγωνο στο οποίο έχει τοποθετηθεί η ομάδα του.

4.3.4.2 Επιλογή επόμενων στόχων

Η επιλογή του στόχου κάθε κόμβου σε κάθε στιγμή επιλέγεται βάσει του παρακάτω μηχανισμού. Κάθε χρονική στιγμή κάθε κόμβος σχετίζεται με κάποιο τετράγωνο μέσα στο οποίο βρίσκεται ο στόχος του. Έτσι κάθε τετράγωνο λέγεται ότι έχει μία κοινωνική

ελκυστικότητα για κάθε κόμβο. Η ελκυστικότητα αυτή υπολογίζεται από το άθροισμα των σχέσεων που έχει κάθε κόμβος με τους κόμβους που κινούνται προς αυτό το τετράγωνο. Η ελκυστικότητα δείχνει τη σημασία που έχει ο συγκεκριμένος χώρος για κάθε κόμβο και υπολογίζεται ως εξής:

$$SA_{p,q_i} = \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j \in C_{S_{p,q}}}^n m_{i,j}}{w}$$

όπου $C_{S_{p,q}}$ είναι το σύνολο από κόμβους που σχετίζονται με το τετράγωνο p, q , w είναι ο αριθμός των στοιχείων του $C_{S_{p,q}}$ και $m_{i,j}$ είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των κόμβων i και j .

Ως καινούριος στόχος επιλέγεται ένα τυχαίο σημείο μέσα στο τετράγωνο που παρουσιάζει την υψηλότερη ελκυστικότητα. Το τετράγωνο αυτό μπορεί να είναι το ίδιο τετράγωνο που βρίσκεται ήδη ο κόμβος. Ένας κόμβος είναι πιθανό να κινηθεί προς κάποιο άλλο τετράγωνο, αν έχει ισχυρές σχέσεις με κόμβους που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες.

Το μοντέλο έχει επίσης τη δυνατότητα να παρέχει και ένα άλλο χαρακτηριστικό. Είναι προφανές ότι οι κοινωνικές σχέσεις είναι δυνατό να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της μέρας. Μπορεί, δηλαδή, να έχει κανείς άλλη σχέση με τους συνεργάτες του κατά τη διάρκεια της μέρας και άλλη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Έτσι λοιπόν, το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να αλλάζει ο Πίνακας Αλληλεπίδρασης ανά τακτά χρονικά διαστήματα, δημιουργώντας νέες σχέσεις μεταξύ των κόμβων έτσι ώστε να προσομοιώνεται ακριβώς αυτό το χαρακτηριστικό. Η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή και έτσι ανακαλύπτονται καινούριες κοινότητες οι οποίες τοποθετούνται σε σημεία του πλέγματος. Η αλλαγή αυτή μπορεί να συμβεί ανά τακτά χρονικά διαστήματα οριζόμενα από τον χρήστη.

Η αρχική έκδοση των συγγραφέων παρήγαγε σε κάθε αλλαγή της κοινωνικής βάσης του μοντέλου έναν τυχαίο γράφο. Επειδή είναι σημαντικό πολλές φορές να γίνεται προσομοίωση της κίνησης ενός ατόμου μέσα σε μία περίοδο μεγαλύτερη της μέρας (π.χ. μίας εβδομάδας), ο αρχικός κώδικας τροποποιήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι κοινωνικές σχέσεις να εμφανίζουν περιοδικότητα. Επιλέχθηκε η περιοδικότητα αυτή να είναι της μίας μέρας, ενώ η αλλαγή των σχέσεων γίνεται κάθε οχτώ ώρες. Κατ' αυτό τον τρόπο γίνεται μία προσομοίωση η οποία θεωρεί ότι τα άτομα χωρίζουν την μέρα τους σε οχτάωρα. Αυτή

είναι μία λογική υπόθεση η οποία υποστηρίζεται και από πειραματικά δεδομένα [1], [2], [3], [4].

4.4 Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Balazinska, M., Castro, P., *Characterizing Mobility and Network Usage in a Corporate Wireless Local-Area Network*, In Proceedings of MobiSys 2003, pp. 303-316, May 2003.
- [2] McNett, M., Voelker, G., *Access and mobility of wireless PDA users*, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, v.7 n.4, October 2003.
- [3] Henderson, T., Kotz, D., Abyzov, I., *The Changing Usage of a Mature Campus-wide Wireless Network*, Proceedings of ACM MobiCom 2004, September 2004.
- [4] Hsu, W., Helmy, A., *IMPACT: Investigation of Mobile-user Patterns Across University Campuses using WLAN Trace Analysis*, USC Technical Report, July 2005.
- [5] Camp, T., Boleng, J., Davies, V., *A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research*, Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC), Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
- [6] Musolesi, M., Mascolo, C., *A community based mobility model for ad hoc network research*, University College London, Tech. Rep. CS-UCL Research Note RN/05/31, 2005.
- [7] Watts, D. J., *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*, Princeton University Press, 1999
- [8] Newman, M. E. J., Girvan, M., *Finding and evaluating community structure in networks*, Phy. Rev. E, 68, 2003

5 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η επικοινωνία μεταξύ τυχαίων κόμβων σε ένα ad hoc δίκτυο απαιτεί την δρομολόγηση μέσω ενδιάμεσων κόμβων. Η κύρια δυσκολία, σε αντίθεση με τα δίκτυα που έχουν υποδομή, βρίσκεται στο γεγονός ότι οι ζεύξεις μεταξύ των κόμβων είναι πολύ πιθανό να σταματήσουν να υφίστανται καθώς οι κόμβοι κινούνται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Αυτό οδηγεί σε συμφόρηση του δικτύου, καθώς το πρωτόκολλο δρομολόγησης προσπαθεί να ανταποκριθεί στην αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου.

Η αποτελεσματικότητα ενός πρωτοκόλλου να προσαρμοστεί στις αλλαγές του δικτύου εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα της πληροφορίας που έχει. Για την επιτυχή, όμως, λειτουργία του δικτύου, η μείωση της κίνησης ελέγχου στο ελάχιστο δυνατό είναι ιδιαίτερος σημαντική, λόγω του χαμηλού εύρους ζώνης του ασύρματου μέσου. Σε ένα ad hoc δίκτυο αναμένεται υψηλός ρυθμός τοπολογικών αλλαγών, οπότε η διάχυση πληροφοριών δρομολόγησης μπορεί εύκολα να φέρει το δίκτυο σε κορεσμό. Επομένως, ένας καίριος παράγοντας στον σχεδιασμό ενός ad hoc πρωτοκόλλου είναι η μείωση της αντίδρασης στην κινητικότητα.

Η προληπτική δρομολόγηση, ενώ μπορεί να παρέχει διαδρομές υψηλής ποιότητας σε ένα στατικό δίκτυο, δεν κλιμακώνεται επιτυχώς σε μεγάλα, υψηλής κινητικότητας δίκτυα. Η τεχνική της πλημμύρας μπορεί να έχει θετικά αποτελέσματα σε μικρά δίκτυα, λόγω του χαμηλού φορτίου και της απλότητας της μεθόδου. Είναι όμως πρακτικά ανεφάρμοστη σε μεγάλα δίκτυα λόγω του τεράστιου όγκου κίνησης που παράγεται. Η δρομολόγηση κατ' απαίτηση επιτυγχάνει να μειώσει αρκετά την παραγόμενη κίνηση ελέγχου, αλλά μειονεκτεί στην χαμηλή ποιότητα των διαδρομών που μπορεί να προσφέρει και στην αύξηση της καθυστέρησης δρομολόγησης στην αρχική φάση. Επίσης στην αρχική φάση εύρεσης της διαδρομής μπορεί να προκληθεί αρκετή κίνηση σε μέρη του δικτύου που δεν είναι απαραίτητο. Επίσης δεν προσφέρει πολλές υπηρεσίες σε ανώτερα στρώματα του δικτύου, όπως μπορεί να κάνει η προληπτική δρομολόγηση.

Στη δρομολόγηση με χρήση ιεραρχικών ομάδων το δίκτυο χωρίζεται σε ομάδες με στόχο την δημιουργία μίας σχετικώς σταθερής τοπολογίας. Τα μέλη των ομάδων είναι

δυνατό να αλλάζουν με τον πάροδο του χρόνου λόγω της κίνησης και εξαρτώνται από κάποιο μέγεθος που ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί για να δημιουργήσει τις ομάδες. Μέσα σε μία ομάδα χρησιμοποιείται συνήθως προληπτική δρομολόγηση. Η δρομολόγηση μεταξύ ομάδων επιτυγχάνεται αποκρύπτοντας την τοπολογία των κόμβων μίας ομάδας από εξωτερικούς κόμβους και συνήθως χρησιμοποιείται δρομολόγηση κατ' απαίτηση. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αυξημένη κίνηση ελέγχου σε περιπτώσεις που κάθε κόμβος πρέπει να ανήκει σε μία ομάδα και η δημιουργία των ομάδων δεν είναι σταθερή.

Είναι εμφανές ότι η δρομολόγηση με χρήση ομάδων προσπαθεί να συνδυάσει τις μεθόδους της προληπτικής και κατ' απαίτησης δρομολόγησης, χρησιμοποιώντας κάθε μία στις συνθήκες που εμφανίζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Σε ένα δεύτερο επίπεδο όμως προσπαθεί να κάνει μία αφαίρεση στο δίκτυο, δημιουργώντας ιεραρχικές δομές, με αποτέλεσμα να μειώνεται ταυτόχρονα τόσο το μέγεθος του δικτύου, καθώς λειτουργίες μπορούν να γίνονται σε επίπεδο ομάδων αρκετών κόμβων, όσο και η κινητικότητα, καθώς είναι προφανές ότι η κίνηση μίας ομάδας είναι πολύ μικρότερη από ότι η κίνηση κάθε κόμβου μεμονωμένα. Παράλληλα, η ύπαρξη ιεραρχικής δομής ωφελεί ιδιαίτερος και τα ανώτερα στρώματα του δικτύου, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή την οργάνωση για να βελτιστοποιήσουν δικές τους λειτουργίες.

Για να είναι όμως επιτυχής μία τέτοια προσέγγιση θα πρέπει οι ομάδες που δημιουργούνται να είναι όσο το δυνατόν σταθερότερες, δηλαδή να μην υπάρχει συνεχής αλλαγή στη σύνθεσή τους. Ορμώμενοι από το χαρακτηριστικό αυτό και από την ένδειξη ότι η κίνηση των κόμβων, όταν αυτοί είναι άνθρωποι, δεν είναι τυχαία, προτείνουμε την μελέτη ενός αλγορίθμου ο οποίος δημιουργεί ομάδες στο δίκτυο με κριτήριο τις σχέσεις μεταξύ των κόμβων. Η σχέση μεταξύ κοινωνικών σχέσεων και κίνησης χρηστών έχει αναπτυχθεί αναλυτικότερα σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εν τούτοις, θα ήταν καλό να αναφέρουμε ότι σε ένα πανεπιστημιακό ασύρματο δίκτυο με υποδομή ο μέσος χρήστης περνάει το 95% του χρόνου του σε μόλις πέντε διαφορετικούς σταθμούς βάσης.

Το πρόβλημα σε μία τέτοια αντιμετώπιση βρίσκεται πρωτίστως στο πως μπορεί να γίνει η εκτίμηση των σχέσεων μεταξύ των κόμβων, χωρίς παρέμβαση των ίδιων των χρηστών. Θεωρούμε ότι ένα καλό μέγεθος είναι ο χρόνος που περνάει κάποιος κόμβος με κάποιον άλλο. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είτε ως απόλυτο μέγεθος, να θεωρείται δηλαδή ότι κάποιο χρονικό διάστημα αντιστοιχεί σε κάποιο επίπεδο σχέσης, είτε ως σχετικό, να γίνεται δηλαδή σύγκριση πόση ώρα περνάει κάποιος με κάποιον κόμβο σε σύγκριση με τον μέσο όρο του χρόνου που περνάει με τους υπόλοιπους κόμβους. Είναι

φυσικό ότι κάθε κόμβος θα συναντάει πολλούς διαφορετικούς κόμβους, αλλά δεν χρειάζεται να κρατάει δεδομένα για κάθε έναν από αυτούς, αλλά να μόνο για εκείνους που ικανοποιούν κάποιο βαθμό σημαντικότητας.

Χρησιμοποιώντας αυτό το μέγεθος είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ομάδες των οποίων τα μέλη εμφανίζουν ισχυρές σχέσεις μεταξύ τους. Μάλιστα, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, κάτι τέτοιο είναι πολύ πιθανό να γίνει, δηλαδή κόμβοι που έχουν μεταξύ τους ισχυρές σχέσεις τείνουν να βρίσκονται ταυτόχρονα μαζί. Παράλληλα ο χρόνος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει μία εκτίμηση του πόση ώρα θα βρίσκεται μαζί η ομάδα, ή πόση ώρα θα είναι ενεργή μία διαδρομή.

Θα πρέπει εδώ να τονιστεί ότι είναι πεποίθησή μας ότι δεν είναι αναγκαίο για ένα έναν κόμβο να ανήκει σε μία ομάδα αλλά αυτό να συμβαίνει μόνο όταν εξασφαλίζεται ότι κάτι τέτοιο θα έχει θετικά αποτελέσματα.

Η αρχική δημιουργία των ομάδων προτείνεται να γίνεται με τον εξής τρόπο: Όταν ένας κόμβος αναγνωρίσει ότι βρίσκεται κοντά με δύο άλλους με τους οποίους έχει υψηλές σχέσεις να τους καλεί να γίνουν ομάδα. Κάθε ένας από αυτούς θα δεχθεί μόνο αν έχει σχέση και με τους δύο άλλους. Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει ότι ο αρχικός πυρήνας μίας ομάδας θα είναι ισχυρά συνδεδεμένος (συντελεστής συσσώρευσης ίσο με ένα). Στη συνέχεια, είναι δυνατό να εκλέγεται ένας κόμβος να ηγείται της ομάδας. Η επιλογή μπορεί να γίνεται με διάφορους τρόπους και δεν αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην μελέτη μας. Ο κόμβος-ηγέτης είναι επιφορτισμένος με το να διασφαλίζει την συνοχή της ομάδας. Για τον λόγο αυτό, κρατάει πλήρη τοπολογικά στοιχεία για την ομάδα και είναι αυτός που αποφασίζει για την περαιτέρω εισαγωγή μελών στην ομάδα.

Η εισαγωγή μελών στην ομάδα μπορεί να γίνει κατά τον εξής τρόπο: Όταν ένας κόμβος έλθει σε επαφή με ένα μέλος μίας ομάδας το μέλος της ομάδας τον ενημερώνει για τους κόμβους που αποτελούν την ομάδα. Ο κόμβος ελέγχει τους πίνακες του και αποφασίζει αν είναι συσχετισμένος με αυτήν την ομάδα. Αν θεωρεί ότι θα πρέπει να γίνει μέλος της, αποστέλλει ένα μήνυμα αίτησης στον αρχηγό της ομάδας. Αυτός ενημερώνει όλη την ομάδα και ζητεί από τα μέλη να τον ενημερώσουν αν γνωρίζουν τον κόμβο ή όχι. Αφού συλλέξει όλες τις απαντήσεις, είναι πλέον σε θέση να δημιουργήσει την μελλοντική τοπολογία του δικτύου σε περίπτωση που ο κόμβος γίνει αποδεκτός. Μπορεί τότε να υπολογίσει τον συντελεστή συσσώρευσης της μελλοντικής ομάδας και να τον συγκρίνει με τον τωρινό. Η απόφαση μπορεί να γίνεται με διάφορους τρόπους. Θα μπορούσε να δέχεται

το κόμβο μόνο αν αφήνει τον συντελεστή ίδιο ή τον κάνει καλλίτερο. Μία τέτοια περίπτωση είναι όμως εξαιρετικά σπάνια οπότε θεωρούμε άσκοπο αυτόν τον τρόπο. Μία δεύτερη περίπτωση, θα ήταν να γίνεται αποδοχή του κόμβου αν ο συντελεστής συσσώρευσης δεν πέφτει κάτω από κάποιο κατώφλι. Η συγκεκριμένη περίπτωση έχει το μειονέκτημα ότι η εισαγωγή ενός κόμβου που ρίχνει αρκετά τον συντελεστή συσσώρευσης στα αρχικά στάδια δημιουργίας της ομάδας μπορεί να οδηγήσει στη συνεχώς πτώση της ποιότητας της ομάδας. Για αυτό το λόγο θεωρούμε καλύτερη επιλογή το κατώφλι να εξαρτάται από τον αριθμό των υπαρχόντων μελών της ομάδας και όσο μεγαλώνει ο αριθμός των μελών της ομάδας τόσο να μειώνεται το κατώφλι, μέχρι κάποιο όριο. Η συγκεκριμένη τιμή του ορίου και η σχέση του κατωφλίου με τον αριθμό των κόμβων τελούν υπό μελέτη.

Η ανωτέρω υλοποίηση μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές. Κατ' αρχάς, στο επίπεδο της δρομολόγησης αποφεύγει τα συνήθη μειονεκτήματα ιεραρχικών μεθόδων με ομάδες καθώς κάθε ομάδα που δημιουργείται έχει υψηλή σταθερότητα. Επίσης, είναι δυνατή η ανάπτυξη μεθόδων που δίνουν κάποιο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας καθώς εκτός του ότι είναι εγγυημένη, ως ένα βαθμό, η σταθερότητα κάθε ομάδας, είναι δυνατόν να γίνει και εκτίμηση της διάρκειας κάποιου μονοπατιού, ενδεχομένως και μέσω διαφορετικών ομάδων. Ταυτόχρονα, μέσω των ιεραρχικών δομών που προτείνει το μοντέλο, διευκολύνονται λειτουργίες πολλαπλής εκπομπής. Τέλος, ο συνδυασμός του προτεινόμενου μοντέλου με κάποιο πρωτόκολλο εύρεσης υπηρεσιών που χρησιμοποιεί ιεραρχικά δέντρα (όπως το Konark) είναι εύκολος και μπορεί να αποδειχθεί αρκετά αποτελεσματικός.

Παράρτημα I. Dynamic Source Routing

Το Dynamic Source Routing (DSR) αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Carnegie Mellon. Χρησιμοποιεί δρομολόγηση πηγής και για αυτό το λόγο έχει το πλεονέκτημα ότι κάθε ενδιάμεσος κόμβος από την πηγή στον προορισμό δεν χρειάζεται να κρατά οποιαδήποτε πληροφορία δρομολόγησης, καθώς η διαδρομή είναι επακριβώς ορισμένη μέσα στο πακέτο. Το DSR δεν απαιτεί κανενός είδους περιοδική ανταλλαγή μηνυμάτων καθώς οι διαδρομές δημιουργούνται κατ'απαίτηση (on-demand). Το DSR αποτελείται από δύο φάσεις: ανακάλυψη διαδρομής (route discovery) και συντήρηση διαδρομής (route maintenance).

I.1 Ανακάλυψη διαδρομής

Όταν ένας κόμβος έχει να στείλει ένα μήνυμα δεδομένων σε κάποιον άλλο, αλλά δεν έχει αποθηκευμένη μία διαδρομή προς αυτόν, ξεκινάει μία διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής. Η πηγή πλημμυρίζει το δίκτυο με ένα μήνυμα αίτησης διαδρομής (Route Request), το οποίο περιέχει ένα ξεχωριστό αριθμό ταυτότητας (ID). Όταν το μήνυμα αυτό παραληφθεί από τον προορισμό ή κάποιον κόμβο ο οποίος έχει πληροφορίες διαδρομής για τον προορισμό, δημιουργείται ένα μήνυμα απάντησης διαδρομής από τον εν λόγω κόμβο. Το μήνυμα αυτό προωθείται στην πηγή και περιέχει πληροφορίες για τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθηθεί. Σε κάθε κόμβο υπάρχει ένας πίνακας διαδρομών, στον οποίο κάθε κόμβος αποθηκεύει τις πληροφορίες που έχει μάθει, είτε απ' ευθείας είτε εμμέσως, για τους διάφορους προορισμούς. Έτσι είναι δυνατό να μειωθεί το κόστος που απαιτείται για την ανακάλυψη κάποιας διαδρομής.

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα αίτησης διαδρομής το προωθεί στους γείτονές του μόνο αν πληρούνται οι εξής συνθήκες: (α) Ο κόμβος δεν είναι ο προορισμός, (β) ο κόμβος δεν αποτελεί μέρος της διαδρομής που περιέχεται στο μήνυμα, (γ) το μήνυμα δεν έχει ληφθεί ξανά από τον ίδιο κόμβο, (δ) ο κόμβος δεν έχει πληροφορίες για τον προορισμό. Αν όλα τα παραπάνω είναι αληθή τότε ο κόμβος προσθέτει την ταυτότητά του στη διαδρομή που περιέχεται στο μήνυμα και το μεταδίδει σε όλους τους γείτονές του. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι (β) ή (γ) το πακέτο απλά απορρίπτεται. Στις άλλες

δύο περιπτώσεις, δηλαδή αν ο κόμβος είναι ο προορισμός ή έχει πληροφορίες για τον προορισμό, τότε δημιουργεί ένα μήνυμα απάντησης και το προωθεί προς την πηγή.

I.2 Συντήρηση διαδρομής

Η συντήρηση των διαδρομών στο DSR επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου κατά πόσο ένα πακέτο έχει ληφθεί από τους γείτονες ενός κόμβου. Αυτό γίνεται είτε έμμεσα, με το να παρακολουθεί ένας κόμβος αν ένα πακέτο επαναεκπέμπεται από τον γειτονικό του κόμβο, είτε άμεσα με την αίτηση απάντησης από κάθε κόμβο ότι έλαβε το πακέτο. Αν ένας κόμβος διαπιστώσει ότι υπάρχει πρόβλημα στην εκπομπή ενός πακέτου μέσω μίας διαδρομής στέλνεται ένα μήνυμα λάθους προς τον αρχικό αποστολέα ώστε να ξεκινήσει μία καινούρια φάση ανακάλυψης διαδρομής. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα λάθους απαιτείται να διαγράψει από τον πίνακά του κάθε διαδρομή που χρησιμοποιεί την ζεύξη που παρουσιάζει το πρόβλημα. Είναι προφανές ότι ένα μήνυμα λάθους δημιουργείται μόνο όταν ένας κόμβος προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει μία ζεύξη η οποία δεν λειτουργεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των απαιτούμενων μηνυμάτων ελέγχου, αλλά προσθέτει αρκετή καθυστέρηση στα πακέτα που θα χρησιμοποιούσαν τη ζεύξη άμεσα.

I.3 Δεδομένα που φυλάσσονται σε κάθε κόμβο

- **Πίνακας Διαδρομών:** Κάθε κόμβος φυλάσσει πληροφορίες διαδρομών σε έναν πίνακα. Τις πληροφορίες αυτές μπορεί να τις αποκτήσει ένας κόμβος από την επεξεργασία μηνυμάτων απάντησης διαδρομής καθώς και από την διαδρομή που περιέχεται σε πακέτα δεδομένων. Για κάθε προορισμό είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες της μίας διαδρομής. Αν ληφθεί ένα μήνυμα σφάλματος διαδρομής ο κόμβος είναι υποχρεωμένος να σβήσει όλες τις διαδρομές που περιέχουν τη λανθασμένη ζεύξη.

- **Πίνακας Αιτήσεων Διαδρομών:** Οι κόμβοι οι οποίοι δημιουργούν ένα μήνυμα αίτησης διαδρομής φυλάσσουν δεδομένα σχετικά με την αίτηση σε ένα πίνακα. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν τον προορισμό, το χρόνο που ο κόμβος είδε τελευταία φορά μια αίτηση διαδρομής προς τον συγκεκριμένο

προορισμό και τον χρόνο που πρέπει να περιμένει ο κόμβος μέχρι να ξαναστείλει μία αίτηση προς τον συγκεκριμένο προορισμό. Ο πίνακας αυτό υπάρχει ώστε να περιορίζει συχνές αιτήσεις προς τον ίδιο προορισμό.

I.4 Βελτιστοποιήσεις

Για το πρωτόκολλο DSR έχουν προταθεί διάφορες βελτιστοποιήσεις, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την λειτουργία του και να μειώσουν τον επίφορτο. Κάποιες από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Μη Προωθούμενες Αιτήσεις Διαδρομής:** Όταν ένας κόμβος δημιουργεί ένα μήνυμα αίτησης διαδρομής θέτει το πεδίο Time-To-Live (TTL) ίσο με μηδέν με αποτέλεσμα το μήνυμα να λαμβάνεται μόνο από τους άμεσους γείτονες και να μην προωθείται περαιτέρω. Αν κάποιος από τους γείτονες είναι ο προορισμός ή έχει πληροφορίες για τον προορισμό απαντάει, αλλιώς η πηγή περιμένει κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να ξεκινήσει μία κανονική φάση ανακάλυψης διαδρομής.
- **Εισαγωγή δεδομένων σε μηνύματα αίτησης διαδρομής:** Για να μειωθεί η καθυστέρηση που εμφανίζεται για την αποστολή δεδομένων από την πηγή στον προορισμό είναι δυνατόν το μήνυμα αίτησης διαδρομής να μεταφέρει και δεδομένα. Σε αυτή την περίπτωση, αν κάποιος ενδιάμεσος κόμβος έχει πληροφορίες για τον προορισμό τότε αυτό είναι υποχρεωμένος να απαντήσει στην πηγή και να στείλει ένα κανονικό πακέτο δεδομένων στον προορισμό.
- **Ανέξοδη Απάντηση Διαδρομής:** Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος λάβει ένα πακέτο το οποίο δεν απευθύνεται σε αυτόν αλλά υπάρχει στη διαδρομή που περιέχεται σε αυτό, τότε γνωρίζει ότι είναι δυνατόν να συντομευτεί η διαδρομή προς τον προορισμό και αποστέλλει ένα μήνυμα απάντησης στην πηγή.
- **Διάσωση (Salvaging):** Αν ένας ενδιάμεσος κόμβος αναγνωρίσει ότι ο επόμενος κόμβος δεν είναι προσπελάσιμος ψάχνει στον πίνακα διαδρομών του για μία εναλλακτική διαδρομή προς τον προορισμό. Αν βρει μία τέτοια προωθεί το πακέτο μέσω αυτής, ενώ ταυτόχρονα ενημερώνει την πηγή για τη πρόβλημα ζεύξης.
- **Snooping:** Όταν ένας κόμβος επεξεργάζεται δεδομένα εξετάζει τους κόμβους μετά από αυτόν που βρίσκονται στη διαδρομή και κρατά πληροφορίες για αυτούς στον πίνακα διαδρομών του. Έτσι είναι δυνατό να έχει περισσότερες τις μία

διαδρομής για κάθε προορισμό και να χρησιμοποιήσει κάποια εναλλακτική διαδρομή, αν αυτό χρειαστεί.

Παράρτημα II. Destination Sequenced Distance Vector Protocol (DSDV)

II.1 Περιγραφή πρωτοκόλλου

Το DSDV ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων διανύσματος αποστάσεων (distance vector) και είναι ένα proactive πρωτόκολλο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος έχει μία διαδρομή για κάθε άλλο κόμβο όποτε του ζητηθεί. Αναλυτικά το πρωτόκολλο λειτουργεί ως εξής:

Τα πακέτα ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων βάσει πινάκων διαδρομών που κάθε κόμβος έχει αποθηκευμένους. Οι πίνακες αυτοί περιέχουν μία εγγραφή για κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο η οποία περιέχει:

- τη διεύθυνση του προορισμού
- τον επόμενο κόμβο (next hop)
- των αριθμό των βημάτων (hops) που χρειάζονται για να φτάσει ένα πακέτο στον προορισμό ή κάποιο άλλο μέγεθος επιλογής (metric) και
- ένα sequence number το οποίο έχει προέλθει από τον προορισμό

Το τελευταίο χρησιμοποιείται για να μπορεί κάθε κόμβος να αναγνωρίζει το πόσο παλιά είναι μια πληροφορία. Πάντα προτιμώνται οι νεότερες πληροφορίες, ενώ σε περίπτωση διαδρομών που έχουν το ίδιο sequence number προτιμάται η διαδρομή με το καλλίτερο χρησιμοποιούμενο μέγεθος.

Το πρωτόκολλο, για να μπορεί να λειτουργήσει σωστά σε ένα περιβάλλον του οποίου η τοπολογία αλλάζει διαρκώς, απαιτεί από κάθε κόμβο να κάνει γνωστούς τους πίνακες δρομολόγησής του. Αυτό συμβαίνει ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή όταν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές που πρέπει να γίνουν γνωστές. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πίνακα δρομολόγησης τροποποιεί τον δικό του βάσει αυτού αν χρειάζεται και στη συνέχεια επαναεκπέμπει την πληροφορία αφού πρώτα κάνει τις τροποποιήσεις που χρειάζονται στο χρησιμοποιούμενο μέγεθος (π.χ. αυξάνει κατά ένα τον αριθμό των βημάτων που απαιτούνται για κάποιο προορισμό).

Έτσι οποιαδήποτε πληροφορία εξαπλώνεται στο δίκτυο. Λόγω όμως της κινητικότητας των κόμβων το κάθε πότε θα γίνονται οι εκπομπές των πινάκων είναι πολύ σημαντική παράμετρος. Από τη μία, αν γίνονται πολύ συχνά ή λόγω οποιασδήποτε μεταβολής στην τοπολογία η επιβάρυνση του δικτύου θα είναι πολύ μεγάλη. Από την άλλη, αν γίνονται πολύ σπάνια οι κόμβοι θα έχουν λανθασμένες πληροφορίες. Για αυτόν τον λόγο εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές, οι οποίες θα αναφερθούν αργότερα, ώστε να μειωθούν τα μηνύματα ελέγχου μεταξύ κόμβων.

Η κινητικότητα των κόμβων έχει επίσης ως αποτέλεσμα την πτώση των ζεύξεων μεταξύ των κόμβων. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από ένα κόμβο είτε μέσω του πρωτοκόλλου επιπέδου 2, είτε με το να μην έχει ληφθεί κάποιο μήνυμα από ένα μέχρι πρότινος γείτονα. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος θέτει σε κάθε διαδρομή μέσω αυτού του κόμβου το αντίστοιχο μέγεθος ίσο με άπειρο και επίσης δίνει ένα καινούριο sequence number. Αυτή είναι η μόνη περίπτωση κατά την οποία το sequence number μίας διαδρομής τίθεται από κάποιον ενδιάμεσο κόμβο και όχι από την πηγή. Επίσης, τα sequence numbers τα οποία έχουν προέλθει από μία τέτοια διαδικασία είναι μονοί αριθμοί, ενώ στην περίπτωση που προέρχονται από την πηγή είναι ζυγοί αριθμοί. Στη συνέχεια ο κόμβος οφείλει να εκπέμψει στους γείτονές του την αλλαγή την οποία επήλθε. Αν κάποιος κόμβος λάβει μία διαδρομή με μέγεθος ίσο με άπειρο και ο ίδιος έχει μία διαδρομή με μεγαλύτερο sequence number και μη άπειρο μέγεθος οφείλει να μεταδώσει την διαδρομή που έχει άμεσα.

II.2 Βελτιστοποιήσεις

Κάποιες βελτιστοποιήσεις που έχουν προταθεί για το πρωτόκολλο είναι οι εξής:

- **Μετάδοση μόνο των αλλαγών.** Οι κόμβοι είναι δυνατό να μην αναμεταδίδουν όλο τον πίνακα δρομολόγησης αλλά μόνο τις εγγραφές που έχουν αλλάξει από την τελευταία εκπομπή του. Αυτό θα πρέπει να μπορεί να συμβεί με τη χρήση μόνο ενός πακέτου. Η εκπομπή όλου του πίνακα δρομολόγησης μπορεί να συμβαίνει σπανιότερα και όταν δεν υπάρχει κίνηση στο δίκτυο και είναι φυσιολογικό να χρειάζονται περισσότερα του ενός πακέτα, ακόμη και για μικρά δίκτυα.

- **Μη άμεση μετάδοση των ληφθέντων διαδρομών.** Πολλές φορές είναι δυνατό ένας κόμβος να λάβει μία διαδρομή και σε σύντομο χρονικό διάστημα να λάβει μία άλλη διαδρομή για τον ίδιο προορισμό με καλλίτερο όμως μέγεθος. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να σταλούν μηνύματα ελέγχου που θα μπορούσαν να αποφευχθούν. Έτσι είναι δυνατόν όταν ένας κόμβος λάβει μία διαδρομή προς κάποιον άλλο να μην την αναμεταδώσει αμέσως αλλά να περιμένει κάποιο χρονικό διάστημα σε περίπτωση που έρθει μία καινούρια διαδρομή για τον ίδιο προορισμό (πιθανώς και με λιγότερα βήματα). Αυτό προϋποθέτει αφενός μεν κάθε κόμβος να έχει δύο πίνακες δρομολόγησης (έναν για την αποστολή πακέτων και έναν για την ενημέρωση των γειτόνων του) αφετέρου δε και τη καταγραφή κάποιων στατιστικών στοιχείων ώστε να μπορεί ο κόμβος να επιλέγει σωστά τον χρόνο που θα περιμένει για μία καλλίτερη διαδρομή. Έτσι μπορούν να μειωθούν αισθητά τα μηνύματα ελέγχου.

Παράρτημα III. Ad Hoc on-Demand Distance Vector protocol (AODV)

Το AODV είναι ένα proactive πρωτόκολλο, στο οποίο η ανακάλυψη των διαδρομών βασίζεται σε ένα κύκλο αίτηση διαδρομής-απάντηση διαδρομής (route request – route reply). Μόλις ανακαλυφθεί μία διαδρομή διατηρείται όσο χρειάζεται από την πηγή. Για να αποφευχθεί το πρόβλημα της δημιουργίας βρόγχων (loops) το AODV χρησιμοποιεί μοναδικά sequence numbers σε κάθε κόμβο. Κάθε κόμβος αυξάνει τον αριθμό αυτό όποτε διαπιστώσει κάποια αλλαγή στις συνδέσεις του με τους γείτονές του. Αναλυτικότερα έχουμε:

III.1 Ανακάλυψη Διαδρομής (Route Discovery)

Η ανακάλυψη μιας διαδρομής ξεκινάει όταν η πηγή χρειάζεται να επικοινωνήσει με έναν προορισμό. Για το σκοπό αυτό η πηγή δημιουργεί ένα πακέτο Αίτησης Διαδρομής (Route Request – RREQ). Το πακέτο αυτό περιέχει την διεύθυνση IP του προορισμού, το τελευταίο sequence number που είναι γνωστό στην πηγή για τον συγκεκριμένο προορισμό, τη διεύθυνση IP της πηγή καθώς και το sequence number της πηγής.

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο RREQ δημιουργεί μία καταχώρηση στο πίνακα διαδρομών του προς την πηγή. Στη συνέχεια ελέγχει αν έχει μία έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό. Για να μπορεί να απαντήσει θετικά στην πηγή θα πρέπει είτε να είναι ο ίδιος ο προορισμός είτε να περιέχει μία έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό με sequence number τουλάχιστο ίσο ή μεγαλύτερο από αυτόν που περιέχεται στην αίτηση. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται αυτές οι προϋποθέσεις, ο κόμβος επαναεκπέμπει το πακέτο.

Σε περίπτωση που οι προϋποθέσεις ικανοποιούνται, τότε ο κόμβος δημιουργεί ένα μήνυμα Απάντησης Διαδρομής (Route Reply – RREP). Στο πακέτο περιέχεται το τρέχων sequence number του προορισμού και ο αριθμός των βημάτων (hops) προς αυτόν. Στη συνέχεια το πακέτο στέλνεται προς την πηγή. Σαν επόμενο βήμα χρησιμοποιείται ο κόμβος από τον οποίο προήλθε το μήνυμα RREQ. Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος λάβει το μήνυμα RREP, δημιουργεί στον πίνακα διαδρομών του μία εγγραφή προς τον προορισμό με τα

δεδομένα που περιέχονται στο πακέτο και προωθεί το πακέτο προς την πηγή. Μόλις η πηγή λάβει το μήνυμα RREP μπορεί να ξεκινήσει να χρησιμοποιεί τη διαδρομή. Αν στη συνέχεια λάβει κάποιο RREP με μεγαλύτερο sequence number προορισμού ή ίδιο αλλά με μικρότερο αριθμό βημάτων, αλλάζει την εγγραφή του στον πίνακα διαδρομών και ξεκινά να χρησιμοποιεί τη νεότερη ή καλλίτερη διαδρομή.

Αν η πηγή δεν λάβει κάποιο μήνυμα απάντησης μέσα σε κάποιο χρονικό όριο, το οποίο αποτελεί σχεδιαστική επιλογή, εκπέμπει εκ νέου το μήνυμα RREQ. Η πηγή μπορεί να επαναλάβει αυτή τη διαδικασία κάποιο μέγιστο αριθμό φορών μέχρι να θεωρηθεί ότι η επικοινωνία με τον προορισμό είναι αδύνατη.

III.2 Συντήρηση Διαδρομής (Route Maintenance)

Μία διαδρομή θεωρείται ενεργή αν έχει χρησιμοποιηθεί προσφάτως για την αποστολή δεδομένων. Αν η ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πια και αυτή αποτελεί μέρος μία μη ενεργής διαδρομής δεν λαμβάνεται καμία ενέργεια από το πρωτόκολλο. Αν όμως αυτό συμβεί σε μία ενεργή διαδρομή τότε πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ο κόμβος ο οποίος βρίσκεται προς την πηγή ελέγχει αν κάποιος από τους γείτονές του χρησιμοποιούσε την εν λόγω ζεύξη. Αν αυτό ισχύει τότε δημιουργεί ένα μήνυμα Λάθους Διαδρομής (Route Error – RERR), το οποίο περιέχει την διεύθυνση IP κάθε προορισμού ο οποίος είναι πλέον απροσπέλαστος, λόγω της αποτυχίας της ζεύξης. Το μήνυμα περιέχει ακόμα και το sequence number κάθε προορισμού αυξημένο κατά ένα. Ο κόμβος εκπέμπει στη συνέχεια το μήνυμα RERR και διαγράφει όλες τις διαδρομές που περιείχαν την ζεύξη που απέτυχε.

Όταν ένας γειτονικός κόμβος λάβει το μήνυμα RERR διαγράφει από τον πίνακά του κάθε διαδρομή που περιέχεται στο μήνυμα, αν οι διαδρομές αυτές χρησιμοποιούσαν τον κόμβο που έστειλε το RERR σαν επόμενο βήμα. Στη συνέχεια ακολουθεί την προηγούμενη διαδικασία, ελέγχει δηλαδή αν κάποιος από τους γείτονές του χρησιμοποιούσε κάποια διαδρομή μέσω αυτού προς κάποιον από τους προορισμούς. Αν αυτό ισχύει δημιουργεί το δικό του μήνυμα RERR και το μεταδίδει.

Όταν κάποιος κόμβος-πηγή λάβει το RERR, διαγράφει τις διαδρομές που απαιτείται και αν χρειάζεται κάποια διαδρομή ξεκινάει μια καινούρια διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής.

III.3 Βελτιστοποιήσεις

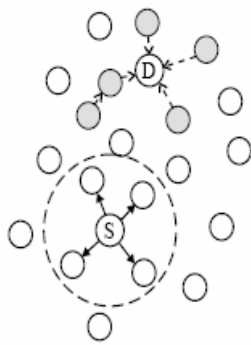
Η απόδοση του AODV μπορεί να μειωθεί αισθητά καθώς μεγαλώνει το μέγεθος του δικτύου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι κάθε RREQ πρέπει να πλημμυρίσει το δίκτυο, πράγμα που σπαταλάει πολύτιμο εύρος ζώνης καθώς και επεξεργαστική ισχύ σε κάθε κόμβο.

Επίσης καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, αυξάνεται και το μήκος των διαδρομών. Αυτό, σε συνδυασμό με την κινητικότητα των κόμβων, έχει ως αποτέλεσμα να σπάνε συχνά οι ενεργές διαδρομές. Έτσι η πηγή οφείλει να αποκαταστήσει ένα μεγάλο αριθμό από διαδρομές. Σε ιδιαιτέρως απαιτητικά περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα και μεγάλες διαδρομές είναι πιθανό η πηγή να προλαβαίνει να βρει διαδρομές προς χρήση.

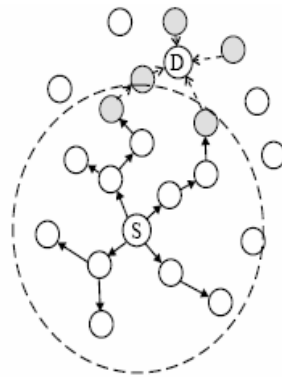
Εξ αιτίας των παραπάνω προβλημάτων, έχουν προταθεί διάφορες τροποποιήσεις, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν ώστε το πρωτόκολλο να μπορεί να αντεπεξέρχεται στις απαιτήσεις που θέτουν τα μεγάλα δίκτυα. Οι πιο σημαντικές προτάσεις είναι η τεχνική της αναζήτησης διευρυνόμενου δακτυλίου (expanding ring search), η εντόπιση ερώτησης (query localization) και η τοπική διόρθωση (local repair) των διαδρομών.

III.3.1. Expanding Ring Search

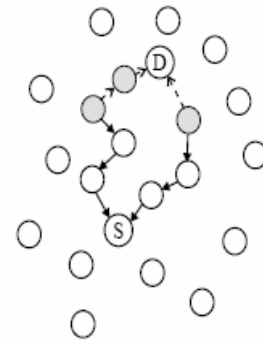
Η τεχνική expanding ring search λειτουργεί με το να εξετάζονται διαδοχικώς μεγαλύτερες περιοχές, με κέντρο την πηγή, έως ότου βρεθεί ένας κόμβος που έχει μία διαδρομή προς τον προορισμό. Η βασική ιδέα της τεχνικής είναι να βρεθεί κάποιος κοντινός κόμβος που να έχει στοιχεία για τον προορισμό και να αποφευχθεί η πλημμύρα του μηνύματος αναζήτησης σε όλο το δίκτυο. Το αρχικό μήνυμα RREQ έχει μικρό time-to-live (TTL), συνήθως ίσο με δύο. Αυτό σημαίνει ότι το μήνυμα θα φτάσει σε απόσταση 2 βημάτων (hops) και δεν θα προωθηθεί περαιτέρω. Η πηγή περιμένει κάποιο χρόνο και αν δεν της έρθει απάντηση αποστέλλει ένα καινούριο RREQ με μεγαλύτερο TTL κατά ένα μέγεθος. Η τακτική αυτή ακολουθείται έως ότου έρθει απάντηση ή το TTL φτάσει κάποιο όριο, μετά το οποίο η πηγή απλώς πλημμυρίζει το δίκτυο.



α) RREQ TTL = 1



β) RREQ TTL = 3



γ) Η διαδρομή των RREP προς την πηγή

Για να είναι πιο αποδοτική η αναζήτηση, ο χρόνος που θα περιμένει η πηγή πριν αποστείλει ένα καινούριο μήνυμα RREQ μπορεί να τεθεί σε αναλογία με την περιοχή που γίνεται η αναζήτηση. Παραδείγματος χάρη θα μπορούσε να τεθεί ως εξής:

$$\text{χρονος_αναμονής} = 2 \times \text{TTL} \times \text{χρονος_διάσχισης_κόμβου}$$

όπου $\text{χρονος_διάσχισης_κόμβου}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει ένα μήνυμα στον αποδέκτη και να γίνει και η επεξεργασία του. Με αυτόν τον τρόπο ο χρόνος αναμονής είναι ευθέως ανάλογος του TTL.

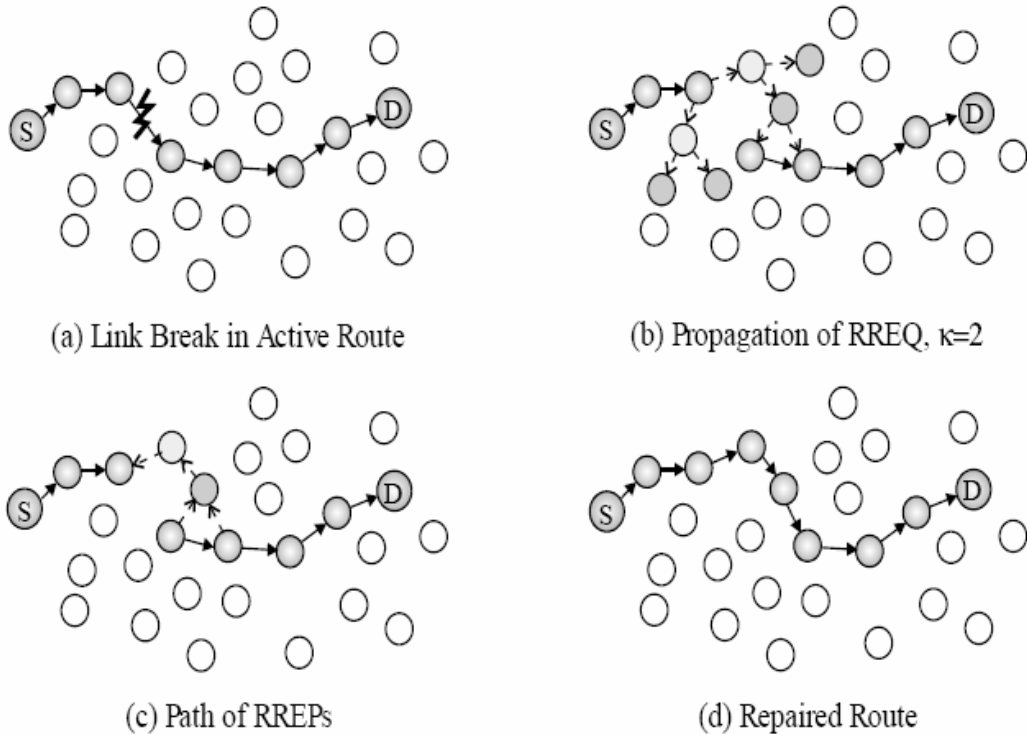
Εάν η αναζήτηση διαδρομής οφείλεται στην μη λειτουργία μίας ενεργής διαδρομής, τότε η πηγή θέτει ως αρχικό TTL τον αριθμό των βημάτων (hops) που ήταν πριν γνωστό ότι απέχει ο προορισμός. Στη συνέχεια ακολουθούνται τα βήματα όμως περιγράφηκαν παραπάνω.

Είναι προφανές ότι με την τεχνική της αναζήτησης διευρυνόμενου δακτυλίου ο χρόνος μέχρι την εύρεση μίας διαδρομής μπορεί να είναι μεγαλύτερος από ότι χωρίς την χρήση της. Παρ' όλα αυτά, η τεχνική αυτή βοηθάει πολύ στο να γίνει εξοικονόμηση εύρους ζώνης, καθώς το δίκτυο δεν πλημμυρίζει από κάθε αναζήτηση διαδρομής.

III.3.2. Query Localization

Η τεχνική της τοπικοποίησης της ερώτησης βασίζεται στην ιδέα ότι η εύρεση της διαδρομής θα πρέπει να χρησιμοποιεί τα δεδομένα για την προηγούμενη διαδρομή προς κάποιον προορισμό. Έτσι το μήνυμα RREQ δεν πλημμυρίζει το δίκτυο αλλά περιορίζεται σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή. Η μέθοδος προϋποθέτει ότι ο προορισμός έχει μετακινηθεί κάποια μικρή απόσταση από την προηγούμενη θέση του και έτσι μπορεί να βρεθεί κάποιο μικρό αριθμό βημάτων από την προηγούμενη διαδρομή. Για να λειτουργήσει η τεχνική απαιτείται έναν καινούριο μετρητή στο μήνυμα RREQ. Όταν δέχεται το μήνυμα ένας κόμβος ο οποίος δεν ήταν προηγουμένως μέρος της διαδρομής αυξάνει τον μετρητή,

ενώ όταν το λαμβάνει κάποιος που ήταν ο μετρητής μηδενίζεται. Όταν ο μετρητής υπερβεί κάποιο όριο k το πακέτο απορρίπτεται.



Όταν ξεκινάει η εύρεση μίας διαδρομής προς κάποιο προορισμό, δηλαδή δεν υπάρχουν πληροφορίες για τον προορισμό, το μέγεθος k τίθεται ίσο με τη διάμετρο του δικτύου, ώστε το μήνυμα να διασχίσει όλο το δίκτυο. Αν όμως πρόκειται για προσπάθεια επιδιόρθωσης βλάβης, το k τίθεται σε κάποια μικρή τιμή. Αν δεν βρεθεί διαδρομή με την πρώτη προσπάθεια η πηγή προσπαθεί ξανά με κάποια μεγαλύτερη τιμή.

Όπως είναι προφανές, η τεχνική αυτή παρουσιάζει τα ίδια μειονεκτήματα με την τεχνική expanding ring search, καθώς, αν η διαδρομή δεν βρεθεί με την πρώτη προσπάθεια, κάποια κόμβοι ρωτούνται συνεχώς και η εύρεση παίρνει περισσότερο χρόνο από ότι θα έπαιρνε με την διαδικασία της πλημμύρας.

III.3.3. Τοπική Διόρθωση

Η μέθοδος της τοπικής διόρθωσης μπορεί να επιδράσει πολύ θετικά στο πρωτόκολλο AODV, ιδιαιτέρως σε μεγάλα δίκτυα. Σύμφωνα με αυτήν, όταν γίνει αντιληπτό ένα πρόβλημα σε μία ζεύξη, δεν ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω με την αποστολή μηνυμάτων RERR, αλλά ο κόμβος που βρίσκεται προς την

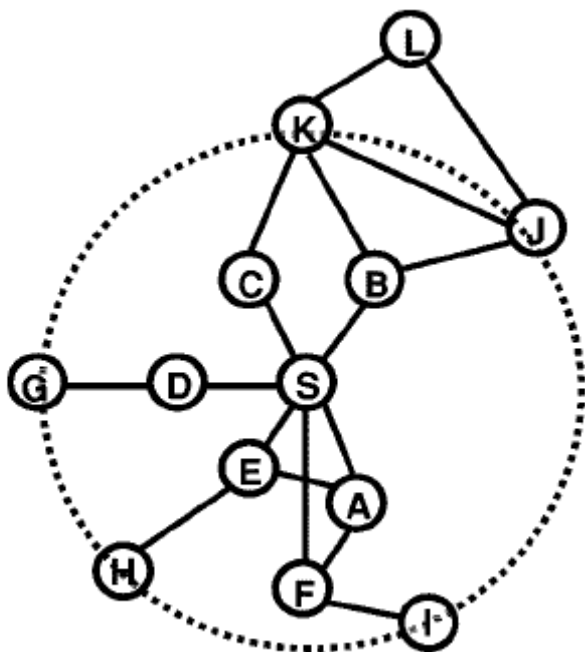
πηγή και αντιλαμβάνεται το πρόβλημα προσπαθεί πρώτα να βρει μια διαδρομή προς τον προορισμό πριν ξεκινήσει την διαδικασία των μηνυμάτων RERR. Ο κόμβος το επιτυγχάνει αυτό με την αποστολή μηνυμάτων RREQ με TTL ίσο με την απόσταση του προς τον προορισμό συν κάποια μικρή διόρθωση. Έτσι η αναζήτηση λαμβάνει χώρα σε μία περιοχή κοντά στον προορισμό και δεν πλημμυρίζεται το δίκτυο. Επίσης ο κόμβος θέτει στο μήνυμα το sequence number του προορισμού αυξημένο κατά ένα, έτσι ώστε να αποτρέψει τους κόμβους που βρίσκονται προς την πηγή να απαντήσουν δημιουργώντας βρόγχους. Αν η επιδιόρθωση δεν επιτευχθεί με την πρώτη προσπάθεια, αποστέλλεται ένα μήνυμα RERR στην πηγή και ακολουθείται η διαδικασία που αναφέρθηκε προωτέρα.

Παράρτημα IV. Zone Routing Protocol (ZRP)

Το ZRP μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα υβριδικό πρωτόκολλο, καθώς προσπαθεί να χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα τα θετικά στοιχεία των proactive και reactive πρωτοκόλλων. Έτσι, κάθε κόμβος χωρίζει το δίκτυο σε δύο ζώνες. Την κοντινή του περιοχή, όπου εφαρμόζεται ένα proactive πρωτόκολλο και την εξωτερική περιοχή, όπου εφαρμόζει ένα reactive πρωτόκολλο.

IV.1 Ζώνες Δρομολόγησης

Στο ZRP κάθε κόμβος κρατάει διαδρομές για ένα σύνολο κόμβων το οποίο ονομάζεται ζώνη δρομολόγησης (routing zone). Χαρακτηριστικό του συνόλου αυτού είναι ότι τα μέλη του δεν απέχουν από τον κόμβο περισσότερο από κάποιο αριθμό βημάτων (hops). Η παράμετρος αυτή αποκαλείται ακτίνα ζώνης (zone radius). Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι κάθε κόμβος διατηρεί την δικιά του ζώνη δρομολόγησης, με αποτέλεσμα οι ζώνες γειτονικών κόμβων να επικαλύπτονται.



Παραπάνω φαίνεται η ζώνη δρομολόγησης του κόμβου S με ακτίνα 2. Ο κόμβος L δεν ανήκει στη ζώνη δρομολόγησης του S, ενώ οι κόμβοι G, H, I, J και K αποτελούν ένα σημαντικό υποσύνολο της ζώνης δρομολόγησης, καθώς η απόστασή τους από τον S είναι ίση με την ακτίνα ζώνης και αποκαλούνται περιφερειακοί κόμβοι (peripheral nodes).

Το πρωτόκολλο θεωρεί δεδομένο ότι κάθε κόμβος γνωρίζει τους γείτονές του. Αυτό είναι γνωστό συνήθως μέσω του πρωτοκόλλου MAC. Σε διαφορετική περίπτωση είναι πολύ εύκολη η ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου εύρεσης γειτόνων, μέσω της περιοδικής εκπομπής μηνυμάτων.

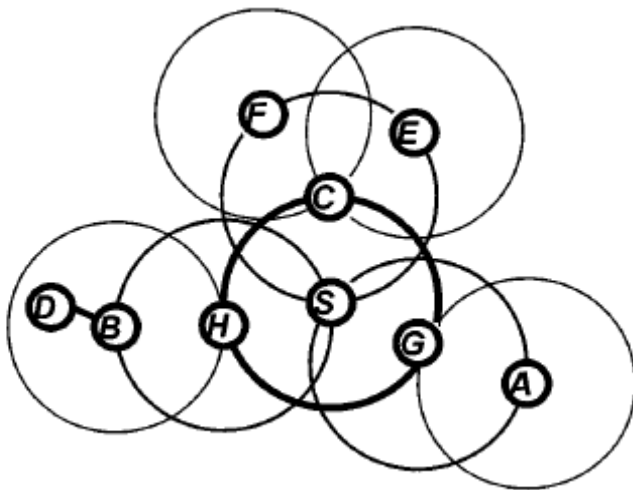
IV.2 Ενδοζωνική Δρομολόγηση

Τα δεδομένα που έχει κάθε κόμβος για τους γείτονές του χρησιμοποιούνται για να γίνεται η ενδοζωνική δρομολόγηση, δηλαδή η δρομολόγηση μέσα στη ζώνη κάθε κόμβου. Η δρομολόγηση γίνεται μέσω κάποιου proactive πρωτοκόλλου, δηλαδή κάθε κόμβος διατηρεί συνεχώς διαδρομές για τους κόμβους που αποτελούν την ζώνη του. Το πρωτόκολλο αυτό ονομάζεται Ενδοζωνικό Πρωτόκολλο Δρομολόγησης (IntraZone Routing Protocol – IARP). Ως τέτοιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε πρωτόκολλο κατάστασης ζεύξεων (link state), αρκεί να διασφαλιστεί ότι θα καλύπτει μόνο την περιοχή που αποτελεί την ζώνη του κάθε κόμβου.

IV.3 Διαζωνική Δρομολόγηση

Υπεύθυνο για τη δρομολόγηση προς κόμβους εκτός της ζώνης είναι το Διαζωνικό Πρωτόκολλο Δρομολόγησης (InterZone Routing Protocol – IERP). Αυτό χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό ερώτησης – απάντησης και έτσι ανακαλύπτει τις διαδρομές κατ' αίτηση (on demand). Η διαφορά του σε σχέση με τα συνηθισμένα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν την τεχνική της πλημμύρας, είναι ότι χρησιμοποιεί την τεχνική της εκπομπής συνοριακών κόμβων (bordercasting). Η τεχνική αυτή επιτρέπει σε έναν κόμβο να στείλει μηνύματα στους περιφερειακούς του κόμβους. Το ZRP παρέχει αυτή την υπηρεσία μέσω ενός συστατικού που ονομάζεται Bordercast Resolution Protocol. Στην πιο απλή περίπτωση αυτό μπορεί να υλοποιηθεί στο στρώμα δικτύου, χρησιμοποιώντας πολυεκπομπή (multicasting) προς τους περιφερειακούς κόμβους. Αυτό που απαιτείται είναι τα μηνύματα να φτάνουν στους περιφερειακούς κόμβους χωρίς να επεξεργάζονται στο επίπεδο δρομολόγησης των ενδιάμεσων κόμβων.

Μία αίτηση δρομολόγησης IERP δημιουργείται στο στρώμα δικτύου, όταν ζητείται η αποστολή ενός πακέτου προς κάποιο κόμβο ο οποίος δεν είναι μέρος της ζώνης δρομολόγησης. Η πηγή δημιουργεί ένα πακέτο αίτησης διαδρομής το οποίο περιέχει την ταυτότητά της και έναν αριθμό αίτησης. Το πακέτο αποστέλλεται στους περιφερειακούς κόμβους, οι οποίοι με το που το λάβουν προσθέτουν την δική τους ταυτότητα στο πακέτο. Αν ο προορισμός δεν βρίσκεται μέσα στη ζώνη του κόμβου, το πακέτο προωθείται από τον κόμβο στους δικούς του περιφερειακούς κόμβους. Η ακολουθία των ταυτοτήτων των κόμβων δημιουργεί μία συσσωρευμένη διαδρομή από την πηγή στην τρέχουσα ζώνη δρομολόγησης. Αν ο προορισμός βρίσκεται μέσα στη ζώνη του τρέχοντα κόμβου, αποστέλλεται μία απάντηση στην πηγή μέσω της συσσωρευμένης διαδρομής.



Παράδειγμα λειτουργίας IERP

Στο σχήμα ο κόμβος S προσπαθεί να στείλει ένα πακέτο στον κόμβο D. Η διαδρομή που λαμβάνει ο S είναι τελικά η S – H – B – D.