



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

Γνωστικά Αδόμητα Δίκτυα Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Κατσαούνης Γεώργιος

Επιβλέπων: Παναγόπουλος Αθανάσιος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



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

Γνωστικά Αδόμητα Δίκτυα Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Κατσαούνης Γεώργιος

Επιβλέπων: Παναγόπουλος Αθανάσιος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Φεβρουαρίου 2014.

.....

Παναγόπουλος Αθανάσιος
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

.....

Κωνσταντίνου Φίλιππος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Κανελλόπουλος Ιωάννης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....
ΚΑΤΣΑΟΥΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Κατσαούνης Κ. Γεώργιος, 2014

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

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχει γίνει ένας δυσεύρετος πόρος, ειδικά με την ευρεία εξάπλωση και ανάπτυξη πολλαπλών συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, όπως η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB), τα κυβελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και άλλα. Τα γνωστικά δίκτυα είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για να γίνει πιο αποδοτική η χρησιμοποίηση του ήδη περιορισμένου ραδιοφάσματος. Η ιδέα των γνωστικών δικτύων είναι να επιτρέπεται σε έναν μη εξουσιοδοτημένο-δευτερεύοντα χρήστη να έχει πρόσβαση στο φάσμα, με την προϋπόθεση ότι η λειτουργία του δεν θα παρεμβάλει στην επικοινωνία των εξουσιοδοτημένων-πρωτευόντων χρηστών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσουμε την ανίχνευση φάσματος με συνεργατικότητα στα αδόμητα δίκτυα οχημάτων (VANETs) και ειδικότερα να αναλύσουμε τη πιθανότητα ανίχνευσης φάσματος σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης. Επίσης, γίνεται παρουσίαση της τεχνολογίας PVA, δηλαδή της βοήθειας από παρκαρισμένα οχήματα σε αδόμητα δίκτυα οχημάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία των Γνωστικών Δικτύων, ο σχεδιασμός τους και οι βασικές διαδικασίες τις οποίες επιτελούν προκειμένου να έχουμε βέλτιστη χρησιμοποίηση φάσματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύουμε την ανίχνευση του φάσματος με συνεργατικότητα και παρατηρούμε τη σχέση της πιθανότητας παρεμβολής και πιθανότητας εσφαλμένου εντοπισμού συναρτήσει του κατωφλιού του ανιχνευτή ισχύος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των αδόμητων δικτύων οχημάτων (VANETs) και μελετούμε την ανίχνευση φάσματος στα ανωτέρω δίκτυα. Ειδικότερα, αναλύουμε τη πιθανότητα ανίχνευσης φάσματος σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης με χρήση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται η τεχνολογία PVA, δηλαδή η βοήθεια από σταθμευμένα οχήματα σε αδόμητα δίκτυα οχημάτων.

Λέξεις κλειδιά

Γνωστικά δίκτυα, ανίχνευση φάσματος, συνεργατικότητα, αδόμητα δίκτυα οχημάτων, VANET, βοήθεια από σταθμευμένα οχήματα, PVA

Abstract

Radio spectrum has become a scarce resource in particular with the wide-spread deployment of various wireless communication systems, such as digital video broadcasting (DVB), mobile cellular radio, wireless local area networks (WLAN), etc. Cognitive Radio are a promising method to make more efficient use of the limited radio spectrum. The key feature of cognitive radio is to allow a cognitive (unlicensed/secondary) user to access the licensed spectrum as long as its transmission does not interfere with the primary user's communications.

The object of the present paper is to study the collaborative spectrum sensing. In particular to analyze the behavior of probability of miss (P_m) of the secondary users to the primary users and to suggest a different design for the energy detector which will be used by the secondary users. Also, we present the idea of Parked Vehicle Assistance, which allows parked vehicles to join VANETs as static nodes.

In the first chapter we present the technology of Cognitive Radios, their design and the basic functions they carry out in order to achieve the maximum utilization of the spectrum.

In second chapter we analyze the collaborative spectrum sensing and observe the relationship between the probability of detection (P_d) and the probability of false alarm (P_f) with the threshold of the energy detector.

In third chapter are presented the main features of vehicular ad-hoc networks (VANETs) and we focus on spectrum sensing. In particular, we analyze the behavior of probability of detection in a composite fading channel using simulation results.

Finally, in fourth chapter is presented the idea of Parked Vehicle Assistance, which allows parked vehicles to join VANETs as static nodes.

Keywords

Cognitive Radio, spectrum sensing, collaboration, vehicular ad hoc network, VANET, Parked Vehicle Assistance, PVA

Πρόλογος

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές μου, κυρίως τον κύριο Παναγόπουλο, για τις γνώσεις που μου μετέφεραν και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Παπανικολάου για την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Κατσαούνης Γεώργιος

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Γνωστικά Ασύρματα Δίκτυα	15
1.1 Εισαγωγή / Έννοια των Γνωστικών Ασύρματων Δικτύων	15
1.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία των γνωστικών ασύρματων δικτύων	16
1.3 Αρχιτεκτονική γνωστικού δικτύου	18
1.3.1 Μέρη του δικτύου.....	18
1.3.2 Φασματική ετερογενετικότητα	19
1.3.3 Δικτυακή ετερογενετικότητα.....	20
1.3.4 Πλαίσιο διαχείρισης φάσματος.....	20
1.4 Ανίχνευση φάσματος	22
1.4.1 Ανίχνευση πρωτεύοντος πομπού	22
1.4.2 Ανίχνευση πρωτεύοντος δέκτη.....	24
1.4.3 Διαχείριση θερμοκρασίας παρεμβολής.....	24
1.4.4 Προκλήσεις για έρευνα στην ανίχνευση φάσματος	25
1.5 Επιλογή φάσματος	25
1.5.1 Χαρακτηριστικά καναλιού στα γνωστικά δίκτυα.....	26
1.5.2 Διαδικασία επιλογής.....	27
1.5.3 Προκλήσεις για έρευνα στην επιλογή φάσματος.....	28
1.6 Κατανομή φάσματος.....	29
1.6.1 Προκλήσεις για έρευνα στην κατανομή φάσματος	31
1.7 Κινητικότητα φάσματος	32
1.7.1 Προκλήσεις για έρευνα στην κινητικότητα φάσματος.....	33
Κεφάλαιο 2: Ανίχνευση φάσματος με συνεργατικότητα	34
2.1 Εισαγωγή	34
2.2 Μη συνεργατική ανίχνευση φάσματος σε κανάλι με διαλείψεις	36
2.2.1 Διαλείψεις Rayleigh.....	39
2.2.2 Λογαριθμοκανονική σκίαση.....	40

2.3 Συνεργατική ανίχνευση φάσματος σε κανάλι με διαλείψεις	42
2.3.1 Απόφαση soft-decision	43
2.3.2 Απόφαση hard-decision	46
Κεφάλαιο 3: Αδόμητα δίκτυα οχημάτων - VANETs.....	53
3.1 Εισαγωγή / έννοια αδόμητων δικτύων οχημάτων - VANETs.....	53
3.2 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα των αδόμητων δικτύων οχημάτων - VANETs	54
3.2.1 Από τα MANETs στα VANETs	54
3.2.2 Βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των VANETs	56
3.2.3 Αρχιτεκτονικές δικτύων VANETs	57
3.2.4 Κρίσιμοι παράγοντες στα VANETs - Τρόποι αντιμετώπισης.....	58
3.3 Ανίχνευση φάσματος σε γνωστικά αδόμητα δίκτυα οχημάτων.....	60
3.3.1 Εισαγωγή.....	61
3.3.2 Ανίχνευση ενέργειας σε τεχνολογίες οχημάτων	64
3.3.3 Μοντέλο σύνθετου καναλιού με εξασθένηση λόγω σκιάσεων	65
3.3.4 Στατιστικά σύνθετου καναλιού εξασθένησης	70
3.3.5 Μέση πιθανότητα ανίχνευσης σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης	72
3.3.6 Αριθμητικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης.	74
3.3.7 Συμπεράσματα	79
Κεφάλαιο 4: Βοήθεια από σταθμευμένο όχημα στα αδόμητα δίκτυα οχημάτων	80
4.1 Εισαγωγικές έννοιες στη PVA.....	81
4.2 Από τα παρκαρισμένα οχήματα στη PVA.....	83
4.2.1 Στάθμευση σε πόλεις	83
4.2.2 Στάθμευση σε συγκεκριμένες θέσεις.....	84
4.3 Ανάλυση δικτυακής συνδεσιμότητας.....	86
4.4 Αξιολόγηση επιδόσεων	91
4.4.1 Έρευνα και προσομοιώσεις	91
4.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	92

4.5 Συμπεράσματα και προοπτικές	94
Βιβλιογραφία:	95

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Γνωστικά Ασύρματα Δίκτυα

1.1 Εισαγωγή / Έννοια των Γνωστικών Ασύρματων Δικτύων

Στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα κατανέμεται σε υπηρεσίες και εφαρμογές, με χρήση στατικής ανάθεσης των φασματικών περιοχών. Συνήθης τακτική που ακολουθούνταν, ήταν τα κράτη –μέσω μιας νομικής διαδικασίας– να διαμοιράζουν φασματικές περιοχές για μακροχρόνια χρήση και εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη σε εξουσιοδοτημένους φορείς. Συνέπεια αυτού του τρόπου κατανομής του φάσματος συχνοτήτων ήταν κάποια τμήματα του να χρησιμοποιούνται συχνά και σε μεγάλο βαθμό, σε αντίθεση με άλλα που χρησιμοποιούνται σποραδικά ή υποχρησιμοποιούνται. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έλλειψη φάσματος που παρατηρείται για τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες ασύρματων εφαρμογών και υπηρεσιών, οδήγησε σε μια νέα θεώρηση διαχείρισης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος η οποία χαρακτηρίζεται από τη δυναμική και μεταβαλλόμενη κατανομή του H/M φάσματος. Δημιουργήθηκαν έτσι οι προϋποθέσεις για τη μελέτη και ανάπτυξη των *γνωστικών ασύρματων δικτύων* (Cognitive Radio Networks).

Τα γνωστικά ασύρματα δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να μοιράζονται το φάσμα τους με πρωτεύοντες χρήστες, χρήστες δηλαδή, οι οποίοι έχουν εξουσιοδοτηθεί για να χρησιμοποιούν το εκάστοτε εύρος ζώνης του φάσματος. Μπορούν δηλαδή, μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες (unlicensed) που αποκαλούνται και cognitive radio users ή secondary users να έχουν πρόσβαση στο φάσμα, αλλά όταν ανιχνευθεί χρήση από πρωτεύων χρήστη, εκκενώνουν τη ζώνη που καταλαμβάνουν. Κάθε δευτερεύον χρήστης πρέπει να είναι ικανός ^[1]:

- να ανιχνεύσει τα ελεύθερα τμήματα του φάσματος
- να επιλέξει το καλύτερο δυνατό κανάλι εκπομπής
- να συντονίσει τη πρόσβαση του στο κανάλι αυτό σε σχέση με άλλους δευτερεύοντες χρήστες

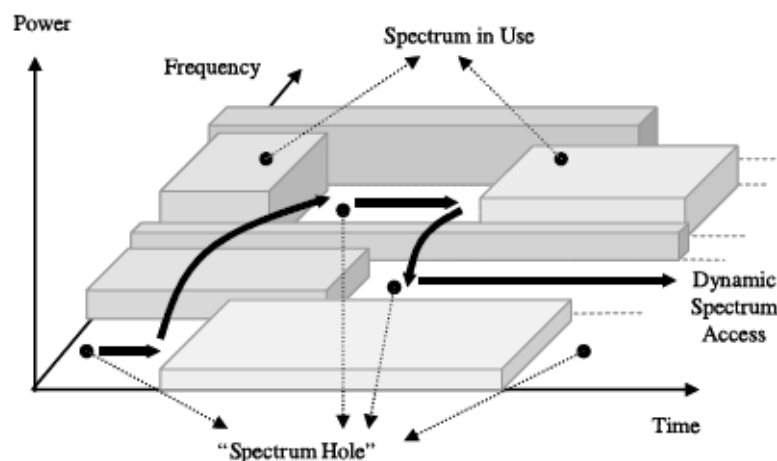
- να εκκενώσει το φάσμα όταν είναι να χρησιμοποιηθεί από πρωτεύοντα χρήστη

προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος με επικοινωνίες υψηλής αξιοπιστίας. Στη πράξη παρουσιάζονται μεγάλες δυσκολίες λόγω του συνεχώς μεταβαλλόμενου φάσματος και των διαφορών στην απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS - quality of service) των διαφόρων υπηρεσιών.

1.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία των γνωστικών ασύρματων δικτύων

Ως γνωστικό δίκτυο ορίζεται το δίκτυο εκείνο το οποίο διαθέτει τεχνολογίες για παράλληλη λειτουργία με τον πρωτεύοντα χρήστη και το οποίο μπορεί να μεταβάλλει τις παραμέτρους μετάδοσής του, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος του. Βάσει του παραπάνω ορισμού προκύπτουν 2 κύρια χαρακτηριστικά στοιχεία [2]:

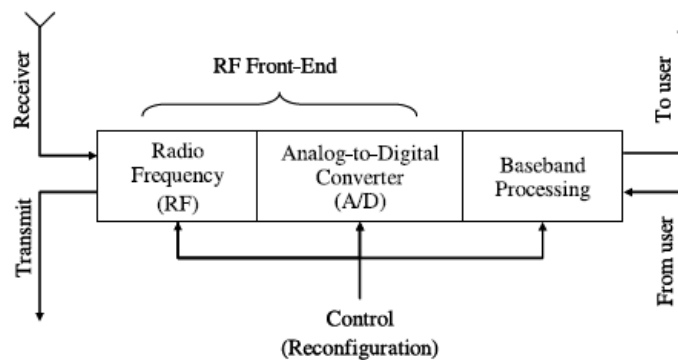
- *Γνωστική ικανότητα*: Τα γνωστικά δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο με το περιβάλλον, οπότε έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν τμήματα φάσματος που δεν χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο. Ένα τέτοιο τμήμα λέγεται *λευκή τρύπα* (white hole) ή *λευκό διάστημα* (white space). Επιλέγεται έτσι το καλύτερο δυνατό κενό τμήμα του φάσματος, το οποίο μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε χωρίς οι δευτερεύοντες χρήστες να παρεμβάλλουν στον πρωτεύοντα.



Εικόνα 1.1: Λευκή τρύπα (white hole).

- *Ικανότητα αναδιαμόρφωσης:* Οι γνωστικοί χρήστες μπορούν να προγραμματιστούν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν σε μεγάλο πλήθος διαφορετικών συχνοτήτων, αλλάζοντας την ισχύ εκπομπής και τη μέθοδο διαμόρφωσης. Με αυτή την ιδιότητα, για κάθε εύρος συχνοτήτων μπορούν να επιλεγούν οι καταλληλότερες παράμετροι λειτουργίας και σε ενδεχόμενη αλλαγή συχνότητας να επαναπροσδιοριστούν, προκειμένου να πετύχουμε μέγιστη αξιοποίηση φάσματος.

Για την υποστήριξη των ανωτέρω δυνατοτήτων, απαιτείται νέα αρχιτεκτονική στον πομποδέκτη με χρήση κατάλληλου hardware. Ένας γνωστικός πομποδέκτης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.2, αποτελείται από τη μονάδα *RF Front-End* και τη βασική μονάδα επεξεργασίας *Baseband Processing Unit*. Στη 1^η μονάδα το σήμα που εκπέμπεται ή λαμβάνεται ενισχύεται και μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα με τη χρήση A/D μετατροπέα. Στη 2^η μονάδα το σήμα διαμορφώνεται / αποδιαμορφώνεται και κωδικοποιείται / αποκωδικοποιείται.



Εικόνα 1.2: Αρχιτεκτονική γνωστικού πομποδέκτη.

Το τμήμα αυτό του γνωστικού πομποδέκτη μοιάζει με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα. Η όποια διαφοροποίηση εντοπίζεται στη μονάδα *RF Front-End*, η οποία έχει τη δυνατότητα πολλαπλής και ταυτόχρονης ανίχνευσης σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλου hardware: κεραία ευρείας ζώνης, ενίσχυση και προσαρμοστικό φίλτρο. Λόγω των αναγκών των γνωστικών δικτύων, μπορεί να συντονίζεται σε οποιοδήποτε μέρος του φάσματος και να

εκπέμπει / λαμβάνει, καθώς και να συλλέγει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο από το περιβάλλον, ώστε να λαμβάνει τις απαραίτητες για τη λειτουργία της πληροφορίες.

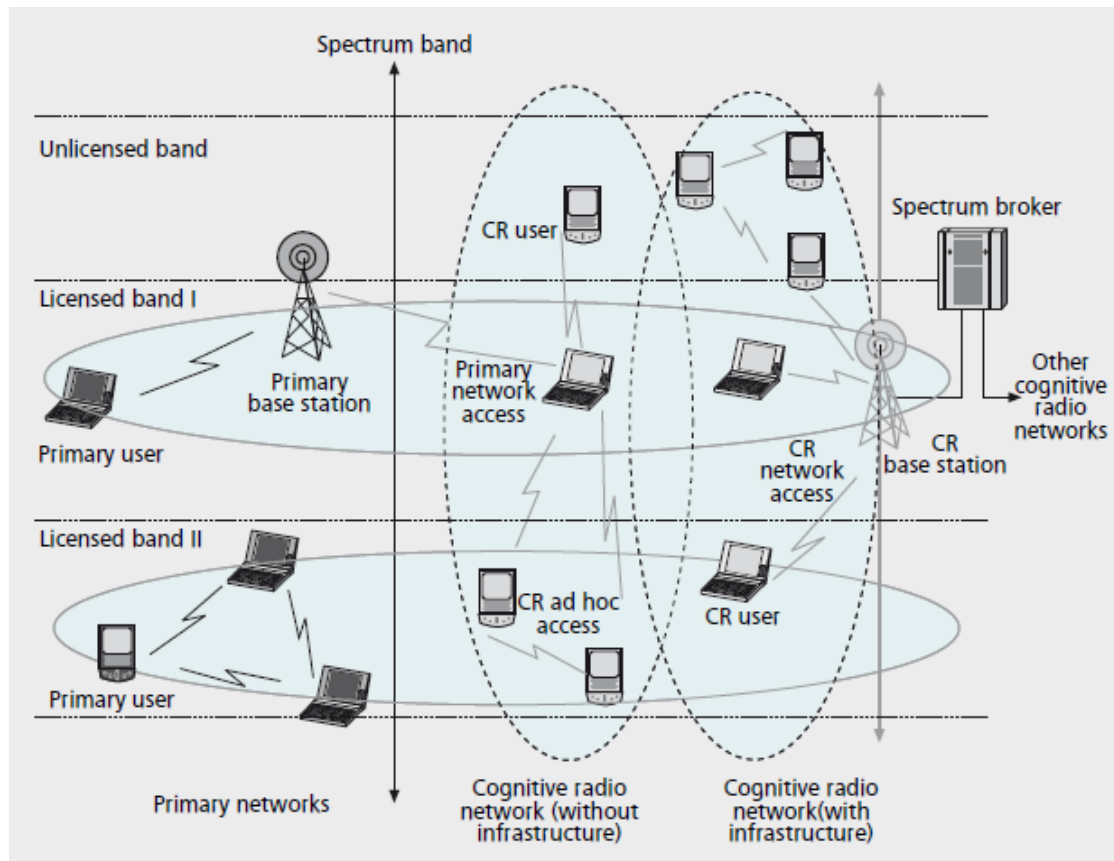
1.3 Αρχιτεκτονική γνωστικού δικτύου

1.3.1 Μέρη του δικτύου

Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διακριθούν σε δύο ομάδες (εικόνα 1.3): το *πρωτεύον δίκτυο* (primary network) και το *γνωστικό* (cognitive network) ή *δευτερεύον δίκτυο* (secondary network).

Πρωτεύον δίκτυο θεωρείται το ήδη υπάρχον δίκτυο, όπου οι πρωτεύοντες χρήστες είναι αδειοδοτημένοι να λειτουργούν σε συγκεκριμένη φασματική ζώνη. Εφόσον το πρωτεύον δίκτυο διαθέτει υποδομή οι πρωτεύοντες σταθμοί βάσης (primary base stations) ελέγχουν τις διαδικασίες των πρωτευόντων χρηστών. Οι πρωτεύοντες χρήστες έχουν προτεραιότητα στο διαθέσιμο φάσμα και οι λειτουργίες του δεν θα πρέπει να επηρεάζονται από δευτερεύοντες χρήστες.

Το *γνωστικό ή δευτερεύον δίκτυο* δεν έχει άδεια να λειτουργήσει στην επιθυμητή φασματική ζώνη (μη εξουσιοδοτημένο δίκτυο). Οι γνωστικοί ή δευτερεύοντες χρήστες αξιοποιούν τη μη χρήση τμημάτων του φάσματος από τους πρωτεύοντες και χρησιμοποιούν το καταλληλότερο από αυτά, χωρίς να εμποδίζουν τις λειτουργίες των πρωτευόντων. Το δευτερεύον δίκτυο μπορεί να έχει δομή που αποτελείται από ένα δευτερεύοντα σταθμό βάσης (secondary base station) και ενδεχομένως έναν spectrum broker που διαμοιράζει το φάσμα στα διάφορα γνωστικά δίκτυα.



Εικόνα 1.3: Αρχιτεκτονική γνωστικών δικτύων

1.3.2 Φασματική ετερογενετικότητα

Τα είδη λειτουργίας για τα γνωστικά δίκτυα είναι δύο: 1. *Λειτουργία σε κατειλημμένο φάσμα* και 2. *Λειτουργία σε ελεύθερο φάσμα*. Οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πρόσβαση τόσο σε τμήμα φάσματος κατειλημμένο από πρωτεύοντες χρήστες όσο και σε τμήμα ελεύθερο, που δεν έχει αποδοθεί σε κάποια υπηρεσία. Στη 1^η περίπτωση, το κατειλημμένο φάσμα χρησιμοποιείται κυρίως από τους πρωτεύοντες χρήστες. Η χωρητικότητα του καναλιού εξαρτάται από την παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες. Αν τυχόν πρωτεύοντες χρήστες εμφανιστούν σε κομμάτι κατειλημμένο από δευτερεύοντες χρήστες, τότε οι δευτερεύοντες χρήστες θα πρέπει άμεσα να εγκαταλείψουν το συγκεκριμένο τμήμα φάσματος και να μετακινηθούν. Στη 2^η περίπτωση, στο ελεύθερο φάσμα, αφού δεν έχει αποδοθεί κάπου, οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν τα ίδια δικαιώματα πρόσβασης με όλους τους άλλους χρήστες. Απαιτούνται, επομένως, έξυπνοι μέθοδοι διαμοιρασμού του φάσματος, ώστε οι δευτερεύοντες χρήστες να είναι ανταγωνιστικοί στη πρόσβασή τους σε αυτό.

1.3.3 Δικτυακή ετερογενετικότητα

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι πρόσβασης για έναν δευτερεύοντα χρήστη:

- *Πρόσβαση στο γνωστικό δίκτυο:* Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δευτερεύοντα σταθμό βάσης (αν υπάρχει), είτε λειτουργούν σε κατειλημμένο είτε σε ελεύθερο φάσμα.
- *Πρόσβαση στο ad hoc γνωστικό δίκτυο:* Οι δευτερεύοντες χρήστες επικοινωνούν μεταξύ τους με ad hoc σύνδεση είτε σε κατειλημμένο είτε σε ελεύθερο φάσμα. Η επικοινωνία αυτή γίνεται με *σύνδεση πολλαπλών αλμάτων* (multihop), μιας και το μήνυμα μπορεί να περνάει από πολλούς χρήστες μέχρι να φτάσει στο τελικό του προορισμό.
- *Πρόσβαση στο πρωτεύον δίκτυο:* Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν και με το πρωτεύοντα σταθμό βάσης όταν λειτουργούν στο κατειλημμένο κομμάτι φάσματος. Αντίθετα με τους άλλους τύπους πρόσβασης, οι δευτερεύοντες χρήστες χρειάζονται ένα προσαρμόσιμο πρωτόκολλο MAC, που να επιτρέπει τη μετάβαση σε πολλά πρωτεύοντα δίκτυα.

1.3.4 Πλαίσιο διαχείρισης φάσματος

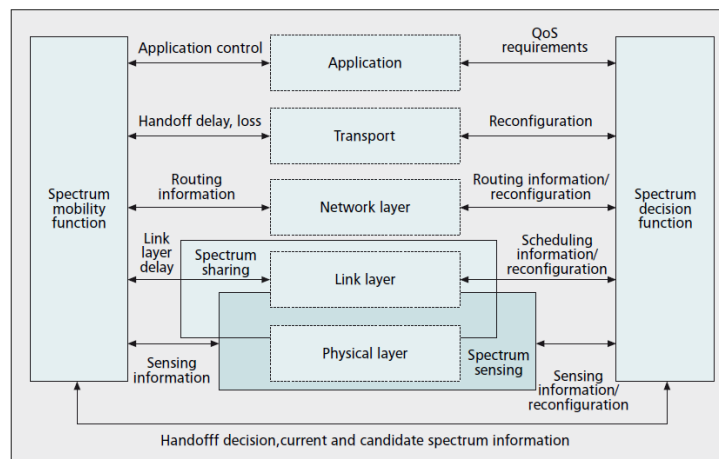
Εξαιτίας της συνύπαρξης των δευτερευόντων δικτύων με τα πρωτεύοντα και της ποικιλίας του απαιτούμενου QoS, απαιτούνται νέες λειτουργίες διαχείρισης φάσματος με τα παρακάτω κρίσιμα σχεδιαστικά σημεία:

- *Αποφυγή παρεμβολής:* τα γνωστικά δίκτυα πρέπει να αποφεύγουν τη παρεμβολή με πρωτεύοντα δίκτυα
- *Γνώση του QoS:* για να επιλεγεί η κατάλληλη φασματική περιοχή, τα γνωστικά δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν επικοινωνία βασισμένη στη γνώση του QoS
- *Αδιάλειπτη επικοινωνία:* τα γνωστικά δίκτυα πρέπει να παρέχουν συνεχή επικοινωνία, ανεξαρτήτως της παρουσίας πρωτευόντων δικτύων.

Για να διευθετηθούν τα παραπάνω κρίσιμα σημεία, απαιτούνται λειτουργίες που καθιστούν τα γνωστικά συστήματα φασματικά ενήμερα. Οι λειτουργίες αυτές αποτελούν το λεγόμενο *γνωστικό κύκλο* (cognitive cycle) και είναι οι εξής:

- *Ανίχνευση φάσματος* (spectrum sensing): ένας δευτερεύων χρήστης χρησιμοποιεί μόνο ένα κενό φασματικό τμήμα, άρα θα πρέπει να ελέγχει το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων, να συλλέγει πληροφορίες και να εντοπίζει τα κενά φάσματος.
- *Επιλογή φάσματος* (spectrum decision): ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του φάσματος οι δευτερεύοντες χρήστες καταλαμβάνουν ένα κανάλι. Στην επιλογή επηρεάζουν εσωτερικές και ενδεχομένως και εξωτερικές πολιτικές.
- *Κατανομή φάσματος* (spectrum sharing): Επειδή, ενδεχομένως, πολλοί δευτερεύοντες χρήστες προσπαθούν να έχουν πρόσβαση στο διαθέσιμο φάσμα, η πρόσβαση στο δευτερεύον δίκτυο πρέπει να συντονίζεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η συνύπαρξη πολλών χρηστών στο ίδιο κομμάτι φάσματος.
- *Κινητικότητα φάσματος* (spectrum mobility): όταν ένας πρωτεύων χρήστης χρειαστεί το κομμάτι φάσματος που χρησιμοποιεί ο δευτερεύων χρήστης, ο δευτερεύων χρήστης πρέπει να μετακινηθεί και η επικοινωνία να συνεχιστεί σε άλλο κενό κομμάτι του φάσματος.

Το πλαίσιο διαχείρισης του φάσματος παρουσιάζεται με μια διαστρωματική προσέγγιση στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 1.4):



Εικόνα 1.4: Πλαίσιο διαχείρισης φάσματος

Οι ανωτέρω 4 λειτουργίες του γνωστικού κύκλου αναλύονται διεξοδικά στις ακόλουθες ενότητες του κεφαλαίου.

1.4 Ανίχνευση φάσματος

Ένας γνωστικός χρήστης πρέπει να έχει πλήρη αντίληψη του περιβάλλοντός του και να είναι ευέλικτος σε αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτό. Καθίσταται αναγκαία, λοιπόν, η ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing) για την υλοποίηση των γνωστικών δικτύων, μέσω της οποίας ο δευτερεύοντας χρήστης βρίσκει ποια μέρη φάσματος χρησιμοποιούνται και ποια είναι κενά για να τα εκμεταλλευτεί χωρίς να προκαλεί παρεμβολή στο πρωτεύον δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο, η οποία είναι ικανή να ανιχνεύει ασθενή σήματα των πρωτευόντων χρηστών σε μεγάλο εύρος ζώνης. Οι τεχνικές ανίχνευσης φάσματος διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: *1. Ανίχνευση πρωτεύοντος πομπού, 2. Ανίχνευση πρωτεύοντος δέκτη και 3. Διαχείριση θερμότητας παρεμβολής.*

1.4.1 Ανίχνευση πρωτεύοντος πομπού

Η *ανίχνευση πρωτεύοντος πομπού* (primacy transmitter detection) βασίζεται στην ανίχνευση ενός ασθενούς σήματος μέσω των τοπικών παρατηρήσεων από τους δευτερεύοντες χρήστες. Υπάρχουν τρία είδη υλοποιήσεων ανίχνευσης πρωτεύοντος πομπού: α. ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου, β. ανίχνευση ενέργειας και γ. ανίχνευση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.

- *ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου:* όταν οι πληροφορίες του σήματος του πρωτεύοντος χρήστη είναι γνωστές στον δευτερεύον χρήστη, ο καλύτερος τρόπος ανίχνευσης υπό σταθερό λευκό θόρυβο είναι μέσω ταυτοποίησης φίλτρου. Η μέθοδος αυτή χρειάζεται μικρό χρόνο ανίχνευσης. Στα αρνητικά αυτού του τρόπου ανίχνευσης είναι η εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών του σήματος του πρωτεύοντα χρήστη, αλλά και ότι πρέπει να συγχρονιστούν πρωτεύον πομπός και γνωστικός χρήστης.

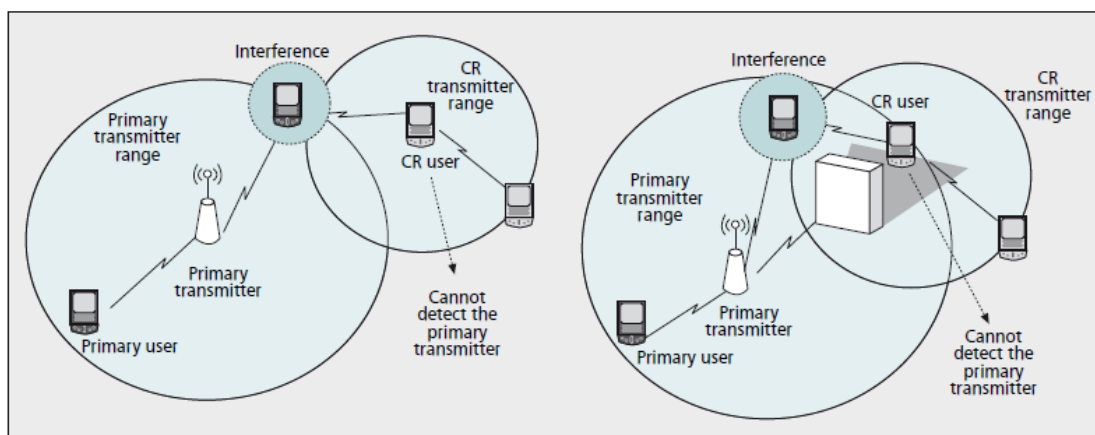
- *ανίχνευση ενέργειας:* αν ο δέκτης δεν μπορεί να συγκεντρώσει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το σήμα του πρωτεύοντος

πομπού, η καλύτερη μέθοδος είναι η ανίχνευση ενέργειας, με δεδομένη την ισχύ θορύβου. Με βάση τη στάθμη της λαμβανόμενης ισχύος, οι γνωστικοί χρήστες αντιλαμβάνονται την ύπαρξη ή μη πρωτεύοντων πομπών. Ο χρόνος ανίχνευσης είναι μεγαλύτερος από τη μέθοδο προσαρμοσμένου φίλτρου. Στην περίπτωση αυτή η απόδοση του ανιχνευτή ενέργειας είναι ευάλωτη λόγω της αβεβαιότητας που εισάγει ο θόρυβος. Επίσης, ο ανιχνευτής ενέργειας συχνά κάνει λάθος ανίχνευση, επειδή δεν μπορεί να διακρίνει τους διαφορετικούς τύπους σήματος, παρά μόνο την ύπαρξη εκπεμπόμενου σήματος.

- ανίχνευση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων: τα διαμορφωμένα σήματα χαρακτηρίζονται από μια υπάρχουσα περιοδικότητα. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να εντοπιστεί και να αναλυθεί από μια λειτουργία φασματικής ανίχνευσης μέσω τοπικών παρατηρήσεων των δευτερευόντων χρηστών. Το κύριο πλεονέκτημα της ανίχνευσης χαρακτηριστικών γνωρισμάτων είναι η ευρωστία του στην αβεβαιότητα του θορύβου. Επιπλέον μπορεί να διακρίνει σήματα από διαφορετικά δίκτυα. Είναι όμως μια υπολογιστικά πολύπλοκη μέθοδος και απαιτεί το μεγαλύτερο χρόνο παρατήρησης.

Βασική θεώρηση της ανίχνευσης πρωτεύοντος πομπού είναι ότι οι δευτερεύοντες χρήστες δεν αλληλεπιδρούν με τους πρωτεύοντες που λειτουργούν στην περιοχή, κι έτσι οι τεχνικές ανίχνευσης πρωτεύοντος πομπού βασίζονται σε ασθενή σήματα προερχόμενα από τον πρωτεύοντα πομπό. Εξαιτίας της έλλειψης πληροφοριών από τον πρωτεύοντα δέκτη, οι τεχνικές αυτές ενδέχεται να παρεμβάλουν στους πρωτεύοντες χρήστες (εικόνα 1.5 α). Επιπλέον, δεν μπορούν να αποτρέψουν το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού. Ένας δευτερεύοντας χρήστης μπορεί να έχει απευθείας καλή σύνδεση με έναν άλλο δευτερεύοντα χρήστη, αλλά να αδυνατεί να εντοπίσει τον πρωτεύοντα πομπό λόγω φαινομένων σκίασης (εικόνα 1.5 β). Χρειάζονται, επομένως, για μια πιο ακριβή ανίχνευση του πρωτεύοντος πομπού, και οι πληροφορίες που έχουν συλλέξει και οι υπόλοιποι δευτερεύοντες χρήστες. Αυτό το είδος ανίχνευσης ονομάζεται *ανίχνευση συνεργατικότητας* και είναι θεωρητικά πιο αξιόπιστη και ακριβής, γιατί η αβεβαιότητα ενός χρήστη μπορεί να μειωθεί μέσω της συνεργασίας με τους υπόλοιπους. Επίσης, αντιμετωπίζονται καλύτερα φαινόμενα όπως

διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών και η σκίαση, καθώς αυξάνεται αρκετά η πιθανότητα ανίχνευσης. Στα αρνητικά της, το γεγονός ότι σε δίκτυα με περιορισμένους διαθέσιμους πόρους, η συνεργασία αυξάνει τη κίνηση στο δίκτυο.



Εικόνα 1.5 α) αβεβαιότητα δέκτη και β) πρόβλημα κρυμμένου τερματικού

1.4.2 Ανίχνευση πρωτεύοντος δέκτη

Η *ανίχνευση πρωτεύοντος δέκτη* βασίζεται στον εντοπισμό πρωτεύοντων χρηστών που λαμβάνουν δεδομένα. Ενδέχεται ένας γνωστικός χρήστης να βρίσκεται εκτός της εμβέλειας του πρωτεύοντος πομπού και να οδηγηθεί στο να εκπέμψει, αλλά μπορεί στην εμβέλεια του να βρίσκεται ένας πρωτεύον δέκτης που να λαμβάνει δεδομένα, επομένως ο γνωστικός χρήστης να αναγκαστεί να παρεμβάλει. Η ανίχνευση πρωτεύοντος δέκτη αποτελεί τη λύση σε τέτοια φαινόμενα. Ο δευτερεύον χρήστης ανιχνεύει τη διαφυγούσα ισχύ του τοπικού ταλαντωτή όταν λαμβάνει ο δέκτης κι έτσι αντιλαμβάνεται την ύπαρξη δέκτη. Επειδή οι τιμές της διαφυγούσας ισχύος είναι χαμηλές, η ανίχνευση γίνεται πιο δύσκολη, γι' αυτό και η πρακτική μορφή αυτής της μεθόδου, προς το παρόν, περιορίζεται στους τηλεοπτικούς δέκτες.

1.4.3 Διαχείριση θερμοκρασίας παρεμβολής

Μέχρι πρόσφατα, η παρεμβολή μπορούσε να ρυθμιστεί στον πομπό μέσω της εκπεμπόμενης ισχύος, η οποία σχεδιάζεται ώστε να ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο κατώφλι σε συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό. Όπως, όμως, φαίνεται στην εικόνα 1.5.α, στην πραγματικότητα η παρεμβολή πραγματοποιείται στον δέκτη. Γι' αυτό η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC - Federal Communications

Comission) πρότεινε ένα νέο μοντέλο μέτρησης της παρεμβολής, τη *θερμοκρασία παρεμβολής*.

1.4.4 Προκλήσεις για έρευνα στην ανίχνευση φάσματος

Στο πεδίο της ανίχνευσης φάσματος υπάρχουν αρκετές προκλήσεις για περαιτέρω έρευνα ως προς την ανάπτυξη τεχνικών ανίχνευσης, όπως:

- *μέτρηση θερμοκρασίας παρεμβολής*: λόγω της έλλειψης αλληλεπίδρασης μεταξύ πρωτευόντων και γνωστικών χρηστών, οι δεύτεροι αδυνατούν να προσδιορίσουν τη θέση ενός πρωτεύοντος δέκτη. Χρειάζονται νέες τεχνικές για να μετρήσουν την θερμοκρασία παρεμβολής σε κοντινούς πρωτεύοντες δέκτες.

- *ανίχνευση φάσματος σε περιβάλλον με πολλούς χρήστες*: σε ένα περιβάλλον με πολλούς χρήστες, στο οποίο συνυπάρχουν πρωτεύοντες και δευτερεύοντες δέκτες, η διαδικασία εντοπισμού φασματικών κενών και ο υπολογισμός της παρεμβολής γίνονται πολύπλοκες. Γι' αυτό οι διαδικασίες ανίχνευσης φάσματος θα πρέπει να σχεδιάζονται με δεδομένο την ύπαρξη πολλών χρηστών, κάτι που δεν συμβαίνει με τα μέχρι τώρα ανεπτυγμένα μοντέλα.

- *φασματική απόδοση ανίχνευσης*: ένας γνωστικός χρήστης δεν μπορεί να ανιχνεύει όταν πραγματοποιείται μετάδοση πακέτων δεδομένων. Θα πρέπει να διακόπτεται η μετάδοση, προκειμένου να γίνεται εκ νέου ανίχνευση του φάσματος, κάτι που μειώνει την αποδοτικότητα λειτουργίας του. Επίσης, ο χρόνος που χρειάζεται ένας χρήστης για την ανίχνευση ενός φάσματος, επηρεάζει την επίδοση της μετάδοσης. Χρειάζεται, επομένως, η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων που να ελαχιστοποιούν το χρόνο ανίχνευσης για μια συγκεκριμένη ακρίβεια ανίχνευσης.

1.5 Επιλογή φάσματος

Μετά την ανίχνευση φάσματος, η επόμενη διαδικασία ενός γνωστικού χρήστη είναι η επιλογή του καταλληλότερου εύρους ζώνης από τις διαθέσιμες συχνότητες του φάσματος, συναρτήσει του

απαιτούμενου QoS, ώστε αυτός να αρχίσει να εκπέμπει. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως *επιλογή φάσματος* (spectrum decision), είναι πολύ σημαντική, αλλά ακόμη αρκετά ανεξερεύνητη. Η επιλογή φάσματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε καναλιού, αλλά και τη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών και αποτελείται από 2 βήματα: 1. Κάθε φασματική ζώνη χαρακτηρίζεται λαμβάνοντας υπόψη, όχι μόνο τις τοπικές παρατηρήσεις των δευτερευόντων χρηστών, αλλά και στατιστικά δεδομένα που προέρχονται από τα πρωτεύοντα δίκτυα. 2. Βάσει αυτού του χαρακτηρισμού, επιλέγεται η καταλληλότερη ζώνη συχνοτήτων.

1.5.1 Χαρακτηριστικά καναλιού στα γνωστικά δίκτυα

Τα διαθέσιμα φασματικά κενά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, γι' αυτό θα πρέπει κάθε κενό φάσματος να χαρακτηριστεί λαμβάνοντας υπόψη το χρονικά μεταβαλλόμενο ασύρματο περιβάλλον, αλλά και τις φασματικές παραμέτρους, όπως το εύρος ζώνης και η συχνότητα λειτουργίας. Κάθε φασματικό κενό χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- *παρεμβολή*: από την μετρούμενη παρεμβολή στον πρωτεύοντα δέκτη καθορίζεται η επιτρεπόμενη ισχύς στην οποία μπορεί να εκπέμπει ένας γνωστικός χρήστης, χωρίς να επηρεάζει την σωστή λειτουργία του δέκτη. Η ισχύς αυτή οδηγεί στον υπολογισμό της χωρητικότητας του καναλιού.
- *απώλειες διαδρομής*: οι απώλειες διαδρομής εξαρτώνται άμεσα από τη συχνότητα εκπομπής και την απόσταση πομπού-δέκτη. Όσο αυξάνεται η συχνότητα, αυξάνονται και οι απώλειες, με αποτέλεσμα τη μείωση της εμβέλειας. Μπορεί να αντιμετωπιστεί με αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, ταυτόχρονα, όμως, μπορεί να προκαλέσει υπέρβαση του επιτρεπόμενου ορίου της θερμοκρασίας παρεμβολής που μπορούν να ανεχτούν οι δέκτες.
- *σφάλματα ασύρματης ζεύξης*: ο ρυθμός σφαλμάτων ασύρματης ζεύξης μεταβάλλεται ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης και το επίπεδο της παρεμβολής της ζώνης συχνοτήτων.

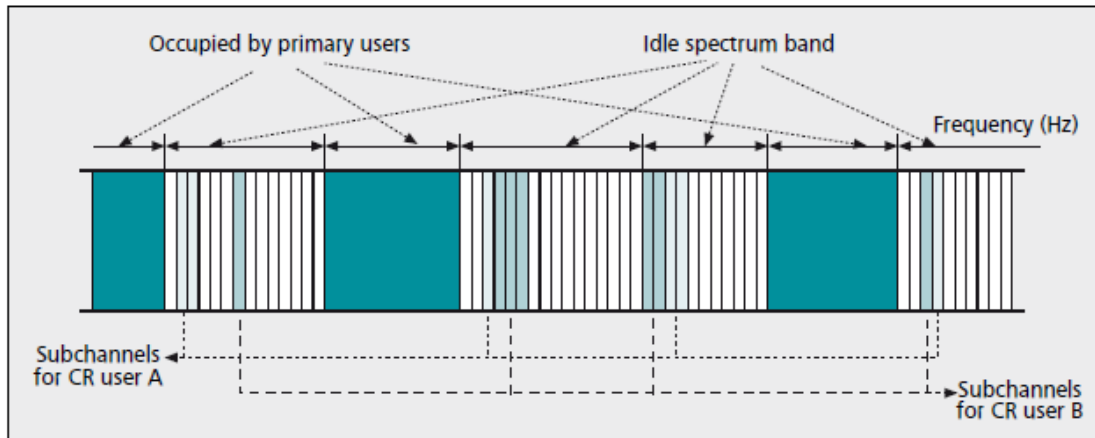
- καθυστέρηση στρώματος ζεύξης: για να αντιμετωπιστούν παρεμβολές, διαφορετικές απώλειες διαδρομής και σφάλματα ασύρματης ζεύξης χρειάζονται διαφορετικά πρωτόκολλα στρώματος ζεύξης. Αυτό οδηγεί σε καθυστέρηση στρώματος ζεύξης.

Για να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην επιλογή φάσματος θα πρέπει να προσδιορίσουμε τις φασματικές ζώνες που συνδυάζουν βέλτιστα όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

1.5.2 Διαδικασία επιλογής

Η χρήση του φάσματος είναι δυναμική, δηλαδή ο αριθμός των χρηστών που εκπέμπουν σε μια στιγμή δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται χρονικά και περιγράφεται με στατιστικό τρόπο. Για να περιγραφεί η δυναμική κατάληψη του φάσματος εισάγεται η έννοια της *δραστηριότητας πρωτεύοντος χρήστη*. Ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης ενός πρωτεύοντος χρήστη στο φάσμα κατά τη διάρκεια εκπομπής ενός γνωστικού χρήστη. Η δραστηριότητα πρωτεύοντος χρήστη είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί σωστά, αφού δεν είναι δεδομένο ότι μια ζώνη συχνοτήτων θα είναι διαθέσιμη για έναν γνωστικό χρήστη σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του.

Εξαιτίας της λειτουργίας των πρωτευόντων δικτύων, οι γνωστικοί χρήστες δεν μπορούν να έχουν ένα αξιόπιστο τηλεπικοινωνιακό κανάλι για μεγάλη χρονική διάρκεια. Επίσης, οι γνωστικοί χρήστες μπορεί να μην εντοπίσουν κανένα κανάλι που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις τους. Γι' αυτό στα Γνωστικά Δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα πολλαπλές και όχι συνεχόμενες ζώνες συχνοτήτων για τις ανάγκες της μετάδοσης, όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 1.6. Η μέθοδος αυτή μπορεί να δημιουργήσει ένα σήμα με υψηλή αποδοτικότητα και ταυτόχρονα προστατευμένο από τη δραστηριότητα και τις παρεμβολές των πρωτευόντων χρηστών. Ακόμη και αν κάποια από τις ζώνες καταληφθεί από πρωτεύον χρήστη, η μετάδοση θα συνεχιστεί κανονικά από τις υπόλοιπες ζώνες συχνοτήτων.



Εικόνα 1.6: εκπομπή σήματος σε πολλά μη συνεχόμενα φασματικά κανάλια.

1.5.3 Προκλήσεις για έρευνα στην επιλογή φάσματος

Στο πεδίο της επιλογής φάσματος υπάρχουν προκλήσεις για περαιτέρω έρευνα προκειμένου να τη βελτιώσουν, όπως:

- *Μοντέλο επιλογής:* ο υπολογισμός της χωρητικότητας του φάσματος μέσω του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) δεν αρκεί για να χαρακτηριστεί μια φασματική ζώνη στα γνωστικά δίκτυα. Επίσης, οι απαιτήσεις QoS των εφαρμογών διαφέρουν. Οπότε, χρειάζεται να εξελιχθεί ένα μοντέλο επιλογής φάσματος που θα προσαρμόζεται.
- *Επαναπροσδιορισμός παραμέτρων:* οι τεχνικές των γνωστικών δικτύων επιτρέπουν τον επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων μετάδοσης για βέλτιστη λειτουργία σε κάθε ζώνη συχνοτήτων. Ακόμη και αν π.χ. αλλάξει το SNR, είναι δυνατόν ο ρυθμός μετάδοσης και ο ρυθμός λαθών να παραμένουν αμετάβλητοι, εκμεταλλευόμενοι ένα σχήμα διαμόρφωσης το οποίο θα προσαρμόζεται αντί για αλλαγή στην επιλογή φάσματος.
- *Επιλογή φάσματος σε ετερογενείς φασματικές ζώνες:* Μέχρι τώρα, κάθε ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται για διαφορετικό σκοπό και κάποιες ζώνες παραμένουν απροσδιόριστες ή ανεκμετάλλευτες. Ένα γνωστικό δίκτυο θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να επιλέγει τόσο από τις ελεύθερες όσο και από τις κατειλημμένες φασματικές ζώνες.

1.6 Κατανομή φάσματος

Όταν ανιχνευθεί μια διαθέσιμη ζώνη φάσματος και από τη λειτουργία επιλογής φάσματος κριθεί ότι πληρεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής χρηστών, είναι αρκετά πιθανό να είναι πολλοί οι χρήστες που θέλουν να καταλάβουν τη ζώνη για να εκπέμψουν. Καταλαβαίνουμε ότι χρειάζεται συντονισμός των προσπάθειών μετάδοσης μεταξύ των γνωστικών χρηστών. Υπό αυτή την έννοια, ο *διαμοιρασμός ή κατανομή φάσματος* περιέχει πολλές λειτουργίες όμοιες με αυτές ενός MAC πρωτοκόλλου (Medium Access Control protocol). Επιπλέον, τα μοναδικά χαρακτηριστικά των γνωστικών δικτύων, όπως η συνύπαρξη πρωτευόντων και γνωστικών χρηστών και η μεγάλη εμβέλεια του διαθέσιμου φάσματος, προκαλούν διαφορετικές προκλήσεις στην κατανομή φάσματος. Η υπάρχουσα έρευνα στοχεύει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών και μπορεί να ταξινομηθεί βάσει τεσσάρων χαρακτηριστικών: α. την αρχιτεκτονική, β. την συμπεριφορά στην κατανομή φάσματος, γ. την τεχνική πρόσβασης στο φάσμα και δ. το πεδίο δράσης.

Η πρώτη ταξινόμηση γίνεται βάσει της αρχιτεκτονικής και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες [3]:

- *Κεντρική κατανομή φάσματος*: ο διαμοιρασμός και η πρόσβαση στο φάσμα ελέγχονται από μια κεντρική οντότητα. Τα αποτελέσματα της ανίχνευσης αποστέλλονται στην κεντρική οντότητα και δημιουργείται έτσι ένας χάρτης κατανομής του φάσματος. Επίσης, η κεντρική οντότητα μπορεί να παρέχει φάσμα σε δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Τέλος, ο ανταγωνισμός για την πρόσβαση στο φάσμα μπορεί να πραγματοποιείται μέσω ενός κεντρικού server, ο οποίος αποφασίζει βάσει προκαθορισμένης πολιτικής που του έχει δοθεί.

- *Κατανεμημένη κατανομή φάσματος*: στην περίπτωση αυτή ο διαμοιρασμός και η πρόσβαση στο φάσμα βασίζονται σε τοπικές στρατηγικές που υλοποιούνται από κάθε κόμβο χωριστά. Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική χρησιμοποιείται και μεταξύ διαφορετικών δικτύων, όπως για παράδειγμα σε ένα σταθμό βάσης που ανταγωνίζεται

άλλους σταθμούς βάσης για πρόσβαση σε ένα κομμάτι του φάσματος, ανάλογα με τις δοσμένες απαιτήσεις σε QoS.

Οι μέχρι τώρα έρευνες έχουν δείξει ότι, η κεντρική κατανομή και η κατανομημένη αρχιτεκτονική έχουν σχεδόν την ίδια απόδοση, με κόστος στη δεύτερη περίπτωση την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων.

Η δεύτερη κατηγοριοποίηση γίνεται βάσει της συμπεριφοράς στην κατανομή φάσματος, όπου η πρόσβαση μπορεί να είναι συνεργατική ή μη:

- *Συνεργατική κατανομή φάσματος:* η συνεργατικότητα αξιοποιεί τις μετρήσεις παρεμβολής που κάνει κάθε κόμβος, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση επικοινωνίας ενός κόμβου με τους άλλους. Συνηθίζεται η δημιουργία ομάδων, η οποία μοιράζει τοπικά την πληροφορία για την παρεμβολή. Εξασφαλίζεται κατ' αυτό τον τρόπο μια αποδοτική ισορροπία μεταξύ μιας πλήρους κεντρικής και μιας κατανομημένης στρατηγικής για την κατανομή φάσματος.

- *Μη συνεργατική κατανομή φάσματος:* στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο ένας κόμβος. Επειδή δεν αξιοποιείται η παρεμβολή στους υπόλοιπους κόμβους, είναι πιθανή η μειωμένη απόδοση του φάσματος. Το θετικό της είναι ότι δεν απαιτείται συχνή ανταλλαγή πακέτων μεταξύ των γειτονικών κόμβων.

Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με τη χρήση της συνεργατικής κατανομής, γιατί η χρήση συνεργατικότητας οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και διατηρεί μια δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Στην περίπτωση της μη συνεργατικής κατανομής η μειωμένη απόδοση φάσματος αντισταθμίζεται από τη μειωμένη ανταλλαγή πακέτων μεταξύ των κόμβων, που μεταφράζεται και σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Επόμενη ταξινόμηση γίνεται ανάλογα με τη τεχνική πρόσβασης στο φάσμα και έχουμε τις εξής δύο περιπτώσεις:

- *Κατανομή ελεύθερου φάσματος:* οι κόμβοι έχουν πρόσβαση σε τμήμα φάσματος που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη από το πρωτεύον δίκτυο, ελαχιστοποιώντας την παρεμβολή του γνωστικού δικτύου στο πρωτεύον.

- *Κατανομή κατειλημμένου φάσματος:* Ο δευτερεύων χρήστης λειτουργεί σε τμήμα φάσματος ήδη κατειλημμένο από το πρωτεύον δίκτυο και θεωρείται από το τελευταίο ως θόρυβος.

Με την κατανομή κατειλημμένου φάσματος μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μεγαλύτερο εύρος φάσματος, αυξάνοντας, όμως, την πολυπλοκότητα. Γι' αυτό στη πράξη καταφεύγουμε σε υβριδικές τεχνολογίες για την κατανομή φάσματος.

Τέλος, οι τεχνικές κατανομής φάσματος κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πεδίο δράσης τους:

- *Κατανομή στο εσωτερικό ενός δικτύου:* με τη τεχνική αυτή το φάσμα διαμοιράζεται μεταξύ των κόμβων ενός γνωστικού δικτύου. Οι δευτερεύοντες χρήστες του γνωστικού δικτύου προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο φάσμα χωρίς να προκαλέσουν παρεμβολή στους πρωτεύοντες.

- *Κατανομή μεταξύ πολλών δικτύων που συνυπάρχουν:* η αρχιτεκτονική των γνωστικών δικτύων επιτρέπει την ανάπτυξη πολλαπλών δικτύων σε επικαλυπτόμενες γεωγραφικές και φασματικές περιοχές.

1.6.1 Προκλήσεις για έρευνα στην κατανομή φάσματος

Για τη συνεχή και αποδοτική λειτουργία των γνωστικών δικτύων υπάρχουν αρκετά πεδία που απαιτούν περαιτέρω έρευνα , όπως:

- *Πληροφορίες θέσης:* έχουμε υποθέσει ότι ο δευτερεύων χρήστης γνωρίζει τη θέση και την εκπεμπόμενη ισχύ του πρωτεύοντος χρήστη, για να γίνονται εύκολα οι υπολογισμοί για τη παρεμβολή. Η υπόθεση αυτή στα γνωστικά δίκτυα δεν είναι πάντα σωστή.

- *Μονάδα φάσματος:* οι περισσότερες αποφάσεις για την επιλογή και την κατανομή φάσματος θεωρούν ένα κανάλι ως βασική μονάδα του φάσματος. Ο καθορισμός ενός καναλιού ως μονάδα φάσματος είναι σημαντικός για την ανάπτυξη αλγορίθμων.

- *Δυναμικό εύρος συχνοτήτων:* λόγω της ανεξαρτησίας της συχνότητας λειτουργίας από το εύρος ζώνης, είναι δυνατόν σε περίπτωση αλλαγής της συχνότητας λειτουργίας να αλλάξουν και οι γειτονικοί κόμβοι ενός

κόμβου. Προς το παρόν δεν υπάρχει σχετική έρευνα που να αντιμετωπίζει την παραπάνω πρόκληση.

- *Κανάλι ανατροφοδότησης*: διευκολύνει πολλές λειτουργίες στην κατανομή φάσματος, αλλά όταν εμφανίζεται ένας πρωτεύον χρήστης θα πρέπει να αδειάσει κι επομένως η υλοποίησή του σε ένα σταθερό κανάλι δεν είναι πρακτική. Επιπρόσθετα, στα γνωστικά δίκτυα ένα κανάλι που θα είναι κοινό για όλους τους χρήστες εξαρτάται και από την τοπολογία η οποία είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Η λύση στη παραπάνω πρόκληση είναι ή να τεθούν τεχνικές περιορισμού στο κανάλι ανατροφοδότησης ή να χρησιμοποιούνται τοπικά κανάλια ανά ομάδες κόμβων.

1.7 Κινητικότητα φάσματος

Τέταρτο βήμα στη διαχείριση φάσματος στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα είναι η *κινητικότητα φάσματος* (spectrum mobility). Οι γνωστικοί χρήστες θεωρούνται «επισκέπτες» στο φάσμα που χρησιμοποιείται από τους πρωτεύοντες χρήστες. Αν, λοιπόν, ένας πρωτεύον χρήστης απαιτήσει το κατειλημμένο από ένα γνωστικό χρήστη τμήμα του φάσματος, τότε ο τελευταίος θα πρέπει να το εγκαταλείψει και να μετακινηθεί σε άλλη κενή φασματική ζώνη με διαφορετική συχνότητα λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή συνιστά την έννοια της κινητικότητας φάσματος.

Κάθε φορά που ένας γνωστικός χρήστης αλλάζει τη συχνότητα λειτουργίας του, το πρωτόκολλο δικτύου ενδέχεται να χρειάζεται τροποποιήσεις στις παραμέτρους λειτουργίας του. Σκοπός της κινητικότητας φάσματος είναι να εξασφαλίζει όσο το δυνατόν πιο ομαλή και γρήγορη μετάβαση πετυχαίνοντας την ελάχιστη μείωση της απόδοσης κατά τη μετάβαση αυτή. Μια βασική πληροφορία που χρειάζονται τα πρωτόκολλα μεταφοράς στο φάσμα είναι η χρονική διάρκεια αλλαγής συχνότητας, δηλαδή πόσο χρόνο χρειάζεται η μετάβαση. Την πληροφορία αυτή την αντλούν με ένα αλγόριθμο ανίχνευσης. Αν αυτή είναι διαθέσιμη μπορούμε να πετύχουμε την ελάχιστη μείωση της απόδοσης κατά τη μετάβαση.

Τα χαρακτηριστικά των γνωστικών δικτύων εισάγουν 2 νέες έννοιες: τη μετακίνηση και την αλλαγή στο φάσμα (handoff). Προς το παρόν υπάρχουν πολλά ζητήματα που πρέπει να ερευνηθούν σχετικά με το πρόβλημα της αλλαγής φάσματος στα γνωστικά δίκτυα, έρευνα η οποία μπορεί να βασιστεί στους μηχανισμούς που έχουν αναπτυχθεί στα κυψελωτά δίκτυα.

1.7.1 Προκλήσεις για έρευνα στην κινητικότητα φάσματος

Στο πεδίο της κινητικότητας φάσματος υπάρχουν αρκετά πεδία για περαιτέρω έρευνα για να πετύχουμε αποδοτικότερη μετακίνηση στο φάσμα:

- *Κινητικότητα φάσματος στο πεδίο του χρόνου:* τα γνωστικά δίκτυα προσαρμόζονται στο ασύρματο φάσμα ανάλογα με τις διαθέσιμες φασματικές περιοχές. Τα διαθέσιμα κανάλια, όμως, μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, οπότε αποτελεί πρόκληση ο ορισμός του QoS σε ένα τέτοιο περιβάλλον.
- *Κινητικότητα φάσματος στο χώρο:* κατά τη μετακίνηση του χρήστη από το ένα μέρος σε άλλο αλλάζουν και τα διαθέσιμα κανάλια. Επομένως, η συνεχής και αποτελεσματική κατανομή του φάσματος είναι τεράστια πρόκληση.

Κεφάλαιο 2: Ανίχνευση φάσματος με συνεργατικότητα

2.1 Εισαγωγή

Η *ανίχνευση του φάσματος* (spectrum sensing) είναι πολύ σημαντική λειτουργία των γνωστικών χρηστών, καθώς τους επιτρέπει να βρουν μη χρησιμοποιούμενα τμήματα φάσματος, ώστε να εκπέμψουν σε αυτά χωρίς να παρεμβάλλουν σε πρωτεύον δίκτυο. Η λειτουργία αυτή προηγείται όλων των άλλων του γνωστικού κύκλου λειτουργιών και είναι πολύ σημαντική η βελτιστοποίηση της, προκειμένου να αποφεύγονται λάθη που οδηγούν σε εσφαλμένες εκτιμήσεις για την ύπαρξη ή όχι πρωτευόντων χρηστών στο φάσμα που ανιχνεύεται.

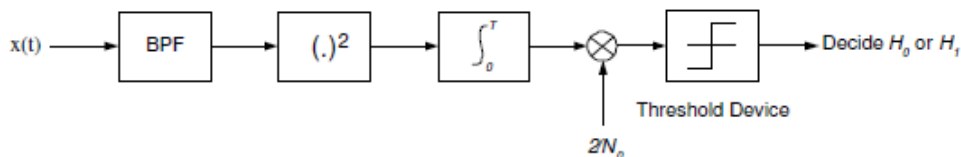
Οι τρόποι ανίχνευσης φάσματος αναπτύχθηκαν στην ενότητα 1.4.1. Στο κεφάλαιο αυτό ως βασική μέθοδο ανίχνευσης επιλέγουμε την ανίχνευση ενέργειας ^[4], καθώς είναι η πιο εύκολα υλοποιήσιμη. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ανίχνευσης, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο κατώφλι, προκειμένου να καθοριστεί αν μέρος του φάσματος χρησιμοποιείται από πρωτεύον χρήστη ή όχι. Η απόδοση του ανιχνευτή ενέργειας είναι ευάλωτη σε σφάλματα της εκτίμησης ισχύος του θορύβου. Για να πετύχουμε το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης υπό συγκεκριμένη ισχύ θορύβου, ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) θα πρέπει να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Το πρόβλημα αυτό δεν θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί αν αυξάναμε το χρόνο ανίχνευσης, αφού θα οδηγούμασταν έτσι στην αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων ανίχνευσης όπου το SNR είναι κάτω από το επιθυμητό κατώφλι. Συγκεκριμένα, όταν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τη δομή

του πρωτεύοντος σήματος, ad-hoc ανιχνευτές αναλαμβάνουν να διευθετήσουν το πρόβλημα.

Σε περιβάλλον με υψηλή σκίαση ή διαλείψεις, η ανίχνευση φάσματος παρεμποδίζεται από την αβεβαιότητα λόγω της τυχαιότητας του καναλιού. Στις περιπτώσεις αυτές, ένα ασθενές λαμβανόμενο σήμα μπορεί να προέρχεται από ένα εξασθενημένο πρωτεύον σήμα και όχι από λευκό θόρυβο. Γι' αυτό, ο γνωστικός χρήστης θα πρέπει να είναι πιο προσεκτικός για να μην μπερδέψει μια ισχυρή διάλειψη με λευκό θόρυβο, που θα οδηγήσει σε υποχρησιμοποίηση του φάσματος. Τα φαινόμενα διάλειψης και σκίασης μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με τη θέση του δέκτη. Η παραπάνω αβεβαιότητα μπορεί να μετριαστεί αν επιτρέψουμε σε διαφορετικούς χρήστες να μοιράζονται τα αποτελέσματα μιας ανίχνευσης και να αποφασίζουν συνεργατικά αν το κανάλι είναι κατειλημμένο ή όχι. Σκοπός μας είναι να αναλύσουμε την επίδραση της συνεργατικότητας στην απόδοση της πρόσβασης στο φάσμα.

Πιο συγκεκριμένα, θα δείξουμε ότι έχοντας ένα ικανό αριθμό συνεργαζόμενων χρηστών με ανεξάρτητες μεταξύ τους διαλείψεις, είναι θεωρητικά εφικτό να ανιχνευτεί ένας πρωτεύον χρήστης σε αυθαίρετα χαμηλές τιμές του SNR. Επιπλέον, μέσω της συνεργατικότητας μειώνεται ο χρόνος παρατήρησης και το εύρος ζώνης που χρειάζεται για ικανοποιητική ανίχνευση της κατάστασης του καναλιού, το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη ευκινησία και αποδοτικότητα στην ανίχνευση. Έχοντας έναν ικανοποιητικό αριθμό χρηστών είναι δυνατόν να έχουμε την επιθυμητή απόδοση υπό θόρυβο ακόμα και όταν οι χρήστες μεμονωμένα δεν ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις του SNR. Η συνεργατικότητα, λοιπόν, προλαμβάνει την ανάγκη να αναπτυχθούν πιο εξελιγμένοι ανιχνευτές για τέτοιες περιπτώσεις.

2.2 Μη συνεργατική ανίχνευση φάσματος σε κανάλι με διαλείψεις



Εικόνα 2.1: Μπλοκ - διάγραμμα του ανιχνευτή ενέργειας

Στην παραπάνω εικόνα (2.1) παρουσιάζεται το μπλοκ-διάγραμμα του ανιχνευτή ενέργειας. Το σήμα πρώτα διέρχεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο (BPF), ώστε να περιοριστεί το εύρος ζώνης του θορύβου. Εκεί επιλέγεται η κεντρική συχνότητα f_s και το εύρος ζώνης W . Ακολουθεί μια συσκευή ύψωσης στο τετράγωνο και στη συνέχεια η λαμβανόμενη ισχύς μετριέται από έναν ολοκληρωτή, ο οποίος καθορίζει το διάστημα παρατήρησης T . Η έξοδος του ολοκληρωτή κανονικοποιείται ως προς $N_0/2$, όπου N_0 η μονόπλευρη πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Τελικά, η κανονικοποιημένη έξοδος Y συγκρίνεται με ένα κατώφλι απόφασης λ και αποφασίζει αν υπάρχει σήμα ή όχι.

Στόχος της ανίχνευσης φάσματος είναι να καθορίσουμε αν ένα κανάλι χρησιμοποιείται ή όχι από ένα πρωτεύοντα χρήστη. Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα δυαδικής απόφασης (binary decision):

$$x(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \text{ (ελεύθερο κανάλι)} \\ h s(t) + n(t), & H_1 \text{ (κατειλημμένο κανάλι)} \end{cases}$$

Όπου η απόφαση H_0 αντιστοιχεί σε λευκή τρύπα (το κανάλι είναι κενό) και η H_1 αντιστοιχεί σε κατειλημμένο κανάλι, $x(t)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα στενής ζώνης (όπως έχουμε προαναφέρει έχει προηγηθεί το ζωνοπερατό φίλτρο BPF) του γνωστικού χρήστη, $n(t)$ το σήμα του λευκού αθροιστικού γκαουσιανού θορύβου (AWGN), $s(t)$ είναι το σήμα του πρωτεύοντος χρήστη και h είναι το πλάτος του κέρδους του καναλιού επικοινωνίας. Ο σηματοθορυβικός λόγος στο χρήστη (SNR) είναι: $\gamma = \frac{P}{N_0 W}$, όπου P η ισχύς του σήματος του πρωτεύοντος χρήστη που λαμβάνεται

στην είσοδο του δευτερεύοντος χρήστη, N_0 η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου και W το εύρος ζώνης του καναλιού [5].

Η αξιολόγηση της ανίχνευσης φάσματος γίνεται με τη βοήθεια τριών ακόμη μεγεθών, τα οποία είναι: η *πιθανότητα σωστής ανίχνευσης* (probability of detection) P_d , η *πιθανότητα false-alarm* P_f και η *πιθανότητα απώλειας ορθής ανίχνευσης πρωτεύοντα χρήστη* (probability of missed detection) P_m . Η P_d εκφράζει την πιθανότητα ένας γνωστικός χρήστης να ανιχνεύσει σωστά τη λειτουργία ενός πρωτεύοντος χρήστη στο φάσμα που ανιχνεύει. Η P_m εκφράζει την πιθανότητα ένας γνωστικός χρήστης να μην ανιχνεύσει την ύπαρξη ενός πρωτεύοντος χρήστη στο φάσμα, ενώ αυτός στην πραγματικότητα το χρησιμοποιεί. Προφανώς ισχύει ότι $P_m = 1 - P_d$. Οι παραπάνω 2 πιθανότητες μας δείχνουν το επίπεδο παρεμβολής από τους δευτερεύοντες χρήστες στους πρωτεύοντες. Η P_f εκφράζει την πιθανότητα ένας γνωστικός χρήστης να ανιχνεύσει λανθασμένα την ύπαρξη πρωτεύοντος χρήστη στο φάσμα, όταν δεν υπάρχει πρωτεύον χρήστης (ουσιαστικά είναι το ποσοστό των χαμένων ευκαιριών για χρήση φάσματος). Αυτό οδηγεί σε υποχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Συνεπώς, ένα λογικό κριτήριο είναι να ελαχιστοποιήσουμε την P_f , ενώ παράλληλα η P_d παραμένει πάνω από ένα κατώφλι.

Προκειμένου να κατανοήσουμε την έννοια της συνεργατικότητας, αρχίζουμε από την ανάλυση του *μεμονωμένου* (μη-συνεργατικού) *ανιχνευτή ισχύος σε κανάλι με διαλείψεις*.

Για λόγους ευκολίας θεωρούμε ότι το γινόμενο του χρόνου επί το εύρος ζώνης TW συμβολίζεται από έναν ακέραιο αριθμό m ($m = TW$). Η κανονικοποιημένη έξοδος του ολοκληρωτή Y ακολουθεί κεντρική κατανομή x^2 υπό H_0 και μη-κεντρική x^2 υπό H_1 με παράμετρο μη-κεντρικότητας $\frac{PT}{N_0/2}$, κάθε μία με $2m$ βαθμούς ελευθερίας. Ισχύει δηλαδή:

$$\kappa = \frac{PT}{N_{02}} = \frac{2PT}{N_0} = \frac{2PTW}{N_0W} = 2m\gamma$$

Όπου N_0 η φασματική πυκνότητα θορύβου μιας πλευράς, γ ο σηματοθορυβικός λόγος. Προφανώς ισχύει: $N_{02} = N_0/2$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Y υπό τις 2 υποθέσεις γράφεται:

$$f_{Y|H_0}(y) = \frac{y^{m-1}e^{-y/2}}{\Gamma(m)2^m} \quad (2.1)$$

$$f_{Y|H_1}(y) = \frac{y^{m-1}e^{-(y+2m\gamma)/2}}{\Gamma(m)2^m} F_1\left(m, \frac{m\gamma y}{2}\right) \quad (2.2)$$

Όπου $\Gamma(\cdot)$ η συνάρτηση γάμμα και ${}_0F_1(\cdot, \cdot)$ είναι η συμβάλλουσα υπεργεωμετρική συνάρτηση ορίου.

Σε περιβάλλον χωρίς διαλείψεις όπου το κέρδος h είναι ντετερμινιστικό, χρησιμοποιώντας τις αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής των κεντρικών και μη κεντρικών κατανομών x^2 , η πιθανότητα ανίχνευσης P_d και η πιθανότητα false-alarm P_f [6], γράφονται ως εξής:

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_m(\sqrt{2m\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (2.3)$$

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(m, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(m)} \triangleq G_m(\lambda) \quad (2.4)$$

όπου $\Gamma(a, b) = \int_b^\infty t^{a-1}e^{-t} dt$ είναι η ατελής συνάρτηση γάμμα και $Q_m(\cdot, \cdot)$ είναι η γενικευμένη συνάρτηση Marcum που ορίζεται ως εξής:

$$Q_m(a, b) = \int_b^\infty \frac{x^m}{a^{m-1}} e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{m-1}(ax) dx$$

όπου $I_{m-1}(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους $(m-1)$ τάξης.

Συνδυάζοντας τις (2.3) και (2.4) η πιθανότητα ανίχνευσης συναρτήσει της πιθανότητας false-alarm δίνεται από τη σχέση:

$$P_d = Q_m(\sqrt{2m\gamma}, \sqrt{G_m^{-1}(P_f)}) \quad (2.5)$$

Αφού ισχύει ότι $P_m = 1 - P_d$, συμπεραίνουμε ότι και η πιθανότητα ανίχνευσης πρωτεύοντος χρήστη εκφράζεται συναρτήσει της πιθανότητας false-alarm. Η αλληλεξάρτηση αυτή δημιουργεί διάφορες επιπλοκές στα γνωστικά δίκτυα σχετικά με τη πρόσβαση στο φάσμα. Υψηλή P_m έχει ως αποτέλεσμα ο γνωστικός χρήστης να έχει χαμηλή πιθανότητα σωστής ανίχνευσης της παρουσίας πρωτεύοντος χρήστη,

γεγονός που θα αυξήσει τις παρεμβολές στο πρωτεύον δίκτυο. Από την άλλη μεριά, μια υψηλή P_f έχει ως αποτέλεσμα την υποχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, αφού τα λάθη αυτά αυξάνουν τον αριθμό των χαμένων ευκαιριών για πρόσβαση στο φάσμα.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η πιθανότητα false-alarm P_f είναι ανεξάρτητη από το σηματοθορυβικό λόγο γ , αφού υπό H_0 δεν υπάρχει σήμα πρωτεύοντος χρήστη στο λαμβανόμενο σήμα. Όταν το κέρδος του καναλιού h μεταβάλλεται λόγω σκίασης ή διαλείψεων, η σχέση (2.3) μας δίνει την πιθανότητα ανίχνευσης υπό συνθήκη για ένα στιγμιαίο σηματοθορυβικό λόγο γ . Στην περίπτωση αυτή, η μέση πιθανότητα ανίχνευσης εξάγεται υπολογίζοντας μια μέση τιμή της (2.3) από στατιστικά των διαλείψεων:

$$P_d = \int_{\gamma} Q_m(\sqrt{2m\bar{x}} \cdot \sqrt{\lambda}) f_{\gamma}(x) dx$$

$$= \int_{\gamma} Q_m\left(\sqrt{2m\bar{x}}, \sqrt{G_m^{-1}(P_f)}\right) f_{\gamma}(x) dx \quad (2.6)$$

όπου $f_{\gamma}(x)$ είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του σηματοθορυβικού λόγου υπό διαλείψεις.

Η απόδοση του ανιχνευτή ενέργειας για τις διάφορες τιμές του μέσου σηματοθορυβικού λόγου και της ποσότητας m μπορεί να χαρακτηριστεί μέσω των καμπυλών ROC. Οι καμπύλες ROC είναι τα γραφήματα της πιθανότητας P_m (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει της P_f (οριζόντιος άξονας).

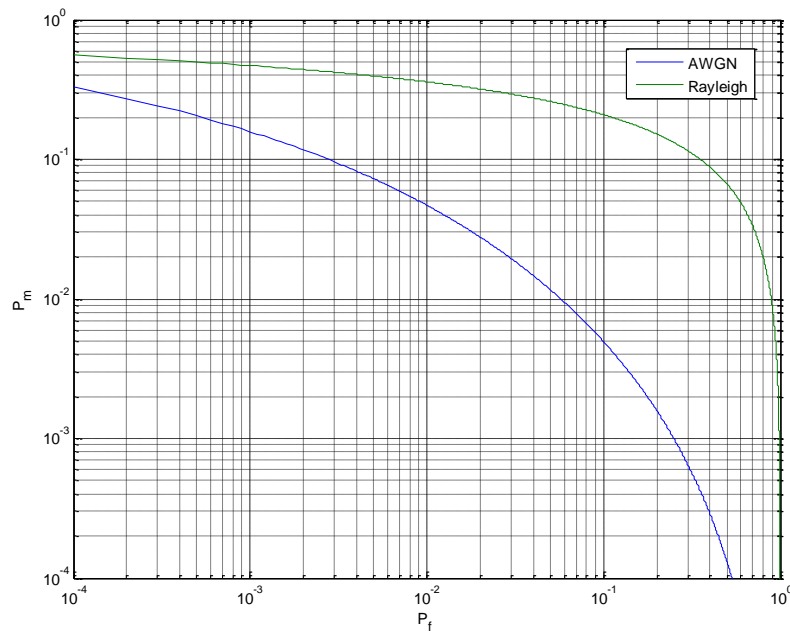
Στη συνέχεια θα μελετηθεί η επίδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh και με λογαριθμικές σκιάσεις.

2.2.1 Διαλείψεις Rayleigh

Σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh, ο σηματοθορυβικός λόγος γ έχει εκθετική κατανομή. Στην περίπτωση αυτή, μετά από σύνθετες πράξεις, μια έκφραση κλειστής κατανομής μπορεί να υπολογιστεί, αν αντικαταστήσουμε τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του γ , $f_{\gamma}(x)$, στη σχέση (2.6).

$$P_d = \frac{\Gamma(m-1, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(m-1)} + e^{-\frac{\lambda}{2(1+m\bar{\gamma})}} \left(1 + \frac{1}{m\bar{\gamma}}\right)^{m-1} \times \left[1 - \frac{\Gamma\left(m-1, \frac{\lambda m \bar{\gamma}}{2(1+m\bar{\gamma})}\right)}{\Gamma(m-1)}\right] \quad (2.7)$$

Όπου $\bar{\gamma}$ είναι η μέση τιμή του σηματοθορυβικού λόγου. Η εικόνα 2.2 παρουσιάζει τα διαγράμματα των καμπυλών ROC για περιβάλλον με λευκό προσθετικό θόρυβο τύπου Gaussian και στη συνέχεια για περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh. Για τα διαγράμματα αυτά έχει υποθεθεί ότι οι τιμές του μέσου σηματοθορυβικού λόγου $\bar{\gamma}$ είναι 5dB και του προϊόντος χρόνου-φάσματος m είναι 5. Παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις Rayleigh υποβαθμίζουν σημαντικά την απόδοση του ανιχνευτή ενέργειας. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνοντας $P_m < 10^{-2}$ συνεπάγεται η πιθανότητα false-alarm να είναι μεγαλύτερη από 0,9, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την υποχρησιμοποίηση του φάσματος.



Εικόνα 2.2: Συμπληρωματικές καμπύλες ROC σε Rayleigh διαλείψεις

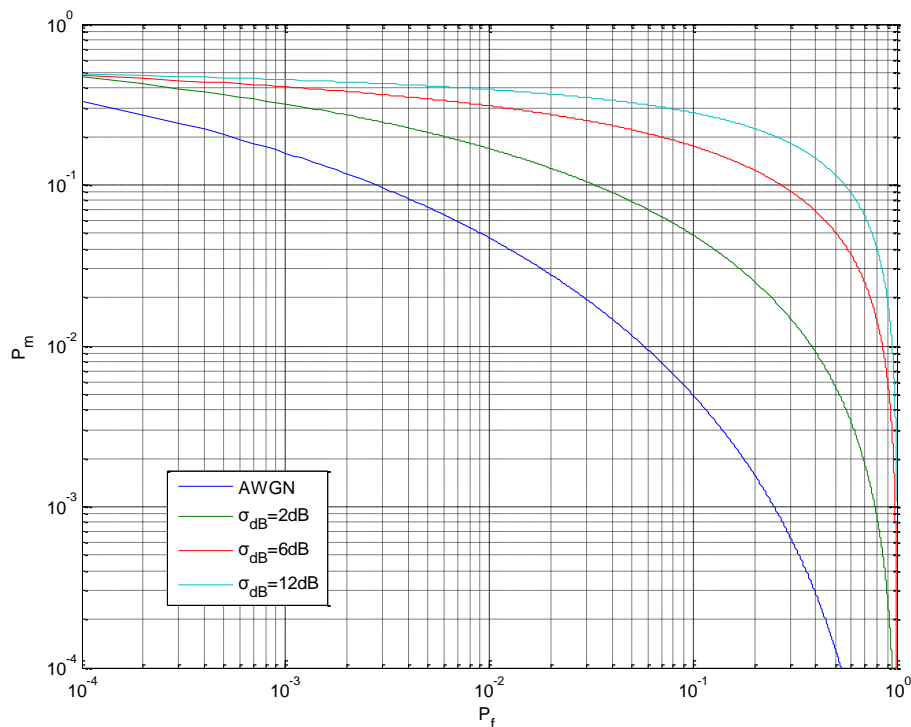
2.2.2 Λογαριθμοκανονική σκίαση

Από εμπειρικές μετρήσεις έχει αποδειχθεί ότι, οι μεσαίας κλίμακας διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος (σε dB) ακολουθούν κανονική κατανομή. Το γραμμικό κέρδος του καναλιού μπορεί να μοντελοποιηθεί από μια λογαριθμοκανονική τυχαία κατανομή e^X , όπου x μια τυχαία Gaussian μεταβλητή, μηδενικής μέσης τιμής με τυπική απόκλιση σ^2 . Η λογαριθμοκανονική σκίαση συνήθως μετριέται σε μονάδες dB τυπικής απόκλισης (dB-spread) σ_{dB} , η οποία συνδέεται με την τυπική απόκλιση σ ως εξής:

$$\sigma = 0.1 \log_e(10) \sigma_{dB}$$

Όταν ο σηματοθροβικός λόγος γ έχει λογαριθμοκανονική κατανομή λόγω σκιάσεων, η σχέση 2.6 μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά. Η εικόνα 2.3 δείχνει τις καμπύλες ROC για τρία διαφορετικά dB-spreads. Το μέσο SNR $\bar{\gamma}$ και το m υποθέτουμε ότι είναι 5dB και 5 αντίστοιχα. Η καμπύλη AWGN σχεδιάζεται για σύγκριση.

Συγκρίνοντας την καμπύλη για το κανάλι με AWGN με αυτές που προκύπτουν όταν υπάρχουν και σκιάσεις, παρατηρούμε ότι για τις περιοχές πρακτικού ενδιαφέροντος, η ανίχνευση φάσματος είναι πιο δύσκολη σε περιβάλλον με σκίαση. Επιπλέον, όσο η σκίαση γίνεται πιο έντονη (δηλαδή αυξάνεται το dB-spread), τόσο μειώνεται η επίδοση του ανιχνευτή ενέργειας.



Εικόνα 2.3: Συμπληρωματικές καμπύλες ROC σε λογαριθμοκανονική σκίαση για 3 διαφορετικά dB-spreads

Όπως φαίνεται από τις εικόνες 2.2 και 2.3, ο ανιχνευτής ισχύος δέχεται σημαντικές απώλειες στην απόδοση του σε περιβάλλον με διαλείψεις ή σκίαση.

2.3 Συνεργατική ανίχνευση φάσματος σε κανάλι με διαλείψεις

Μέχρι τώρα, έχουμε ποσοτικοποιήσει τη μείωση στην απόδοση του ανιχνευτή ενέργειας που προκαλεί η παρουσία των διαλείψεων και των σκιάσεων. Το γενικότερο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι για μια απαιτούμενη πιθανότητα ανίχνευσης P_d , τέτοια ώστε να εξασφαλίζει την απαιτούμενη προστασία στο πρωτεύον δίκτυο από παρεμβολές, η πιθανότητα false-alarm P_f αυξάνεται σημαντικά με τη παρουσία εξασθενίσεων στο κανάλι. Αυτό οδηγεί σε υποχρησιμοποίηση του φάσματος, καθώς χάνονται ευκαιρίες ένας γνωστικός χρήστης να εκπέμψει σε μια λευκή τρύπα.

Προκειμένου να βελτιώσουμε την ανίχνευση φάσματος υπό την παρουσία διαλείψεων, επιτρέπουμε σε διαφορετικούς γνωστικούς χρήστες να συνεργάζονται διαμοιράζοντας τις πληροφορίες μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί αυτό, κάθε δευτερεύων χρήστης ανακοινώνει τη μετρούμενη λαμβανόμενη ενέργεια Y ή μια δική του τοπική απόφαση σε ένα κεντρικό χρήστη ή διαχειριστή φάσματος. Ο χρήστης αυτός λέγεται *κοινός δέκτης* (common receiver) και με βάση τις μετρήσεις που συλλέγει, παίρνει τη τελική απόφαση για την κατάσταση της ζώνης και στη συνέχεια την εκπέμπει προς όλους τους χρήστες.

Έστω n ο αριθμός των συνεργαζόμενων χρηστών. Για απλούστευση θεωρούμε ότι οι πληροφορίες που συλλέγονται από το κοινό δέκτη δεν έχουν σφάλματα. Επίσης, υποθέτουμε ότι όλοι οι n χρήστες υπόκεινται σε ανεξάρτητες και ακριβώς ίδιας κατανομής διαλείψεις ή σκιάσεις με τον ίδιο μέσο σηματοθορυβικό λόγο.

Ένα βασικό συμπέρασμα στα δυαδικά προβλήματα είναι ότι όταν οι παρατηρήσεις των διαφορετικών ανιχνευτών είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, όπως στην περίπτωση μας, ο βέλτιστος κανόνας απόφασης για μεμονωμένους χρήστες είναι ο LRT (likelihood ratio test). Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητο όλοι οι χρήστες να χρησιμοποιούν το ίδιο βέλτιστο κατώφλι. Επειδή η εφαρμογή του LRT σε περιβάλλον με διαλείψεις απαιτεί εκτίμηση του καναλιού, κάνοντας το σχεδιασμό πολύπλοκο, υποθέτουμε ότι όλοι οι χρήστες έχουν ανιχνευτή ενέργειας αντί LRT και χρησιμοποιούν το ίδιο κατώφλι απόφασης λ . Οι παραδοχές

αυτές δεν οδηγούν στο βέλτιστο μοντέλο, αλλά διευκολύνουν την ανάλυση και την πρακτική εφαρμογή του.

Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται δύο περιπτώσεις για τον τρόπο διαμοιρασμού της μετρούμενης ισχύος. Αρχικά υποθέτουμε ότι ο κοινός δέκτης έχει πλήρη γνώση των μετρήσεων όλων των χρηστών (απόφαση soft-decision). Η μετρούμενη ισχύς Y πρέπει να κβαντιστεί χρησιμοποιώντας έναν επαρκή αριθμό bits πριν αποσταλεί στον κοινό δέκτη. Στη περίπτωση αυτή, αν και υπάρχουν ακριβή αντίγραφα των μετρήσεων στο διαχειριστή του φάσματος, η μέθοδος αυτή δεν είναι ελκυστική ως προς την εφαρμογή της, καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο και σπαταλάμε το διαθέσιμο φάσμα. Μια πιο θεμιτή λύση είναι ο κάθε χρήστης να εκπέμπει την τελική του απόφαση στο κοινό δέκτη με ένα μόνο bit: 1 για την περίπτωση ύπαρξης πρωτεύοντος χρήστη H_1 και 0 για την περίπτωση λευκής τρύπας H_0 (απόφαση hard-decision).

2.3.1 Απόφαση soft-decision

Είναι γνωστό ότι μεταξύ των διαφόρων τεχνικών γραμμικού συνδυασμού, ο *συνδυασμός μεγίστου λόγου* (maximal-ratio combining - MRC) έχει την καλύτερη επίδοση. Απαιτεί, όμως, τον υπολογισμό του κέρδους του καναλιού με διαλείψεις για κάθε χωριστό χρήστη στη περίπτωση μας. Από την άλλη, ο *συνδυασμός ίσου κέρδους* (equal-gain combining - EGC) έχει ελάχιστα κατώτερες επιδόσεις από τον MRC και δεν απαιτείται υπολογισμός του κέρδους. Στην περίπτωση του EGC, ο κεντρικός χρήστης αποφασίζει μεταξύ H_0 και H_1 , συγκρίνοντας το άθροισμα των μετρούμενων ενεργειών με ένα κατώφλι. Η συγκρινόμενη ποσότητα είναι λοιπόν:

$$Y_0 \triangleq \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.8)$$

Το άθροισμα των n ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών με κατανομή x^2 είναι άλλη μια x^2 κατανομή, με βαθμό ελευθερίας και παράμετρο μη-κεντρικότητας ίσο με το άθροισμα των βαθμών ελευθερίας και τις παραμέτρους μη-κεντρικότητας των n μεταβλητών αντίστοιχα. Έτσι, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συνδυαστικής εξόδου για κάθε υπόθεση δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_{Y_0|H_0}(y) = \frac{y^{nm-1}e^{-y/2}}{\Gamma(nm)2^{nm}} \quad (2.9)$$

$$f_{Y_0|H_1}(y) = \frac{y^{m-1}e^{-(y+2m\sum_{i=1}^n\gamma_i)/2}}{\Gamma(nm)2^{nm}} \times {}_0F_1\left(nm, \frac{my\sum_{i=1}^n\gamma_i}{2}\right) \quad (2.10)$$

Άρα η πιθανότητα ανίχνευσης και η πιθανότητα false-alarm δίνονται από τις σχέσεις:

$$Q_d = P\{Y_0 > \lambda | H_1, \gamma_1 = l_1, \dots, \gamma_n = l_n\} = Q_{nm}(\sqrt{2m\sum_{i=1}^n l_i}, \sqrt{\lambda}) \quad (2.11)$$

$$Q_f = P\{Y_0 > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(nm, \lambda/2)}{\Gamma(nm)} \quad (2.12)$$

Όπου χρησιμοποιούμε τους συμβολισμούς Q_d και Q_f για να διαχωρίσουμε τις σχετικές ποσότητες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την ανίχνευση του φάσματος χωρίς καμία συνεργασία μεταξύ των χρηστών. Επίσης, οι παραπάνω ποσότητες δεν θα πρέπει να συγχέονται με την Q-συνάρτηση Marcum $Q_m(\cdot, \cdot)$. Η μέση πιθανότητα εντοπισμού απορρέει από τη σχέση 2.11 αν την αποσυσχετίσουμε από κάθε σηματοθορυβικό λόγο γ_i . Παρατηρούμε ότι η πιθανότητα Q_d είναι συνάρτηση μόνο του $\gamma_0 \triangleq \sum_{i=1}^n \gamma_i$ και μπορούμε να γράψουμε:

$$Q_d = \int_{\gamma_0} Q_{nm}(\sqrt{2mx}, \sqrt{\lambda}) f_{\gamma_0}(x) dx \quad (2.13)$$

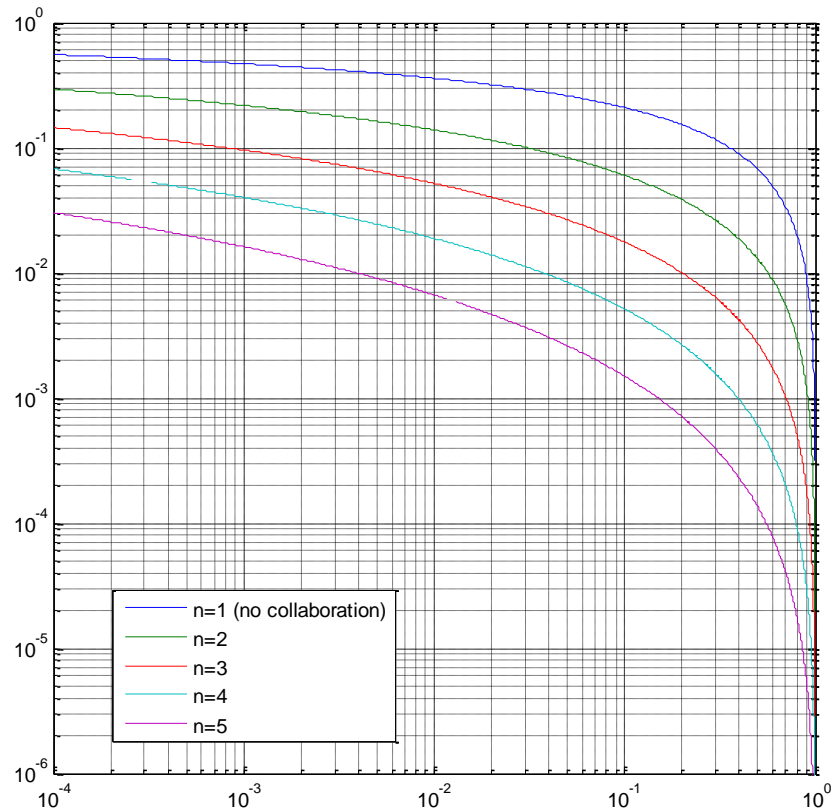
Όπου, με κατάχρηση του συμβολισμού, η Q_d συμβολίζει επίσης τη μέση πιθανότητα ανίχνευσης. Σε διαλείψεις Rayleigh, το γ_0 είναι το άθροισμα n ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών με την ίδια εκθετική κατανομή και μπορούμε εύκολα να αποδείξουμε ότι ακολουθεί κατανομή Γάμμα:

$$f_{\gamma_0}(x) = \frac{x^{n-1}e^{-x/\bar{\gamma}}}{(n-1)!\bar{\gamma}^n} \quad (2.14)$$

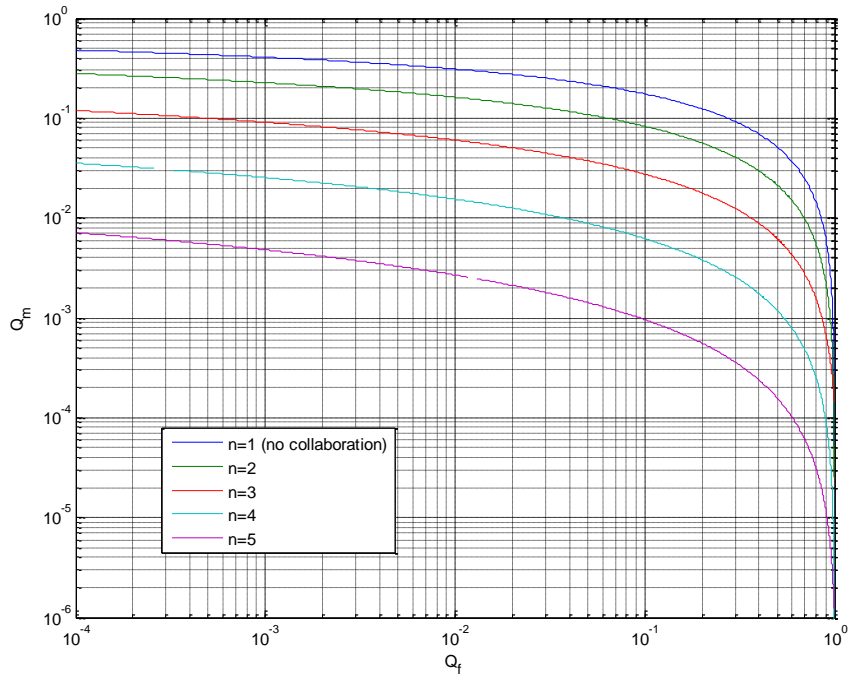
Αντικαθιστώντας την $f_{\gamma_0}(x)$ από την σχέση 2.14 στη σχέση 2.13 και μετά από πράξεις μπορούμε να βρούμε μια κλειστής μορφής εξίσωση για την πιθανότητα ανίχνευσης Q_d που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των συμπληρωματικών καμπυλών ROC.

Υπό ανεξάρτητες και πανομοιότυπα κατανεμημένες λογαριθμοκανονικές σκιάσεις, οι συμπληρωματικές καμπύλες ROC υπολογίζονται αριθμητικά. Οι εικόνες 2.4 και 2.5 δείχνουν τις καμπύλες

αυτές σε διαλείψεις Rayleigh και σε λογαριθμοκανονική σκίαση ($\sigma_{dB} = 6dB$) αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για μια δοσμένη πιθανότητα ανίχνευσης Q_d , η οποία εκφράζει την προσασία του πρωτεύοντος δικτύου από παρεμβολές, η συνεργατικότητα καταλήγει σε σημαντικά υψηλότερη πιθανότητα ανίχνευσης λευκών τρυπών, δηλαδή σε χαμηλότερη πιθανότητα false-alarm Q_f .



Εικόνα 2.4: Συμπληρωματικές καμπύλες ROC του Soft-decision υπό διαλείψεις Rayleigh



Εικόνα 2.5: Συμπληρωματικές καμπύλες ROC του soft-decision υπό λογαριθμοκανονικές σκιάσεις

2.3.2 Απόφαση hard-decision

Για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης του φάσματος, έχουμε υποθέσει ότι όλες οι μετρούμενες ενέργειες από τους διάφορους χρήστες γνωστοποιούνται ακριβώς στον κοινό δέκτη. Ενώ με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βέλτιστη τελική απόφαση, η παροχή όλων των πληροφοριών σχετικά με τη μετρούμενη ισχύ στον διαχειριστή του φάσματος απαιτεί μεταφορά υψηλού όγκου δεδομένων μεταξύ των χρηστών, γεγονός που προσθέτει άσκοπη κίνηση στο δίκτυο. Για να ελαχιστοποιήσουμε αυτή την κίνηση, θεωρούμε την περίπτωση όπου οι χρήστες λαμβάνουν μόνοι τους μια απόφαση (hard-decision) για το τμήμα φάσματος που ανιχνεύουν και στέλνουν την απόφαση αυτή στον κοινό δέκτη με σήμα του ενός bit (H_0 ή H_1).

Έστω u_i η απόφαση ενός bit του i -οστού χρήστη που ορίζεται ως:

$$u_i = \begin{cases} 0, & \text{απόφαση } H_0 \text{ αν } y_i < \lambda_i \\ 1, & \text{απόφαση } H_1 \text{ αν } y_i > \lambda_i \end{cases} \quad i = 1, \dots, n$$

Όταν οι μεμονωμένες μετρήσεις είναι αμοιβαία ανεξάρτητες, μπορούμε να αποδείξουμε ότι το κριτήριο Neyman-Pearson οδηγεί στον παρακάτω κανόνα απόφασης:

$$\sum_{i=1}^n u_i \log_e \left[\frac{P_{d_i}(1-P_{f_i})}{(1-P_{d_i})P_{f_i}} \right] \underset{H_1}{\overset{H_0}{\leq}} \Lambda \quad (2.15)$$

όπου P_{d_i} και P_{f_i} είναι η πιθανότητα ανίχνευσης και η πιθανότητα false-alarm κάθε χρήστη. Ο κεντρικός χρήστης λαμβάνει την απόφαση του συγκρίνοντας το σταθμισμένο μέσο όρο των ατομικών μετρήσεων με ένα κατώφλι, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στις πιο αξιόπιστες μετρήσεις. Προκειμένου να απλοποιήσουμε την υλοποίηση, υποθέτουμε ότι όλοι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο κατώφλι απόφασης λ . Υποθέτουμε επίσης ότι όλοι οι συνεργαζόμενοι χρήστες υπόκεινται στις ίδιες απώλειες διάδοσης, κάτι που σημαίνει ότι έχουν τον ίδιο σηματοθορυβικό λόγο ($\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}$, $i = 1, \dots, n$). Υπό αυτές τις συνθήκες, οι χρήστες έχουν ίσες πιθανότητες ανίχνευσης και false-alarm ($P_{d_i} = P_d$, $P_{f_i} = P_f$, $i = 1, \dots, n$), το οποίο έχει ως συνέπεια οι επιμέρους αποφάσεις να έχουν το ίδιο βάρος στην τελική απόφαση. Έτσι, με βάση το επιλεγμένο κατώφλι Λ , ο διαχειριστής του φάσματος τελικά χρησιμοποιεί τον κανόνα «κ από ν» (k-out-of-n rule) και αποφασίζει ότι το κανάλι βρίσκεται στην κατάσταση H_1 εάν k ή περισσότερες μεμονωμένες μετρήσεις είναι ίσες με 1, αλλιώς η απόφαση είναι H_0 .

Οι μέσες πιθανότητες ανίχνευσης και false-alarm για τον κανόνα «κ από ν» σχετίζονται με τις πιθανότητες του κάθε χρήστη μέσω των σχέσεων:

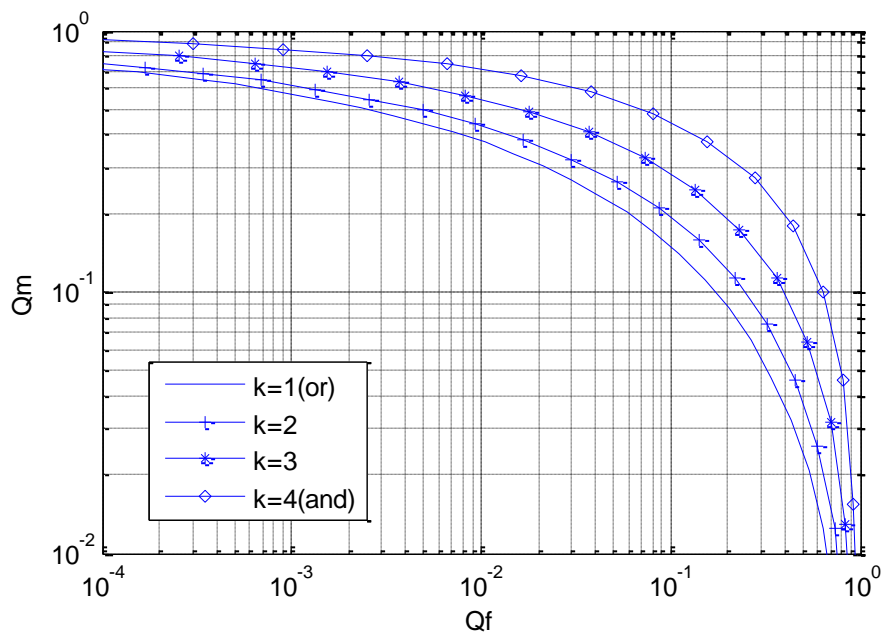
$$Q_d = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} P_d^i (1 - P_d)^{n-i} \quad (2.16)$$

$$Q_f = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} P_f^i (1 - P_f)^{n-i} \quad (2.17)$$

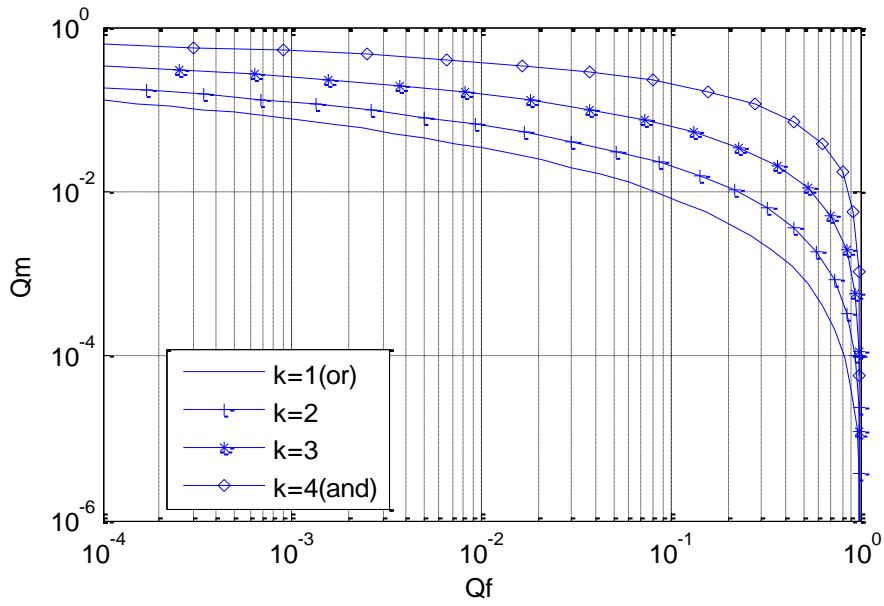
όπου P_d και P_f είναι οι πιθανότητες ανίχνευσης και false-alarm του κάθε χρήστη αντίστοιχα όπως ορίστηκαν στις (2.6) και (2.4) αντίστοιχα.

Οι καμπύλες ROC για διάφορες τιμές του κανόνα «κ από ν» σε διαλείψεις Rayleigh φαίνονται στις εικόνες 2.6 α-δ. Οι εικόνες αυτές, μαζί με άλλα αποτελέσματα προσομοιώσεων που δεν αναφέρονται εδώ,

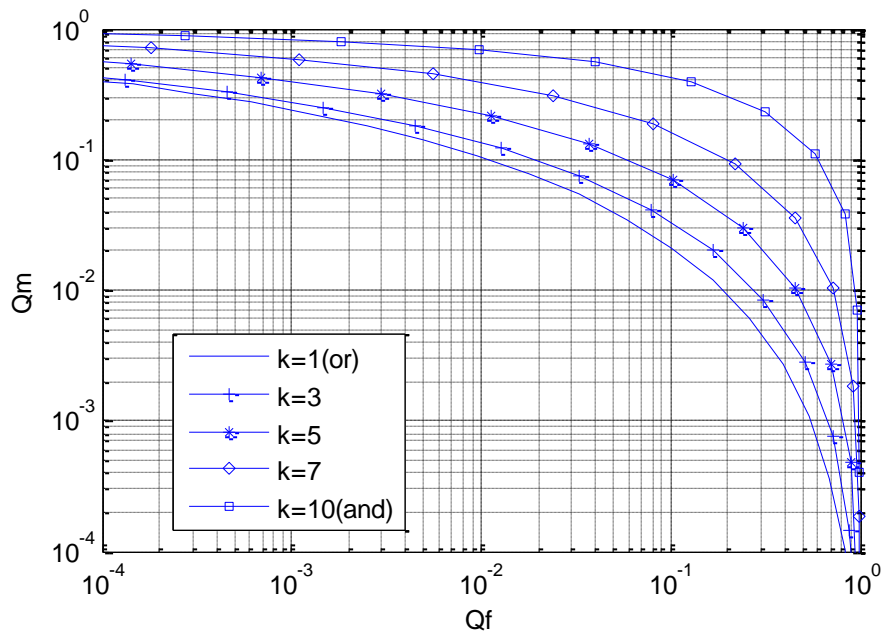
δείχνουν ότι για περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος, ο κανόνας «1 από ν» (ή κανόνας OR) κάνει την ανίχνευση του φάσματος να έχει καλύτερη επίδοση για το δίκτυο. Επομένως, ο κοινός δέκτης θα πρέπει να χαρακτηρίζει κατειλημμένο το κανάλι όταν έστω και ένας από τους γνωστικούς χρήστες εντοπίσει σήμα πρωτεύοντος χρήστη. Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο κανόνας OR δεν είναι πάντα ο καλύτερος, αλλά αναλόγως την περίπτωση θα πρέπει να επιλέγεται ο καταλληλότερος «1 από ν» κανόνας.



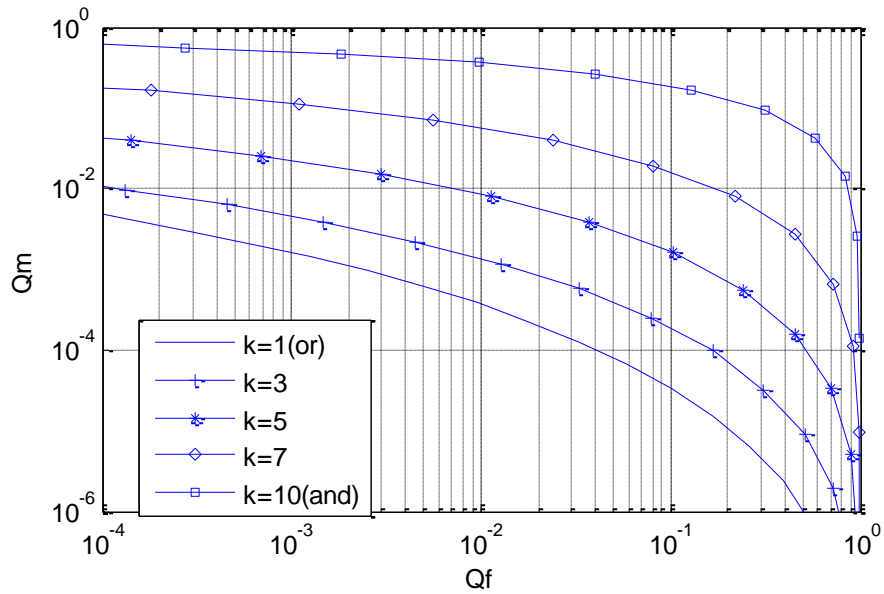
Εικόνα 2.6α: ROC καμπύλες για διάφορους «k από ν» κανόνες σε διαλείψεις Rayleigh με $m=5$, $n=4$, $\gamma=0\text{dB}$



Εικόνα 2.6β: ROC καμπύλες για διάφορους «κ από ν» κανόνες σε διαλείψεις Rayleigh με $m=5$, $n=4$, $\gamma=5\text{dB}$

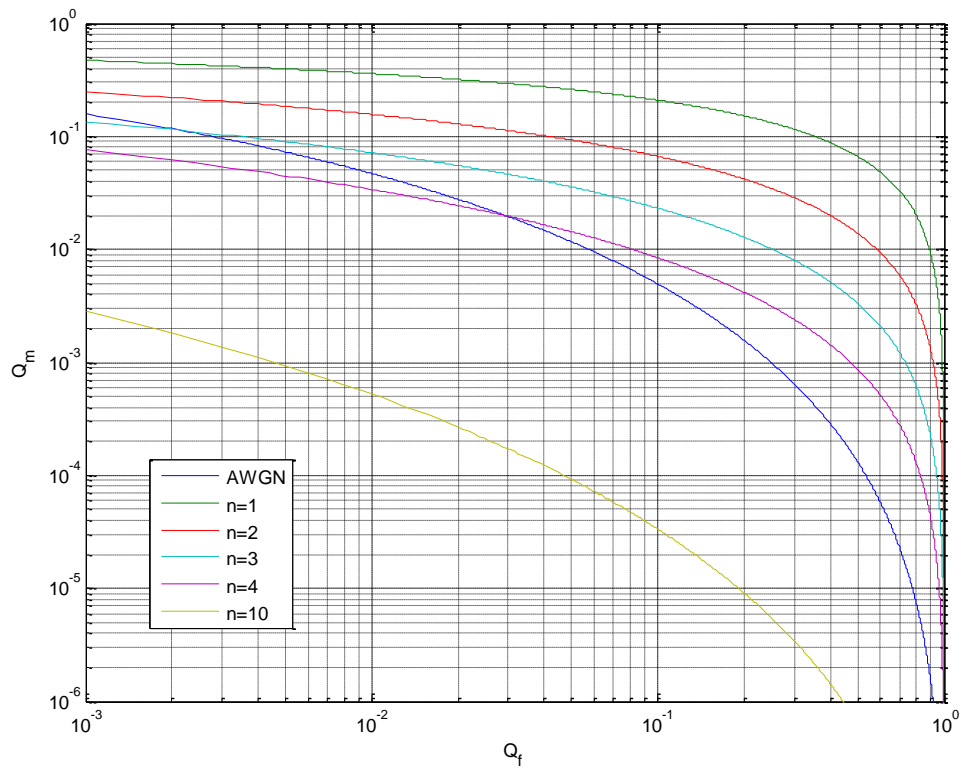


Εικόνα 2.6γ: ROC καμπύλες για διάφορους «κ από ν» κανόνες σε διαλείψεις Rayleigh με $m=5$, $n=10$, $\gamma=0\text{dB}$

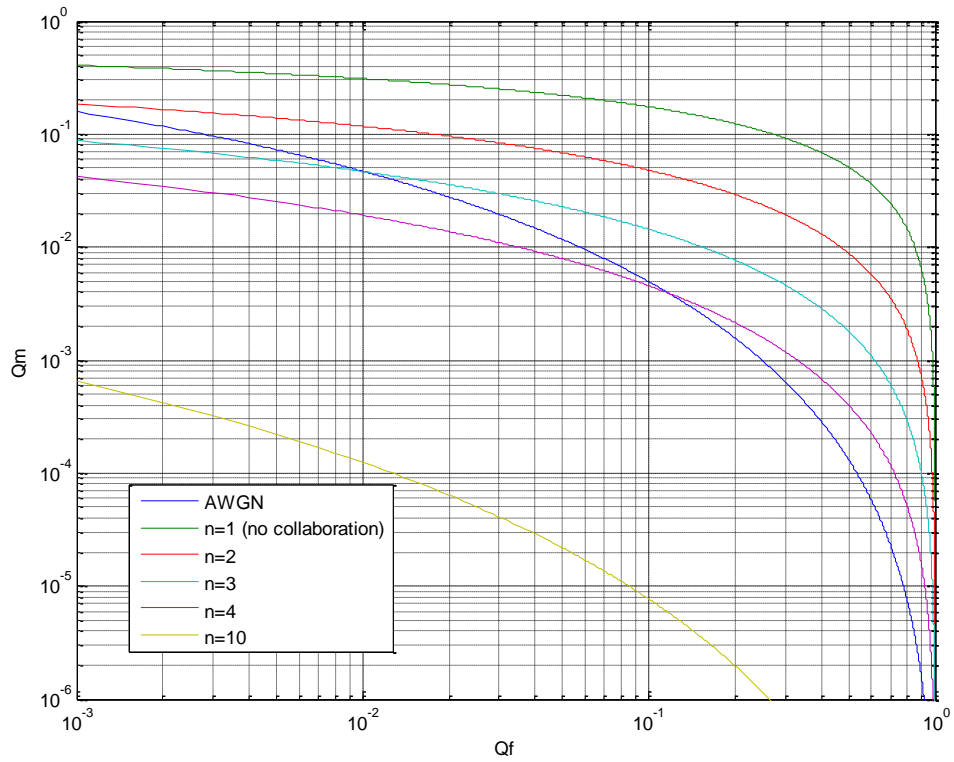


Εικόνα 2.6δ: ROC καμπύλες για διάφορους «κ από ν» κανόνες σε διαλείψεις Rayleigh με $m=5$, $n=10$, $\gamma=5\text{dB}$

Οι εικόνες 2.7α και 2.7β δείχνουν τις ROC καμπύλες για τον κανόνα OR για διάφορα πλήθη συνεργαζόμενων χρηστών υπό ανεξάρτητες και πανομοιότυπα κατανομημένες διαλείψεις Rayleigh και λογαριθμοκανονικές σκιάσεις (με $\sigma_{dB} = 6\text{ dB}$) αντίστοιχα. Όπως πριν, ο μέσος σηματοθρομβικός λόγος είναι ίσος με 5 dB και $m=5$. Και στις 2 περιπτώσεις παρουσιάζεται η καμπύλη AWGN για σύγκριση.



Εικόνα 2.7α: Καμπύλες ROC για τον κανόνα OR σε Rayleigh διαλείψεις



Εικόνα 2.7β: Καμπύλες ROC για τον κανόνα OR σε λογαριθμοκανονικές σκιάσεις

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η συνεργατικότητα των γνωστικών χρηστών αναιρεί την αρνητική επίδραση των διαλείψεων/σκιάσεων αποτελεσματικά. Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών n , η τεχνική της συνεργατικότητας μπορεί να φτάσει σε απόδοση ακόμη και την περίπτωση που έχουμε μόνο λευκό προσθετικό θόρυβο για μη συνεργατική ανίχνευση.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, στην περίπτωση του hard-decision με κανόνα OR έχουμε πολύ μικρό τηλεπικοινωνιακό φόρτο στο κανάλι. Αυτό θα μπορούσε να είναι πολύ χρήσιμο στην περίπτωση που η συνεργατικότητα ήταν μια διαδικασία εθελοντική από τους γνωστικούς χρήστες, καθώς αυτοί δε θα σπαταλούσαν ιδιαίτερους πόρους και θα είχαν σημαντικά οφέλη απ' ότι αν ενεργούσαν χωρίς συνεργατικότητα ή με συνεργατικότητα και soft-decision.

Κεφάλαιο 3: Αδόμητα δίκτυα οχημάτων – VANETs

3.1 Εισαγωγή / έννοια αδόμητων δικτύων οχημάτων – VANETs

Τα *VANETs* (Vehicular Ad-hoc NETWORKs - *αδόμητα δίκτυα οχημάτων*) είναι αδόμητα και αυτοοργανωνόμενα δίκτυα τα οποία δημιουργούνται μέσω της ασύρματης επικοινωνίας των οχημάτων που διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό (πομποδέκτη). Τα δίκτυα αυτά βρίσκουν κυρίως εφαρμογές στα ευφυή συστήματα μεταφορών ITS (Intelligent Transportation Systems), που ως απώτερο σκοπό έχουν τη βελτίωση της κυκλοφοριακής κίνησης αλλά και την αύξηση της οδικής ασφάλειας. Αυτή η μορφή δικτύου δεν έχει σταθερή υποδομή, αλλά στηρίζεται στα ίδια τα οχήματα τα οποία διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο συμβάλλοντας στη λειτουργία ενός τέτοιου δικτύου. Επιπροσθέτως, τα δίκτυα αυτά αποτελούν υποκατηγορία των MANETs (Mobile Ad-hoc NETWORKs - *κινητά αδόμητα δίκτυα*) από τα οποία πήραν την ιδιότητά τους να μπορούν να σχηματίσουν δίκτυο αποκλειστικά και μόνο από τους κόμβους τους χωρίς την απαίτηση κάποιας σταθερής υποδομής [7]. Από την άλλη, η συμπεριφορά των οδηγών των οχημάτων,

οι περιορισμοί ως προς την κίνησή τους στο χώρο (γραμμική, καθώς ακολουθούν τη χάραξη των οδών στις οποίες κινούνται), αλλά και η υψηλή κινητικότητα που αυτά παρουσιάζουν είναι ορισμένα επιπλέον χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα δίκτυα αυτά σε σχέση με τα δίκτυα MANET.

3.2 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα των αδόμητων δικτύων οχημάτων – VANETs

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των αδόμητων δικτύων οχημάτων (VANETs) που τα διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα κινητά αδόμητα δίκτυα (MANETs). Παρατίθενται επίσης τα βασικά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής τους και καλύπτονται τα κύρια προβλήματα των δικτύων αυτών. Τέλος, αναφέρονται οι κύριοι δείκτες που υποδεικνύουν την απόδοσή τους.

3.2.1 Από τα MANETs στα VANETs

Στην εποχή μας όλο και περισσότεροι άνθρωποι έχουν τη δυνατότητα να αποκτήσουν ένα αυτοκίνητο, οπότε οι απαιτήσεις για αυξημένη οδική ασφάλεια αποτελεί τα τελευταία χρόνια αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, αλλά και έρευνας. Ένα μέσο που μπορεί να οδηγήσει σε αποτροπή ατυχημάτων είναι η χρήση εφαρμογών ασφαλείας (Safety applications) οι οποίες θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων δικτύων. Παράλληλα, οι ανάγκες για πολυτέλεια και διασκέδαση ακόμη και μέσα στο αυτοκίνητο κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής θεωρούνται τα τελευταία χρόνια δεδομένες. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας στην επεξεργασία δεδομένων, αλλά και στις ασύρματες επικοινωνίες, μπορούν να εξασφαλίσουν μια βάση για εφαρμογές που θα καλύπτουν τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, είτε αφορούν την ασφάλειά τους είτε την ψυχαγωγία τους.

Τα ασύρματα δίκτυα που θα παρέχουν τις υπηρεσίες αυτές θα πρέπει να πληρούν τα εξής χαρακτηριστικά [8]:

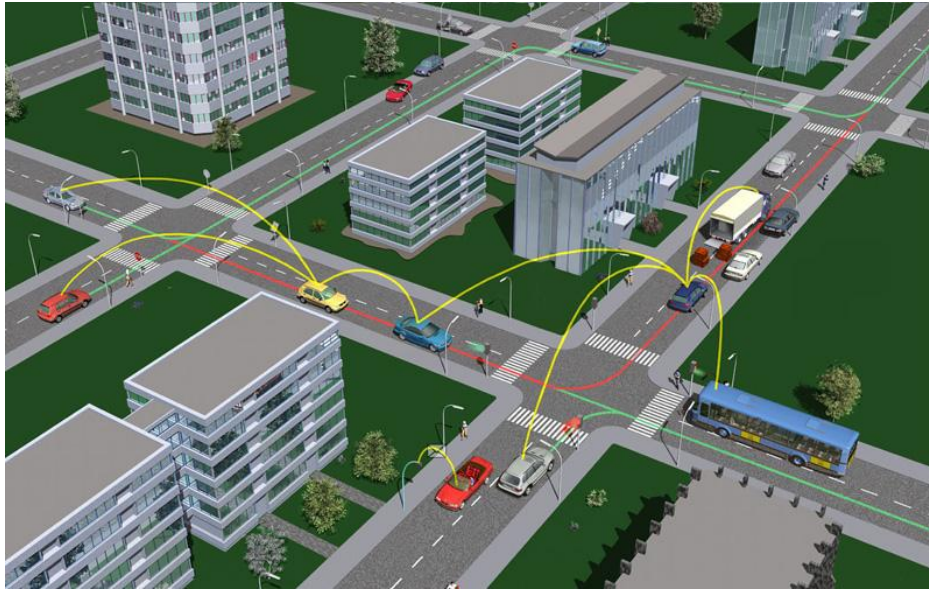
- Να είναι εξ' ολοκλήρου κινητά δίκτυα (mobile networks)
- Να απαιτούν μικρή ή και καθόλου υποδομή

- Να υποστηρίζουν τις παραπάνω εφαρμογές σε μια τοπολογία δυναμική, τυχαία και ανεξαρτήτου κλίμακας
- Να εξασφαλίζεται η επικοινωνία χρηστών οι οποίοι δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους (multihop)

Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στη δημιουργία των *αδόμητων κινητών ασύρματων δικτύων* που ονομάστηκαν MANETs (Mobile Ad-hoc NETWORKs), τα οποία πέρα από τα προαναφερθέντα φέρουν και κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά απαραίτητα για τη φύση τους [8]:

- Υποστηρίζουν πλήρως δυναμική τοπολογία
- Χρησιμοποιούν μικρό εύρος συχνοτήτων για τη λειτουργία τους
- Χρησιμοποιούν συσκευές που έχουν πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος και άρα μεγαλύτερη αυτονομία
- Κάθε χρήστης δεν είναι απλός χρήστης, αλλά δρομολογεί πληροφορίες και σε άλλους χρήστες του δικτύου
- Είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν ακόμη και όταν οι χρήστες είναι ετερόμορφοι, με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις για να υλοποιούν τη λειτουργικότητα των δικτύων.

Τα MANETs από τη φύση τους είναι αυτόνομα δίκτυα και οι κινητοί τους κόμβοι τοποθετούνται σε αεροπλάνα, πλοία, φορτηγά, αυτοκίνητα και σε οποιοδήποτε άλλο μέσο κινείται. Στην ειδική περίπτωση που οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι σε οχήματα τα αδόμητα αυτοοργανούμενα δίκτυα που δημιουργούν ονομάζονται *VANETs* (Vehicular Ad-hoc NETWORKs).



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των αδόμετων δικτύων οχημάτων (VANETs)

3.2.2 Βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των VANETs

Τα VANETs μπορούν να δημιουργηθούν είτε μεταξύ οχημάτων, είτε μεταξύ υποδομής και οχήματος, είτε μεταξύ υποδομής και οχημάτων. Λόγω της φύσης τους έχουν αποτελέσει τη βάση για πολλές εφαρμογές. Τα VANETs έχουν κάποιες ιδιότητες που τα ξεχωρίζουν από τα MANETS [9]:

- Οι κόμβοι του δικτύου (οχήματα) είναι κατεξοχήν κινητοί, με μεγάλη αυτονομία και πολύ μεγάλο χώρο για αποθήκευση δεδομένων.
- Η πιθανότητα κατάτμησης του δικτύου σε άλλα μικρότερα είναι αρκετά μεγάλη
- Η συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των κόμβων δεν είναι εγγυημένη. Γενικά το δίκτυο συνεχώς αλλάζει, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συχνά ασυνέχειες στη διάδοση ιδιαίτερα σε ώρες μη αιχμής.
- Η τοπολογία των δικτύων είναι δυναμική, αλλά όχι τυχαία, καθώς τα οχήματα μπορούν να βρίσκονται μόνο κατά μήκος των οδών.
- Το ζήτημα του εύρους ζώνης και κυρίως της έλλειψης επαρκούς εύρους ζώνης για τις ανάγκες επικοινωνίας είναι σημαντικό εξαιτίας των περιπτώσεων κυκλοφοριακής συμφόρησης, των διασταυρώσεων, αλλά και της ύπαρξης κτιρίων (κυρίως στις αστικές περιοχές) που είναι ανασταλτικοί παράγοντες στις ασύρματες επικοινωνίες.

- Η κλίμακα των δικτύων αυτών μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλη. Για παράδειγμα, υπό κανονικές συνθήκες σε μια περιοχής ακτίνας 1 χιλιομέτρου μπορεί να βρίσκονται 70 οχήματα, ενώ σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης μπορεί να υπάρχουν στην ίδια περιοχή 1.000 οχήματα.

Το γεγονός ότι μπορεί να προβλεφθεί η θέση ενός οχήματος παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η επιλογή σύνδεσης μπορεί να γίνει με πιο αποδοτικό τρόπο για το δίκτυο. Από την άλλη, η γραμμική τοπολογία μειώνει τα πιθανά μονοπάτια διάδοσης των πληροφοριών.

3.2.3 Αρχιτεκτονικές δικτύων VANETs

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου VANET ^[10] εμπίπτει σε μια από τις τρεις παρακάτω κατηγορίες:

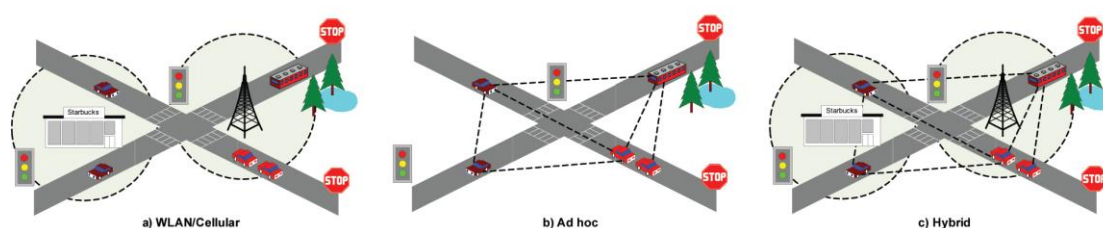
- *αμιγώς κυψελωτή επικοινωνία ή επικοινωνία μέσω ασυρμάτων δικτύων WLAN*: το δίκτυο χρησιμοποιεί κυψελωτό δίκτυο ή ασύρματο δίκτυο για να συνδεθεί στο διαδίκτυο και να διευκολύνει τις οδικές εφαρμογές.

- *αμιγώς αδόμητο αυτοοργανούμενο δίκτυο (ad-hoc)*: επειδή η υποδομή για παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω κυψελωτού δικτύου και τα σημεία παροχής ασύρματου δικτύου με πρόσβαση στο διαδίκτυο (WLAN hot spots) δεν είναι ευρέως εγκατεστημένα, αλλά παρέχονται σε συγκεκριμένες περιοχές, οι κόμβοι μεταπίπτουν στην παρούσα κατηγορία αρχιτεκτονικής και αλληλεπιδρούν μόνο μεταξύ τους. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες σε ένα όχημα μπορεί να γίνουν πολύτιμες προειδοποιώντας άλλα οχήματα σχετικά με την κατάσταση της κυκλοφορίας και βοηθώντας την αστυνομία να επιλύει περιπτώσεις τροχαίων ατυχημάτων. Η αρχιτεκτονική δικτύου χωρίς υποδομή είναι τα αμιγώς αδόμητα ασύρματα δίκτυα, όπου τα οχήματα βγάζουν ζεύξεις και επικοινωνούν με άλλα οχήματα (vehicle-to-vehicle).

- *υβριδικό δίκτυο που συνδυάζει τις δύο παραπάνω αρχιτεκτονικές*: σε περιπτώσεις που υπάρχουν μονάδες επικοινωνίας επί της οδού (Roadside Communication Units), όπως κεραιές κυψελωτών δικτύων ή

σημεία πρόσβασης στο διαδίκτυο (Access Points), και τα οχήματα είναι εφοδιασμένα με αντίστοιχες ασύρματες συσκευές, τα δίκτυα εκμεταλλεύονται την υποδομή που υπάρχει και επικοινωνούν τόσο μεταξύ τους όσο και με την υποδομή. Πολλές εφαρμογές ασφάλειας, υποστήριξης οδήγησης, γενικής πληροφόρησης σε αστικό περιβάλλον, αλλά και ψυχαγωγίας χρησιμοποιούν υπάρχουσες υποδομές, ώστε να αποκτούν πρόσβαση σε δυναμικές και πλούσιες πληροφορίες που βρίσκονται έξω από τα όρια του δικτύου τους και στη συνέχεια τις παρέχουν στους χρήστες-οχήματα μέσω αδόμητων δικτύων ή απευθείας ζεύξης. Η υβριδική αρχιτεκτονική δικτύου VANET με χρήση κυψελωτού δικτύου/WLAN και χρήση αδόμητου δικτύου για την επικοινωνία με πιο απομακρυσμένους κόμβους παρέχει πιο πλούσιες υπηρεσίες, πιο ευρύ περιεχόμενο και παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στο διαμοιρασμό πληροφοριών.

Στην εικόνα 3.2 απεικονίζονται οι παραπάνω τρεις αρχιτεκτονικές δικτύων.



Εικόνα 3.2: Αρχιτεκτονικές δικτύων VANET (a) WLAN / κυψελωτή (b) Ad-hoc (c) υβριδική

3.2.4 Κρίσιμοι παράγοντες στα VANETs - Τρόποι αντιμετώπισης

Στα VANETs βασική πρόκληση αποτελεί η πολύ φτωχή *συνδεσιμότητα των κόμβων*, η οποία προκαλείται από την σποραδική και ασταθή κυκλοφοριακή κίνηση ή ακόμη και από την τυχαία χωροχρονική της διακύμανση. Μπορεί π.χ. ένα όχημα να μην μπορεί να βρει ένα άλλο για να επικοινωνήσει ή π.χ. τα οχήματα να μην είναι εξίσου κατανομημένα στις οδούς. Ακόμη και αν η μέση πυκνότητα είναι μεγάλη, η μη ισορροπημένη κατανομή οχημάτων συνιστά αρνητικό παράγοντα και μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια συνδεσιμότητας. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, αντιλαμβανόμαστε ότι τα VANETs είναι πολύ ειδικά δίκτυα, στα οποία η συνδεσιμότητα δεν είναι εγγυημένη και πραγματοποιείται κατά ωφελιμιστικό τρόπο.

Η συνδεσιμότητα είναι πολύ κρίσιμη παράμετρος για τα VANETs και επηρεάζει τη συνολική απόδοση των δικτύων. Για την καλύτερη συνδεσιμότητα των VANETs έχουν προταθεί διάφορες λύσεις και έχουν να κάνουν με βελτιωμένες τεχνικές μετάδοσης καθώς και με ανοχή αυτών σε καθυστέρηση. Μια άλλη λύση θα μπορούσε να είναι η αυξημένη τοποθέτηση σημείων πρόσβασης (Access Points), αλλά το κόστος θα ήταν απαγορευτικό. Επιπλέον, η επιλογή στο οποίο θα τοποθετούνταν είναι ένα πολύ δύσκολο έργο, επομένως η λύση αυτή στερείται ευελιξίας. Ένας εφικτός τρόπος για βελτίωση της συνδεσιμότητας θα μπορούσε να είναι η αξιοποίηση των σταθμευμένων οχημάτων. Τα σταθμευμένα οχήματα που είναι εφοδιασμένα με πομποδέκτες θα μπορούσαν να παίξουν το ρόλο των ενδιάμεσων κόμβων και δρομολογητών την ώρα που τα ίδια είναι ακίνητα, παίζοντας το ρόλο των RCU (Roadside Communication Units). Σύμφωνα με μελέτες και προσομοιώσεις που έχουν γίνει, έχει αποδειχθεί ότι ακόμη κι ένα μικρό ποσοστό σταθμευμένων οχημάτων να συνεισφέρει με αυτό τον τρόπο στο VANET, τα αποτελέσματα θα είναι αισθητά βελτιωμένα.

Ο χαμηλός βαθμός συνδεσιμότητας μπορεί, υπό συνθήκες, να μην είναι καταστροφικός για το δίκτυο που μελετάμε. Αυτό αφορά εφαρμογές οι οποίες απαιτούν μικρή εμβέλεια επικοινωνίας. Σε μια τέτοια περίπτωση αρκεί να υπάρχει συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται σε μια περιορισμένη περιοχή. Η χειρότερη κατάσταση στην οποία μπορεί να περιέλθει ένας κόμβος είναι να είναι απομονωμένος, δηλαδή να μην έχει επικοινωνία με κανέναν άλλο κόμβο του δικτύου (node isolation).

Δύο εξίσου κρίσιμοι παράγοντες για το δίκτυο είναι οι παρακάτω:

- *το ποσοστό των κόμβων οχημάτων που έχουν δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων*: είναι κυρίως ένας δείκτης για τη κλίμακα εξάπλωσης των εφαρμογών που παρέχονται μέσω ενός VANET και αφορά τη μελέτη και το σχεδιασμό του ασύρματου δικτύου. Το μέτρο αυτό δεν περιέχει αμιγή συγκοινωνιακή πληροφορία, καθώς δεν έχει πληροφορίες για το οδικό δίκτυο παρά μόνο για το ασύρματο δίκτυο.

- το ποσοστό του οδικού δικτύου στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης VANET: αποτελεί το βασικό δείκτη ποιότητας δικτύου που αξιοποιείται από συγκοινωνιακή άποψη.

Για την παροχή υπηρεσιών συγκοινωνιακών εφαρμογών σε ένα VANET κρίνεται απαραίτητη η παράλληλη εξέταση των δύο παραπάνω δεικτών. Είναι φανερό ότι όσο πιο πυκνή είναι η κυκλοφορία σε μια περιοχή, τόσο πιο μεγάλη κάλυψη θα έχει το ασύρματο δίκτυο και τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η λειτουργικότητά του. Γι' αυτό, παράλληλα μελετάται και το ποσοστό διείσδυσης της τεχνολογίας που μετατρέπει ένα αυτοκίνητο σε ασύρματο κόμβο ενός δικτύου VANET. Σε μια ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος μόνο ένα ποσοστό των οχημάτων θα φέρει κατάλληλο εξοπλισμό, το οποίο θα πρέπει να εκτιμηθεί και να αξιολογηθεί ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση περιβάλλοντος και κυκλοφοριακού φόρτου. Σημαντικός παράγοντας είναι και οι δυνατότητες εκπομπής και λήψης του εκάστοτε εξοπλισμού, καθώς όπως έχει φανεί από αντίστοιχες μελέτες οι επιπτώσεις στο δίκτυο είναι τεράστιες.

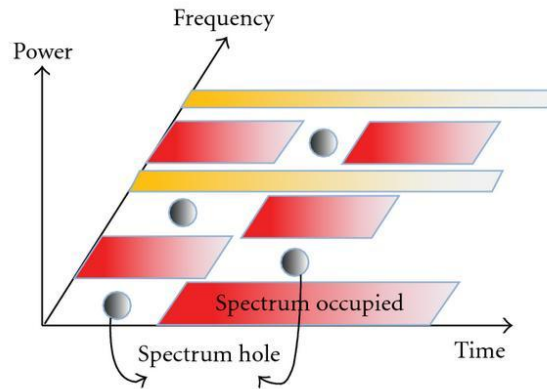
3.3 Ανίχνευση φάσματος σε γνωστικά αδόμητα δίκτυα οχημάτων

Η εξέλιξη των τελευταίων χρόνων στις ασύρματες εφαρμογές οχημάτων συνιστά ένα σημαντικό παράγοντα περιορισμού του διαθέσιμου φάσματος. Τα γνωστικά δίκτυα αποτελούν ένα μηχανισμό που επιτρέπει σε μη εξουσιοδοτημένους γνωστικούς χρήστες να χρησιμοποιούν αδρανείς αχρησιμοποίητες ζώνες φάσματος για περαιτέρω αξιοποίησή του. Η γρήγορη και αξιόπιστη ανίχνευση πρωτεύοντος χρήστη, που ήδη χρησιμοποιεί το διαθέσιμο φάσμα, αποτελεί βασικό συστατικό των γνωστικών δικτύων. Παρ' όλα αυτά, κρυμμένοι σταθμοί βάσης και προβλήματα χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου SNR λόγω εξασθένησης από σκιάσεις θέτουν θεμελιώδεις περιορισμούς στην απόδοση της ανίχνευσης και πρακτικούς περιορισμούς στο σχεδιασμό των γνωστικών δικτύων οχημάτων. Εκτενής μοντελοποίηση πραγματοποιείται για να συγκεκριμενοποιηθούν διάφορα χαρακτηριστικά του καναλιού, ιδιαίτερα ότι έχει να κάνει με την εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών και τις σκιάσεις ^[11]. Η ανίχνευση

φάσματος που βασίζεται σε ανιχνευτή ενέργειας συνιστά βιώσιμη επιλογή για πολλές από-όχημα-σε-όχημα (Vehicle-to-vehicle, V2V) και από-όχημα-σε-επί-της-οδού υποδομή (V2I) επικοινωνίες. Στη συνέχεια αναλύουμε την απόδοση ανίχνευσης φάσματος χρησιμοποιώντας ανιχνευτή ενέργειας σε Nakagami-m σύνθετης εξασθένησης κανάλι με σκιάσεις που ακολουθούν κατανομή τύπου Γάμμα, μελετώντας τόσο χαμηλής όσο και υψηλής κλίμακας εξασθένηση. Τα αποτελέσματα επισημαίνουν *την αξιολογούμενη επίδραση της εξάπλωσης των σκιάσεων και τη σοβαρή επίδραση της εξασθένησης στην απόδοση της ανίχνευσης*. Τα σχετικά αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται για να υποστηρίξουν τα αναλυτικά μας αποτελέσματα για τη μέση πιθανότητα ανίχνευσης. Επιπρόσθετα, αυτά τα αποτελέσματα διερευνώνται και συγκρίνονται με άλλα σύνθετα και κλασσικά κανάλια.

3.3.1 Εισαγωγή

Η διαθεσιμότητα του ασύρματου φάσματος είναι περιορισμένη, και σχεδόν όλες οι ζώνες συχνοτήτων είναι κατανομημένες σε συγκεκριμένους εξουσιοδοτημένους χρήστες. Η υποχρησιμοποίηση ζωνών φάσματος μας οδηγεί στον ορισμό της έννοιας του φασματικού κενού, όπως αυτό ορίζεται στην εικόνα 3.3. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύνολο παραχωρημένων ζωνών συχνοτήτων, που όμως σε συγκεκριμένα χρονικά και γεωγραφικά διαστήματα, η ζώνη αυτή είναι δυνατόν να μην χρησιμοποιείται από τον εκάστοτε αδειοδοτημένο χρήστη. Τα γνωστικά δίκτυα καθίστανται επομένως επιτακτική, αλλά ταυτόχρονα, καινοτόμος ανάγκη για τις μελλοντικές απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων. Μέσω της συνεργατικότητας είναι πολύ πιθανό να βελτιώσουμε την απόδοση του φάσματος και την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών QoS (Quality of service). Τα δίκτυα αυτά βρίσκουν επίσης εφαρμογές στα ευφυή δίκτυα μεταφορών ITS (Intelligent Transportation Networks). Τα γνωστικά ασύρματα συστήματα μεταφοράς οχημάτων σε V2I και V2V επικοινωνίες, καθώς και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενσωματωμένων συσκευών μεταξύ των οχημάτων, θα βοηθήσουν να βελτιωθούν οι διαθέσιμοι ασύρματοι πόροι, η απόδοση ενέργειας, η διαχείριση της κυκλοφορίας δικτύου και τα διαγνωστικά των οχημάτων και θα μειωθούν τα ατυχήματα μέσω της ενημερότητας για την οδική κυκλοφορία και το σχεδιασμό των διαδρομών.

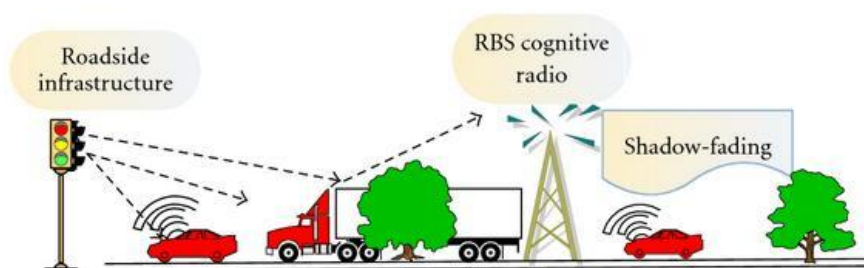


Εικόνα 3.3: έννοια φασματικού κενού (spectrum hole)

Η *ανίχνευση φάσματος* είναι το πρώτο βήμα, καθώς θα πρέπει να εκτελεστεί πριν επιτραπεί σε ένα γνωστικό χρήστη να πλησιάσει ένα εξουσιοδοτημένο κανάλι. Η γρήγορη και αξιόπιστη ανίχνευση του αδειοδοτημένου χρήστη είναι βασικό χαρακτηριστικό των γνωστικών ασύρματων δικτύων. Έτσι, οι γνωστικοί χρήστες είναι αναγκαίο να έχουν τέτοιες γνωστικές ικανότητες παράλληλα με την παρακολούθηση εναλλακτικών φασματικών διαδρομών για πιθανή κένωση ζώνης και ελάχιστη συσσωμάτωση παρεμβολής σε άλλους γνωστικούς χρήστες.

Στις ασύρματες επικοινωνίες, η επίδραση της εξασθένησης υποβαθμίζει τη διάδοση του σήματος. Επίσης, θέτει περιορισμούς στην απόδοση της ανίχνευσης. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές δοκιμές διάδοσης για να διερευνηθούν τα στατιστικά της εξασθένησης λόγω σκιάσεων στα ασύρματα περιβάλλοντα. Σε από-όχημα-επί-της-οδού-υποδομή επικοινωνίες, όπως π.χ. σε ένα αυτόματο σύστημα εισπραξής διοδίων χρειάζεται να αντιμετωπίσει διάφορες παραμέτρους του καναλιού, και ιδιαίτερα τις αποσβέσεις λόγω σκιάσεων και τις εξασθενήσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών. Παρότι, η ενσωματωμένη στο όχημα κεραία διασφαλίζει την απευθείας ζεύξη (line-of-sight, LOS) με τη κεραία τύπου ραδιοφάρου (κεραία τύπου beacon), η εξασθένηση από σκιάσεις λόγω αντανάκλασεων και διασκορπισμού από το κάλυμμα του κινητήρα του ίδιου του αυτοκινήτου ή από άλλα γειτονικά μεγάλα οχήματα είναι ένα κοινό πρόβλημα, όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 3.4. Μοντέλα σύνθετης εξασθένησης, όπως τα Suzuki, Loo, Rice-λογαριθμοκανονικό και Nakagami-λογαριθμοκανονικό και ούτω καθεξής, χρησιμοποιούνται για να παρουσιάσουν συνδυαστικά τα φαινόμενα

πολλαπλών διαδρομών και σκιάσεων στις ασύρματες επικοινωνίες. Όλα βασίζονται σε τυπική λογαριθμοκανονική κατανομή με το μοντέλο σκίασης. Παρ' όλα αυτά, η μέτρηση της ικανότητας και η απόδοση της ανίχνευσης φάσματος και η πρόσβαση υπό πολλαπλές διαδρομές και σκιάσεις, χρησιμοποιώντας λογαριθμοκανονικό κανάλι εξασθένησης είναι σχετικά πολύπλοκες και δεν οδηγούν σε κλειστής μορφής λύσεις. Εναλλακτικά, η κατανομή Γάμμα προτείνεται να μοντελοποιήσει τις παραλλαγές της μέσης ισχύος, η οποία προσεγγίζει την λογαριθμοκανονική κατανομή σε ερμηνεία της εξασθένησης λόγω σκιάσεων [12].



Εικόνα 3.4: σκιάσεις σε χωρικό περιβάλλον

Ο *ανιχνευτής ενέργειας* προτείνεται για την ανίχνευση φάσματος στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα λόγω της απλότητάς του, το χαμηλό υπολογιστικό του κόστος και την ικανότητά του να εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε είδος ντετερμινιστικού σήματος. Στα γνωστικά αδόμητα δίκτυα οχημάτων (VANETs), ο ανιχνευτής ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί για να αυξήσει την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης. Οι αδειοδοτημένοι κάτοχοι τηλεοπτικών ζωνών είναι πρωτεύοντες χρήστες, ενώ τα οχήματα και οι επί των οδών υποδομές σε αυτοκινητοδρόμους και προάστια πόλεων θα δρουν ως δευτερεύοντες χρήστες. Αφού τα μεγαλύτερα τμήματα των τηλεοπτικών ζωνών είναι κενά, οι γνωστικοί χρήστες σε επικοινωνία οχημάτων θα εκτελούν ανίχνευση βασισμένη σε ανιχνευτή ενέργειας, για να βρουν διάφορες αχρησιμοποίητες ζώνες φάσματος. Αυτή η υπόθεση παρέχει οπορτουνιστική πρόσβαση σε φάσμα για ασύρματες V2V και V2I επικοινωνίες. Αυτά, τα βασιζόμενα σε ανιχνευτή ενέργειας γνωστικά συστήματα οχημάτων, οδηγούν σε αυξημένη ασφάλεια και κινητικότητα πληροφορίας για οχήματα στο

δρόμο, που επηρεάζονται από πολλαπλών διαδρομών εξασθενήσεις και σκιάσεις. Επιπρόσθετα, η μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη μοντελοποιείται σαν ένα σήμα με γνωστή ισχύ, και ως εκ τούτου ο ανιχνευτής ενέργειας είναι προαιρετικός. Εκτός από τα γνωστικά ασύρματα δίκτυα, ο ανιχνευτής ενέργειας βρίσκει πολλές εφαρμογές σε εξαιρετικά ευρείας ζώνης τεχνολογίες. Έτσι, η ανάλυση απόδοσης του ανιχνευτή ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα οχημάτων με χρήση ποικίλων ολοκληρωμένων τεχνικών, αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση.

Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος οχημάτων απαιτεί αξιόπιστες, χαμηλής καθυστέρησης ασύρματες μεθόδους επικοινωνίας. Ένα βασικό ζήτημα είναι να ανιχνεύσουμε και να καταλάβουμε τη φύση του ασύρματου καναλιού που ανακύπτει από το ασύρματο δίκτυο οχημάτων. Τα κανάλια εξασθένησης που εξετάζονται είναι κλασσικά λογαριθμοκανονικά και Rayleigh κανάλια εξασθένησης. Παλιότερες έρευνες επικεντρώθηκαν και εξέτασαν τον ανιχνευτή ενέργειας, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα κανάλια εξασθένησης που αποτελούνται από σύνθετες κατανομές. Η έρευνα σε Nakagami-m κανάλι πάνω σε σκιάσεις κατανομής Γάμμα επικεντρώνεται κυρίως στην παράσταση σφάλματος, ενώ η ανίχνευση φάσματος ή η εκτίμηση της πιθανότητας ανίχνευσης είναι ακόμη μια ανεξερεύνητη περιοχή.

Παρακάτω επικεντρωνόμαστε κυρίως στην ανάλυση παράστασης του ανιχνευτή ενέργειας σε δίκτυα οχημάτων υπό την επίδραση Nakagami-m καναλιού εξασθένησης σε σκιάσεις κατανομής Γάμμα.

3.3.2 Ανίχνευση ενέργειας σε τεχνολογίες οχημάτων

Η ανίχνευση ενέργειας είναι μια γρήγορη και αποδοτική ασύμφωνη τεχνική, που ουσιαστικά υπολογίζει τον τρέχον μέσο όρο της ισχύος σήματος πάνω από ένα κατώφλι προκαθορισμένου μήκους φάσματος. Αυτή είναι η πιο απλή μέθοδος ανίχνευσης, η οποία δεν απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση πληροφοριών για τα μεταδιδόμενα σήματα. Επιπρόσθετα, στις επικοινωνίες οχημάτων, η σημαντικότητα του ανιχνευτή ισχύος βρίσκει εφαρμογές σε ευρείας ζώνης τεχνολογίες. Η ανάλυση απόδοσης του ανιχνευτή ισχύος σε κανάλια με διαλείψεις είναι ιδιαίτερα σημαντική και απαιτεί επισταμένη έρευνα.

Ο ανιχνευτής ενέργειας έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί αποδοτική μέθοδο ανίχνευσης για τα γνωστικά δίκτυα. Στα δίκτυα οχημάτων το γνωστικό ασύρματο δίκτυο είναι ένα νέο παράδειγμα που δίνει λύση στο πρόβλημα της έλλειψης εύρους ζώνης, το οποίο θα είναι ένα ζήτημα που θα μας απασχολήσει στο άμεσο μέλλον. Όπως και πολλά άλλα συστήματα γνωστικών ασύρματων δικτύων, τα γνωστικά VANET αντιμετωπίζουν την πρόκληση της ανίχνευσης φάσματος, δηλαδή την ανάγκη των οχημάτων να ανιχνεύσουν την παρουσία ή απουσία αδειοδοτημένων πρωτευόντων χρηστών με υψηλή αξιοπιστία.

Αναλυτικότερα, ο ανιχνευτής ενέργειας έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.2 όπου παρουσιάζεται το μπλοκ-διάγραμμα του και αναλύονται τα επιμέρους τμήματα του, καθώς επίσης αναπτύσσονται όλες οι σχέσεις για τη πιθανότητα ανίχνευσης και την πιθανότητα false-alarm στις οποίες και θα ανατρέξουμε στην παρακάτω ανάλυσή μας.

3.3.3 Μοντέλο σύνθετου καναλιού με εξασθένηση λόγω σκιάσεων

Στην επικοινωνία οχημάτων, ένα σήμα υποτίθεται ότι διέρχεται από ένα μεγάλο αριθμό υλικών που προκαλούν εξασθένηση μέχρι να φτάσει στο προορισμό του. Χάρη στο μικρό εύρος των τυπικών V2V και V2I συνδέσεων, μια πιο ακριβής περιγραφή των διακυμάνσεων δίνεται συχνά από μικρής κλίμακας μοντέλα εξασθένησης. Αυτές οι διακυμάνσεις προκαλούνται από εποικοδομητικές και καταστροφικές παρεμβολές μεταξύ τμημάτων πολλαπλών διαδρομών. Η κατανομή Nakagami μπορεί να μοντελοποιήσει συνθήκες εξασθένησης, όπως τύπου Rayleigh ή Rician στατιστικές, εξαρτώμενη από το αν υπάρχει απευθείας ζεύξη τύπου LOS ή όχι. Οι στατιστικές εξασθένησης για κανάλι V2V διάδοσης, κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης σε προαστιακές περιοχές, μοντελοποιούνται και αναλύονται από την κατανομή Nakagami.

Η PDF $f_x(x)$ της περιβάλλουσας X κάτω από συνθήκες εξασθένησης Nakagami περιγράφει το μέγεθος της ληφθείσας περιβάλλουσας από τις κατανομές και δίνεται από τη σχέση:

$$f_x(x) = \frac{2m^m x^{2m-1} e^{-(m/p)x^2}}{\Gamma(m)p^m}, x \geq 0.5 \quad (3.1)$$

Όπου $\Gamma(\cdot)$ είναι η κατανομή Γάμμα και m είναι η παράμετρος εξασθένησης Nakagami. $p = E[x^2]$ είναι η μέση ισχύς του ληφθέντος σήματος με την $E[\cdot]$ να αναπαριστά το στατιστικό μέσο όρο του διαχειριστή.

Η μέση ισχύς p είναι ντετερμινιστικό μέγεθος στην περίπτωση που απουσιάζουν οι σκιάσεις. Παρ' όλα αυτά, οι παραλλαγές των V2V και V2I καναλιών, λόγω εμποδίων και μεγάλου μεγέθους οχημάτων κοκ, εμφανίζουν επιδράσεις σκιάσεων. Έτσι, η μέση ισχύς του σήματος γίνεται τυχαία και μπορεί να γραφτεί ...:

$$f_{x|p}(x|p) = \frac{2m^m x^{2m-1} e^{-(m/p)x^2}}{\Gamma(m)p^m}, x, p > 0 \quad (3.2)$$

Η σύνθετη PDF με εξασθένηση και σκίαση ως εκ τούτου γράφεται:

$$f_X(x) = \int_0^\infty f_{x|p}(x|p)f_P(p)dp \quad (3.3)$$

Όπου $f_P(p)$ είναι η PDF της μέσης ισχύος λόγω σκιάσεων. Εάν η $f_P(p)$ είναι λογαριθμοκανονικά κατανεμημένη και $m \neq 1$ η $f_X(x)$ θα είναι Nakagami-λογαριθμοκανονική σύνθετη κατανομή. Παρ' όλα αυτά, λόγω της ενυπάρχουσας αναλυτικής πολυπλοκότητας στο χειρισμό συσχετιζόμενων λογαριθμοκανονικών τυχαίων μεταβλητών, είναι συχνά άβολη για περαιτέρω μετρήσεις απόδοσης και δεν οδηγεί σε μια κλειστής μορφής λύση.

3.3.3.1 Κατανομή Γάμμα

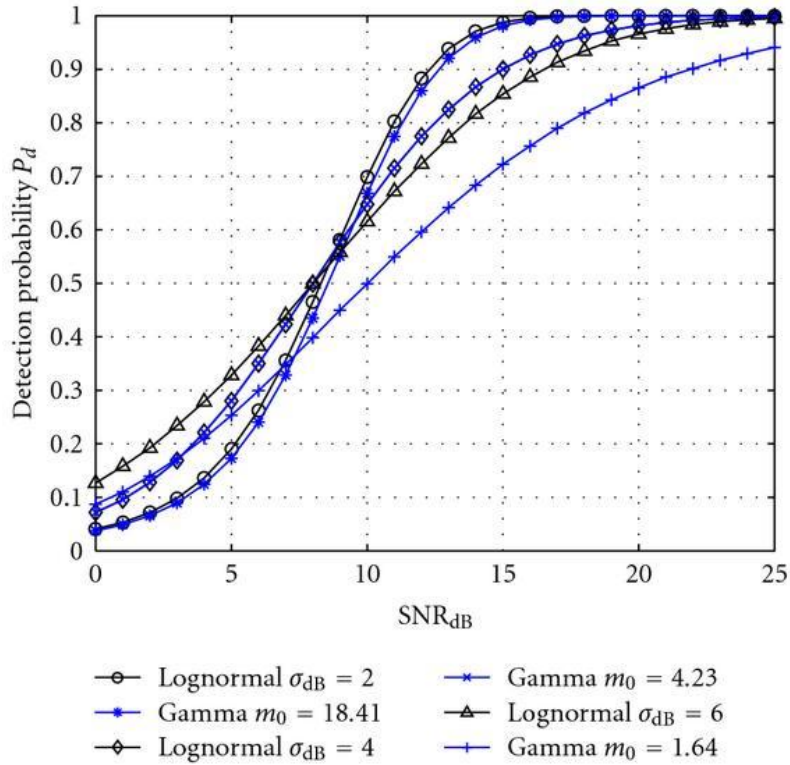
Χρησιμοποιείται ως εναλλακτική της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Η λογαριθμοκανονική κατανομή γενικά χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει παραλλαγές μέσης ισχύος. Εμπειρικές έρευνες έχουν δείξει ότι η p έχει μια λογαριθμοκανονική PDF, η οποία είναι:

$$f_P(p) = \frac{1}{p\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(20\log p - \mu_{dBm})^2}{2\sigma^2}\right), p > 0 \quad (3.4)$$

Όπου σ είναι η σταθερή απόκλιση για σκιάσεις, με $\sigma \rightarrow 0$ να αντιστοιχεί σε μηδενική σκίαση. Η τοπική μέση ισχύς p διακυμνείται γύρω από μια σταθερή περιοχή μ_{dBm} , όπου $\mu_{dBm} = 30 + 10E[\text{Log}_{10}p]$. Το σύνθετο κανάλι εξασθένησης με PDF τύπου Nakagami και λογαριθμοκανονικά κατανεμημένη ισχύ εμπλέκει περίπλοκες ολοκληρωτικές μορφές και επίσης, από παραπάνω αναφορές, η τοποθέτηση αυτής της PDF σε

πραγματικά δεδομένα σε επικοινωνίες οχημάτων είναι δύσκολη διαδικασία. Ως εκ τούτου, μια κλειστής μορφής έκφραση για διάφορους υπολογισμούς του συστήματος συνιστά μια πρόκληση. Βασιζόμενοι σε θεωρητικά αποτελέσματα και σε μετρήσιμα δεδομένα, ένα εναλλακτικό υποκατάστατο είναι η 2-παραμέτρων κατανομή Γάμμα, η οποία προσεγγίζει διάφορες PDFs και δικαιολογεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή.

Λογαριθμοκανονικές και Γάμμα PDFs εναλλάσσονται προσομοιώνοντας πραγματικά δεδομένα όταν το σ_{dB} δεν είναι μεγάλο, δηλαδή όταν αυτό είναι ≤ 6 . Γι' αυτό συγκρίναμε τις παραλλαγές της μέσης πιθανότητας ανίχνευσης πάνω σε Γάμμα και λογαριθμοκανονικά κανάλια εξασθένησης στην εικόνα 3.5 θέτοντας παράμετρο σκίασης Γάμμα m_0 με αντίστοιχες λογαριθμοκανονικές διαδόσεις σ_{dB} . Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα προσομοίωσης ότι για $\sigma_{dB} < 6$, η PDF τύπου Γάμμα μοιάζει με τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Επιπρόσθετα, όταν το πλάτος σήματος ακολουθεί Nakagami- m κατανομή, η PDF του σηματοθορυβικού λόγου γ , η οποία είναι το άθροισμα n ανεξάρτητων και πανομοιότυπα κατανεμημένων εκθετικών τυχαίων μεταβλητών, ακολουθεί επίσης κατανομή Γάμμα.



Εικόνα 3.5: Μια σύγκριση διαφόρων μέσων πιθανοτήτων ανίχνευσης (P_d) ανάμεσα σε λογαριθμοκανονική σ_{dB} διάδοση και Γάμμα κατανομές σκίασης με τιμές παραμέτρων m_0 , διατηρώντας το προϊόν χρόνου εύρους ζώνης $u = 5$ και τη πιθανότητα false alarm $P_f = 0,01$.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $P = X^2$, το λαμβανόμενο αποτέλεσμα θα είναι ότι η PDF του P μπορεί να εκφραστεί ως:

$$f_P(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi p \sigma^2}} \exp\left(-\frac{p}{\sigma^2}\right), p \geq 0 \quad (3.5)$$

Αν το P ορίζεται ως $P = \sum_{i=1}^n X_i^2$, όπου $i = 1, 2, \dots, n$ είναι στατιστικά ανεξάρτητες και πανομοιότυπα κατανομημένες Gaussian τυχαίες μεταβλητές με μηδενικό μέσο και διακύμανση σ^2 . Η χαρακτηριστική λειτουργία του P παριστάνεται ως:

$$\varphi_P(jv) = \frac{1}{(1 - j2v\sigma^2)^{n/2}} \quad (3.6)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός αυτής της χαρακτηριστικής λειτουργίας οδηγεί σε κεντρική κατανομή χ^2 (chi-square distribution) με n βαθμούς ελευθερίας, που είναι:

$$f_P(p) = \frac{p^{(n/2)-1}}{\sigma^{n/2} 2^{n/2} \Gamma(n/2)} \exp\left(-\frac{p}{2\sigma^2}\right), p \geq 0 \quad (3.7)$$

Αντικαθιστώντας $p_0 = 2\sigma^2$ και $m_0 = n/2$ απλοποιείται σε Γάμμα PDF ως εξής:

$$f_p(p) = \frac{p^{m_0-1}}{\Gamma(m_0)p_0^{m_0}} \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right) \quad (3.8)$$

Όπου p_0 είναι το μέτρο της μέσης ισχύος και m_0 είναι η σειρά της Γάμμα PDF, που αντικατοπτρίζει την ένταση των σκιάσεων. Αλλάζοντας το m_0 , μπορούν να ληφθούν διάφορες κατανομές, όπως η λογαριθμοκανονική, η Gaussian κ.α. Οι παράμετροι m_0 και p_0 της κατανομής Γάμμα σχετίζονται με το λογαριθμικό μέσο και την διακύμανση με τις σχέσεις: $m_0 = 1/(e^{\sigma^2} - 1)$ και $p_0 = \mu\sqrt{(m_0 + 1)/m_0}$, όπου το $\sigma = \sigma_{dB}/8,686$ και το μ ορίζονται ως η σταθερή απόκλιση και η μέση ισχύς συσχετισμένες με την αντίστοιχη λογαριθμοκανονική PDF. Οι ισοδύναμες τιμές του σ_{dB} και του m_0 βρίσκονται αναλόγως και υποδεικνύονται από τον παρακάτω πίνακα:

Table 1: Gamma m_0 and lognormal σ_{dB} values relationships.

σ_{dB}	2	4	6
m_0	18.41	4.23	1.64

Εικόνα 3.6: σχέσεις τιμών Γάμμα m_0 και λογαριθμοκανονικού σ_{dB} .

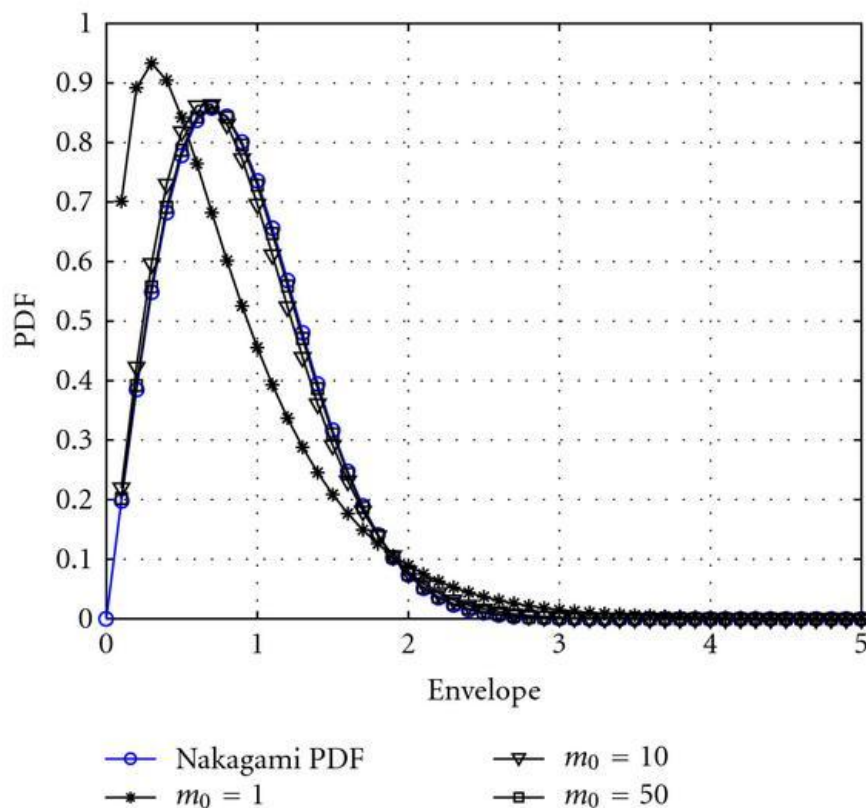
3.3.3.2 Nakagami-m κατανομή εξασθένησης σε Γάμμα σκιάσεις για πολλαπλές διαδρομές και σκιάσεις

Στη διάδοση ασύρματου δικτύου, οι εξασθενήσεις λόγω σκιάσεων και πολλαπλών διαδρομών εμφανίζονται συγχρόνως. Αντιστρόφως, το μοντέλο καναλιού που χρησιμοποιείται πιο συχνά στις επικοινωνίες οχημάτων δεν διακρίνει τα 2 συμπτώματα. Η κατανομή Nakagami-m σε Γάμμα σκιάσεις παρέχει αναλυτικούς περιορισμούς, για να διευκολύνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.8) και (3.2) στην (3.3) ο συνολικός envelope των X συνίσταται τόσο από πολλαπλές διαδρομές όσο και από σκιάσεις λαμβάνεται στην (3.9) ως:

$$f_X(x) = \int_0^\infty f_{X|P}(x|p)f_p(p)dp = \frac{2c}{\Gamma(m_0)\Gamma(m)} \left(\frac{cx}{2}\right)^{m_0+m+1} K_{m_0-m}(cx), \quad x > 0 \quad (3.9)$$

Όπου $c = 2\sqrt{m/p_0}$ και $K_{m_0-m}(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel τάξεως $m_0 - m$.

Οι αριθμητικά εκτιμημένες PDFs της σύνθετης και Nakagami εξασθένησης παριστάνονται στην εικόνα 3.7. Αποδεικνύεται ότι, όταν η επίδραση των σκιάσεων μειώνεται σε μεγάλη τιμή του $m_0 = 50$, η σύνθετη PDF επικαλύπτει επακριβώς την Nakagami PDF και παριστάνει τόσο τις επιδράσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών όσο και λόγω σκιάσεων.



Εικόνα 3.7: Η σύνθετη PDF πάνω σε διάφορες παραμέτρους σκίασης m_0 το οποίο αντιστοιχεί σε Nakagami- m που διατηρεί $m = 0,8$.

3.3.4 Στατιστικά σύνθετου καναλιού εξασθένησης

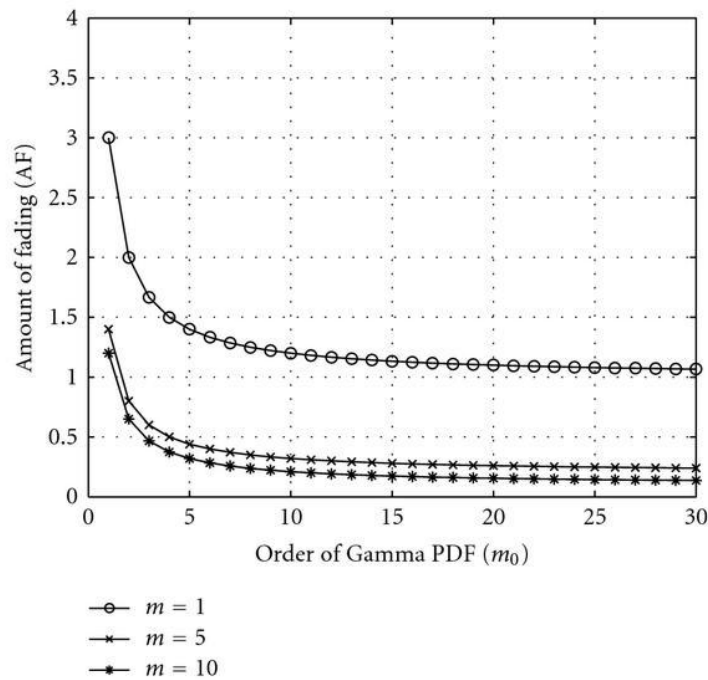
Τα στιγμιότυπα της σύνθετης περιβάλλουσας PDF εκφράζονται ως:

$$E_c[X^t] = \frac{\Gamma(m_0+t/2)\Gamma(m+t/2)}{\Gamma(m_0)\Gamma(m)} \left(\frac{2}{c}\right)^t \quad (3.10)$$

Από το παραπάνω τύπο, το ποσοστό αποσβέσεως (amount of fading - AF) ορίζεται ως A_f και δίνεται από τον τύπο:

$$A_f = \frac{\text{variance}[X^2]}{E[X^2]^2} = \frac{mm_0 + m^2m_0 + mm_0^2}{m^2m_0^2} > 0 \quad (3.11)$$

Η τιμή του A_f ποικίλει από μηδέν μέχρι άπειρο, που αντιστοιχεί σε μηδενική εξασθένηση μέχρι σοβαρές εξασθενήσεις πολλαπλών διαδρομών και σκιάσεις. Χρησιμοποιώντας την (3.11), οι καμπύλες AF προσομοιώνονται σε ένα εύρος τιμών m_0 για διάφορες τιμές m , όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.8. Βρίσκεται ότι, το AF είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος των αποσβέσεων, και γίνεται ανεξάρτητο για τιμές $m_0 > 5$, το οποίο ισοδυναμεί σε διάδοση $3,71\sigma_{dB}$.



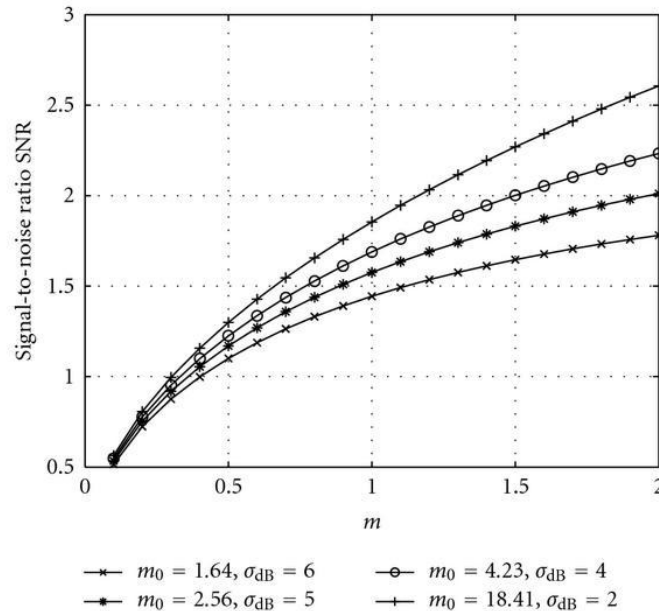
Εικόνα 3.8: Ποσοστό εξασθένησης συναρτήσει της παράμετρου σκιάσεων m_0 , ενώ η παράμετρος έντασης εξασθένησης m λαμβάνει διαφορετικές τιμές.

Για μια δοσμένη αβεβαιότητα θορύβου, υπάρχουν όρια σηματοθορυβικού λόγου SNR, κάτω από τα οποία ο ανιχνευτής ενέργειας δεν μπορεί να παρατηρήσει την ύπαρξη άγνωστων ντετερμινιστικών σημάτων. Εξαιτίας των σκιάσεων και των επιδράσεων εξασθένησης, είναι πολύ πιθανό ο χρήστης να υπόκειται σε συνθήκες πολύ χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου SNR και ως εκ τούτου, η απόδοση του μειώνεται. Για βελτίωση της ανίχνευσης σε τέτοιες καταστάσεις, οι τιμές του SNR του καναλιού που σχετίζονται με τη συνθήκες εξασθένησης λόγω σκιάσεων πρέπει να παρακολουθούνται προσεκτικά. Ο σηματοθορυβικός

λόγος της σύνθετης περιβάλλουσας δίνεται με εφαρμογή των σχέσεων 3.10 και 3.11 ως εξής:

$$SNR = \frac{1}{\sqrt{m_0 m [\Gamma(m_0) \Gamma(m) / \Gamma(m_0 + 0,5) \Gamma(m + 0,5)]^2 - 1}} \quad (3.12)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.12, σχεδιάζουμε τις διάφορες παραλλαγές σηματοθορυβικού λόγου SNR σαν συνάρτηση του δείκτη έντασης εξασθένησης m , όπως απεικονίζονται στην εικόνα 3.9. Παρατηρείται ότι υψηλότερες τιμές του m_0 αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές SNR. Παρ' όλα αυτά, για $m > 0,5$, η αλλαγή στον SNR σταδιακά φθίνει. Όταν ο χρήστης βρίσκεται σε περιβάλλον εξασθένησης λόγω σκιάσεων με χαμηλό SNR, το κατώφλι ανίχνευσης λ του ανιχνευτή ενέργειας θα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα.



Εικόνα 3.9: Σηματοθορυβικός λόγος SNR σύνθετου καναλιού εξασθένησης ως συνάρτηση της παραμέτρου σκιάσεων m_0 για διάφορες τιμές της παραμέτρου έντασης εξασθένησης m .

3.3.5 Μέση πιθανότητα ανίχνευσης σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης

Η μέση πιθανότητα ανίχνευσης \bar{P}_d σε στατιστικά εξασθένησης προσδιορίζεται ως:

$$\bar{P}_d = \int_0^\infty Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (3.13)$$

Όπου $f_\gamma(\gamma)$ είναι η PDF του σηματοθορυβικού λόγου SNR υπό εξασθένηση λόγω σκιάσεων.

Όταν η περιβάλλουσα του ληφθέντος σήματος, λόγω της εξασθένησης από σκιάσεις, μοντελοποιείται σαν κατανομή Nakagami, η PDF του SNR μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν κατανομή Γάμμα:

$$f_{\gamma|\bar{\gamma}}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m) \bar{\gamma}^m} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0, m \geq 0,5 \quad (3.14)$$

Όπου $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα και m είναι παράμετρος εξασθένησης Nakagami. $\bar{\gamma} = E[h^2 E_b / N_{01}]$ είναι ο μέσος SNR ή η μέση ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, που είναι τυχαία, ως εκ τούτου κάνει εμφανή την ύπαρξη σκιάσεων. Η 2-παραμέτρων Γάμμα κατανομή, η οποία συνιστά μια καλή δικαιολόγηση της λογαριθμοκανονικής PDF ορίζεται ως:

$$f_{\bar{\gamma}_0}(\gamma) = \frac{m_0^{m_0} \gamma^{m_0-1}}{\Gamma(m_0) \bar{\gamma}_0^{m_0}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_0}\right) \quad (3.15)$$

Όπου $\bar{\gamma}_0$ είναι το μέτρο της μέσης ισχύος και εξαρτάται από το μέσο SNR $\bar{\gamma}$, m_0 είναι η σειρά της PDF τύπου Γάμμα και μέτρο των σκιάσεων του καναλιού. Η PDF λαμβανόμενου SNR σε συνδυασμό με τις εξασθενήσεις λόγω σκιάσεων δίνεται από:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \int_0^{\infty} f(\gamma|\bar{\gamma}) f_p(p) \quad (3.16)$$

Αντικαθιστώντας την (3.14) και την 2-παραμέτρων PDF τύπου Γάμμα της (3.15) στην (3.16) και αλλάζοντας τις μεταβλητές $f_{\gamma}(\gamma)$, η PDF του λαμβανόμενου SNR σε συνδυασμό με το περιβάλλον εξασθένησης λόγω σκιάσεων, λαμβάνεται από τη σχέση:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{2}{\Gamma(m)\Gamma(m_0)} \left(\frac{c_0}{2}\right)^{m+m_0} \gamma^{((m+m_0)/2)-1} K_{m_0-m}(c_0\sqrt{\gamma}), \gamma > 0 \quad (3.17)$$

Όπου $c_0 = 2\sqrt{mm_0/\bar{\gamma}_0}$ είναι η παράμετρος κλίμακας συσχετισμένη με το $\bar{\gamma}$ και $K_{m_0-m}(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel της σειράς $m_0 - m$.

Η πιθανότητα ανίχνευσης σε περιβάλλον εξασθένησης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας πολύπλοκους ολοκληρωτικούς τύπους με τη συμμετοχή της συνάρτησης Bessel. Επιπρόσθετα, αυτά τα ολοκληρώματα γενικά δεν υπολογίζονται ως κλειστής μορφής με τα διαθέσιμα ολοκληρωτικά αποτελέσματα. Για να αποφύγουμε τέτοιες μαθηματικές δυσκολίες και να υπολογίσουμε ολοκληρώματα που περιέχουν τη συνάρτηση Marcum-Q με εκθετικές συναρτήσεις και

συναρτήσεις Bessel με περίπλοκες λύσεις, χρησιμοποιούνται εναλλακτικές σειρές αναπαράστασης της συνάρτησης Marcum-Q.

Η γενικευμένη συνάρτηση Marcum-Q $Q_u(a, b)$ σε εναλλακτικές σειρές αναπαράστασης για $\sqrt{2\gamma} > \sqrt{\lambda} \geq 0$ δίνεται από:

$$Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) = 1 - e^{-(2\gamma+\lambda)/2} \sum_{n=u}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{2\gamma}\right)^{n/2} I_n(\sqrt{2\lambda\gamma}) \quad (3.18)$$

Όπου $I_n(\cdot)$ είναι η n σειρά της τροποποιημένης συνάρτησης Bessel 1^{ου} είδους. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.18) και (3.17) στην (3.13) η μέση πιθανότητα ανίχνευσης σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης P_d μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{P}_d &= \int_0^{\infty} (1 - e^{-(2\gamma+\lambda)/2}) \sum_{n=u}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{2\gamma}\right)^{n/2} I_n(\sqrt{2\lambda\gamma}) \\ &\times \frac{2}{\Gamma(m)\Gamma(m_0)} \left(\frac{c_0}{2}\right)^{m+m_0} \gamma^{((m+m_0)/2)-1} K_{m_0-m}(c_0\sqrt{\gamma}) d\gamma \quad (3.19) \end{aligned}$$

Δεδομένου ότι $\int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma = 1$, η σχέση (3.19) απλοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{P}_d &= 1 - \frac{2e^{-\lambda/2}}{\Gamma(m)\Gamma(m_0)} \left(\frac{c_0}{2}\right)^{m+m_0} \\ &\sum_{n=u}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^{n/2} \times \int_0^{\infty} e^{-\gamma} \gamma^{(-n+m_0+m)/2-1} I_n(\sqrt{2\lambda\gamma}) K_{m_0-m}(c_0\sqrt{\gamma}) d\gamma \quad (3.20) \end{aligned}$$

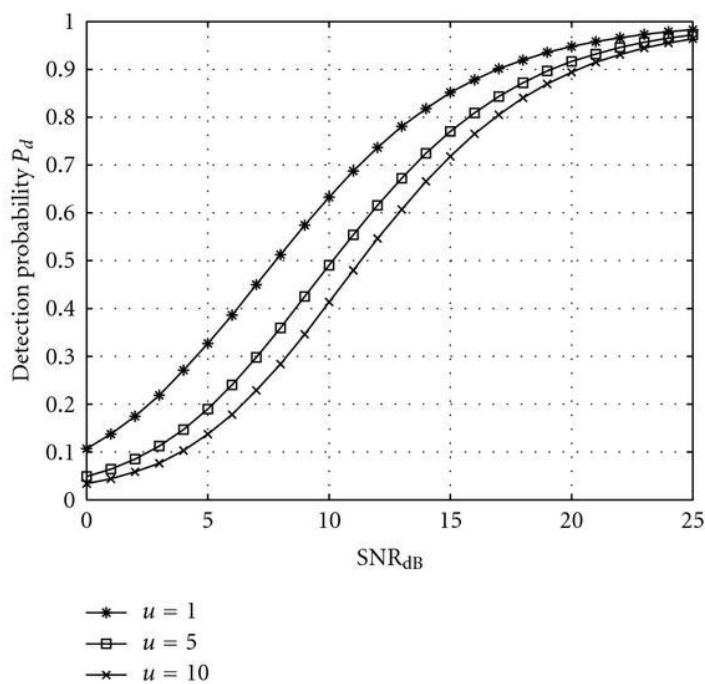
Παρ'όλα αυτά, το ολοκληρωτικό προϊόν $I_n(\cdot)$ των συναρτήσεων Bessel και το $K_{m_0-m}(\cdot)$ με εκθέτες και δυνάμεις δεν οδηγούν σε μια κλειστή μορφή, γι' αυτό κάνουμε αριθμητική εκτίμηση και συγκρίνουμε αυτά που βρίσκουμε με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας.

3.3.6 Αριθμητικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης

Η απόδοση του ανιχνευτή ενέργειας σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης για επικοινωνίες οχημάτων παρουσιάζεται συναρτήσει με την πιθανότητα ανίχνευσης \bar{P}_d και τις συμπληρωματικές χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του δέκτη (ROC), το οποίο είναι P_m έναντι P_f . Αλλάζοντας το μέσο όρο του σηματοθορυβικού λόγου SNR $\bar{\gamma}_0$, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές, όπως το κατώφλι λ , το προϊόν χρόνου-εύρους ζώνης u , το μέτρο εξασθένησης m και τη παράμετρο σκίασης m_0 , παρουσιάζεται η συμπεριφορά της πιθανότητας \bar{P}_d . Στη δεύτερη υπόθεση, η απόδοση του ανιχνευτή

εκτιμάται μέσω των συμπληρωματικών ROC καμπυλών, όπου είναι \overline{P}_m έναντι P_f με $\overline{P}_m = 1 - \overline{P}_d$.

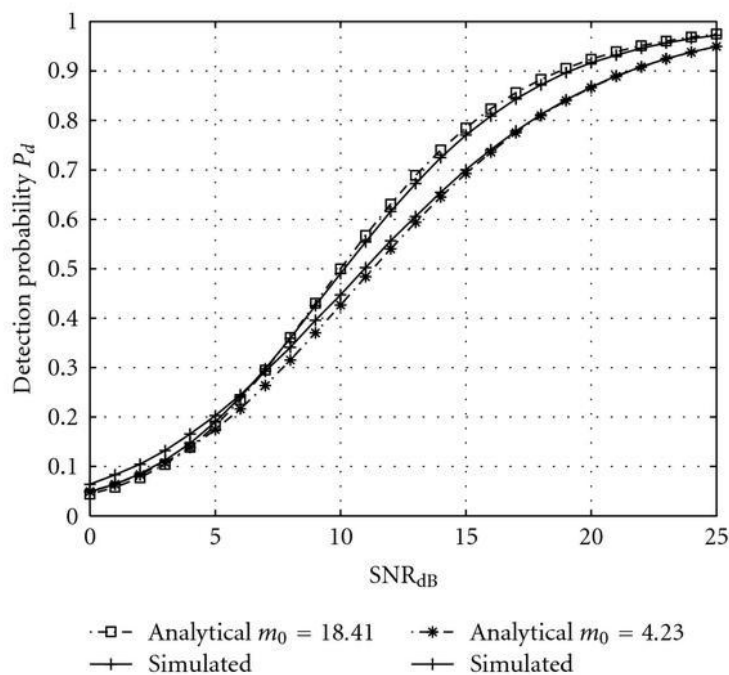
Ο χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς του ανιχνευτή σε διάφορες παραμέτρους είναι σημαντικός, προκειμένου να προσαρμόσουμε πολυάριθμα περιβάλλοντα οχημάτων. Το κατώφλι του ανιχνευτή λ υπολογίζεται για $P_f = 0,01$, λαμβάνοντας $u = 1,5,10$ όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10. Παρατηρείται ότι η απόδοση του ανιχνευτή με μικρότερο αριθμό δειγμάτων (χαμηλότερο u) για ενέργεια E_s είναι καλύτερη αν συγκριθεί με αυτή που λαμβάνεται από μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων. Το κατώφλι του ανιχνευτή λ βρίσκεται για μια καθορισμένη P_f . Μια αύξηση στη τιμή του κατωφλιού του ανιχνευτή, το οποίο σημαίνει μεγαλύτερο u , οδηγεί σε μείωση τόσο στις πιθανότητες false-alarm όσο και στις πιθανότητες ανίχνευσης.



Εικόνα 3.10: Παραλλαγές μέσης πιθανότητας ανίχνευσης (\overline{P}_d) για διάφορες τιμές προϊόντος χρόνου-εύρους ζώνης σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης με πιθανότητα false-alarm $P_f = 0,01$.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.20) η μέση \overline{P}_d για μεταβαλλόμενο $\overline{\gamma}_0$ υπολογίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica 7. Η εικόνα 3.11 απεικονίζει τις παραλλαγές της μέσης P_d σε σύνθετο κανάλι εξασθένησης για $m_0 = 18,41$ και $4,23$ που αντιστοιχούν σε $\sigma_{dB} = 2$ και 6 αντίστοιχα. Τόσο τα αναλυτικά αποτελέσματα όσο και τα αποτελέσματα

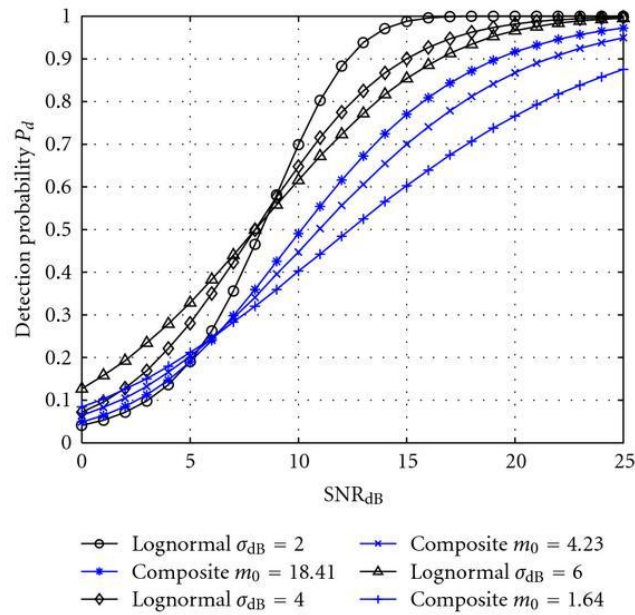
προσομοίωσης δείχνουν ικανοποιητική απόδοση ανιχνευτή για υψηλό μέσο σηματοθορυβικό λόγο $SNR > 10dB$, και επίσης υψηλότερες τιμές του m_0 αντανακλούν καλύτερη ανίχνευση σε συγκεκριμένο SNR_{dB} . Παρ' όλα αυτά σε περιοχή χαμηλού SNR η επιδείνωση της απόδοσης μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας χωρική ποικιλομορφία και κατάλληλες συνδυαστικές μεθόδους.



Εικόνα 3.11: Μέση πιθανότητα ανίχνευσης (\bar{P}_d) τόσο για αναλυτικά αποτελέσματα όσο και αποτελέσματα προσομοίωσης θεωρώντας $m = 1$, $u = 5$ και $P_f = 0,01$.

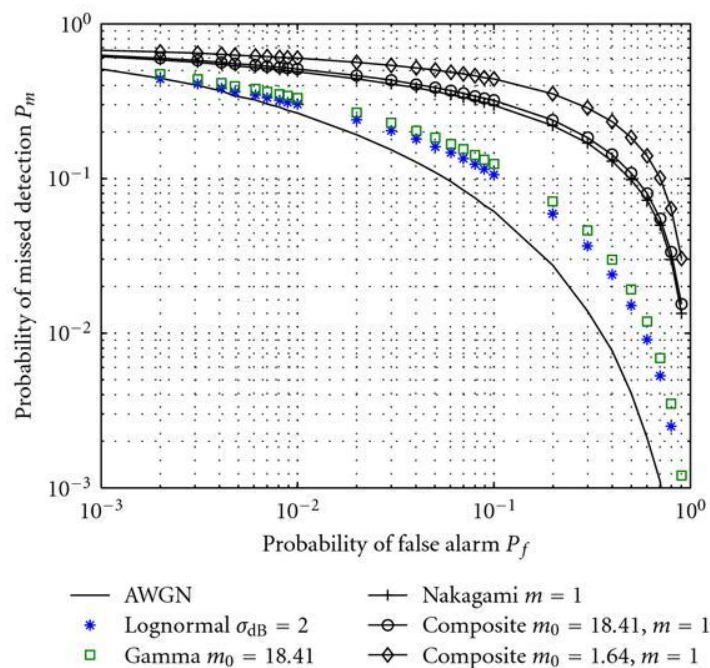
Η απόδοση ανίχνευσης σύνθετου καναλιού εξασθένησης που αφορά τόσο τις επιδράσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών όσο και τις επιδράσεις λόγω σκιάσεων, για διάφορες τιμές του m_0 απεικονίζεται στην εικόνα 3.12. Καλύτερη ανίχνευση έχουμε όταν η επίδραση των σκιάσεων ελαχιστοποιείται σε υψηλότερες τιμές του m_0 , διατηρώντας τα χαρακτηριστικά εξασθένησης $m = 1$ αμετάβλητα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται σε χαμηλότερες τιμές των λογαριθμοκανονικών στατιστικών σκίασης $\sigma_{dB} \leq 2$ αναφερόμενο σε φως που μετριάζει το ενδεχόμενο σκίασης. Ενώ για βαρύτερα σκιασμένες περιοχές, όπου $\sigma_{dB} > 6$, το να πετύχουμε μια καλή προσαρμογή δεν είναι εφικτό. Παρ' όλα αυτά, ο δείκτης έντασης εξασθένησης $m > 1$ συμβάλει ώστε το σύνθετο κανάλι να ξεπεράσει τις σκιάσεις και μπορεί να υπάρξει

απευθείας ζεύξης επικοινωνία (τύπου LOS), που είναι συνήθης στα δίκτυα οχημάτων.



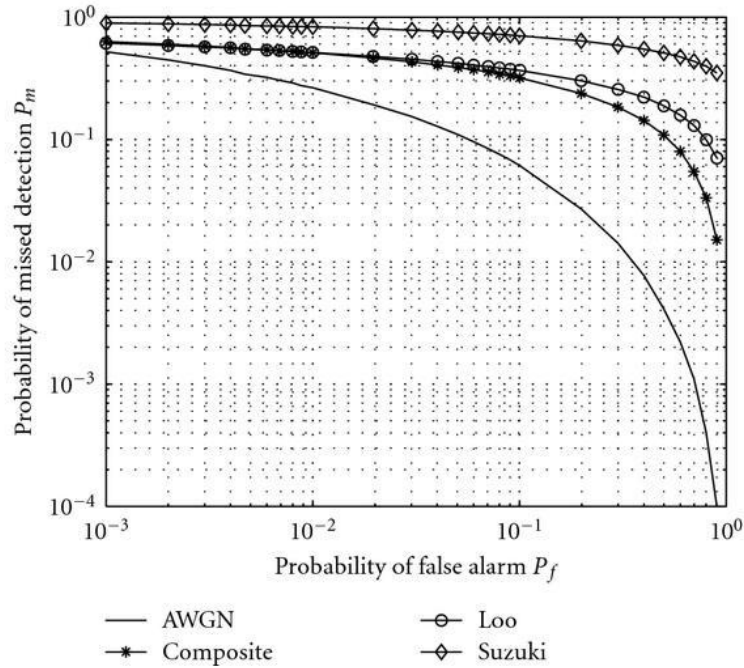
Εικόνα 3.12: Μια σύγκριση της μέσης πιθανότητας ανίχνευσης

Το διάγραμμα των συμπληρωματικών ROC (P_m έναντι P_f) για σύνθετο κανάλι σχεδιάζεται σε αντιπαράβολή με τα τύπου Γάμμα, τα λογαριθμοκανονικά και τα τύπου Nakagami κανάλια, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.13. Τόσο τα τύπου Γάμμα όσο και τα λογαριθμοκανονικά παρέχουν ίδια χαρακτηριστικά ανίχνευσης για τις επιλεγμένες παραμέτρους. Είναι προφανές ότι, το σύνθετο κανάλι εξασθένησης προβάλλει τις συνδυασμένες ιδιότητες εξασθένησης Γάμμα και Nakagami-m κανάλι εξασθένησης.



Εικόνα 3.13: Συμπληρωματικές ROC (P_m έναντι P_f) σύνθετου καναλιού εξασθένησης σε διαφορετικές τιμές παραμέτρου σκιάσεων m_0 σε σύγκριση με Nakagami- m κανάλι εξασθένησης. Η καμπύλη AWGN παρέχεται ως καμπύλη αναφοράς

Στην εικόνα 3.14, η καμπύλη ROC της Nakagami- m σύνθετης εξασθένησης σε σκιάσεις τύπου Γάμμα υποδεικνύει ξεκάθαρα μια ουσιαστική βελτίωση απόδοσης ανίχνευσης σε αντίθεση με τα κανάλια ανάμεικτης Loο και Suzuki κατανομής, όπου το k αναπαριστά το φέροντα λόγω πολλαπλών διαδρομών σε κατανομή Loο. Άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του πολύπλευρου Nakagami- m σύνθετου καναλιού με σκιάσεις τύπου Γάμμα είναι ότι έχει ελάχιστο σύνολο παραμέτρων, όπως συνοψίζεται στην εικόνα 3.15 μέσω της οποίας προσεγγίζονται ποικίλα περιβάλλοντα εξασθένησης λόγω σκιάσεων.



Εικόνα 3.14: Συμπληρωματικές ROC (P_m έναντι P_f) καναλιού εξασθένησης διαφορετικών ανάμεικτων κατανομών με παράγοντα σκίασης $\sigma_{dB} = 2$ και παράμετρος έντασης εξασθένησης $k = m = 1$. Η καμπύλη AWGN παρατίθεται ως καμπύλη αναφοράς.

Channel/parameter	m	m_0	σ_{dB}	k	μ_{dB}
Composite	1	18.41	—	—	—
Loo	—	—	2	5	-6
Suzuki	—	—	2	—	-6

Εικόνα 3.15: Παράμετροι εισόδου διαφόρων κατανομών εξασθένησης λόγω σκιάσεων

3.3.7 Συμπεράσματα

Στη διαδικασία τυποποίησης των δικτύων οχημάτων, τα μοντέλα καναλιών απαιτείται να αξιολογούν και να διαλέγουν την κατάλληλη διαφοροποίηση φυσικού στρώματος και τα κατάλληλα συστήματα κωδικοποίησης. Παρουσιάσαμε την ανίχνευση φάσματος χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή ενέργειας πάνω σε Nakagami- m μοντέλο σύνθετης εξασθένησης σε Γάμμα σκιάσεις. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιείται αποτελεσματικά στα δίκτυα οχημάτων και να βοηθάει στη καταπολέμηση της σπανιότητας του φάσματος. Για να αποφύγουμε πολύπλοκους υπολογισμούς από ολοκληρώματα με χρήση λειτουργίας Marcum-Q, χρησιμοποιούμε προσέγγιση βασισμένη σε PDF και εναλλακτικές σειρές αναπαράστασης της γενικευμένης λειτουργίας

Marcum-Q. Αξιοποιώντας αυτές τις προσεγγίσεις εκτιμάται η μέση πιθανότητα ανίχνευσης. Αναλυτικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης παρέχονται για να υποστηρίξουν τις θεωρητικές διαπιστώσεις. Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανίχνευση φάσματος και η πρόσβαση σε επικοινωνίες οχημάτων μπορεί να βελτιωθεί μοντελοποιώντας το ασύρματο περιβάλλον με ακρίβεια. Η ανίχνευση ενέργειας βασισμένη σε Nakagami-m κανάλι εξασθένησης σε σκιάσεις Γάμμα παρέχει γρήγορη και αξιόπιστη ανίχνευση σε γνωστικά δίκτυα οχημάτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα προσομοίωσης βοηθούν στις προβλέψεις και μπορούν να αποτελέσουν ένα γρήγορο τρόπο να αξιολογηθεί η απόδοση. Από τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρο ότι ένα μοντέλο καναλιού που αποτελείται από ποικίλες κατανομές είναι χρήσιμο για να σχεδιάζουμε ασύρματα συστήματα και δίκτυα οχημάτων.

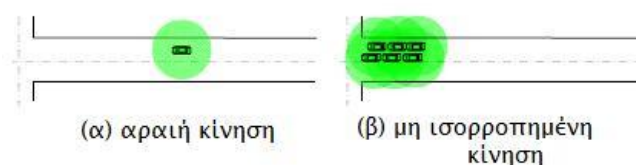
Κεφάλαιο 4: Βοήθεια από σταθμευμένο όχημα στα αδόμετα δίκτυα οχημάτων

Στα αδόμετα δίκτυα οχημάτων, βασική πρόκληση στο επίπεδο επικοινωνίας είναι η φτωχή συνδεσιμότητα, η οποία μπορεί να προκληθεί από αραιή ή μη ισορροπημένη κίνηση. Η ανάπτυξη υποδομών υποστήριξης θα μπορούσε να μετριάσει το πρόβλημα, αλλά συχνά απαιτεί υψηλό ποσό επενδύσεων και περίπλοκο σχεδιασμό, ειδικά σε επίπεδο πόλης. Ακολούθως προτείνουμε την ιδέα της *βοήθειας από σταθμευμένο όχημα* (Parked Vehicle Assistance - PVA) [13]. Με τη μέθοδο αυτή επιτρέπεται σε σταθμευμένα οχήματα να συμμετέχουν στα VANETs σαν στατικοί κόμβοι. Με χρήση ασύρματης συσκευής και επαναφορτιζόμενης μπαταρίας, τα παρκαρισμένα οχήματα μπορούν εύκολα να επικοινωνούν το ένα με το άλλο, καθώς και με τα αντίστοιχα κινούμενα. Λόγω της εκτεταμένης στάθμευσης στις πόλεις, τα παρκαρισμένα οχήματα αποτελούν φυσικούς παράπλευρους κόμβους, που χαρακτηρίζονται από το μεγάλο αριθμό τους, τη μεγάλη διάρκεια παραμονής, την ευρεία κατανομή και τη συγκεκριμένη θέση τους. Έτσι, τα σταθμευμένα οχήματα μπορούν να αποτελέσουν κεντρική στατική υπηρεσία υποδομών για να βελτιωθεί η συνδεσιμότητα. Ερευνούμε τη συνδεσιμότητα δικτύου σε PVA μέσω θεωρητικής ανάλυσης και

πραγματικής ανάλυσης με προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ακόμη και μικρή συμβολή των PVA οχημάτων μπορεί να υπερισχύσει της αραιής ή μη ισορροπημένης κίνησης και να προάγει σημαντικά την συνδεσιμότητα του δικτύου. Έτσι, η PVA ενισχύει τα VANETs και ανοίγει το δρόμο για νέα υβριδικά δίκτυα με στατικούς και κινητούς κόμβους.

4.1 Εισαγωγικές έννοιες στη PVA

Καθώς ολοένα και περισσότερα οχήματα εξοπλίζονται με ασύρματες συσκευές, μεγάλης κλίμακας δίκτυα οχημάτων αναμένεται να είναι διαθέσιμα στο άμεσο μέλλον. Στα VANETs η βασική πρόκληση στις επικοινωνίες είναι η πολύ φτωχή συνδεσιμότητα, η οποία μπορεί να προκληθεί από αραιή ή μη ισορροπημένη κίνηση. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1, αραιή κίνηση σημαίνει ότι είναι δύσκολο το ένα όχημα να βρει το άλλο, ενώ η ανομοιόμορφη κίνηση περιγράφει τις καταστάσεις όπου τα οχήματα δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στους δρόμους λόγω φαναριών, συνωστισμού, οδήγηση με βήμα σημειωτών ή άλλους λόγους. Ακόμη και αν η μέση πυκνότητα οχημάτων είναι υψηλή, η ανομοιόμορφη κίνηση είναι αναπόφευκτη και συχνά οδηγεί σε αποσύνδεση. Συνεπώς, τα VANETs θεωρούνται ως ακραία περιβάλλοντα ή αμφισβητούμενα δίκτυα τα οποία συνδέονται πρόσκαιρα.



Εικόνα 4.1: Φτωχή συνδεσιμότητα σε VANETs

Η συνδεσιμότητα είναι κρίσιμη παράμετρος για τα VANETs και επηρεάζει σημαντικά την δρομολόγηση και τη συνολική απόδοση των λειτουργιών. Πολλές προτάσεις προτείνονται για τη καλύτερη συνδεσιμότητα των VANETs και αναφέρονται σε βελτιωμένες τεχνικές μετάδοσης και στην ανοχή αυτών σε καθυστέρηση. Αντί για αυτές τις προσαρμόσιμες προσεγγίσεις, παρουσιάζεται ένας πιο φιλόδοξος στόχος σχετικά με το πώς μπορούμε να βελτιώσουμε τη συνδεσιμότητα. Με βελτιωμένη συνδεσιμότητα, η καθυστέρηση μετάδοσης και η

πιθανότητα χαμένων μηνυμάτων, που προκαλούνται από μεγάλες περιόδους διαχωρισμού, μπορούν να μειωθούν. Αντίστοιχα, οι εφαρμογές οχημάτων μπορούν να ωφεληθούν από περισσότερο αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και οι χρήστες οχημάτων μπορούν να αποκτήσουν πιο ικανοποιητικές υπηρεσίες, σε λιγότερο αμφισβητούμενα περιβάλλοντα.

Από τη στιγμή που τα σημεία πρόσβασης (Access Points, APs) μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες για γειτονικούς κινητούς κόμβους, η ενσωμάτωση κινούμενων οχημάτων στο διαδίκτυο με τη χρήση APs συνιστά την κατάλληλη επιλογή. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι κατάλληλες τεχνικές ανάπτυξης σημείων πρόσβασης μπορούν να βελτιώσουν δραματικά τη συνδεσιμότητα. Μια βιώσιμη εναλλακτική είναι να εγκαταστήσουμε παράπλευρες μονάδες κατά μήκος του δρόμου για να αναμεταδίδουν πακέτα. Η ευρεία ανάπτυξη, όμως, τέτοιων υποδομών είναι ακριβή. Για παράδειγμα, τα σημεία πρόσβασης διαδικτύου χρειάζονται δαπανηρές εγκαταστάσεις ισχύος και ενσύρματης δικτυακής συνδεσιμότητας, κόστη που μπορεί να φτάνουν και τα 5.000\$ ανά μονάδα. Οι κόμβοι αναμετάδοσης είναι φθηνότεροι, αλλά χρειάζονται περισσότερες μονάδες για να πετύχουν την ίδια απόδοση. Επιπρόσθετα, η παράπλευρα των δρόμων στατική υποδομή είναι δύσκολα προσαρμόσιμη σε κίνηση με γρήγορες εναλλαγές. Φαίνεται σχεδόν αδύνατο να χτίσουμε μία μόνο στρατηγική που να αντιπροσωπεύει όλες τις πτυχές της βέλτιστης ανάπτυξης, όπως του περιορισμού του διαθέσιμου κεφαλαίου, τη ρυμοτομία, τις αλλαγές της κίνησης, τη καθυστέρηση μετάδοσης και τη χρησιμοποίηση. Γενικά, η εισαγωγή υποστηρικτικών υποδομών βελτιώνει τη συνδεσιμότητα, αλλά συχνά απαιτεί μεγάλα ποσά επενδύσεων και περίπλοκου σχεδιασμού, ειδικά σε επίπεδο πόλεως.

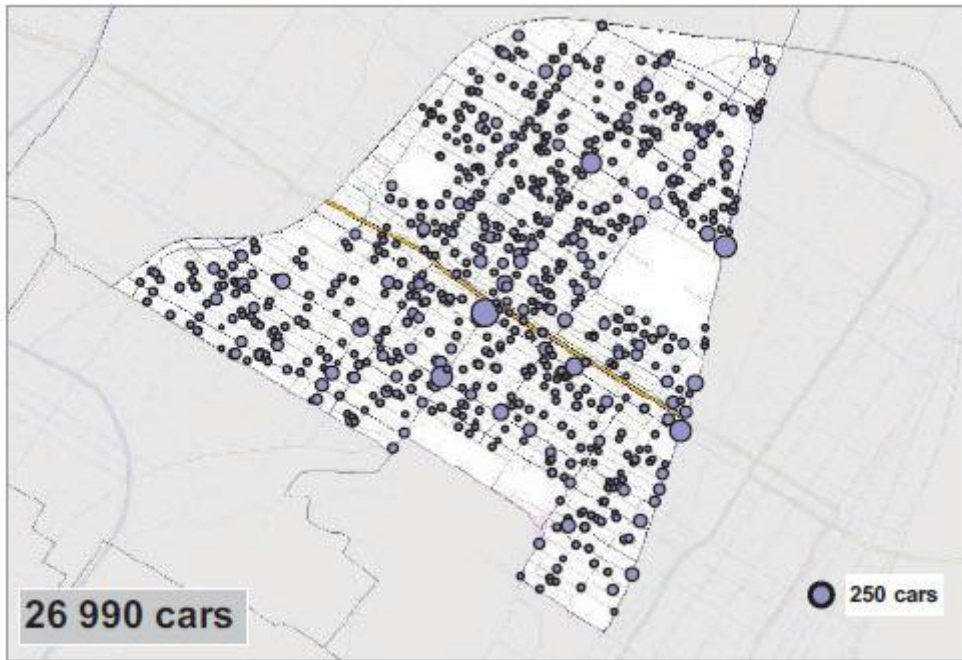
Σε αυτή την ενότητα προτείνουμε την ιδέα της PVA, η οποία επιτρέπει σε παρκαρισμένα οχήματα να προσχωρήσουν στα VANETs ως στατικοί κόμβοι. Με ασύρματο δέκτη και επαναφορτιζόμενη μπαταρία, τα παρκαρισμένα οχήματα μπορούν εύκολα να επικοινωνούν το ένα με το άλλο και με τα αντίστοιχα κινούμενα. Λόγω του εκτεταμένου παρκαρίσματος στις πόλεις, τα παρκαρισμένα οχήματα αποτελούν φυσικούς παράπλευρους κόμβους που χαρακτηρίζονται από το μεγάλο αριθμό, τη μεγάλη διάρκεια παραμονής, την ευρεία κατανομή και τη

συγκεκριμενοποιημένη τοποθεσία. Έτσι, τα σταθμευμένα οχήματα μπορούν να χρησιμεύουν ως κύριο στατικό τμήμα και υποδομή υπηρεσιών προκειμένου να βελτιώνουν τη συνδεσιμότητα. Διερευνούμε τη συνδεσιμότητα δικτύου στην PVA μέσω θεωρητικής ανάλυσης και ρεαλιστικών ερευνών και προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ακόμη και μια μικρή αναλογία PVA οχημάτων μπορεί να αντιμετωπίσει την αραιή ή ανισόρροπη κίνηση και να προάγουν τη συνδεσιμότητα δικτύου σημαντικά. Έτσι, η PVA ενισχύει τα VANETs από κάτω προς τα πάνω, και ανοίγει το δρόμο για νέα υβριδικά δίκτυα με στατικούς και κινητούς κόμβους.

4.2 Από τα παρκαρισμένα οχήματα στη PVA

4.2.1 Στάθμευση σε πόλεις

Αρχικά, βασίζουμε την έρευνά μας σε μια έκθεση περί αστικής στάθμευσης σε ρεαλιστικές συνθήκες ^[14], η οποία παρέχει τα στατιστικά στάθμευσης 2 ερευνών σε μια κεντρική περιοχή στη πόλη Μόντρεαλ του Καναδά. Διερεύνησε 61.000 περιπτώσεις στάθμευσης καθημερινά σε μια έκταση 5.500 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Σύμφωνα με την έκθεση, η στάθμευση στους δρόμους, η στάθμευση σε εξωτερικούς χώρους (κυρίως σε εκτός δρόμων χώρους στάθμευσης στο έδαφος) και η στάθμευση σε εσωτερικούς χώρους (σε γκαράζ ή υπόγειους χώρους στάθμευσης) καταλαμβάνουν ποσοστά 69,2%, 27,1% και 3,7% του συνόλου αντίστοιχα. Κατά μέσο όρο, η στάθμευση σε δρόμους διαρκεί 6,64 ώρες. Παράγονται, λοιπόν, πολλοί παράπλευροι κόμβοι οχημάτων που είναι εύκολο να επικοινωνήσουν και καθίστανται ικανοί να υποστηρίξουν μεγάλης διάρκειας επικοινωνία. Στην εικόνα 4.2 απεικονίζεται χωρικά η κατανομή στάθμευσης στο Μόντρεαλ στις 22.00, που επιτρέπει να ταυτοποιήσουμε σε ποιες τοποθεσίες υπάρχει εκτενής στάθμευση οχημάτων κατά μήκος των δρόμων. Στη περιοχή ο συνολικός αριθμός παρκαρισμένων οχημάτων κυμαίνεται από 26.990 έως 34.170 οχήματα, οπότε υπάρχει κίνηση και εναλλαγή οχημάτων όλες τις ώρες της ημέρας.



Εικόνα 4.2: Κατανομή κίνησης στο Μόντρεαλ

Συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα κινούμενα, τα σταθμευμένα οχήματα εμφανίζουν περισσότερα πλεονεκτήματα στην επικοινωνία. Οι αλλαγές της κυκλοφοριακής κίνησης είναι έντονες και μερικές φορές τα οχήματα είναι αραιά ή ανισόρροπα κατανομημένα, ενώ αντίθετα τα σταθμευμένα οχήματα παραμένουν σταθερά σε μεγάλο αριθμό όλη μέρα. Τα κινούμενα οχήματα έχουν γρήγορα εναλλασσόμενα θέσεις κάθε δευτερόλεπτο, ενώ τα παρκαρισμένα μένουν στατικά για ώρες. Η μεγάλη αναλογία της στάθμευσης στους δρόμους και η εκτεταμένη κατανομή στάθμευσης κάνουν τα παρκαρισμένα οχήματα εύκολα αξιοποιήσιμα στις επικοινωνίες, όπου η αποστολή μηνυμάτων συχνά ακολουθεί τις κατευθύνσεις των οδών. Από τη στιγμή που τα παρκαρισμένα οχήματα αποτελούν άφθονες, αξιόπιστες και βολικές πηγές κόμβων, η ΡVA έχει μια στέρεη βάση στις αστικές περιοχές.

4.2.2 Στάθμευση σε συγκεκριμένες θέσεις

Μεμονωμένοι κόμβοι παρκαρισμένων οχημάτων είναι μακριά από σταθερές παράπλευρες μονάδες, λόγω αβέβαιης τοποθεσίας και διάρκειας στάθμευσης. Αλλά το σύνολο συμπεριφοράς της αστικής στάθμευσης συχνά επιδεικνύει υψηλό βαθμό χρονικής και χωρικής τακτικότητας. Για να εξισορροπήσουμε τη προσφορά και τη ζήτηση, οι

πολεοδόμοι συχνά επιβάλλουν τοπικούς περιορισμούς και δημιουργούν προκαθορισμένους χώρους στάθμευσης σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο.

Μια έρευνα [15] διερευνά την επί του δρόμου στάθμευση στο Ann Arbor, στο αμερικανικό κρατίδιο του Michigan. Η ερευνητική ομάδα επέλεξε τρεις περιοχές της πόλης με επί του δρόμου παρκόμετρα και κατέγραφε διαρκώς τη χρήση τους 6 ημέρες την εβδομάδα. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1 παρακάτω, οι επιλεγμένες περιοχές (A/B) παρουσιάζουν διαφορετικές κεντρικές εμπορικές περιοχές και οι περίοδοι (Peak/Off peak/Day) υποδεικνύουν τις ώρες της έρευνας (Peak: 12.30–14.30 / Off peak: 8.30–10.30). Διενήργησε μια ολόημερη παρατήρηση και μερικές σύντομες διάρκειας 2 ωρών. Παρότι κάθε στάθμευση είναι σύντομη και κυμαινόμενη, η χρήση των θέσεων στάθμευσης είναι αρκετά σταθερή. Ο λόγος πληρότητας, που ορίζεται ως ώρα κατειλημμένου χώρου/ ώρα διαθέσιμου χώρου, αγγίζει κατά μέσο όρο το 93% στη περιοχή A κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και σχεδόν το 100% στις περιοχές A και B στις ώρες αιχμής. Ακόμη και σε μη ώρες αιχμής ο λόγος είναι κατά μέσο όρο στο 80%. Για πρακτικούς λόγους, οι θέσεις στάθμευσης επί του δρόμου χρησιμοποιούνται διαρκώς, λόγω της υψηλής ζήτησης για στάθμευση. Το αποτέλεσμα αυτό δεν μας εκπλήσσει, παρότι αυτό συμφωνεί με το γεγονός ότι περίπου 30% της κίνησης κινείται για στάθμευση στο κέντρο των πόλεων.

Site and period	A, Day	A, Off-peak	A, Peak	B, Peak
Meters surveyed	61	33	34	35
Duration	21 h	2 h	2 h	2 h
Vehicles parked	476	84	94	94
Average stay	41.40 m	39.07 m	42.98 m	44.57 m
Standard deviation	27.17 m	25.09 m	28.43 m	29.96 m
Occupancy ratio	93.5%	79.0%	99.0%	100%

Πίνακας 4.1: Στάθμευση επί του δρόμου στο Ann Arbor

Ομοίως, άλλη έρευνα [16] προβάλλει τη χρήση των θέσεων στάθμευσης στο Hattiesburg, στο κρατίδιο των ΗΠΑ του Missisipi. Διερεύνησε 8 χώρους στάθμευσης της πόλης το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο του 1996 και το Μάρτη και Απρίλη του 1997. Η χρησιμοποίηση και η τυπική απόκλιση των θέσεων στάθμευσης δείχνουν ότι αυτές οι

υποδομές συχνά έχουν αξιοσημείωτο αριθμό οχημάτων (περίπου 129 κατά μέσο όρο) και μικρές διακυμάνσεις στάθμευσης (λιγότερο από 13,7%). Αποδεικνύεται επίσης ότι η πιθανότητα να είναι εντελώς άδειες είναι πολύ μικρή.

Συμπερασματικά, μπορούμε να υποθέσουμε ότι τόσο συχνά χρησιμοποιούμενοι χώροι στάθμευσης επί του δρόμου έχουν κάποια «σταθερά» οχήματα, σαν σταθερές παράπλευρες μονάδες επικοινωνίας. Οι θέσεις τους και οι λόγοι χρησιμοποίησης τους μπορούν να σημειώνονται και να συντηρούνται σε έναν ηλεκτρονικό χάρτη.

4.3 Ανάλυση δικτυακής συνδεσιμότητας

Από τη στιγμή που η PVA εμπλέκει την πρακτική κατανομή στάθμευσης σε αστικούς δρόμους, εξετάζουμε διάφορα στατικά χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα κόμβων, η απόσταση μεταξύ οχημάτων και η μονοδιάστατη συνδεσιμότητα, για να αναλύσουμε τη δικτυακή συνδεσιμότητα της PVA σε διαφορετικά επίπεδα χωρικής πυκνότητας.

Πυκνότητα κόμβων: Η πυκνότητα των οχημάτων παρέχει μια λογική εικόνα της δυνητικής συνδεσιμότητας σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Ειδικότερα, θέτουμε ως N τον αριθμό των οχημάτων και L το μήκος του δρόμου, να αναπαριστούν αντίστοιχα το συνολικό αριθμό οχημάτων και το άθροισμα του μήκους κάθε δρόμου της περιοχής. Η συνάρτηση κίνησης $f(t)$ υποδεικνύει την αλλαγή κίνησης με τη πάροδο του χρόνου σε μια μέρα. Ο λόγος διείσδυσης r_{pen} ορίζει το επί της εκατό ποσοστό οχημάτων με ασύρματη συσκευή στο σύνολο των οχημάτων. Έτσι, το γινόμενο $r_{pen}f(t)N$ δηλώνει το διαθέσιμο αριθμό κόμβων οχημάτων για επικοινωνία. Σε αυτή τη περιοχή, η πυκνότητα των κινούμενων οχημάτων ρ_{mv} δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{mv} = \frac{r_{pen}f(t)N}{L}$$

Στην PVA τα παρκαρισμένα οχήματα εντός μιας περιοχής γίνονται μέρος του δικτύου. Εδώ διαχωρίζουμε τη κίνηση σε δύο κατηγορίες: *τοπική κίνηση* και *κίνηση διέλευσης* (αυτή η οποία δεν προέρχεται ή καταλήγει στην περιοχή που εξετάζουμε και δεν μπορεί να φέρει άλλα

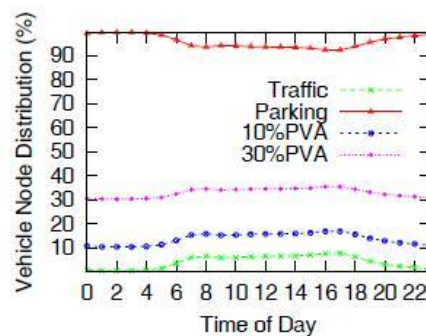
έγκυρα σταθμευμένα οχήματα). Θέτουμε ότι ο λόγος τοπικής κίνησης r_{loc} δείχνει το εκατοστιαίο ποσό της τοπικής κίνησης ανάμεσα στη συνολική κίνηση. Έτσι, το γινόμενο $r_{loc}(1 - f(t))N$ αντανακλά την αλλαγή των τοπικά παρκαρισμένων οχημάτων κατά τη διάρκεια της μέρας. Ο λόγος PVA r_{pva} ορίζει το εκατοστιαίο ποσοστό των σταθμευμένων οχημάτων που είναι διατεθειμένα και μπορούν να παρέχουν βοήθεια. Έτσι, ο λόγος των παρκαρισμένων οχημάτων ρ_{pv} είναι ισοδύναμος με:

$$\rho_{pv} = \frac{r_{pen}r_{loc}r_{pva}(1 - f(t))N}{L}$$

Επίσημα, η πυκνότητα κόμβων στην παρουσία της PVA ορίζεται ως εξής:

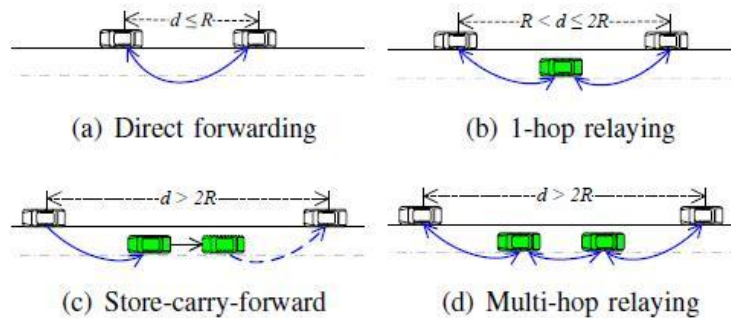
$$\rho_{mv} + \rho_{pv} = (f(t) + r_{loc}r_{pva}(1 - f(t))) \frac{r_{pen}N}{L}$$

Όπου η σχέση $f(t) + r_{loc}r_{pva}(1 - f(t))$ αναπαριστά τη κατανομή των οχημάτων-κόμβων σε σχέση με το χρόνο. Από τη στιγμή που ένα όχημα είναι παρκαρισμένο 23 ώρες την ημέρα, τα κινούμενα οχήματα αποτελούν το 1/24 ή 4,17% των συνολικών οχημάτων κατά μέσο όρο. Βασιζόμενοι σε πραγματική καθημερινή μεταβολή της κίνησης, η ισοδύναμη κατανομή του όγκου κυκλοφορίας κατά μέσο όρο αναπαρίσταται ως $f(t)$ στην εικόνα 4.3. Η κατανομή στάθμευσης $1 - f(t)$ είναι σχεδόν 100%, το οποίο αντανακλά το γεγονός ότι τα σταθμευμένα οχήματα κυριαρχούν στο σύνολο των κόμβων οχημάτων στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μιας ημέρας. Φυσικά, δεν είναι όλοι πρόθυμοι και ικανοί να υποστηρίξουν την PVA. Αλλά ακόμη κι ένα μικρό ποσοστό PVA οχημάτων επιφέρει μεγάλη επίδραση: 10% και 30% PVA θα μπορούσε να αυξήσει τη πυκνότητα κόμβων 3,3 και 7,9 φορές αντίστοιχα, αν δεν υπάρχει καθόλου κίνηση διέλευσεων. Ειδικότερα, η PVA εξαλείφει το κλασσικό χρόνο χαμηλής πυκνότητας κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 4.3: Κατανομή οχημάτων-κόμβων κατά τη διάρκεια μιας ημέρας

Απόσταση μεταξύ των οχημάτων (inter-vehicle distance): Από τη στιγμή που τα προωθούμενα πακέτα μπορούν να αποθηκευθούν στα σταθμευμένα οχήματα, η απόσταση μεταξύ των οχημάτων καθορίζει αν και πως αναμεταδίδουν τα δεδομένα με ακρίβεια. Η εικόνα 4.4 απεικονίζει τη μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε 2 σταθμευμένα οχήματα, ανάλογα με τη διαφορετική μεταξύ τους απόσταση:



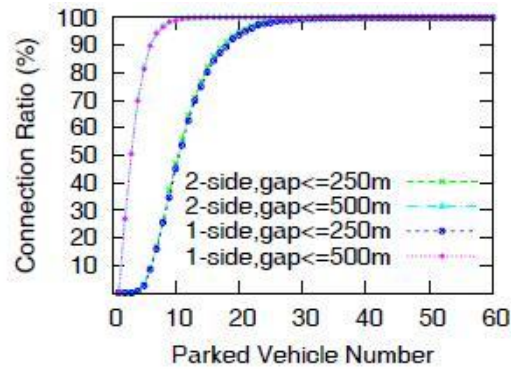
Εικόνα 4.4: Μετάδοση μεταξύ δύο σταθμευμένων οχημάτων

Το γράμμα R συμβολίζει την εμβέλεια και το d συμβολίζει την απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Αν $d \leq R$, όπως στην εικόνα 4.4α, ένα όχημα μπορεί απευθείας να μεταδώσει πακέτα σε ένα άλλο όχημα στα πλαίσια της κοινής τους εμβέλειας. Σε αυτή τη περίπτωση η σύνδεση είναι αξιόπιστη. Στην εικόνα 4.4b είναι $R \leq d \leq 2R$, δεν υπάρχει καμία απευθείας σύνδεση, αλλά κάθε διερχόμενο όχημα μπορεί να μεταβιβάσει πακέτα μεταξύ των δύο οχημάτων. Με μια μέση ταχύτητα u , ένα κινούμενο όχημα φέρει μια προσωρινή σύνδεση που διαρκεί $\frac{(2R-d)}{u}$. Αν η κίνηση είναι αρκετά πυκνή ώστε να διατηρήσει τη $\rho_{mv}(2R-d) \geq 1$ ή $\rho_{mv} \geq \frac{1}{2R-d}$, η σύνδεση μεταξύ δύο σταθμευμένων οχημάτων μπορεί να θεωρηθεί ως αξιόπιστη σύνδεση. Ωστόσο, όταν $d > 2R$ η ενδεχόμενη σύνδεση γίνεται πολύ παροδική, και μερικές φορές υποστηρίζει μόνο μονόδρομη μετάδοση. Αν η κίνηση είναι αραιή, ένα κινούμενο όχημα μπορεί να μεταφέρει πακέτα και να τα προωθήσει στο επόμενο σταθμευμένο όχημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4c με μια καθυστέρηση της τάξεως d/u . Σε περιβάλλοντα πυκνής κίνησης τα πολλαπλώς κινούμενα οχήματα μπορούν να σχηματίσουν παροδική σύνδεση για να αναμεταδώσουν πακέτα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4d. Στην πραγματικότητα, η αναμετάδοση τύπου αποθηκεύω-

μεταφέρω-προωθώ, όπως στην εικόνα 4.4c και η τύπου πολλαπλών αλμάτων (multi-hop), όπως στην εικόνα 4.4d συχνά συμπίπτουν στην αναμετάδοση δεδομένων, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ομορτυνιστική διανομή και σε αβέβαιη καθυστέρηση μετάδοσης. Παραμένει η φτωχή συνδεσιμότητα αν τα οχήματα είναι σταθμευμένα μακριά το ένα από το άλλο. Έτσι, μικρή απόσταση μεταξύ των οχημάτων, λιγότερο από το διπλάσιο της εμβέλειας, οδηγεί σε καλή συνδεσιμότητα.

Μονοδιάστατη συνδεσιμότητα: Από τη στιγμή που η προώθηση πακέτων σε αστικές περιοχές περιορίζεται από street map, η μονοδιάστατη συνδεσιμότητα κατά μήκος ενός μόνο δρόμου καθίσταται πολύ σημαντική. Αναλύουμε αυτόν το παράγοντα παραθέτοντας ένα απλό παράδειγμα στάθμευσης επί του δρόμου. Σε ένα δρόμο μήκους 1000m υπάρχουν 200 παράπλευρες θέσεις στάθμευσης μήκους 5m η καθεμία. Η εμβέλεια είναι 250m. Υποθέτουμε ένα πομπό S και ένα δέκτη D τοποθετημένους στα άκρα του δρόμου. Αν τα οχήματα είναι σταθμευμένα χωρίς να επικαλύπτονται σε τυχαία επιλεγμένους χώρους στάθμευσης, πόσα οχήματα είναι επαρκή για να καταστήσουν μια αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ του πομπού και του δέκτη;

Προφανώς, τουλάχιστον 3 οχήματα θα μπορούσαν να πετύχουν μια σταθερή σύνδεση. Από τη στιγμή που κάθε πενήντα θέσεις ισοδυναμούν με την εμβέλεια, η μέγιστη τιμή των διαδοχικά άδειων θέσεων είναι 50. Διαφορετικά έχουμε αποσύνδεση. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ζεύξη SD είναι μόνιμα συνδεδεμένη αν υπάρχουν πάνω από 150 οχήματα, επειδή δεν μπορεί να υπάρχουν πάνω από 51 άδειες θέσεις ποτέ. Ομοίως, τα οχήματα μπορούν να σταθμεύουν και από τις 2 πλευρές ενός δρόμου, οπότε οι διαθέσιμοι χώροι στάθμευσης διπλασιάζονται σε 400. Αν παραβλέψουμε το φάρδος του δρόμου, η εμβέλεια παραμένει η ίδια. Σε στάθμευση και στις 2 πλευρές, 3 οχήματα είναι ικανά να καταστήσουν μια σταθερή σύνδεση και 300 ή περισσότερα οχήματα αποτρέπουν μόνιμα μια ενδεχόμενη αποσύνδεση. Για ένα δοσμένο αριθμό οχημάτων με εύρος από 1 έως 300, τρέχουμε προσομοιώσεις για να ελέγξουμε τη πιθανότητα συνδεσιμότητας με διαφορετικά κενά αποσυνδέσεων και βρίσκουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.5: Μονοκατευθυντική συνδεσιμότητα κατά μήκος ενός δρόμου

Στην εικόνα 4.5 βλέπουμε ότι, η μονόπλευρη στάθμευση και η στάθμευση και στις 2 πλευρές του δρόμου έχουν περίπου ίδιες πιθανότητες συνδεσιμότητας για κάθε αριθμό οχημάτων. Όταν τα PVA οχήματα ξεπερνούν τα 29 επιτυγχάνεται λόγος σύνδεσης σχεδόν 100%. Αν θεωρήσουμε την υποδεέστερη περίπτωση της εικόνας 4.4b, όπου το κενό δεν είναι μεγαλύτερο από 500m, παρατηρείται συνδεσιμότητα σχεδόν 100% με ένα αριθμό οχημάτων πάνω από 11. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν σταθερές συνδέσεις σε αστικούς δρόμους από τη στιγμή που τα παράπλευρα οχήματα που συμμετέχουν στην PVA φτάνουν με ρυθμό 29οχήματα/χιλιόμετρο (veh/km). Παρότι η πυκνότητα των παρκαρισμένων οχημάτων ανά δρόμο επηρεάζει την συνδεσιμότητα, ο λόγος PVA καθορίζει την αποτελεσματικότητα αυτού του μετρικού τελικά. Σε μια κορεσμένη επί των 2 πλευρών του δρόμου στάθμευση, ένας λόγος της PVA μεγέθους 7,25% είναι αρκετός για να επιτευχθεί μια αξιόπιστη σύνδεση όπως στην εικόνα 4.4α, και ένας αντίστοιχος στο 2,25% είναι επαρκής για να εκτελέσει ενός-άλματος αναμετάδοση, όπως στην εικόνα 4.4b. Φαίνεται μια αρκετά μικρότερη απαίτηση συνεργατικών χρηστών στην PVA απ' ότι στα τωρινά P2P συστήματα διαδικτύου. Έτσι, ένα πολύ μικρό ποσοστό συμμετοχής της PVA, ακόμη και 10%, θα επιφέρει καλή συνδεσιμότητα σε πυκνά σταθμευμένους δρόμους. Με άλλα λόγια, η PVA μπορεί να ανεχτεί ένα υψηλό ποσοστό από «λαθρεπιβάτες».

4.4 Αξιολόγηση επιδόσεων

4.4.1 Έρευνα και προσομοιώσεις

Αρχικά αναφερόμαστε σε μία έρευνα έξι εβδομάδων που πραγματοποιήθηκε σε μια αστική περιοχή της Chengdu, μιας κινεζικής πόλης. Από τη στιγμή που η επιλογή της υπό έρευνα περιοχής είναι κρίσιμη στην αξιολόγηση επιδόσεων, προτιμούμε συνήθεις αστικές περιοχές με τυπική κατανομή στάθμευσης στις κεντρικές περιοχές όπου η στάθμευση είναι πάνω από το μέσο όρο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6, απομονώνουμε ένα πραγματικό τμήμα οδικού χάρτη επιφάνειας 1.600m x 1.400m, το οποίο περιλαμβάνει 9 διασταυρώσεις και 14 δρόμους διπλής κατεύθυνσης συνολικού μήκους 7.860m. Κάθε διασταύρωση σημειώνεται με ένα αριθμό από το 0 μέχρι το 9. Κατά τη διάρκεια της έρευνας μελετήσαμε τη κίνηση και τη παράπλευρη στάθμευση στις 16:00, τις 18:00 και τις 22:00 κάθε Τρίτη, Πέμπτη και Σάββατο. Μετρήσαμε τα οχήματα που είναι παρκαρισμένα κατά μήκος του δρόμου εντός 5 μέτρων, και παραλείψαμε εκείνα που ήταν παρκαρισμένα μεταξύ εμποδίων ή αρκετά μακριά από τους δρόμους. Στις επί του δρόμου θέσεις στάθμευσης υπολογίστηκαν μόνο σταθμευμένα οχήματα κατά τη διεύθυνση του δρόμου. Βρήκαμε τρία είδη δρόμων με διαφορετικά όρια στάθμευσης. Το πρώτο είδος επιτρέπει ελεύθερη στάθμευση παράπλευρα του δρόμου, όπως το R_{04} , το R_{15} και R_{26} , το οποίο έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλή πυκνότητα κόμβων περίπου 308 οχημάτων/ χιλιόμετρο κατά μέσο όρο. Το δεύτερο είδος, όπως στο R_{37} και το R_{79} στερείται δημόσιων θέσεων στάθμευσης. Αυτοί οι δρόμοι έχουν χαμηλή πυκνότητα οχημάτων περίπου 21 οχημάτων/χιλιόμετρο, η οποία προέρχεται από κάποιες κατοχυρωμένες θέσεις στάθμευσης και από παράνομη στάθμευση. Οι υπόλοιποι δρόμοι ανήκουν στο τρίτο είδος, το οποίο έχει μια μέτρια πυκνότητα οχημάτων ύψους 95 οχημάτων/χιλιόμετρο. Κατά τη διάρκεια της έρευνας, επίσης υπολογίσαμε την ημερησία κίνηση μετρώντας τα διερχόμενα οχήματα εντός δεκαπέντε λεπτών σε τυχαίες θέσεις και βρήκαμε τη κίνηση να κυμαίνεται από 300 οχήματα/ώρα έως 2.200 οχήματα/ώρα σε διαφορετική χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Αν το πλάτος του δρόμου είναι 20m, τα αντίστοιχα κινούμενα οχήματα κυμαίνονται

από 60 έως 400 και η μέση ταχύτητα κυμαίνεται από 40km/h έως 80 km/h.



Εικόνα 4.6: Τοπολογία δρόμων στην έρευνα και τις προσομοιώσεις

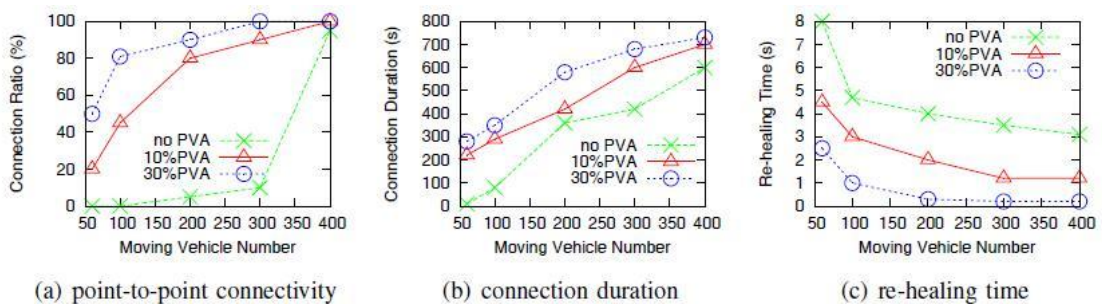
Χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα VanetMobiSim 1.1 [17], προκειμένου να παράγουμε ρεαλιστικά traces αστικής κινητικότητας. Το παραγόμενο αρχείο κίνησης μπορεί απευθείας να χρησιμοποιηθεί από το NS-2.33. Για να παράγουμε αραιή κίνηση και αλλαγή της κυκλοφορίας, χρησιμοποιούμε διαφορετικούς αριθμούς οχημάτων, π.χ. 60, 100, 200, 300 και 400 στο χάρτη. Από τη στιγμή που η ύπαρξη φαναριού μπορεί να προκαλέσει μη ισορροπημένη κίνηση, χρησιμοποιούμε διαφορετικές ρυθμίσεις φαναριού, όπως 0, 60, 90, 120 και 150 sec, για να προσομοιώσουμε τις μη ισορροπημένες κατανομές οχημάτων σε ποικίλους βαθμούς. Η εμβέλεια έχει τεθεί στα 250m και το πρωτόκολλο MAC είναι 2 Mbps 802.11. Στη προσομοίωση, οι κόμβοι σταθμευμένων οχημάτων τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις σε κάθε δρόμο, ακολουθώντας τις πυκνότητες που συλλέχτηκαν κατά την έρευνα. Τοποθετούνται στην αρχή της προσομοίωσης και διατηρούνται στατικοί μέχρι το τέλος. Οι διασταυρώσεις στο χάρτη καλύπτουν ένα τμήμα διαστάσεων 20m x 20m χωρίς στάθμευση. Αφού το free-riding είναι αναπόφευκτο, χρησιμοποιείται ένας λόγος PVA 10% και 30%.

4.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

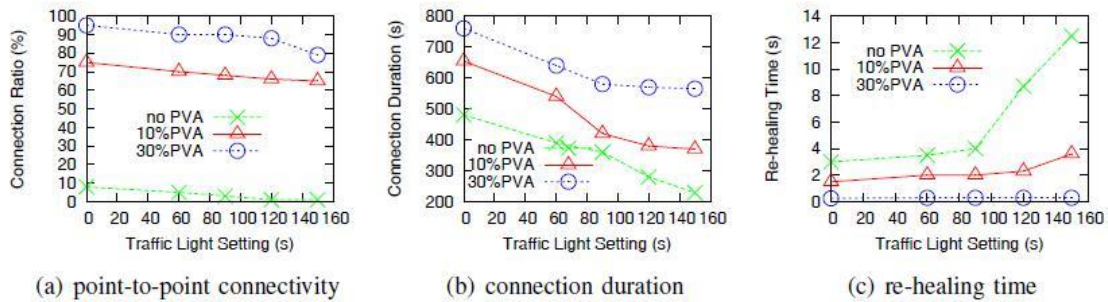
Κυρίως αξιολογούμε την PVA ως προς τη συνδεσιμότητα σημείου-προς-σημείο, τη διάρκεια σύνδεσης και το χρόνο μεταξύ δύο εκπομπών

της προσομοίωσης. Ως ένα στατικό μετρικό, η συνδεσιμότητα σημείου-προς-σημείο αντανακλά την αξιοπιστία μεταξύ δύο τυχαίων θέσεων σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και αποφασίζει αν οι δύο κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλο χωρίς καμία καθυστέρηση. Η διάρκεια σύνδεσης υποδεικνύει τη διάρκεια σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων, η οποία δείχνει πόσο συχνά η διαδρομή μεταξύ των δύο οχημάτων γίνεται μη-διαθέσιμη. Ως ένα δυναμικό χαρακτηριστικό της συνδεσιμότητας, αυτό το μετρικό αντανακλά τη σταθερότητα της σύνδεσης με την πάροδο του χρόνου. Ο χρόνος μεταξύ δύο εκπομπών υποδηλώνει τη περίοδο κατά την οποία τα δύο οχήματα είναι αποσυνδεδεμένα. Υποδεικνύει πόσο χρειάζεται να περιμένουν τα οχήματα για να εγκατασταθεί μια νέα σύνδεση, εφόσον αυτά έχουν αποσυνδεθεί.

Η εικόνα 4.7 περιγράφει τη δικτυακή συνδεσιμότητα πάνω σε πυκνότητα κίνησης με ρύθμιση φαναριού 90sec, στην οποία η PVA δείχνει ξεκάθαρη βελτίωση όλων των μετρικών, ειδικά σε αραιή κίνηση. Η εικόνα 4.8 δείχνει τη δικτυακή συνδεσιμότητα σε φανάρι με ένα αριθμό κινούμενων οχημάτων 200, στην οποία η PVA έχει θετική επίδραση στην περίπτωση αυξημένου βαθμού μη ισορροπημένης κίνησης. Έτσι, η PVA υπερνικά αποτελεσματικά την αραιή η μη ισορροπημένη κίνηση και προωθεί σε μεγάλο βαθμό τη δικτυακή συνδεσιμότητα σε αστικά VANETs.



Εικόνα 4.7: Δικτυακή συνδεσιμότητα σε σχέση με πυκνότητα κίνησης



Εικόνα 4.8: Δικτυακή συνδεσιμότητα σε σχέση με τα φανάρια

4.5 Συμπεράσματα και προοπτικές

Με αφορμή τη φτωχή συνδεσιμότητα των VANETs και συνυπολογίζοντας τα σημαντικά κόστη των υποστηρικτικών υποδομών, προτείνουμε τη PVA για να αξιοποιήσουμε στο μέγιστο τα αστικά σταθμευμένα οχήματα στην επικοινωνία. Η βασική ιδέα της PVA είναι απλή: αν μπορούμε να χρησιμοποιούμε κινητές συσκευές ανεξάρτητα αν περπατάμε ή παραμένουμε ακίνητοι, γιατί να μην επιτρέψουμε στα σταθμευμένα οχήματα να συμμετέχουν στις επικοινωνίες οχημάτων ως κινούμενοι κόμβοι;

Στο κεφάλαιο αυτό, εισάγαμε τα σταθμευμένα οχήματα ως στατικούς κόμβους για να υποστηρίξουν τα VANETs. Ερευνήσαμε την αστική στάθμευση, αξιολογήσαμε την PVA μέσω θεωρητικής ανάλυσης και προσομοιώσεων και βρήκαμε ότι μια μικρή συμμετοχή των PVA οχημάτων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την δικτυακή συνδεσιμότητα. Βασιζόμενοι σε ρεαλιστικές συμπεριφορές στάθμευσης η PVA ανακαλύπτει παραμελημένους πόρους, ενισχύει τα VANETs από κάτω προς τα πάνω και προάγει έρευνες οχημάτων σε βάθος και έκταση. Προοπτικές περαιτέρω έρευνας ανοίγονται στα παρακάτω ζητήματα εφαρμογής:

- Κατανομή των πόρων στα σταθμευμένα οχήματα
- Κινητήριοι μηχανισμοί για να υποστηρίξουν την PVA
- Χαρακτηριστικά μοντέλα στάθμευσης σε αστικές περιοχές
- Ομαδοποιημένες στρατηγικές των σταθμευμένων μονάδων-οχημάτων
- Αυτοπροσαρμοζόμενη δρομολόγηση σε περιβάλλοντα PVA

- Ασφάλεια δεδομένων και προστασία ιδιωτικότητας των σταθμευμένων οχημάτων
- Νέες υπηρεσίες και εφαρμογές στην PVA.

Βιβλιογραφία:

[1] Ian F.Akyldiz, Won–Yeol Lee, Mehmet C.Vuran and Shantidev Mohanty: “A survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks”, Georgia Institute of Technology, IEEE Communications Magazine, April 2008

[2] Simon Haykin “Cognitive Radio: Brain–Empowered Wireless Communications”, IEEE Journal on selected areas in Communications, Vol.23, No.2, February 2005

[3] Kaushik R. Chowdhury and Ian F. Akyildiz, "Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 26, January 2008

[4] Harry Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals", Proceedings of the IEEE, Vol. 55, No 4, April 1967

[5] Amir Ghasemi and Elvino S. Sousa, "Opportunistic Spectrum Access in Fading Channels Through Collaborative Sensing", Electrical and Computer Engineering Department University of Toronto, Journal of Communications, Vol. 2, No. 2, March 2007

[6] Fadel F. Digham, Mohamed–Slim Alouini and Marvin K. Simon, "On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels", Department of Electrical and Computer Engineering University of Minneapolis, IEEE 2003

[7] Saleh Yousefi, Mahmoud Siadat Mlousavi, Mahmood Fathy, "Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Challenges and Perspectives", 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings, Chegdu, China, June 2006.

[8] Y. Toor, P. Muhlethaler, and A. Laouiti, "Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues", IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 10, No. 3, Pages 74–88, 2008.

- [9] Félix Gómez Mármol, Gregorio Martínez Pérez, "TRIP, a trust and reputation infrastructure-based proposal for vehicular ad hoc networks", *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 35, Issue 3, Pages 934-941, May 2012.
- [10] Mohamed Watfa, *Advances in Vehicular Ad-Hoc Networks: Developments and Challenges*, University of Wollongong, Information Science Reference, Hersey, New York, 2010.
- [11] Haroon Rasheed, Nandana Rajatheva: "Spectrum Sensing for Cognitive Vehicular Networks over composite fading, Hindawi Publishing Corporation
- [12] A. Abdi and M.Kaveh, "On the utility of Gamma PDF in modeling shadow fading (slow fading)", in *Proceedings of the 49th IEEE Vehicular Technology Conference*, vol.3, pp. 2308-2312, May 1999
- [13] Niambo Liu, Ming Liu, Wei Lou, Guihai Chen, Jiannong Cao: "PVA in VANETs: Stopped cars are not silent", IEEE, 2011
- [14] C. Morency and M.Trepanier, "Characterizing parking spaces using travel survey data", Cirrelt, 2006
- [15] A. Adiv and W.Wang, "On-street parking meter behavior", *Transportation quarterly*, vol. 41, pp. 281-307, 1987
- [16] B.Albanese and G. Matlack, "Utilization of parking lots in Hattiesburg, Mississippi, USA, and impacts on local streams", *Environmental management*, vol. 24, no. 2, pp. 265-271, 1999
- [17] J. Harri, F.Filali, C.Bonnet and M.Fiore, "VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs" in *proc. of VANET '06*. ACM New York, NY, USA, 2006, pp. 96-97