



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

*«Μελέτη μηχανισμών διαχείρισης ενέργειας για  
ασύρματη μετάδοση δεδομένων»*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΟΣΧΟΓΙΑΝΝΙΔΟΥ ΙΩΑΝΝΑΣ

A.M.: 5358

*Υπεύθυνος Καθηγητής: Χρήστος Ι. Μπούρας*

ΠΑΤΡΑ 2018



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευρέως διαδεδομένη χρήση των ασύρματων συσκευών, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί υπολογιστές, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης αποδοτικών λύσεων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και την αύξηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών με τις οποίες λειτουργούν. Πολλές προτάσεις έχουν γίνει με τα χρόνια, η μελέτη των οποίων αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Στην εργασία αυτή, μελετώνται εκτενώς μέθοδοι και μηχανισμοί της βιβλιογραφίας, οι οποίοι αφορούν τόσο τη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης του προτύπου IEEE 802.11, όσο και τεχνικές ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται μέθοδοι οι οποίοι στοχεύουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που φέρει το PSM, όπως είναι η αρνητική επίδραση του φόρτου κυκλοφορίας που υπάρχει στο υπόβαθρο στην κατανάλωση ενέργειας, ο μεγάλος αριθμός αφυπνίσεων των σταθμών κτλ, καθώς και μέθοδοι που επιχειρούν να το βελτιστοποιήσουν αξιοποιώντας χαρακτηριστικά όπως η κινητικότητα των χρηστών και του δικτύου. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται μηχανισμοί που επιχειρούν να εξοικονομήσουν ενέργεια εφαρμόζοντας τεχνικές ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης, σε αρκετούς από τους οποίους εφαρμόστηκε ταυτόχρονα προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ενώ σε άλλους αξιοποιήθηκαν μετρικές όπως το RSSI και το SNR. Ακόμα, αναλύεται η επίδραση της ύπαρξης παρεμβολών στην απόδοση ενός δικτύου. Έπειτα με τη διενέργεια κατάλληλων προσομοιώσεων, επιχειρείται να επιβεβαιωθεί η λειτουργία και η αποτελεσματικότητα ενός από τους προτεινόμενους μηχανισμούς, ενώ παράλληλα εξετάζεται η επίδραση της ταχύτητας των σταθμών στην απόδοσή του.



## **ABSTRACT**

The widespread use of wireless devices, such as mobile phones and laptops, has led to the need of developing efficient solutions to save energy and increase the lifetime of the batteries with which they operate. Many suggestions have been made over the years, the study of which is the subject of this paper. In this paper methods and mechanisms of the literature are discussed extensively, which concern both the power save mode of the IEEE 802.11 standard and transmit power control techniques. More specifically, methods are presented that address the problems posed by PSM, such as the negative impact of the background traffic on power consumption, the large number of wake-ups etc., as well as methods that attempt to optimize it by utilizing characteristics such as the mobility of users and the network. In addition, mechanisms are presented that attempt to save energy by applying transmission energy control techniques, in several of which adaptation of the data rate has been applied simultaneously, while others have been using metrics such as RSSI and SNR. The effect of interference on the performance of a network is also analyzed. Next by conducting appropriate simulations it is attempted to confirm the operation and effectiveness of one of the proposed mechanisms, while examining the impact of the stations' speed on its performance.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα για τις πολύτιμες συμβουλές του, την καθοδήγηση καθώς και τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με το παρών θέμα.

Επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Καπούλα για την άψογη συνεργασία, και του οποίου οι γνώσεις και η συνεχής βοήθεια και υποστήριξη ήταν απαραίτητες για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου που όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου και με στήριζαν. Τέλος, θα ήθελα πάνω απ' όλα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υποστήριξή τους και για όλα όσα μου παρείχαν μέχρι σήμερα, ώστε να μπορώ να ακολουθώ τις επιλογές μου και να πετύχω τους στόχους μου.





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Περίληψη</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Πρόλογος</b> .....	<b>7</b>
<b>Περιεχόμενα</b> .....	<b>9</b>
<b>Λίστα εικόνων</b> .....	<b>11</b>
<b>Λίστα πινάκων</b> .....	<b>14</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b> .....	<b>15</b>
1.1 Ασύρματα δίκτυα .....	15
1.2 Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 .....	16
1.3 Στόχος και οργάνωση της εργασίας.....	18
<b>Κεφάλαιο 2: Εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα</b> .....	<b>21</b>
2.1 Ανάλυση της ενέργειας που καταναλώνεται στις κινητές συσκευές.....	21
2.2 Λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης του προτύπου IEEE 802.11.....	23
2.2.1 Ζητήματα που προκύπτουν σχετικά με το PSM και προτεινόμενες λύσεις .....	26
2.2.2 Αξιοποίηση ευκαιριών για βελτιστοποίηση του PSM .....	32
2.2.3 Διαχείριση ενέργειας σε δίκτυα υποδομής και ad-hoc.....	35
<b>Κεφάλαιο 3: Μηχανισμοί ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης</b> .....	<b>41</b>
3.1 Έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης .....	41
3.2 Επιπτώσεις της προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης στην κατανάλωση ενέργειας	43
3.3 Χρήση των RSSI και SNR ως μετρικές για τη διατήρηση της ποιότητας και τη μείωση της κατανάλωσης .....	51
3.4 Ανάλυση και αντιμετώπιση των παρεμβολών .....	55
3.5 Επίδραση των στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας στην απόδοση των ασύρματων δικτύων.....	63

3.6 Πρωτόκολλα δρομολόγησης και εξοικονόμηση.....	65
3.7 Εξοικονόμηση στο 802.11n .....	66
<b>Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα .....</b>	<b>71</b>
4.1 Εισαγωγή και χαρακτηριστικά των πειραμάτων .....	71
4.2 Ταχύτητα σταθμού - 0.6 m/s.....	72
4.2.1 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	72
4.2.2 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	75
4.2.3 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	78
4.3 Ταχύτητα σταθμού - 0.8 m/s.....	81
4.3.1 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	81
4.3.2 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	84
4.3.3 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	87
4.4 Ταχύτητα σταθμού – 1.2 m/s .....	90
4.4.1 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	90
4.4.2 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	93
4.4.3 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	96
4.5 Ταχύτητα σταθμού - 0.8-1.2 m/s.....	99
4.5.1 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης.....	99
4.5.2 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης...	102
4.5.3 Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης...	105
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα .....	108
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα .....</b>	<b>111</b>
<b>Κεφάλαιο 6: Μελλοντική εργασία .....</b>	<b>111</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>113</b>
<b>Ακρωνύμια .....</b>	<b>117</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του προτύπου 802.11b.....	17
Εικόνα 2: Φάσμα συχνοτήτων του προτύπου 802.11ac.....	18
Εικόνα 3: Γραφική απεικόνιση της λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης (PSM) του προτύπου IEEE 802.11 .....	24
Εικόνα 4: Περίπτωση ασύμμετρης πρόσβασης στο κανάλι. Ο αποστολέας S1 μπορεί να «ακούσει» τον S2, αλλά όχι αντίστροφα. Για το λόγο αυτό όταν ο S2 έχει δεδομένα προς μετάδοση, ο S1 δεν έχει ίση ευκαιρία να μεταδώσει .....	49
Εικόνα 5: Πρόβλημα κρυμμένου τερματικού. Κάθε ένας από τους αποστολείς δε γνωρίζει την ύπαρξη του άλλου, με αποτέλεσμα τα πακέτα που στέλνονται από αυτούς να συγκρούονται στους παραλήπτες .....	57
Εικόνα 6: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	72
Εικόνα 7: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	73
Εικόνα 8: SNR του σταθμού .....	73
Εικόνα 9: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....	74
Εικόνα 10: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	75
Εικόνα 11: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	76
Εικόνα 12: SNR του σταθμού .....	76
Εικόνα 13: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....	77
Εικόνα 14: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .....	78
Εικόνα 15: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	79
Εικόνα 16: SNR του σταθμού .....	79
Εικόνα 17: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....	80

Εικόνα 18: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	81
Εικόνα 19: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	82
Εικόνα 20: SNR του σταθμού .....	82
Εικόνα 21: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....	83
Εικόνα 22: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .....	84
Εικόνα 23: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	85
Εικόνα 24: SNR του σταθμού .....	85
Εικόνα 25: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....	86
Εικόνα 26: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	87
Εικόνα 27: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	88
Εικόνα 28: SNR του σταθμού.....	88
Εικόνα 29: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....	89
Εικόνα 30: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	90
Εικόνα 31: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	91
Εικόνα 32: SNR του σταθμού.....	91
Εικόνα 33: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού.....	92
Εικόνα 34: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	93
Εικόνα 35: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	94
Εικόνα 36: SNR του σταθμού.....	94
Εικόνα 37: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού.....	95
Εικόνα 38: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	96
Εικόνα 39: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....	97

<b>Εικόνα 40: SNR του σταθμού .....</b>	<b>97</b>
<b>Εικόνα 41: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....</b>	<b>98</b>
<b>Εικόνα 42: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .....</b>	<b>99</b>
<b>Εικόνα 43: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....</b>	<b>100</b>
<b>Εικόνα 44: SNR του σταθμού .....</b>	<b>100</b>
<b>Εικόνα 45: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....</b>	<b>101</b>
<b>Εικόνα 46: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .....</b>	<b>102</b>
<b>Εικόνα 47: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....</b>	<b>103</b>
<b>Εικόνα 48: SNR του σταθμού .....</b>	<b>103</b>
<b>Εικόνα 49: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....</b>	<b>104</b>
<b>Εικόνα 50: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .....</b>	<b>105</b>
<b>Εικόνα 51: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού .....</b>	<b>106</b>
<b>Εικόνα 52: SNR του σταθμού .....</b>	<b>106</b>
<b>Εικόνα 53: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού .....</b>	<b>107</b>
<b>Εικόνα 54: Απόκλιση του SNR.....</b>	<b>108</b>
<b>Εικόνα 55: Διάγραμμα απώλειας πακέτων.....</b>	<b>109</b>

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ποσοστά απώλειας πακέτων για κάθε σενάριο προσομοίωσης .....	109
---	-----

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1: Ασύρματα δίκτυα

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN - Wireless Local Area Network) παρέχει ασύρματη δικτυακή επικοινωνία σε μικρές αποστάσεις χρησιμοποιώντας ραδιοφωνικά ή υπέρυθρα σήματα, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα οποία λειτουργούν με καλωδιώσεις. Μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τα ασύρματα πρωτόκολλα, με πιο συχνά το Wi-Fi και το Bluetooth.

Ένα WLAN μπορεί να περιέχει πολλά διαφορετικά είδη συσκευών, όπως κινητά τηλέφωνα και tablet, φορητούς υπολογιστές, κονσόλες παιχνιδιών και οποιαδήποτε άλλη οικιακή συσκευή που επιτρέπει τη σύνδεση με το διαδίκτυο. Δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης μεγάλου αριθμού συσκευών, ενώ η εγκατάστασή του είναι εξαιρετικά απλή, ειδικότερα σε σχέση με τη διαδικασία τοποθέτησης καλωδίων που απαιτείται για τα ενσύρματα δίκτυα. Επιπλέον, η πρόσβαση σε αυτό είναι εύκολη και δεν περιορίζεται από το μήκος των καλωδίων, ενώ το κόστος είναι αντίστοιχα μικρότερο. Τίθενται, ωστόσο, θέματα ασφαλείας, τα οποία αν και με την πρόοδο της τεχνολογίας γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπιστούν πλήρως, υπάρχει ακόμη μέλλον σε αυτό. Προκύπτουν, επίσης, ζητήματα λόγω των παρεμβολών που δημιουργούνται, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ταχύτητα και τη σταθερότητα του δικτύου.

Ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να είναι είτε δίκτυο υποδομής (infrastructure), το οποίο αποτελεί και την πλειοψηφία τέτοιου τύπου δικτύων, είτε ad-hoc.

Σε ένα δίκτυο υποδομής οι συσκευές είναι συνδεδεμένες με ένα κεντρικό σημείο πρόσβασης (AP), μέσω του οποίου επικοινωνούν μεταξύ τους. Το σημείο πρόσβασης και το σύνολο των συσκευών/σταθμών σχηματίζουν ένα βασικό σύνολο υπηρεσιών (BSS), το οποίο μοιράζεται ένα κοινό ραδιοφωνικό κανάλι χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με αποφυγή συγκρούσεων (CSMA/CA) για τη διαχείριση της πρόσβασης στο μέσο. Για να αυξηθεί το εύρος της υποδομής και να μπορούν να υποστηριχθούν περισσότερες συσκευές, είναι δυνατό να προστεθούν περισσότερα AP, κάτι που όμως θα οδηγήσει σε επιπλέον κόστος για την αγορά του απαραίτητου υλικού. Τα δίκτυα τέτοιου τύπου προσφέρουν κεντρικοποιημένη διαχείριση και ασφάλεια και είναι κατάλληλα για μόνιμες ή μεγάλης διάρκειας δικτυακές λύσεις.

Σε ένα ad-hoc ασύρματο δίκτυο, οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς την ύπαρξη κάποιας δικτυακής υποδομής ή κεντρικής συσκευής υπεύθυνης για τη διαχείριση της επικοινωνίας. Οι κόμβοι, οι οποίοι μπορεί να είναι από κινητά τηλέφωνα και διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι συσκευές ειδικού σκοπού όπως αισθητήρες, λαμβάνουν μέρος στη δρομολόγηση προωθώντας τα δεδομένα ο ένας στον άλλο, δημιουργώντας έτσι ένα δικό τους δίκτυο. Ωστόσο, οι κόμβοι έχουν περιορισμένο εύρος μετάδοσης κάτι που απαιτεί οι συσκευές να βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Μεγάλος αριθμός συσκευών μειώνει την απόδοση και δυσχεραίνει τη διαχείριση του δικτύου.

## **1.2: Το πρωτόκολλο IEEE 802.11**

Στη σημερινή εποχή η ασύρματη συνδεσιμότητα είναι κάτι δεδομένο. Φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, τηλεοράσεις, είναι μόνο μερικές από τις συσκευές που δίνουν τη δυνατότητα σύνδεσης μέσω του λεγόμενου Wi-Fi. Πρόκειται για το κυρίαρχο πρότυπο των ασύρματων τοπικών δικτύων, γνωστό και ως IEEE 802.11. Με τις ταχύτητες στα 54 Mbps να είναι πλέον τετριμμένες, το Wi-Fi είναι σε θέση να ανταγωνιστεί τα ενσύρματα συστήματα.

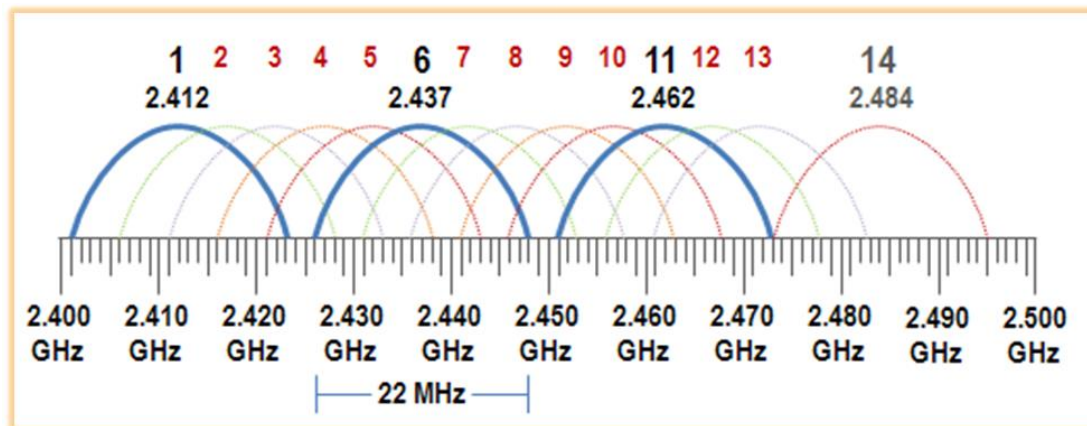
Λόγω της ευελιξίας και της απόδοσης που προσφέρει, πολλά σημεία πρόσβασης Wi-Fi (hotspot) χρησιμοποιούνται σήμερα, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης των συσκευών σε μέρη όπως ξενοδοχεία και αεροδρόμια χωρίς να απαιτείται καλώδιο. Επιπρόσθετα, ο εξοπλισμός WLAN επιτρέπει τη σύνδεση χωρίς την ανάγκη μόνιμης καλωδίωσης, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος και καθιστώντας έτσι το πρότυπο ιδιαίτερα θελκτικό όπως παραδείγματος χάριν σε επιχειρήσεις, στις οποίες μπορούν έτσι να προστεθούν ή να μετακινηθούν σταθμοί εύκολα και γρήγορα.

Το IEEE 802.11 είναι στην πραγματικότητα μια οικογένεια προτύπων. Όλα τα πρότυπα λειτουργούν στα πλαίσια των ISM (Industrial, Scientific and Medical) ζωνών συχνοτήτων. Οι ζώνες αυτές χρησιμοποιούνται από μια πληθώρα χρηστών και εφαρμογών, ενώ δεν απαιτείται άδεια για λειτουργία σε αυτές τις συχνότητες, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για ένα σύστημα με διαδεδομένη χρήση. Κάθε ένα από τα πρότυπα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, και κάθε ένα προέκυψε σε διαφορετική χρονική στιγμή.

Το πρώτο που έγινε δεκτό είναι το 802.11b, το οποίο λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz και επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 11 Mbps. Σχεδόν παράλληλα ορίστηκε και



ένα δεύτερο πρότυπο, το 802.11a. Σ' αυτήν τη περίπτωση η χρησιμοποιούμενη ζώνη είναι αυτή των 5 GHz ενώ η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι η ορθογώνια πολύπλεξη συχνότητας (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), επιτυγχάνοντας έτσι ρυθμούς μετάδοσης έως και 54 Mbps. Το 802.11b είναι αυτό που επικράτησε, μέχρι η ανάγκη για αύξηση των ταχυτήτων να οδηγήσει στη δημιουργία ενός νέου προτύπου.



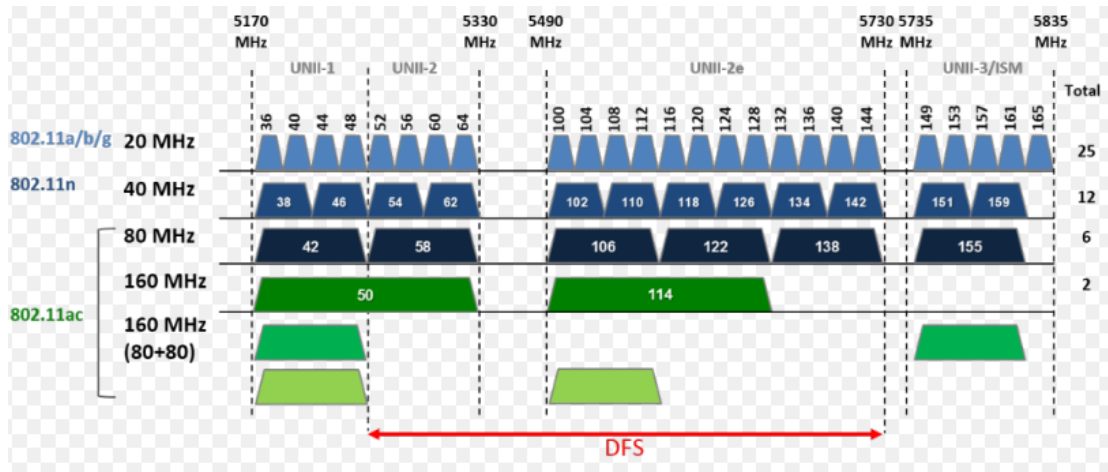
Εικόνα 1: Ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του προτύπου 802.11b

Τον Ιούνιο του 2003 εγκρίθηκε το 802.11g, το οποίο επιχειρεί να συνδυάσει τα καλύτερα σημεία των προηγούμενων δύο προτύπων. Η λειτουργία του είναι στα 2.4 GHz, δηλαδή στην ίδια ζώνη με το 802.11b, με ορθογώνια όμως διαμόρφωση που επιτρέπει ρυθμό μετάδοσης στα 54 Mbps, όπως και το 802.11a.

Το 802.11n είναι το επόμενο πρότυπο, το οποίο βασίζεται πάνω στο 802.11g ενώ προσθέτει την τεχνική MIMO (multiple input, multiple output), στην οποία αντί για μία χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές στον πομπό και στο δέκτη, συνδυάζοντας πολλαπλά σήματα που εκπέμπονται ταυτόχρονα μέσω διαφορετικών ασύρματων καναλιών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των λαθών και τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας. Προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης δύο καναλιών εύρους 20 MHz σχηματίζοντας ένα μεγαλύτερο (40 MHz) κανάλι στο φάσμα των 5 GHz. Το 802.11n λειτουργεί τόσο στα 2.4 GHz, όσο και στα 5 GHz και υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης έως 600 Mbps.

Το τελευταίο πρότυπο είναι το 802.11ac, το οποίο είναι εξέλιξη του 802.11n. Δίνει τη δυνατότητα συνένωσης ακόμα περισσότερων καναλιών σε σχέση με τον προκάτοχό του, δημιουργώντας ένα 80 MHz κανάλι (σύνδεση 4 καναλιών) ή ένα 160 MHz (σύνδεση 8 καναλιών). Επίσης, ενσωματώνει την τεχνική MU-MIMO (multi user-multiple input,

multiple output), που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση σε διαφορετικούς χρήστες. Το 802.11ac προσφέρει προς τα πίσω συμβατότητα με τα πρότυπα 802.11b/g/n και το εύρος ζώνης εκτιμάται μέχρι 1300 Mbps στη ζώνη των 5 GHz.



Εικόνα 2: Φάσμα συχνοτήτων του προτύπου 802.11ac

### 1.3: Στόχος και οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Η εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας τα τελευταία χρόνια οδήγησε σε ραγδαία αύξηση της χρήσης των κινητών συσκευών, όπως φορητοί υπολογιστές, tablet και κινητά τηλέφωνα, τα οποία έχουν γίνει κομμάτι της καθημερινότητας εκατομμύρια χρηστών ανά τον κόσμο. Οι συσκευές αυτές, οι οποίες έχουν περιορισμένο μέγεθος και βάρος, λειτουργούν με μπαταρία προσφέροντας φορητότητα στους χρήστες, η οποία ωστόσο έρχεται με ένα τίμημα: απαιτούν περιορισμένη ποσότητα ενέργειας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών αυτών, προκειμένου να διασφαλιστεί η ευχρηστία τους.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις όσο αφορά τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο, με την παρουσίαση και ανάλυση των οποίων να είναι ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει την τοποθέτηση των σταθμών σε κατάσταση αδράνειας όταν δεν έχουν πακέτα προς μετάδοση, γνωστή ως λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (PSM – Power Save Mode). Η τοποθέτηση των σταθμών σε κατάσταση χαμηλής ισχύος όταν δε χρησιμοποιούνται αποτελεί μία σημαντική τεχνική όσο αφορά την

εξοικονόμηση ενέργειας των ασύρματων συσκευών που λειτουργούν με μπαταρία. Η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης του προτύπου IEEE 802.11 είναι μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές που έχουν εφαρμογή στα ασύρματα δίκτυα, και ορίζει λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας τόσο για δίκτυα υποδομής όσο και για δίκτυα ad-hoc.

Η δεύτερη προσέγγιση αφορά τον έλεγχο της ενέργειας μετάδοσης, δηλαδή της ενέργειας που απαιτείται για τη μετάδοση των πακέτων. Καθώς η ενέργεια των συσκευών WLAN καταναλώνεται κυρίως στη λειτουργία μετάδοσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επικοινωνίας, ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης (TPC - Transmit Power Control) αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο επίτευξης του στόχου εξοικονόμησης ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αρχικά μία ανάλυση της ενέργειας που καταναλώνεται στις κινητές συσκευές, η οποία αποδεικνύει τη συνεισφορά του WiFi στην κατανάλωση ενέργειας μιας ηλεκτρονικής συσκευής. Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (PSM) του προτύπου IEEE 802.11, καθώς και πιθανά ζητήματα που προκύπτουν σχετικά με αυτή. Επιπρόσθετα, αναλύεται η απόδοση του PSM και γίνεται μία εκτενής αναφορά σε προτεινόμενες λύσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία με σκοπό την αντιμετώπιση των αδυναμιών από τις οποίες πάσχει, ενώ γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης κάποιων δυνατοτήτων με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση της κατανάλωσης ενός σταθμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται και κατηγοριοποιούνται προτεινόμενοι μέθοδοι και μηχανισμοί ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης, ενώ επιπλέον αναλύονται οι επιπτώσεις των στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας στην απόδοση των ασύρματων δικτύων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα από τη διεξαγωγή κατάλληλων προσομοιώσεων με σκοπό την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας ενός από τους προτεινόμενους μηχανισμούς, καθώς και τη μελέτη της επίδρασης μιας από τις παραμέτρους του πειράματος στην απόδοση του μηχανισμού.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, ενώ παρατίθενται προτάσεις για πιθανή μελλοντική εργασία στο κεφάλαιο έξι.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

### 2.1: Ανάλυση της ενέργειας που καταναλώνεται στις κινητές συσκευές

Καθώς η φορητότητα έχει γίνει πλέον απαραίτητη στη σημερινή κοινωνία με την ανάπτυξη των smartphones και των tablets, τα οποία κυριαρχούν ολοένα και περισσότερο στην καθημερινότητα των ανθρώπων, οι ανάγκες έχουν πλέον αλλάξει. Οι προγραμματιστές λογισμικού, οι οποίοι στις περιπτώσεις σταθερών υπολογιστών σπάνια λάμβαναν υπόψιν τους την ενέργεια στη διαδικασία ανάπτυξης των εφαρμογών, είναι αναγκασμένοι τώρα να το κάνουν. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι κρίσιμη για το χρήστη και την εμπειρία του, γεγονός που καθιστά την προσπάθεια εξοικονόμησης της ενέργειας επιτακτική.

Αποδεικνύεται ότι η μοντελοποίηση (ή αλλιώς ανάλυση) της ενέργειας που καταναλώνεται με σκοπό τη βελτιστοποίησή της δεν είναι από μόνη της αρκετή. Κάποιες συνιστώσες, όπως για παράδειγμα το WiFi και το GPS, συνεχίζουν να αντλούν ενέργεια ακόμα και μετά τη χρήση τους. Η κατάσταση αυτή, γνωστή και ως κατάσταση ισχύος ουράς (tail power state), περιπλέκει τα πράγματα και δυσχεραίνει την απόδοση της ενέργειας που καταναλώθηκε στο υπεύθυνο τμήμα κώδικα. Για το λόγο αυτό οι συγγραφείς του [1] προτείνουν μια υβριδική προσέγγιση, η οποία δίνει τη δυνατότητα στους developers να κατανοήσουν τον τρόπο που καταναλώνεται η ενέργεια στον κώδικά τους και να αξιοποιήσουν την πληροφορία προς όφελος της βελτιστοποίησης, με τελικό στόχο την επέκταση ζωής της μπαταρίας.

Γίνεται λοιπόν ξεκάθαρο ότι για να υπάρξει καλή διαχείριση ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται, πρέπει να γίνει κατανοητό που και πως χρησιμοποιείται αυτή. Στο [2] γίνεται ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας των κύριων συνιστωσών υλικού ενός κινητού τηλεφώνου, τόσο μέσω μετρήσεων όσο και με τη βοήθεια διαφόρων σεναρίων χρήσης. Τα αποτελέσματα, τα οποία επιβεβαιώθηκαν με τη διενέργεια μετρήσεων σε δύο επιπλέον κινητές συσκευές, δείχνουν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της κατανάλωσης οφείλεται στο κομμάτι που αφορά το σύστημα κινητής τηλεφωνίας (GSM) και την απεικόνιση (display), συμπεριλαμβανομένου του LCD πλαισίου και της οθόνης αφής, του οδηγού γραφικών και του οπίσθιου φωτισμού (backlight), με τη φωτεινότητα του τελευταίου να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην κατανάλωση ενέργειας. Παρατηρήθηκε ότι καθιστώντας τον οπίσθιο

φωτισμό αμυδρό κατά τη διάρκεια μιας κλήσης, πολιτική που ακολουθεί και το Android, μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση έως και 40%. Όσο αφορά το WiFi, η συγκριτική αξιολόγηση έδειξε ότι μπορεί να ξεπεράσει τα 700 mW σε κατανάλωση.

Συμπερασματικά, αποδεικνύεται ότι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της κατανάλωσης σε κινητές συσκευές είναι μέσω τερματισμού της λειτουργίας των εξαρτημάτων που δε χρησιμοποιούνται, καθώς και απενεργοποίηση της παροχής τους όπου αυτό είναι εφικτό.

Σύμφωνα με το 802.11 πρότυπο, μια συσκευή WLAN μπορεί να βρίσκεται κάθε στιγμή είτε σε μία ενεργή κατάσταση είτε σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης. Στην ενεργή κατάσταση, ο προσαρμογέας δικτύου είναι σε επαγρύπνηση και έτοιμος να δεχτεί δεδομένα οποιαδήποτε στιγμή. Όταν η διεπαφή είναι αδρανής, μεταβαίνει στη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης. Στην περίπτωση αυτή, ο προσαρμογέας δεν μπορεί να δεχτεί ή να στείλει δεδομένα με αποτέλεσμα η κατανάλωση να μειώνεται όσο η συσκευή παραμένει στην κατάσταση αυτή.

Η ενεργή κατάσταση περιλαμβάνει τις λειτουργίες μετάδοσης και λήψης, ενώ η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης τις λειτουργίες αδράνειας (idle mode) και μερικής αδράνειας (doze mode), στην οποία το σύστημα επιχειρεί να διαφυλάξει ενέργεια με το να περιορίσει την πρόσβαση των εφαρμογών στο δίκτυο, καθώς και τις υπηρεσίες που απαιτούν τη CPU. Η περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται στη λειτουργία μετάδοσης, ενώ στη λειτουργία μερικής αδράνειας η κατανάλωση είναι η λιγότερη δυνατή. Η συσκευή πρέπει να αισθανθεί το μέσο όταν βρίσκεται σε λειτουργία αδράνειας και επομένως απαιτείται η ίδια ενέργεια όπως και στη λειτουργία λήψης [3].

Στο [4] γίνεται ανάλυση της καταναλισκόμενης ενέργειας ενός κινητού τηλεφώνου σε διάφορους τρόπους λειτουργίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης που εκ των πραγμάτων προορίζεται για εξοικονόμηση ενέργειας, δεν είναι τελικά τόσο αποδοτική. Επιπλέον, το WiFi είναι αυτό που απαιτεί την περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις υπόλοιπες λειτουργίες μιας κινητής συσκευής Android. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση της συσκευής σε λειτουργία πτήσης (δηλαδή απενεργοποιώντας τη σύνδεση δεδομένων από και προς το κινητό τηλέφωνο) ενόσω βρίσκεται σε αδράνεια, οδηγεί σε τεράστια εξοικονόμηση και ως εκ τούτου επέκταση της

διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

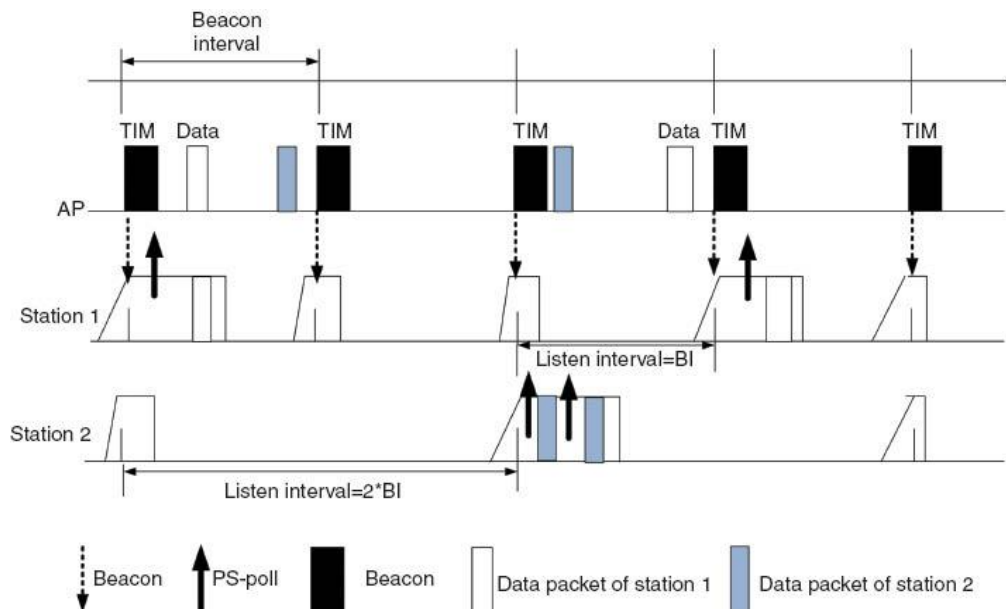
## 2.2: Λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης του προτύπου IEEE 802.11

Προκύπτει εύλογα λοιπόν το συμπέρασμα ότι το WiFi είναι υπεύθυνο για την κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας στις κινητές συσκευές. Όπως προαναφέρθηκε, το 802.11 πρότυπο δίνει τη δυνατότητα στις συσκευές αυτές να εξοικονομήσουν ενέργεια με το να εισέλθουν στη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (PSM - Power Save Mode), όπου η κεραία «ξυπνάει» ανά διαστήματα για να λάβει δεδομένα. Η λειτουργία αυτή έρχεται σε αντίθεση με αυτή της συνεχούς αφύπνισης (CAM - Constantly Awake Mode), όπου τόσο η κατανάλωση όσο και η απόδοση είναι σαφώς ανώτερη.

Το 802.11 PSM μπορεί να θεωρηθεί μια στατική (static PSM) προσέγγιση, αφού δεν προσαρμόζει τη διάρκεια της αδράνειας και της αφύπνισης στο βαθμό δραστηριότητας του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός και το σημείο πρόσβασης συμφωνούν πάνω στο διάστημα μεταξύ των πλαισίων beacon. Στο διάστημα αυτό, το σημείο πρόσβασης αποθηκεύει προσωρινά τα πακέτα και έπειτα στέλνει τα πλαίσια beacon, στα οποία μέσω του πεδίου TIM (Traffic Indication Map) υποδεικνύει στους σταθμούς την ύπαρξη των πακέτων. Οι σταθμοί «ξυπνούν» περιοδικά για να λάβουν τα πλαίσια beacon και στην περίπτωση που το πεδίο TIM ενός σταθμού έχει ρυθμιστεί, τότε ο σταθμός αυτός θα στείλει ένα πλαίσιο PS-POLL στο σημείο πρόσβασης ώστε να λάβει το πακέτο. Με τη βοήθεια του πεδίου δεδομένων MORE, ο σταθμός έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει αν υπάρχουν άλλα αποθηκευμένα πακέτα στο σημείο πρόσβασης, ώστε να συνεχίσει ή να σταματήσει να στέλνει πλαίσια PS-POLL [5].

Ο παραπάνω μηχανισμός συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, αφού οι συσκευές «ξυπνούν» μόνο όταν υπάρχουν πακέτα που εκκρεμούν στο σημείο πρόσβασης, αλλά με σημαντικό κόστος απόδοσης. Η καθυστέρηση (latency) που εισάγεται λόγω της προσωρινής αποθήκευσης των πακέτων στο σημείο πρόσβασης και των πλαισίων PS-POLL που απαιτούνται για να ληφθούν τα πακέτα είναι υψηλή, ειδικά για διαδραστικές εφαρμογές όπως το σερφάρισμα στο διαδίκτυο, καθώς και για εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση όπως το Skype. Γι' αυτό το λόγο, πολλές συσκευές WiFi υλοποιούν μια τεχνική γνωστή ως προσαρμοστικό PSM (adaptive PSM) [6]. Σύμφωνα με αυτή, η συσκευή εναλλάσσει μεταξύ της λειτουργίας CAM και της PSM με βάση κάποιες ευρετικές τιμές, όπως το αν έχει ρυθμιστεί το πεδίο TIM, αν έχει ληφθεί συγκεκριμένος αριθμός πακέτων

και αν δεν έχει υπάρξει δραστηριότητα στο δίκτυο για κάποιο προκαθορισμένο διάστημα. Η συσκευή ενημερώνει το σημείο πρόσβασης για τη μετάβασή της στην κάθε λειτουργία στέλνοντας πλαίσια που δεν περιέχουν δεδομένα (null data frames), αλλά έχουν ρυθμίσει κατάλληλα το δυαδικό ψηφίο διαχείρισης ενέργειας στο 0 (περίπτωση CAM) ή στο 1 (περίπτωση PSM). Δεδομένου ωστόσο ότι η συσκευή παραμένει σε λειτουργία CAM για μια περίοδο αδράνειας μετά από κάθε μετάβαση PSM λειτουργίας σε CAM, για πολλές εφαρμογές που τρέχουν στο υπόβαθρο και που δεν έχουν συνεχή δικτυακή δραστηριότητα, το προσαρμοστικό PSM μπορεί να είναι πιο ακριβό από την άποψη της κατανάλωσης σε σχέση με το στατικό PSM [6].



Εικόνα 3: Γραφική απεικόνιση της λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης (PSM) του προτύπου IEEE 802.11

Η στρατηγική που ακολουθεί ένα σημείο πρόσβασης για να προγραμματίσει τον τρόπο που θα διαχειριστεί τα πακέτα που πρέπει να σταλούν στους σταθμούς ποικίλει ανάλογα με την υλοποίηση. Μία τέτοια κοινή στρατηγική περιλαμβάνει «κανονικό προγραμματισμό» (normal scheduling), όπου τα αποθηκευμένα πακέτα ενός σταθμού τοποθετούνται στο τέλος της ουράς μετάδοσης. Όσο μεταδίδονται τα πακέτα που βρίσκονται πιο μπροστά στην ουρά, τόσο αυξάνεται ο χρόνος που ένας σταθμός πρέπει να



παραμένει σε λειτουργία CAM, και επομένως και η καταναλισκόμενη ενέργεια. Συσκευές όπως το iPhone 3GS λύνουν αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας προσαρμοστικό PSM με μικρό περιθώριο παραμονής σε λειτουργία CAM (20-25 ms). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην παραμένει ο σταθμός αρκετή ώρα «ζύπνιος» όσο τα πακέτα του βρίσκονται στην ουρά μετάδοσης, τα οποία επομένως θα επαναμεταδοθούν αρκετές φορές δημιουργώντας πρόβλημα στη χωρητικότητα του δικτύου [6].

Μία δεύτερη στρατηγική που χρησιμοποιείται υλοποιεί προγραμματισμό «υψηλής προτεραιότητας» (high priority scheduling), σύμφωνα με τον οποίο τα αποθηκευμένα πακέτα τοποθετούνται σε μια ξεχωριστή ουρά υψηλότερης προτεραιότητας. Η προσέγγιση αυτή ωστόσο μπορεί να οδηγήσει σε μεροληπτική αντιμετώπιση των σταθμών που βρίσκονται σε λειτουργία CAM, αφού τα πακέτα που προορίζονται για τους σταθμούς που είναι σε λειτουργία PSM τοποθετούνται στην κεφαλή της ουράς.

Οι συγγραφείς του [6] με τη βοήθεια κατάλληλων πειραμάτων κατέληξαν ότι με βάση την επιλογή της στρατηγικής υλοποίησης της λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης τόσο από τους σταθμούς όσο και από τα σημεία πρόσβασης, η ανταγωνιζόμενη κίνηση που υπάρχει στο υπόβαθρο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας ενός σταθμού, τη μείωση της χωρητικότητας του ασύρματου δικτύου λόγω των προαναφερόμενων αναμεταδόσεων και τέλος την αρνητική επίδραση στο βαθμό δικαιοσύνης απέναντι στους σταθμούς. Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω ζητήματα προτείνεται το NAPman (Network-Assisted Power Management), μία λύση που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας σε λειτουργία WiFi στις κινητές συσκευές ακόμη και με την παρουσία ανταγωνιζόμενης κίνησης.

Το NAPman υλοποιεί ένα νέο ενεργειακό αλγόριθμο δίκαιου προγραμματισμού στα ασύρματα σημεία πρόσβασης και καταφέρνει να απομονώσει τους PSM σταθμούς, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει να μειώσει στο ελάχιστο την κατανάλωση και τις μη αναγκαίες αναμεταδόσεις, καθώς και να εξασφαλίσει τον απαραίτητο βαθμό δικαιοσύνης μεταξύ ανταγωνιζόμενης κίνησης. Τα αποτελέσματα είναι παραπάνω από ικανοποιητικά, παρουσιάζοντας εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 70% στις κινητές συσκευές και μάλιστα χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στο 802.11 πρότυπο ή στις συσκευές WiFi, παρά μόνο στα σημεία πρόσβασης.

### 2.2.1: Ζητήματα που προκύπτουν σχετικά με το PSM και προτεινόμενες λύσεις

Καθώς το μέγεθος και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι κρίσιμα για τις ασύρματες συσκευές και τις εφαρμογές τους, ο προσεκτικός σχεδιασμός ενός τμήματος διαχείρισης ενέργειας σε μια ασύρματη διεπαφή είναι αναγκαίος ώστε να μην εξαντληθεί γρήγορα η ενέργεια από τις εφαρμογές των ανώτερων στρωμάτων. Το κύριο έργο της διαχείρισης ενέργειας είναι η επιλογή του κατάλληλου χρόνου και της σειράς μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων επαγρύπνισης και αδράνειας. Μία καλή λύση θα περιλαμβάνει την αφύπνιση της ασύρματης διεπαφής την κατάλληλη στιγμή ώστε να επέλθει επικοινωνία, καθώς και τη μετάβαση σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ώστε να εξοικονομηθεί ενέργεια εάν δεν υπάρχει κίνηση.

Όπως προαναφέρθηκε, το πρότυπο 802.11 ορίζει τη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (PSM), η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά την ενέργεια που καταναλώνεται και να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των κινητών σταθμών. Η λειτουργία αυτή ωστόσο δεν είναι επαρκής όταν υπάρχουν πολλαπλές ροές κίνησης στο δίκτυο. Η κατανάλωση ενέργειας ενός σταθμού δεν εξαρτάται μόνο από την κίνηση που προορίζεται γι' αυτόν, αλλά και από την κίνηση άλλων σταθμών. Ένας μεγάλος φόρτος κυκλοφορίας στο υπόβαθρο συχνά προκαλεί υψηλή κατανάλωση, φαινόμενο που οφείλεται σε τρεις παράγοντες [7]. Πρώτον, η διαδικασία αποστολής ενός πλαισίου PS-POLL για κάθε πακέτο ώστε να ληφθούν τα δεδομένα δεν είναι αποδοτική, ενώ επιπλέον η διαδικασία είναι επιρρεπής στο να διακοπεί εξαιτίας των δραστηριοτήτων άλλων σταθμών, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο αφύπνισης των κινητών σταθμών. Δεύτερον, παρόλο που ένας σταθμός ενημερώνεται για την ύπαρξη αποθηκευμένων δεδομένων, δεν μπορεί να γνωρίζει πότε ξεκινάει και πότε τελειώνει η διαδικασία της παράδοσής τους. Ως εκ τούτου, είναι αναγκασμένος να παραμένει «ξύπνιος» και να περιμένει έως ότου αυτή ολοκληρωθεί. Τρίτον, το PSM δε διαφοροποιεί μεταξύ της κίνησης multicast και broadcast. Η χρήση ενός μόνο bit που υποδεικνύει την κίνηση broadcast/multicast στο σημείο πρόσβασης αναγκάζει ένα σταθμό να παραμείνει σε ενεργή κατάσταση και να ξοδέψει ενέργεια για να λάβει τα multicast πλαίσια, ακόμα και αν δεν προορίζονται γι' αυτόν.

Στο [7], οι συγγραφείς εξετάζουν την απόδοση του υπάρχοντος μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας του προτύπου 802.11 και αποδεικνύουν ότι η κίνηση στο υπόβαθρο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας των κινητών σταθμών. Με βάση αυτό προτείνουν μία λύση με σκοπό να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση του μηχανισμού, ενώ ταυτόχρονα να διατηρήσουν τη δικτυακή απόδοση όσο το

δυνατό λιγότερο υποβαθμισμένη. Η λύση αυτή περιλαμβάνει ένα προγραμματισμένο πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης (scheduled PSM), το οποίο βασίζεται σε διαίρεση του χρόνου.

Πιο συγκεκριμένα, η περίοδος ενός πλαισίου beacon διαιρείται σε πολλαπλές χρονικές περιόδους προκαθορισμένης διάρκειας (time slices) και όλα τα εκκρεμή πλαίσια προγραμματίζονται ώστε να παραδοθούν στις περιόδους που τους έχουν ανατεθεί. Η δομή του πεδίου TIM έχει επανασχεδιαστεί, ώστε να μεταφέρει την πληροφορία ανάθεσης των περιόδων. Ένας σταθμός μπορεί να ενημερωθεί από το πεδίο TIM όχι μόνο για την ύπαρξη πακέτων δεδομένων στο σημείο πρόσβασης, αλλά και για το χρονοδιάγραμμα της αναμενόμενης παράδοσής τους. Είναι επομένως δυνατό για το σταθμό να ελέγξει την κατάσταση της ασύρματης διεπαφής του, έτσι ώστε να την προσαρμόσει στις ρυθμίσεις της κυκλοφορίας. Κατά τη διάρκεια των περιόδων που έχουν ανατεθεί σε άλλους σταθμούς, ο σταθμός μπορεί να επιλέξει να εισέλθει στη λειτουργία αδράνειας ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια.

Σε κάθε ομάδα multicast ανατίθεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό σύνδεσης (AID-association ID), όπως γίνεται και για κάθε σταθμό. Κατά τη διαδικασία της συσχέτισης multicast, το σημείο πρόσβασης εγκαθιδρύει μια αντιστοίχιση μεταξύ των διευθύνσεων προορισμού και των AIDs, και κάθε πλαίσιο στην προσωρινή μνήμη αποθήκευσης αναγνωρίζεται από το AID που του αντιστοιχεί. Τα πλαίσια που έχουν πανομοιότυπο αναγνωριστικό ομαδοποιούνται και αποστέλλονται σε συνεχόμενες χρονικές περιόδους, σχηματίζοντας έτσι μια περίοδο υπηρεσίας για αυτή την ομάδα.

Το σημείο πρόσβασης ξεκινάει τις μεταδόσεις πλαισίων για να παραδώσει τα δεδομένα που εκκρεμούν στον προορισμό τους, όταν η προγραμματισμένη περίοδος υπηρεσίας αρχίσει. Η μετάδοση για ένα συγκεκριμένο προορισμό πρέπει να λήξει πριν ξεκινήσει η επόμενη περίοδος υπηρεσίας, αποφεύγοντας έτσι την παρεμβολή των δύο μεταδόσεων.

Ένας σταθμός εναλλάσσει την κατάσταση της διεπαφής του από ενεργή σε αδράνειας και αντίστροφα, με βάση το πλάνο των χρονικών περιόδων στο πεδίο TIM. Εάν δεν ενδιαφέρεται για τα δεδομένα της παρούσας περιόδου υπηρεσίας, τότε μπορεί να εισέλθει στην κατάσταση αδράνειας και να «ξυπνήσει» μόνο όταν παρουσιαστεί μία περίοδος υπηρεσίας που τον αφορά. Στην περίπτωση που η ενέργεια που εξοικονομείται κατά τη διάρκεια της αδράνειας δεν αντισταθμίζει την ενέργεια που απαιτείται για τη

μετάβαση καταστάσεων, τότε ο σταθμός επιλέγει να παραμείνει «ξύπνιος».

Τα αποτελέσματα κατάλληλων προσομοιώσεων έδειξαν ότι το προγραμματισμένο PSM πλησιάζει το ιδανικό όσο αφορά την ενεργειακή απόδοση, μειώνει την επίδραση της κίνησης που υπάρχει στο υπόβαθρο και με κόστος μια μικρή μόνο υποβάθμιση της απόδοσης του δικτύου. Ως μετρική αξιολόγησης της δικτυακής απόδοσης χρησιμοποιήθηκε η μονόδρομη καθυστέρηση (OWD - One-Way Delay), γεγονός που οφείλεται στο ότι η αρνητική επίδραση μιας λύσης εξοικονόμησης ενέργειας πάνω στην απόδοση ενός δικτύου έχει κυρίως ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της κίνησης μεταξύ του σημείου πρόσβασης και των σταθμών. Η καθυστέρηση αυτή προκαλείται από την προσωρινή αποθήκευση των πλαισίων στο σημείο πρόσβασης, τα οποία απευθύνονται στους σταθμούς που βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας. Όσο μεγαλύτερη η καθυστέρηση, τόσο περισσότερη ενέργεια συντηρείται. Μία καλή ενεργειακά λύση επιδιώκει να κάνει ένα συμβιβασμό μεταξύ των δύο.

Το προγραμματισμένο PSM αποδεικνύεται ότι υπερτερεί του απλού PSM ενεργειακά, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο χειρισμού των αποθηκευμένων πλαισίων. Στο απλό PSM κάθε πλαίσιο που εκκρεμεί αντιμετωπίζεται σαν μία ξεχωριστή μονάδα στη διαδικασία παράδοσης υποβαθμίζοντας έτσι την απόδοση, ενώ ο χρόνος μιας παράδοσης δεν μπορεί να προβλεφθεί. Οι δύο αυτοί παράγοντες αναγκάζουν τους σταθμούς να παραμείνουν «ξύπνιοι» περισσότερη ώρα από αυτή που απαιτείται κανονικά, καθιστώντας τους ταυτόχρονα επιρρεπείς στο να επηρεαστούν από τις δραστηριότητες των άλλων σταθμών. Το προγραμματισμένο PSM, αντίθετα, χειρίζεται τα πακέτα με έναν πιο εκλεπτυσμένο τρόπο. Ομαδοποιεί τα πλαίσια με βάση τον προορισμό τους και τα παραδίδει σε ομάδες σε καθορισμένο χρόνο, προγραμματισμένο από το σημείο πρόσβασης. Είναι έτσι εφικτό για τους σταθμούς να αλλάξουν την κατάσταση της διεπαφής τους με βάση τα γνωστά-σχέδια παράδοσης των πλαισίων.

Οι ασύρματες κάρτες δικτύου έχει αποδειχτεί ότι ευθύνονται για περίπου το μισό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στις φορητές συσκευές, γεγονός που καθιστά την προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας στις ασύρματες διεπαφές ζωτικής σημασίας για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των συσκευών αυτών. Το πρωτόκολλο εξοικονόμησης ενέργειας του προτύπου 802.11, δηλαδή το PSM, πλήττεται από το σοβαρό μειονέκτημα ότι οι σταθμοί είναι υποχρεωμένοι να «ξυπνούν» σε κάθε άφιξη ενός πλαισίου beacon, ακόμα

και αν δεν υπάρχουν αποθηκευμένα πλαίσια για αυτούς στο σημείο πρόσβασης. Η ενέργεια που καταναλώνεται από την κινητή συσκευή για να αφυπνιστεί από μια αδρανή κατάσταση είναι συγκρίσιμη με αυτή της λήψης ενός πακέτου. Είναι επομένως προφανές ότι αν καταφέρει να μειωθεί ο αριθμός των αφυπνίσεων χωρίς να παρουσιαστούν μεγάλες καθυστερήσεις, τότε η καταναλισκόμενη ενέργεια μπορεί να μειωθεί σημαντικά [8].

Στην εργασία αυτή προτείνεται ένας αλγόριθμος που ορίζει δυναμικούς αντί για σταθερούς χρόνους αφύπνισης για τους σταθμούς, με απώτερο στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης και την όσο το δυνατό λιγότερη παρέμβαση και αλλαγή στο καθιερωμένο σχέδιο PSM. Σύμφωνα με αυτόν, η μόνη χρονική στιγμή που το σημείο πρόσβασης μπορεί να επικοινωνήσει με ένα σταθμό, είναι αυτή στην οποία ο σταθμός αφυπνίζεται και λαμβάνει ένα πλαίσιο beacon. Τη στιγμή αυτή το σημείο πρόσβασης προβλέπει την επόμενη βέλτιστη χρονική στιγμή beacon που ο σταθμός πρέπει να «ξυπνήσει» με βάση την κατάσταση του συστήματος, και ενημερώνει το σταθμό για τη στιγμή αυτή μέσω του τρέχοντος πλαισίου beacon. Οι επιλεγμένες χρονικές στιγμές αφύπνισης είναι ακέραια πολλαπλάσια των χρόνων άφιξης πλαισίων beacon. Ως εκ τούτου, η υπάρχουσα μέθοδος μετάδοσης των πλαισίων beacon από το σημείο πρόσβασης δε χρειάζεται να τροποποιηθεί.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που συγκρίνουν την ενέργεια που καταναλώνεται κάνοντας χρήση του προτεινόμενου αλγορίθμου με την ενέργεια χρησιμοποιώντας το απλό μοντέλο PSM δείχνουν, ότι όταν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι χαμηλός, το προτεινόμενο σχέδιο είναι κατά 37% περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό σε σχέση με το καθιερωμένο PSM.

Στο [9] οι συγγραφείς εξετάζουν το σενάριο ύπαρξης ενός αριθμού από σταθμούς οι οποίοι σερφάρουν στο διαδίκτυο σε ένα ασύρματο δίκτυο υποδομής. Το σερφάρισμα στο διαδίκτυο χαρακτηρίζεται από τη ζήτηση μικρών αρχείων για μεταφορά εκ μέρους των χρηστών, ενώ υπάρχει μια μικρή περίοδος αδράνειας μεταξύ δύο αιτήσεων.

Σε προηγούμενη δουλειά τους έδειξαν ότι η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (PSM) έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με αυτή της συνεχούς αφύπνισης (CAM) στην περίπτωση που όλοι οι σταθμοί «κατεβάζουν» μικρά αρχεία με μικρές περιόδους αδράνειας ανάμεσα στις λήψεις. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σταθμοί που βρίσκονται σε λειτουργία PSM μπορούν να αδρανοποιηθούν όσο δεν υπάρχει δραστηριότητα, γεγονός που εξοικονομεί ενέργεια, σε αντίθεση με τη λειτουργία CAM όπου οι σταθμοί παραμένουν ενεργοί συνεχώς.

Παρότι η λειτουργία PSM αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τη CAM, η απόδοση υποβαθμίζεται με την αύξηση του αριθμού των σταθμών, αφού το μερίδιο του ρυθμού απόδοσης ενός σταθμού μειώνεται, πράγμα που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου λήψης και ως εκ τούτου της ενέργειας που δαπανείται. Η αιτία που συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι το σημείο πρόσβασης δε δείχνει προτίμηση σε κανέναν από τους σταθμούς, πράγμα που σημαίνει ότι με την αύξηση των σταθμών που επιχειρούν να «κατεβάσουν» ταυτόχρονα, ο ρυθμός απόδοσης καθενός από τους σταθμούς θα μειωθεί.

Η παρούσα εργασία αποτελεί βελτίωση του στατικού PSM του προτύπου 802.11 και καλείται οπορτουριστικό PSM (OPSM - opportunistic PSM), αφού κάθε σταθμός περιμένει για την ευκαιρία να κατεβάσει το επιθυμητό αρχείο, η οποία θα έλθει όταν το σημείο πρόσβασης δε θα εξυπηρετεί κανένα άλλο σταθμό εκείνη τη στιγμή. Στην περίπτωση αυτή, ο ρυθμός απόδοσης δε θα μοιραστεί μεταξύ των σταθμών κατά τη διάρκεια λήψης ενός αρχείου, γεγονός που θα οδηγήσει σε μείωση του χρόνου λήψης του αρχείου καθώς και της καταναλισκόμενης ενέργειας. Οι σταθμοί ενημερώνονται για το αν το σημείο πρόσβασης εξυπηρετεί την παρούσα στιγμή κάποιο σταθμό μέσω της προσθήκης ενός επιπλέον bit στην επικεφαλίδα του πλαισίου beacon, το οποίο υποδεικνύει το αν η ουρά μετάδοσης του σημείου πρόσβασης είναι κενή ή όχι. Επιπρόσθετα, προκειμένου να αποφευχθεί η ταυτόχρονη λήψη αρχείων από σταθμούς που μόλις βγήκαν από την κατάσταση αδράνειας και επιθυμούν να εξυπηρετηθούν από το σημείο πρόσβασης, οι σταθμοί περιμένουν για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα κάθε φορά πριν ξεκινήσουν τη λήψη ενός αρχείου.

Στο OPSM, κάθε σταθμός μπορεί να είναι είτε σε λειτουργία CAM είτε σε λειτουργία PSM, ενώ εναλλάσσει μεταξύ των δύο. Ο σταθμός είναι πάντα ενεργός ενόσω βρίσκεται σε λειτουργία CAM, ενώ στην περίπτωση που είναι σε λειτουργία PSM μπορεί να είναι είτε ενεργός (περιμένοντας το πλαίσιο beacon από το σημείο πρόσβασης) είτε σε αδράνεια. Όταν ο σταθμός μεταβεί από τη λειτουργία PSM στη CAM ενημερώνει το σημείο πρόσβασης, το οποίο θα μεταφέρει όλα τα πακέτα που βρίσκονται στην αντίστοιχη ουρά PSM του σταθμού στην ουρά μετάδοσης. Αντίστοιχα, όταν ο σταθμός μεταβεί από τη λειτουργία CAM στη λειτουργία PSM, το σημείο πρόσβασης θα ξεκινήσει να τοποθετεί όλα τα πακέτα που προορίζονται για τον PSM σταθμό στην αντίστοιχη ουρά PSM.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που συγκρίνουν τον προτεινόμενο αλγόριθμο με το στατικό PSM δείχνουν, ότι αύξηση στον αριθμό των σταθμών που συσχετίζονται με το σημείο πρόσβασης ή στο μέγεθος του αρχείου που ζητείται από τους σταθμούς οδηγεί σε σημαντική αύξηση της απόδοσης και εξοικονόμηση ενέργειας.

Όπως έχει ήδη σημειωθεί, στη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης του προτύπου IEEE 802.11 οι σταθμοί «ξυπνούν» περιοδικά για να ελέγξουν αν υπάρχουν αποθηκευμένα πλαίσια στο σημείο πρόσβασης μέσω της αποστολής πλαισίων beacon εκ μέρους του AP. Τόσο το χρονικό διάστημα που το σημείο πρόσβασης μεταδίδει τα πλαίσια beacon όσο και το διάστημα που οι σταθμοί «ξυπνούν» για να λάβουν τα πλαίσια αυτά μπορούν να ρυθμιστούν, ενώ η επιλογή της ρύθμισής τους επηρεάζει άμεσα την απόδοση του PSM. Το πρότυπο, ωστόσο, δεν υπαγορεύει τον τρόπο που θα πρέπει να διαμορφωθούν τα παραπάνω διαστήματα, γεγονός που συχνά οδηγεί στη χρήση προκαθορισμένων τιμών. Όχι μόνο το PSM δεν μπορεί να προσαρμοστεί στη δυναμική της κίνησης και της διαμόρφωσης που είναι εγγενής στα τυπικά ασύρματα δίκτυα, αλλά έχει επίσης αναφερθεί ότι έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην απόδοση των εφαρμογών [10].

Για να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω αδυναμίες, έχουν προταθεί πολλά σχέδια εξοικονόμησης ενέργειας. Στο [10] οι συγγραφείς προτείνουν μια κεντρικοποιημένη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης για δίκτυα υποδομής συμβατά με το πρότυπο 802.11, την οποία καλούν C-PSM. Το προτεινόμενο σχέδιο επιτρέπει στο σημείο πρόσβασης να επιλέξει τις βέλτιστες παραμέτρους που είναι σχετικές με τη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης, όπως είναι τα διαστήματα αποστολής των πλαισίων beacon από το σημείο πρόσβασης και αφύπνισης από τους σταθμούς για τη λήψη τους, σύμφωνα με τα μοτίβα κίνησης όλων των σταθμών. Τα διαστήματα επιλέγονται έτσι ώστε να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια που προκαλείται από τις περιττές αφυπνίσεις και από τις διαμάχες για το κανάλι, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική σπατάλη ενέργειας λόγω του ότι οι σταθμοί που εμπλέκονται δεν μπορούν να εισέλθουν σε λειτουργία αδράνειας κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής.

Επιπλέον, το C-PSM περιλαμβάνει ένα χρονοδιάγραμμα αφύπνισης με σκοπό να μειώσει τις ταυτόχρονες αφυπνίσεις των σταθμών, αποσκοπώντας μ' αυτόν τον τρόπο στην περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Το σημείο πρόσβασης, επίσης, αναθέτει στους σταθμούς τα ελάχιστα δυνατά μεγέθη των παραθύρων συμφόρησης, έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα ένας σταθμός που «ξυπνάει» πιο σπάνια να επαναμεταδώσει νωρίτερα, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται εξάλειψη της μεροληψίας ανάμεσα στους σταθμούς.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι το προτεινόμενο σχέδιο ξεπερνά σημαντικά σε επίδοση το καθιερωμένο PSM, επιτυγχάνοντας να μειώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια και να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση έως 76% και 320% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, καταφέρνει να μειώσει την καθυστέρηση που επιφέρει η

αποθήκευση των πλαισίων στο σημείο πρόσβασης κατά 88%. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η απόδοση του C-PSM αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο αριθμός των σταθμών.

### **2.2.2: Αξιοποίηση ευκαιριών για βελτιστοποίηση του PSM**

Με τα χρόνια έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες και προτάσεις με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης της λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης του προτύπου 802.11. Οι περισσότερες από αυτές τις προσπάθειες, ωστόσο, δεν αξιοποιούν τη δυνατότητα η κινητικότητα του χρήστη να βελτιώσει το PSM, ούτε και τον τρόπο που θα πρέπει να συμπεριφέρεται ένας σταθμός PSM όταν κινείται. Ένας από τους περιορισμούς του προεπιλεγμένου σχεδίου PSM, επίσης, είναι ότι δε λαμβάνει υπόψιν του την κινητικότητα του χρήστη καθώς και την κίνηση που υπάρχει στο δίκτυο, όταν πρόκειται να πάρει αποφάσεις σχετικά με την αφύπνιση ή την αδράνεια των σταθμών. Κάθε σταθμός, δηλαδή, «ξυπνάει» σε κάθε διάστημα άφιξης των πλαισίων beacon και λαμβάνει όποια πακέτα είναι προσωρινά αποθηκευμένα για αυτόν, χωρίς να λάβει υπόψιν του την κινητικότητά του ή τον τρέχων ρυθμό κυκλοφορίας.

Η εξέταση των παραγόντων αυτών μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον ευκαιρίες εξοικονόμησης ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν ο χρήστης βρίσκεται μακριά από το σημείο πρόσβασης, τα πακέτα που προορίζονται γι' αυτόν μπορούν να αποθηκευτούν και να μεταδοθούν αργότερα με υψηλότερους ρυθμούς, αφού ο χρήστης έχει έρθει πιο κοντά, επιτυγχάνοντας έτσι εξοικονόμηση ενέργειας. Με παρόμοιο τρόπο, αξιοποιώντας την πληροφορία σχετικά με την κατάσταση της κίνησης είναι δυνατό να μειωθεί περαιτέρω η καταναλισκόμενη ενέργεια, με το να επιτραπεί στους σταθμούς να «ξυπνούν» πιο σπάνια (άρα λιγότερη επιβάρυνση λόγω της αφύπνισης) ώστε να λάβουν τα αποθηκευμένα πακέτα, κατά τη διάρκεια ενός και μοναδικού διαστήματος beacon.

Οι συγγραφείς του [11] επιδιώκουν να εκμεταλλευτούν τις παραπάνω ευκαιρίες εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ με τη διενέργεια πειραμάτων και προσομοιώσεων εξετάζουν διάφορες παραμέτρους του PSM, τα αποτελέσματα των οποίων θα τους οδηγήσουν στη σχεδίαση ενός βελτιστοποιημένου σχεδίου PSM.

Η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης είναι μια γνωστή τεχνική που αποσκοπεί στη βελτίωση της ρυθμαπόδοσης μεταξύ ενός σταθμού και του σημείου πρόσβασης. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την αξιοποίηση των πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης που είναι διαθέσιμοι για ένα σταθμό, και τη δυναμική προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσής του στην-χρονικά



μεταβαλλόμενη και εξαρτώμενη από τη θέση-κατάσταση του καναλιού μεταξύ του σταθμού και του σημείου πρόσβασης. Με τη βοήθεια ενός αποτελεσματικού σχεδίου προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης, ένα πακέτο μπορεί να μεταδοθεί με τον υψηλότερο ρυθμό που μπορεί να φιλοξενηθεί με βάση την κατάσταση του καναλιού, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη λιγότερου χρόνου μετάδοσης όπως και ενέργειας. Η αποδοτικότητα του προεπιλεγμένου σχεδίου PSM, επομένως, μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση μιας έξυπνης στρατηγικής προσωρινής αποθήκευσης. Η κεντρική ιδέα είναι ότι όταν η κατάσταση του καναλιού είναι κακή, το σημείο πρόσβασης αποθηκεύει προσωρινά τα πακέτα, τα οποία θα ζητήσουν οι σταθμοί με την εκπομπή πλαισίων PS-POLL μόνο όταν η κατάσταση του καναλιού θα έχει βελτιωθεί αρκετά, ώστε να μπορεί να δεχτεί υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Ο συνδυασμός της προσωρινής αποθήκευσης με το PSM μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα ωφέλιμος για τους κινητούς σταθμούς, οι οποίοι μπορεί να παρατηρήσουν μεγάλης κλίμακας διακυμάνσεις στην κατάσταση του καναλιού.

Με τη βοήθεια πειραμάτων, οι συγγραφείς σύγκριναν το προεπιλεγμένο σχέδιο PSM με ένα που περιλαμβάνει μια απλή στρατηγική προσωρινής αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση της στρατηγικής οδήγησε σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η οποία όμως μπορεί να μην είναι εφικτή κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό προτείνουν τη σχεδίαση μιας έξυπνης στρατηγικής, η οποία όταν θα συνδυαστεί με το PSM θα επιφέρει περισσότερη εξοικονόμηση και ταυτόχρονα παράδοση όλων των πακέτων.

Για να εξασφαλιστεί η λήψη των πλαισίων beacon από το σημείο πρόσβασης, ένας σταθμός συνήθως χρειάζεται να «ξυπνήσει» λίγο νωρίτερα από τον αναμενόμενο χρόνο άφιξης ενός πλαισίου beacon. Οι λόγοι για την ανάγκη ύπαρξης αυτής της «επιβάρυνσης λόγω της αφύπνισης» (wakeur overhead) περιλαμβάνουν την απαίτηση χρόνου από μέρος της κεραίας για την εναλλαγή λειτουργίας, καθώς και την ασυγχρονία μεταξύ του σημείου πρόσβασης και του σταθμού εξαιτίας της απόκλισης του ρολογιού. Οι συγγραφείς εκτέλεσαν πειράματα για να μελετήσουν την επίδραση αυτής της επιβάρυνσης, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όσο μικρότερο το overhead, τόσο υψηλότερο το ποσοστό απώλειας των πλαισίων beacon. Ένας τρόπος για να διατηρηθεί το overhead όσο το δυνατό χαμηλότερο χωρίς απώλειες, είναι η παράλειψη εκ μέρους των σταθμών κάποιων πλαισίων beacon όταν η κίνηση δεν είναι έντονη, και η αφύπνισή τους αργότερα ώστε να παραλάβουν τα αποθηκευμένα πακέτα από το σημείο πρόσβασης με ένα και μοναδικό overhead.

Τέλος, με τη βοήθεια κατάλληλων προσομοιώσεων οι συγγραφείς εξέτασαν την

επίδραση του «διαστήματος παρακολούθησης Beacon» (BMI - Beacon Monitoring Interval), το οποίο ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων στιγμών, στις οποίες ο σταθμός «ξυπνάει» για να λάβει τα πλαίσια beacon. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι όσο μεγαλύτερο το BMI, τόσο περισσότερα πακέτα τοποθετούνται στην ουρά του σημείου πρόσβασης. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μήκους της ουράς και ως εκ τούτου της καθυστέρησης παράδοσης των πακέτων. Ωστόσο, κάτι τέτοιο θα οδηγήσει επίσης σε περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας, αφού θα εξοικονομηθούν περισσότερα overhead λόγω αφύπνισης και ιδιαίτερα όταν η κίνηση είναι χαμηλή. Προκύπτει εύλογα λοιπόν το συμπέρασμα, ότι απαιτείται ένας συμβιβασμός κατά τη ρύθμιση του κατάλληλου BMI.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδήγησαν στο σχεδιασμό ενός βελτιστοποιημένου σχεδίου PSM, το οποίο καλείται M-PSM, όπου χρησιμοποιώντας μια έξυπνη στρατηγική προσωρινής αποθήκευσης καθώς και έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο ρύθμισης του διαστήματος ύπνου, επιδιώκει να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας.

Στο M-PSM, όταν ο σταθμός που βρίσκεται σε λειτουργία PSM θα λάβει ένα πλαίσιο beacon, θα εκτελέσει δύο δομοστοιχεία. Το πρώτο, η εκτίμηση τάσεων μεγάλης κλίμακας, είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση ενός κινητού μέσου όρου των τιμών SNR που ανήκουν στα ληφθέντα πλαίσια beacon, καθώς επίσης και για τον υπολογισμό των τάσεων μεγάλης κλίμακας της τρέχουσας κατάστασης του καναλιού μεταξύ του σταθμού και του σημείου πρόσβασης, που μπορεί να είναι υψηλές, χαμηλές ή σταθερές. Αν ο σταθμός είναι κινητός, τότε η τάση μεγάλης κλίμακας μπορεί να είναι μια ένδειξη της κινητικότητας του σταθμού. Μια χαμηλή τάση μεγάλης κλίμακας της κατάστασης του καναλιού, για παράδειγμα, μπορεί να σημαίνει ότι ο σταθμός απομακρύνεται από το σημείο πρόσβασης.

Το δεύτερο δομοστοιχείο περιλαμβάνει τον χρονοπρογραμματισμό των διαστημάτων αφύπνισης και αδράνειας. Δέχεται ως δεδομένα τις εξόδους του πρώτου δομοστοιχείου καθώς και την πληροφορία του μεγέθους της ουράς του σημείου πρόσβασης για τον συγκεκριμένο σταθμό, που όπως θα αναφερθεί παρακάτω περιέχεται στο πλαίσιο beacon, και έπειτα υπολογίζει το ρυθμό κυκλοφορίας που προορίζεται για αυτό το σταθμό και αποφασίζει για το αν θα πρέπει να αποστείλει πλαίσια PS-POLL για να ανακτήσει τα αποθηκευμένα πακέτα και το πόσο θα πρέπει να μείνει σε κατάσταση αδράνειας πριν «ξυπνήσει» για να λάβει το πλαίσιο beacon. Με άλλα λόγια, αποφασίζει για το πως πρέπει να ορίσει το BMI. Ο στόχος αυτού του στοιχείου είναι να εξασφαλίσει ότι όλα τα πακέτα που προορίζονται για ένα συγκεκριμένο σταθμό θα ανακτηθούν με έναν πιο ενεργειακά

αποδοτικό τρόπο, δηλαδή με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και με χαμηλότερες επιβαρύνσεις λόγω αφύπνισης.

Όσο αφορά το σημείο πρόσβασης, η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτή του προεπιλεγμένου σχεδίου PSM, με την έννοια ότι θα αποθηκεύσει τα πακέτα που προορίζονται για τους PSM σταθμούς και θα τα παραδώσει όταν λάβει τα πλαίσια PS-POLL. Το σημείο πρόσβασης θα επισυνάψει επιπρόσθετα στο πλαίσιο beacon την πληροφορία σχετικά με το μέγεθος της ουράς του σημείου πρόσβασης. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται από το σταθμό για τον υπολογισμό του ρυθμού κυκλοφορίας καθώς επίσης και για το σχεδιασμό των μελλοντικών χρονοδιαγραμμάτων.

Οι συγγραφείς αξιολόγησαν την αποτελεσματικότητα του M-PSM εκτελώντας κατάλληλα πειράματα και προσομοιώσεις, ενώ παράλληλα το σύγκριναν με το προεπιλεγμένο PSM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν η κίνηση είναι χαμηλή, το M-PSM είναι εξαιρετικά πιο αποδοτικό ενεργειακά από το απλό PSM. Αντίθετα, όταν η κίνηση είναι έντονη, τα δύο σχέδια παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση τόσο μεταξύ τους όσο και με την ενεργή λειτουργία, γεγονός που υποδεικνύει ότι σ' αυτήν την περίπτωση δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί κανένα από τα δύο σχέδια. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει το στόχο του αρχικού σχεδιασμού του σχεδίου PSM (και άρα και του M-PSM), ο οποίος αφορά τη μείωση της κατανάλωσης ενός ασύρματου σταθμού όταν ο σταθμός είναι ελαφρώς φορτωμένος, και με κίνηση που δεν είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση. Επομένως για εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, όπως το Skype, μπορεί να χρειαστεί ειδική μεταχείριση αν ο σταθμός πρόκειται να λειτουργήσει στο PSM ή το M-PSM.

### **2.2.3: Διαχείριση ενέργειας σε δίκτυα υποδομής και ad-hoc**

Για να επιτευχθεί μείωση στην ενέργεια που καταναλώνεται, ένας σταθμός μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να εισέλθει στη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης, η οποία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω επιτρέπει σε μια συσκευή συμβατή με το πρότυπο 802.11 να εξοικονομήσει ενέργεια όταν δε συμμετέχει ενεργά σε επικοινωνίες δεδομένων. Υπενθυμίζεται ότι μία συσκευή που βρίσκεται σε λειτουργία, μπορεί να βρίσκεται κάθε στιγμή σε λειτουργία μετάδοσης, λήψης, αδράνειας ή μερικής αδράνειας. Η χαμηλότερη κατανάλωση επιτυγχάνεται στη λειτουργία μερικής αδράνειας (doze mode), στην οποία όμως η συσκευή αδυνατεί να μεταδώσει ή να λάβει πλαίσια.

Είναι προφανές ότι η διατήρηση της ενέργειας προϋποθέτει ελαχιστοποίηση του

χρόνου που ένας σταθμός είναι σε επαγρύπνηση και μεγιστοποίηση αυτού που ο σταθμός είναι στη λειτουργία μερικής αδράνειας. Η διαχείριση της ενέργειας λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο για τα δίκτυα ad-hoc και υποδομής.

Στην περίπτωση του βασικού συνόλου υπηρεσιών υποδομής (infrastructure BSS), οι σταθμοί θα εισέλθουν στη λειτουργία μερικής αδράνειας εάν βρίσκονταν προηγουμένως σε αδράνεια για ένα χρονικό διάστημα, το οποίο υποδεικνύεται από τη λήξη του αντίστοιχου χρονοδιακόπτη. Όταν οι σταθμοί βρίσκονται σε λειτουργία μερικής αδράνειας, το σημείο πρόσβασης με το οποίο είναι συσχετισμένοι θα αποθηκεύσει προσωρινά τα πλαίσια δεδομένων που προορίζονται για αυτούς και αφού συγκεντρώσει περιοδικά ένα χάρτη ένδειξης της κυκλοφορίας (TIM - Traffic Indication Map), θα τον ενσωματώσει σε πλαίσια beacon, τα οποία και θα μεταδώσει έπειτα στους σταθμούς. Στο μεταξύ οι σταθμοί «ξυπνούν» ανά διαστήματα για να λάβουν τα πλαίσια beacon, ώστε να ενημερωθούν για το αν υπάρχουν αποθηκευμένα πλαίσια που προορίζονται γι' αυτούς στο σημείο πρόσβασης. Αν υπάρχουν, τότε οι σταθμοί βγαίνουν από τη λειτουργία μερικής αδράνειας ώστε να λάβουν τα πακέτα. Η περίοδος μερικής αδράνειας ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από το ξεκίνημα της λειτουργίας μερικής αδράνειας σε ένα σταθμό, έως τη στιγμή που ο σταθμός «ξυπνάει» για να λάβει το πλαίσιο beacon και αποφασίζεται από κοινού από το σταθμό και το AP. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η περίοδος, τόσο περισσότερη μνήμη χρησιμοποιεί το σημείο πρόσβασης για την προσωρινή αποθήκευση των πακέτων. Μια συνάρτηση γήρανσης χρησιμοποιείται συνήθως στο σημείο πρόσβασης, ώστε να απορρίπτονται τα παλιά πλαίσια λόγω των περιορισμών σε μνήμη.

Σε ένα ανεξάρτητο βασικό σύνολο υπηρεσιών (IBSS - Independent BSS), δηλαδή σε ένα ad-hoc δίκτυο, οι σταθμοί είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Αν κάποιος σταθμός έχει αποθηκευμένα δεδομένα για κάποιον άλλο, τότε θα στείλει ένα μήνυμα ένδειξης κυκλοφορίας ad-hoc (ATIM), ώστε να τον ειδοποιήσει. Οι σταθμοί που δε λαμβάνουν αυτό το πλαίσιο μπορούν να διατηρήσουν την ενέργειά τους μπαίνοντας σε λειτουργία μερικής αδράνειας.

Η διαχείριση της ενέργειας σε ένα IBSS δεν είναι τόσο αποδοτική όσο σε ένα BSS υποδομής, καθώς οι σταθμοί που πρέπει να παραλάβουν κάποιο πλαίσιο πρέπει να είναι περισσότερο διαθέσιμοι και δεν μπορούν έτσι να παραμείνουν σε λειτουργία μερικής αδράνειας για την ίδια χρονική διάρκεια όπως σε ένα δίκτυο υποδομής.

Στο [12] εξετάζεται η κατανάλωση ενέργειας ενός σταθμού που βρίσκεται σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο υποδομής. Οι συγγραφείς επιχειρούν να μελετήσουν το σχέδιο διαχείρισης ενέργειας του προτύπου IEEE 802.11 κατασκευάζοντας μια αλυσίδα Markov, ενώ παράλληλα υπολογίζουν τόσο τη μέση καθυστέρηση ουράς όσο και την αναλογία κατανάλωσης ενέργειας, που ορίζεται ως ο λόγος της κατανάλωσης εκ μέρους του σταθμού στη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης προς την κατανάλωση ενέργειας του σταθμού στην ενεργή κατάσταση.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα που ο σταθμός «ξυπνάει» περιοδικά για να λάβει τα πλαίσια που δηλώνουν την ύπαρξη αποθηκευμένων πακέτων στο σημείο πρόσβασης, αυξάνεται η καθυστέρηση στην ουρά, ενώ η αναλογία της κατανάλωσης ενέργειας μειώνεται. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι πράγματι υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ της καθυστέρησης και της κατανάλωσης ενέργειας, όπως σημειώθηκε παραπάνω. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη ανάλυση μπορεί να βρεθεί το βέλτιστο διάστημα ακρόασης ενός ασύρματου σταθμού το οποίο ελαχιστοποιεί την κατανάλωση, ενώ παράλληλα ικανοποιείται η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS - Quality of Service) όσο αφορά την καθυστέρηση.

Στο [13] γίνεται ανάλυση της απόδοσης της λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης στα δίκτυα ad-hoc όσο αφορά διάφορες μετρικές ενεργειακής απόδοσης, όπως η κατανάλωση ενέργειας, η καθυστέρηση καθώς και ο ρυθμός απώλειας πακέτων, ως συνάρτηση του φόρτου κίνησης, του μεγέθους της προσωρινής μνήμης (buffer) και άλλων σχετικών παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι αλλάζοντας το μέγεθος του διαστήματος αποστολής των πλαισίων beacon δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό η κατανάλωση ενέργειας. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι το PSM δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό σε συνθήκες μικρού φόρτου κίνησης. Όσο αφορά την καθυστέρηση, η οποία αποτελείται από την καθυστέρηση ουράς, την καθυστέρηση μετάδοσης καθώς και αυτή που απαιτείται για να μεταβεί η διεπαφή στην ενεργή κατάσταση αν κριθεί απαραίτητο, παρατηρείται ότι καθώς το διάστημα αποστολής πλαισίων beacon μεγαλώνει, αυξάνεται αντίστοιχα και η καθυστέρηση. Στα σενάρια ύπαρξης υψηλού φόρτου συμβαίνουν απώλειες πακέτων, γεγονός που συνεπάγεται μείωση στην καθυστέρηση λόγω μικρότερης καθυστέρησης στην ουρά.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα, ότι σε περιπτώσεις μικρής κίνησης η επιλογή ενός μεγάλου διαστήματος αποστολής πλαισίων beacon θα εξοικονομήσει ενέργεια, με κόστος όμως υψηλές καθυστερήσεις. Αντίστοιχα, σε συνθήκες μεγάλου φόρτου, θα πρέπει να προτιμάται η χρήση μικρού διαστήματος αποστολής πλαισίων beacon, έτσι ώστε να μειωθεί ο ρυθμός απώλειας πακέτων. Μπορεί να σημειωθεί, ότι η ρύθμιση του διαστήματος αποστολής πλαισίων beacon με βάση την κατάσταση της κίνησης δεν μπορεί να επιτύχει μια καλή ισορροπία μεταξύ απόδοσης και ενέργειας.

Το πρότυπο 802.11 ορίζει έναν περιορισμό, σύμφωνα με τον οποίο το σημείο πρόσβασης πρέπει να αποθηκεύσει την κίνηση που λαμβάνει για τουλάχιστον ένα διάστημα ακρόασης, του οποίου τη διάρκεια διαπραγματεύεται ο σταθμός με το σημείο πρόσβασης όταν συσχετίζεται με αυτό. Επομένως, η διαχείριση του χρονοδιακόπτη αδράνειας, της περιόδου μερικής αδράνειας καθώς και η κατανομή της προσωρινής μνήμης πλαισίων στο AP αποτελούν σημαντικά ζητήματα που πρέπει να διευθετηθούν έτσι ώστε να καταστεί αποτελεσματική η διαχείριση της ενέργειας.

Στο [14] αναπτύσσεται ένα μοντέλο ανάλυσης της διαχείρισης ενέργειας για ασύρματα δίκτυα υποδομής και εξάγονται στατιστικές που περιλαμβάνουν τις πιθανότητες ενός σταθμού να βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, σε λειτουργία αδράνειας και σε λειτουργία μερικής αδράνειας, την κατανάλωση ενέργειας του σταθμού, τον αριθμό των πλαισίων που αποθηκεύονται προσωρινά κατά τη διάρκεια της περιόδου μερικής αδράνειας και τη μέση καθυστέρηση ανά πλαίσιο. Επιπλέον, οι στατιστικές αυτές εφαρμόστηκαν για τη βελτιστοποίηση των κύριων παραμέτρων που είναι κρίσιμες για το σχέδιο διαχείρισης ενέργειας, δηλαδή η χρονική διάρκεια του χρονοδιακόπτη αδράνειας και μερικής αδράνειας στο σταθμό, καθώς και η χωρητικότητα μνήμης για την αποθήκευση πλαισίων στο AP.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια αποτελεσματική μέθοδο διαχείρισης ενέργειας, η οποία καταφέρνει να βελτιστοποιήσει το χρονοδιακόπτη αδράνειας και την περίοδο μερικής αδράνειας σε ένα σταθμό, αλλά και την αποδοτική κατανομή της μνήμης στο σημείο πρόσβασης με σκοπό την αποθήκευση πλαισίων που προορίζονται για τους σταθμούς.

Όπως προαναφέρθηκε, οι σταθμοί ενός IEEE 802.11 ασύρματου δικτύου έχουν τη δυνατότητα να εισέλθουν στη λειτουργία μερικής αδράνειας προκειμένου να

εξοικονομήσουν ενέργεια. Όσο πιο μεγάλη είναι η διάρκεια της περιόδου που ο σταθμός παραμένει στη λειτουργία αυτή, τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται αλλά με κόστος πιθανές μεγάλες καθυστερήσεις στα πακέτα σε συνδυασμό με τη χρήση περισσότερης μνήμης στο σημείο πρόσβασης, με σκοπό την αποθήκευση των εισερχόμενων πακέτων. Μια υπερχειλίση μνήμης στο σημείο πρόσβασης θα οδηγήσει στο να πεταχτούν κάποια αποθηκευμένα πλαίσια, γεγονός που θα προκαλέσει την επαναποστολή των χαμένων πακέτων, αυξάνοντας έτσι την καθυστέρηση και προκαλώντας την κατανάλωση επιπλέον ενέργειας για τη λήψη των νέων πακέτων. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι μια αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να διευθετήσει το συμβιβασμό μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας στους σταθμούς, την καθυστέρηση των πακέτων και τη χρήση της μνήμης στο σημείο πρόσβασης. Ο προηγούμενος μηχανισμός που παρουσιάστηκε επέκτεινε το σχέδιο διαχείρισης ενέργειας που περιλαμβάνεται στο πρότυπο IEEE 802.11 με την εισαγωγή δύο χρονοδιακοπών (ένα για την περίοδο αδράνειας και ένα για την περίοδο μερικής αδράνειας), η προσαρμογή των τιμών των οποίων επιτυγχάνει να εξισορροπήσει την κατανάλωση της ενέργειας και τη χρήση της μνήμης στο AP.

Πολλές κινητές συσκευές σήμερα ενσωματώνουν αισθητήρες, καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για κάποια λειτουργία, όπως παραδείγματος χάριν ο αισθητήρας θερμοκρασίας ή ο αισθητήρας κίνησης. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται από τις εφαρμογές για να κάνουν τις απαραίτητες μετρήσεις. Σε μια εφαρμογή που έχει αναλάβει την ανίχνευση φωτιάς, ο εντοπισμός ασυνήθιστης υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να είναι ένδειξη φωτιάς. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ασύρματος πομποδέκτης πρέπει να βγει αμέσως από την κατάσταση αδράνειας που βρισκόταν προηγουμένως, ενδεχομένως για πολλή ώρα. Επιπρόσθετα, σε μία εφαρμογή η οποία καλείται να παρακολουθεί την κίνηση ενός ασθενή, ο πομποδέκτης καλείται να «ξυπνήσει» ώστε να μεταδώσει ένα μήνυμα βοήθειας εάν ο ενσωματωμένος αισθητήρας συλλάβει το γεγονός πτώσης του ασθενούς. Πολλές εφαρμογές τέτοιου τύπου έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι η κίνηση μεταφόρτωσης (uplink) είναι μη ανεκτική στην καθυστέρηση [15].

Ο μηχανισμός που παρουσιάστηκε στο [14] δεν μπορεί να υποστηρίξει όπως πρέπει τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν κίνηση μεταφόρτωσης μη ανεκτική στην καθυστέρηση, εξαιτίας του ότι όταν ένας σταθμός βρίσκεται σε κατάσταση μερικής αδράνειας, δηλαδή όταν ο ασύρματος πομποδέκτης του είναι απενεργοποιημένος, τα εξερχόμενα πλαίσια κρατούνται σε μια προσωρινή μνήμη στο επίπεδο MAC, και δε θα μεταδοθούν μέχρι να λήξει η περίοδος μερικής αδράνειας του σταθμού. Παρόλο που μια μεγάλη περίοδος μερικής

αδράνειας οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, μπορεί ταυτόχρονα να σημάνει την απώλεια ενός κρίσιμου γεγονότος. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για να συλλάβουν τυχαία γεγονότα που είναι δύσκολο να προβλεφθούν, όπως η ανίχνευση φωτιάς ή η πτώση ενός ασθενή, γίνεται κατανοητό ότι η ρύθμιση κατάλληλης διάρκειας για την περίοδο αδράνειας ενός σταθμού έτσι ώστε να είναι σε θέση να συλλάβει και να αναφέρει εγκαίρως τα γεγονότα ενώ ταυτόχρονα διαφυλάσσει ενέργεια, δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί. Η καλύτερη επιλογή είναι η αφύπνιση του πομποδέκτη του σταθμού μόλις συλληφθεί κάποιο γεγονός.

Στο [15], οι συγγραφείς προτείνουν ένα ενισχυμένο σχέδιο διαχείρισης ενέργειας, σύμφωνα με το οποίο οι σταθμοί παύουν να βρίσκονται σε αδράνεια οποτεδήποτε παράγεται ένα εξερχόμενο πλαίσιο, το οποίο και μεταδίδεται αμέσως έτσι ώστε η κίνηση που δεν είναι ανεκτική σε καθυστέρηση να μεταδίδεται χωρίς επιπλέον αργοπορία. Το σχέδιο αυτό επιτυγχάνει να μειώσει σημαντικά την καθυστέρηση σε σχέση με το προγενέστερο, καθώς και την καταναλισκόμενη ενέργεια, χρησιμοποιώντας περιορισμένη μνήμη στο σημείο πρόσβασης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

### 3.1: Έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης

Εξαιτίας της δυνατότητας των κινητών συσκευών να προσφέρουν πρόσβαση στο διαδίκτυο οποτεδήποτε υπάρχουν κοντά σημεία πρόσβασης, η ανάγκη διατήρησης της λειτουργίας και της φορητότητάς τους όσο το δυνατό περισσότερο καθιστάται επιτακτική. Καθώς οι συσκευές αυτές λειτουργούν με μπαταρίες, είναι απαραίτητο να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής τους προκειμένου να εξυπηρετήσουν το σκοπό τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο πομποδέκτης μιας ασύρματης διεπαφής, ωστόσο, καταναλώνει ιδιαίτερη υψηλή ποσότητα ενέργειας, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την υλοποίηση αποτελεσματικών τεχνικών διαχείρισης ενέργειας στις φορητές ασύρματες ηλεκτρονικές συσκευές. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να επιτευχθεί είναι ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης (TPC - Transmit Power Control), κάτι που επιτρέπει σε μια ασύρματη συσκευή να χρησιμοποιήσει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια στη λειτουργία μετάδοσης.

Το TPC είναι στην πραγματικότητα ένας μηχανισμός που εισήγαγε το πρότυπο 802.11h, μαζί με το μηχανισμό δυναμικής επιλογής συχνοτήτων (DFS - Dynamic Frequency Selection).

Το πρότυπο 802.11h αναπτύχθηκε αρχικά για να επεκτείνει τη λειτουργία του προτύπου 802.11 στη ζώνη των 5 GHz στην Ευρώπη. Για να είναι σε θέση οι συσκευές WLAN να συνυπάρχουν με τους πρωταρχικούς χρήστες στη ζώνη των 5 GHz στην Ευρώπη, δηλαδή τα ραντάρ και τα δορυφορικά συστήματα, πρέπει να υποστηρίζουν τόσο έλεγχο της ενέργειας μετάδοσης όσο και δυναμική επιλογή συχνοτήτων. Για παράδειγμα, οι ασύρματες συσκευές απαιτείται να αλλάξουν το κανάλι συχνότητας λειτουργίας σε κάποιο άλλο μόλις εντοπιστεί ένα σήμα που προέρχεται από ραντάρ. Επίσης, στην περίπτωση εντοπισμού ενός δορυφορικού σήματος, οι ασύρματες συσκευές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ισχύ μετάδοσης έως τη μέγιστη τιμή που έχει οριστεί μείον 3 dB, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα είχαν το δικαίωμα να μεταδώσουν στο μέγιστο δυνατό επίπεδο [16]. Το 802.11h ορίζει τους μηχανισμούς TPC και DFS πάνω από το 802.11 MAC και το 802.11a PHY για αυτούς τους σκοπούς.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρόλο που το 802.11h αναπτύχθηκε για να ικανοποιήσει

τις ευρωπαϊκές ρυθμιστικές απαιτήσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από άλλες χώρες για πολλαπλούς σκοπούς, όπως ο αυτόματος σχεδιασμός συχνότητας, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των παρεμβολών, και η ενίσχυση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS - Quality of Service).

Τέλος, τόσο το DFS όσο και το TPC περιλαμβάνουν αλγορίθμους που εξαρτώνται από την υλοποίηση. Για παράδειγμα, ένας αλγόριθμος ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης είναι απαραίτητος ώστε να αποφασιστεί το επίπεδο ισχύος μιας μετάδοσης πλαισίου. Το 802.11h ορίζει μόνο τους μηχανισμούς που επιτρέπουν τη σωστή επιλογή ενός επιπέδου ισχύος, όχι την ίδια την υλοποίηση [16].

Το 802.11h ορίζει δύο λειτουργίες σχετικές με το TPC. Αρχικά, το σημείο πρόσβασης σε ένα βασικό σύνολο υπηρεσιών υποδομής (infrastructure BSS) ή ένας ασύρματος σταθμός σε ένα ανεξάρτητο βασικό σύνολο υπηρεσιών (independent BSS) διαφημίζει το ρυθμιστικό και τοπικό μέγιστο επίπεδο ισχύος για το τρέχον κανάλι συχνότητας στα πλαίσια Beacon και απόκρισης εξερεύνησης (Probe Response frame) χρησιμοποιώντας το συνδυασμό ενός στοιχείου “Country” και ενός στοιχείου “Power Constraint”. Το τοπικό μέγιστο ορίζει το πραγματικό μέγιστο επίπεδο ισχύος που επιτρέπεται στο BSS και είναι μικρότερο ή ίσο με το ρυθμιστικό μέγιστο. Οι σταθμοί σε ένα BSS μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε επίπεδο ισχύος που είναι μικρότερο ή ίσο με το τοπικό μέγιστο.

Η δεύτερη λειτουργία αφορά την ύπαρξη ενός μηχανισμού αναφοράς ενέργειας μετάδοσης. Ορίζει ένα στοιχείο αναφοράς TPC που περιέχεται σε ένα πλαίσιο αναφοράς TPC (TPC Report frame) ως απάντηση σε ένα πλαίσιο αίτησης TPC (TPC Request frame), και περιέχει ένα πεδίο ενέργειας μετάδοσης και ένα πεδίο με το περιθώριο συνδέσμου. Το πεδίο ενέργειας μετάδοσης περιέχει την ενέργεια μετάδοσης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του πλαισίου αναφοράς TPC, ενώ το δεύτερο πεδίο περιέχει το περιθώριο συνδέσμου που υπολογίζεται ως ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος του αντίστοιχου πλαισίου αίτησης TPC προς την ελάχιστη επιθυμητή ισχύ του σταθμού.

Μια άμεση επίπτωση ενός τέτοιου μηχανισμού αναφοράς ενέργειας μετάδοσης είναι ότι η εφαρμοσιμότητα των ενεργειακά αποδοτικών μεταδόσεων πλαισίων γίνεται γεγονός με το 802.11h. Γενικά, η απόφαση για το κατάλληλο επίπεδο ισχύος μιας δεδομένης μετάδοσης πλαισίου εξαρτάται από τον υπολογισμό εκ μέρους ενός ασύρματου σταθμού της ποιότητας σύνδεσης μεταξύ του ίδιου και του παραλήπτη. Με το 802.11h, ένα παράδειγμα

ενός απλού σχεδίου υπολογισμού της ποιότητας σύνδεσης θα λειτουργεί ως εξής [16]. Οποτεδήποτε ένας ασύρματος σταθμός λαμβάνει ένα πλαίσιο που περιέχει το στοιχείο αναφοράς TPC, έχοντας γνώση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος μέσω του RSSI (Received Signal Strength Indicator) καθώς επίσης και της ενέργειας μετάδοσης που περιέχεται στο στοιχείο αναφοράς TPC, θα είναι σε θέση να υπολογίσει την ποιότητα σύνδεσης (από την άποψη του path loss, δηλαδή τη διαφορά (μείωση) της ισχύος μεταξύ του μεταδιδόμενου και του λαμβανόμενου σήματος) από το σταθμό εκπομπής προς τον ίδιο εκτελώντας μια απλή αφαίρεση. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα μηχανισμός που βασίζεται σ' αυτό το σχέδιο υπολογισμού της ποιότητας σύνδεσης και υλοποιώντας μία έξυπνη στρατηγική TPC επιτυγχάνει να ελαχιστοποιήσει την καταναλισκόμενη ενέργεια.

### **3.2: Επιπτώσεις της προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης στην κατανάλωση ενέργειας**

Πολλές προτάσεις ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα έχουν γίνει με τα χρόνια. Ένα θέμα που προκύπτει με πολλές από τις προτάσεις αυτές είναι το γεγονός ότι δε λαμβάνουν υπόψιν την προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης στις συνθήκες του καναλιού. Δεδομένου ότι το 802.11 πρότυπο αποτελείται από ένα σύνολο προδιαγραφών φυσικού επιπέδου οι οποίες υποστηρίζουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης, προκύπτει εύλογα το συμπέρασμα ότι η καλύτερη αξιοποίησή τους μέσω της επιλογής του καταλληλότερου ρυθμού κάθε φορά μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά αυξημένη απόδοση του συστήματος.

Στο [3] παρουσιάζεται ένας καινοτόμος μηχανισμός ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης, καλούμενος «MiSer» (Minimum-energy transmission Strategy), με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Ο μηχανισμός αυτός συνδυάζει το TPC με την ικανότητα προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης φυσικού επιπέδου και υπολογίζει έναν ιδανικό συνδυαστικό πίνακα ρυθμού και ισχύος. Ο πίνακας αυτός υπολογίζεται εκτός σύνδεσης, απλοποιώντας έτσι σημαντικά τη διαδικασία εκτέλεσης. Έπειτα ένας ασύρματος σταθμός αποφασίζει κατά το χρόνο εκτέλεσης την πιο ενεργειακά αποδοτική στρατηγική μετάδοσης για το κάθε πακέτο δεδομένων, κάνοντας μια απλή αναζήτηση στον πίνακα.

Πράγματι, τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι προσαρμόζοντας το ρυθμό μετάδοσης η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται αποτελεσματικά, καθιστώντας την προσαρμογή αυτή ζωτικής σημασίας για το μηχανισμό και ως εκ τούτου θα πρέπει να

χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με το TPC.

Επιπρόσθετα, στην εργασία αυτή αναλύονται οι επιδράσεις του TPC στα 802.11 συστήματα όσο αφορά τις παρεμβολές. Η εφαρμογή του TPC στις μεταδόσεις δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στους λεγόμενους «κρυφούς κόμβους» (hidden nodes). Το πρόβλημα δημιουργείται όταν δύο κόμβοι βρίσκονται μακριά ο ένας από τον άλλο, αλλά επικοινωνούν με το ίδιο σημείο πρόσβασης. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στο να στείλουν ταυτόχρονα πακέτα πληροφοριών αφού ο ένας δεν είναι ορατός στον άλλο, προκαλώντας έτσι συγκρούσεις.

Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί αυτό είναι η ανταλλαγή RTS/CTS πλαισίων, ώστε να κρατηθεί δεσμευμένο το ασύρματο κανάλι προτού αποπειραθεί η οποιαδήποτε μετάδοση. Με τον μηχανισμό αυτό, η συσκευή που επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο μεταδίδει αρχικά ένα πλαίσιο “RequestToSend” και περιμένει ένα αντίστοιχο “ClearToSend”. Βλέποντας τα πλαίσια αυτά οι συμβατές με το 802.11 πρότυπο συσκευές γνωρίζουν ότι κάποιος είναι έτοιμος να μεταδώσει και ως εκ τούτου δεν ξεκινάνε κάποια μετάδοση.

Ωστόσο αποδεικνύεται ότι η χρήση των RTS/CTS πλαισίων μπορεί μεν να λύνει το πρόβλημα των κρυμμένων κόμβων αλλά όχι και των παρεμβολών. Οι παρεμβολές λόγω της εφαρμογής του TPC θα επιδεινωθούν πάραυτα και είναι δυνατό να οδηγήσουν σε σοβαρή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Για αυτό το λόγο, οι συγγραφείς της εργασίας εκτός από την ανταλλαγή των RTS/CTS πλαισίων πριν από τη μετάδοση, προτείνουν τα CTS πλαίσια να μεταδίδονται με μεγαλύτερο επίπεδο ισχύος, ώστε να μετριαστεί η προβλεπόμενη παρεμβολή και ταυτόχρονα να υφίσταται καλύτερη απόδοση ενέργειας.

Η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης και ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης στα 802.11 ασύρματα δίκτυα έχουν μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια. Οι αλγόριθμοι προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης είναι υπεύθυνοι για την επιλογή του κατάλληλου σχεδίου διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS - Modulation and Coding Scheme), δεδομένης μιας εκτίμησης για την κατάσταση των συνδέσμων. Είναι σημαντική η διάκριση μεταξύ των απωλειών που οφείλονται σε συγκρούσεις και αυτών που οφείλονται σε κακές ραδιοφωνικές συνθήκες, καθώς η κάθε περίπτωση θα προκαλέσει διαφορετική αντίδραση. Η βελτίωση της απόδοσης απαιτεί τη βελτιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης ή κάποιου σχετικού μεγέθους, όπως για παράδειγμα του χρόνου που απαιτείται για την παράδοση ενός πλαισίου.

Από την άλλη πλευρά, η δημιουργία πυκνών δικτύων γίνεται όλο και πιο συχνή στην προσπάθεια παροχής καλύτερης κάλυψης και χωρητικότητας. Η πυκνωση αυτή ωστόσο προκαλεί προβλήματα, ιδιαίτερα για τα 802.11 δίκτυα, λόγω του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων ορθογώνιων καναλιών, γεγονός που οδηγεί σε θέματα απόδοσης και αξιοπιστίας εξαιτίας των ραδιοφωνικών παρεμβολών. Ως αποτέλεσμα, πολλά σχέδια προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης ενσωματώνουν έλεγχο της ενέργειας μετάδοσης, ο οποίος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια μετάδοσης έτσι ώστε να μειωθεί η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών δικτύων.

Οι συγγραφείς του [17] μελετούν το ζήτημα της προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης και του ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης από τη σκοπιά της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, παρατηρούν ότι παρά την αντίληψη ότι η βέλτιστη ρυθμαπόδοση συνεπάγεται και βέλτιστη ενεργειακή απόδοση (ορίζεται ως ο λόγος του αναμενόμενου παραδοθέντος φορτίου δεδομένων προς την αναμενόμενη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια), κάτι τέτοιο ωστόσο δε συμβαίνει πάντα. Αντίθετα, αποδεικνύεται ότι η ενεργειακή απόδοση και οι επιδόσεις ενός δικτύου δεν πηγαίνουν απαραίτητα μαζί, ενώ απαιτείται κάποιο κριτήριο για να τεθεί μία ισορροπία μεταξύ τους. Ο λόγος για αυτή τη «μη δυαδικότητα» δεν είναι ξεκάθαρος, και μπορεί να αφορά το συγκεκριμένο σχεδιασμό των αλγορίθμων, την επιπλέον κατανάλωση που προκαλείται λόγω της περιπλοκότητας των τεχνικών MIMO (Multiple-input, multiple-output) ή κάτι άλλο.

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσουν ένα συνδυασμένο μοντέλο πραγματικής απόδοσης (δηλαδή ρυθμαπόδοση επιπέδου εφαρμογής, που ορίζεται ως ο αριθμός των χρήσιμων bits πληροφορίας ανά μονάδα χρόνου που προωθείται από το δίκτυο από την πηγή στον προορισμό, και δεν περιλαμβάνει overhead του) και κατανάλωσης ενέργειας για μονές ροές χωρίς την παρουσία παρεμβατικής κίνησης. Ο σκοπός αυτού του μοντέλου είναι η απομόνωση των σχετικών μεταβλητών (δηλαδή του MCS και της ενέργειας μετάδοσης), έτσι ώστε να αναλυθεί η σχέση μεταξύ της πραγματικής απόδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς την παρουσία άλλων επιδράσεων όπως συγκρούσεων ή της τεχνολογίας MIMO.

Η αριθμητική ανάλυση και η μετέπειτα διεξαγωγή κατάλληλων πειραμάτων έδειξαν ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός σε κάποιες περιπτώσεις μεταξύ της βέλτιστης ρυθμαπόδοσης και της ενεργειακής απόδοσης, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι δεν μπορούν να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα. Επιπλέον έγινε ανάλυση της ευαισθησίας τους απέναντι στις παραμέτρους κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι ο

παραπάνω συμβιβασμός εμφανίζεται σε ορισμένες μεταβάσεις λειτουργίας όταν μεγιστοποιείται η πραγματική απόδοση, γεγονός που υπονοεί ότι μικρές υποβαθμίσεις στην απόδοση μπορεί να επιφέρουν αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Στις μεταβάσεις αυτές οι αλγόριθμοι προσαρμογής του ρυθμού και ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης που έχουν επίγνωση της ενέργειας θα πρέπει να είναι «συντηρητικοί», με την έννοια ότι θα πρέπει να προτιμήσουν ένα μικρότερο MCS και μια χαμηλότερη ενέργεια μετάδοσης, μέχρις ότου να μπορεί να εξασφαλιστεί ένα υψηλότερο MCS.

Λόγω της ιδιότητας της ακρόασης φέροντος του πρωτοκόλλου DCF του προτύπου 802.11, όλοι οι σταθμοί σε ένα ασύρματο δίκτυο πρέπει να λάβουν και να αποκωδικοποιήσουν κάθε μεταδιδόμενο πλαίσιο του συστήματος, ακόμα και αν το πλαίσιο αυτό δεν προορίζεται για αυτούς. Επομένως, για κάθε πλαίσιο που μεταδίδεται από ένα σταθμό, οι υπόλοιποι σταθμοί του δικτύου θα σπαταλήσουν ενέργεια για τη λήψη και αποκωδικοποίησή του.

Οι συγγραφείς του [18] προτείνουν ένα σχέδιο προσαρμοστικού ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης και επιλογής του ρυθμού μετάδοσης, με το οποίο επιχειρούν να αποδείξουν ότι η ενεργειακή απόδοση ολόκληρων των δικτυακών συστημάτων WLAN, συμπεριλαμβανομένων τόσο των σταθμών όσο και των σημείων πρόσβασης, μπορεί να βελτιστοποιηθεί. Επιπλέον γίνεται μια ακριβέστερη ανάλυση της ενέργειας που καταναλώνεται στα 802.11 συστήματα, όπου προκύπτει ότι η ακριβής κατανάλωση ενέργειας μιας μετάδοσης πλαισίου περιλαμβάνει τη συνολική κατανάλωση των σταθμών του δικτύου καθώς και του σημείου πρόσβασης.

Με τη διενέργεια κατάλληλων προσομοιώσεων και αριθμητικής ανάλυσης, προέκυψε το συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο σχέδιο μπορεί να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή απόδοση ολόκληρου του δικτύου χρησιμοποιώντας εξαιρετικά μειωμένη ενέργεια μετάδοσης. Η μέση ενεργειακή απόδοση φτάνει το 34% με μια υποβάθμιση της ρυθμαπόδοσης της τάξης του 5%, γεγονός που υποδηλώνει ένα συμβιβασμό μεταξύ ρυθμαπόδοσης και ενεργειακής απόδοσης.

Για τις συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, όπως οι φορητοί υπολογιστές, η επίγνωση της ισχύος μετάδοσης είναι ζωτικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενέργειας και την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Μείωση της ενέργειας μετάδοσης,

ειδικότερα όταν η απόσταση από τον παραλήπτη είναι μικρή, μπορεί να οδηγήσει επίσης σε μείωση των παρεμβολών με τα γειτονικά ασύρματα δίκτυα. Προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή απόδοση του συστήματος, είναι επιτακτικό να βρεθεί ένας αλγόριθμος προσαρμογής του συνδέσμου, ο οποίος να επιτρέπει σε ένα σταθμό να προσαρμόζει τις παραμέτρους μετάδοσης στις πραγματικές συνθήκες του ασύρματου καναλιού.

Στο [19] προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος προσαρμογής του συνδέσμου, ο οποίος είναι σε θέση να προσαρμόζει από κοινού το επίπεδο ενέργειας μετάδοσης και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στις συνθήκες του καναλιού. Ο αλγόριθμος βασίζεται αποκλειστικά στις πληροφορίες ποιότητας της σύνδεσης που είναι διαθέσιμες στον μεταδότη αξιοποιώντας τη λήψη των πλαισίων ACK, ενώ δεν απαιτείται χρήση του πρωτοκόλου RTS/CTS αλλά ούτε και κάποια ανατροφοδότηση εκ μέρους του παραλήπτη με τις απαραίτητες εκτιμήσεις της ποιότητας σύνδεσης, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους.

Πιο συγκεκριμένα, αν ο μεταδότης δε λάβει ένα πλαίσιο ACK μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, συμπεραίνεται ότι η ποιότητα της σύνδεσης ήταν ανεπαρκής και ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας χαμηλότερος ρυθμός ή ένα υψηλότερο επίπεδο ισχύος. Από την άλλη, αν ο μεταδότης καταφέρει να στείλει πολλά πλαίσια δεδομένων, θεωρείται ότι η ποιότητα ήταν επαρκής και ένας υψηλότερος ρυθμός ή ένα χαμηλότερο επίπεδο ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει μία απλή προσέγγιση για να προκύψει μια διαδικασία επιλογής των βέλτιστων παραμέτρων προσαρμογής, ειδικότερα σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχουν πολλοί ενεργοί σταθμοί. Για το λόγο αυτό οι συγγραφείς εισάγουν δύο στρατηγικές, τη λειτουργία «υψηλής απόδοσης» (HP – High performance) και τη λειτουργία «χαμηλής ισχύος» (LP – Low power). Στη λειτουργία «υψηλής απόδοσης», ο στόχος είναι η μετάδοση με τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό, ενώ η ισχύς μετάδοσης είναι δευτερεύουσας σημασίας. Η λειτουργία αυτή εφαρμόζεται όταν απαιτείται ο υψηλότερος δυνατός ρυθμός ή όταν πρέπει να βελτιστοποιηθεί η συνολική ρυθμαπόδοση. Η λειτουργία «χαμηλής ισχύος» είναι συμπληρωματική, υπό την έννοια ότι η στρατηγική σ' αυτήν την περίπτωση περιλαμβάνει τη μετάδοση στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ισχύος, με τους ρυθμούς μετάδοσης να προσαρμόζονται αναλόγως. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα σε φορητές συσκευές με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και σε περιπτώσεις όπου ο ρυθμός μετάδοσης ή οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση μιας εφαρμογής είναι αρκετά χαμηλές.

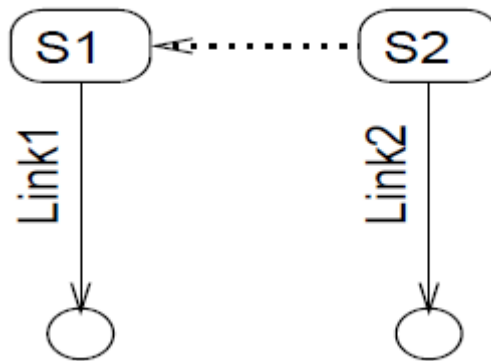
Με τη βοήθεια κατάλληλων προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η καλύτερη επιλογή για την επίτευξη χαμηλών χρόνων μεταφοράς, μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης και μείωση του προβλήματος των κρυμμένων τερματικών είναι η μετάδοση με τους υψηλότερους δυνατούς ρυθμούς και με υψηλά επίπεδα ισχύος, όπως συμβαίνει στη λειτουργία «υψηλής απόδοσης». Η στρατηγική αυτή οδηγεί επίσης σε ελαχιστοποίηση των χρόνων μετάδοσης, γεγονός που με τη σειρά του θα οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου τοποθέτησης των αδρανών συνιστωσών σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης, ελαχιστοποιώντας έτσι τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Καθώς τα ασύρματα δίκτυα γίνονται όλο και πιο δημοφιλή όσο αφορά την επιλογή δικτυακής πρόσβασης, τόσο η χωρική επαναχρησιμοποίηση όσο και η διάρκεια ζωής των μπαταριών είναι κρίσιμες μετρικές στην επιδίωξη καλύτερης εμπειρίας για το χρήστη. Με πολλές εφαρμογές για κινητές συσκευές να αναπτύσσονται ραγδαία απαιτώντας τη μεταφορά μεγάλης ποσότητας δεδομένων πάνω από τις διεπαφές WiFi, καθώς και τις βελτιώσεις στα πρωτόκολλα και σε υλικό που καταφέρνουν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια αδράνειας αυτών των διεπαφών, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια μετάδοσης μετατρέπεται στον κυρίαρχο παράγοντα επίδρασης στη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Επιπρόσθετα, με τη διαρκή αύξηση της πυκνότητας των ασύρματων δικτύων προκειμένου να εξασφαλιστεί συνεχής κάλυψη των χρηστών, ο μετριασμός των παρεμβολών με σκοπό την αύξηση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό στόχο. Η εφαρμογή προσαρμοστικού ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης ανά σύνδεσμο μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση των παραπάνω δύο μετρικών.

Παρόλο που ένας προσαρμοστικός έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της χωρητικότητας και σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα δίκτυο, αντιμετωπίζει ωστόσο κάποιες προκλήσεις. Πρώτον, μπορεί να επιδεινώσει την παρεμβολή στην πλευρά του παραλήπτη (δηλαδή το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού) και την ασύμμετρη πρόσβαση στο κανάλι, οδηγώντας έτσι σε περιττές επαναμεταδόσεις των πακέτων και σε έλλειψη δικαιοσύνης. Δεύτερον, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη μείωση του ρυθμού μετάδοσης ενός συνδέσμου, αυξάνοντας μ' αυτόν τον τρόπο τη διάρκεια μετάδοσης του καναλιού. Τέλος, μεταβολές στο κανάλι που προκαλούνται λόγω της κινητικότητας σε μικρά χρονικά διαστήματα καθιστούν την ανίχνευση και την αποφυγή αυτών των προβλημάτων δυσκολότερη.



Οι συγγραφείς του [20] με τη βοήθεια ενός μοντέλου ανάλυσης αποδεικνύουν ότι οι παραπάνω προκλήσεις συμβαίνουν αρκετά συχνά στην πράξη. Για το λόγο αυτό, προτείνουν ένα καινοτόμο σύγχρονο σύστημα ελέγχου του ρυθμού και της ενέργειας μετάδοσης δύο φάσεων, που καλούν «Symphony», και το οποίο επιχειρεί να αντιμετωπίσει τα προβλήματα αυτά και να προτείνει λύσεις για τα ασύρματα δίκτυα με δυνατότητα κινητικότητας.



Εικόνα 4: Περίπτωση ασύμμετρης πρόσβασης στο κανάλι. Ο αποστολέας S1 μπορεί να «ακούσει» τον S2, αλλά όχι αντίστροφα. Για το λόγο αυτό όταν ο S2 έχει δεδομένα προς μετάδοση, ο S1 δεν έχει ίση ευκαιρία να μεταδώσει

Στα 802.11a/b/g ασύρματα δίκτυα, οι αποστολείς χρησιμοποιούν έναν από τους πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης για την αποστολή των πακέτων. Η επιλογή του ρυθμού γίνεται με βάση την εκτίμηση των συνθηκών του καναλιού, μέσω της απώλειας πακέτων, της αναλογίας παράδοσής τους, της ρυθμαπόδοσης ή της αναλογίας σήματος προς την παρεμβολή και το θόρυβο (SINR – Signal to Interference and Noise Ratio). Η επιλογή του ρυθμού και ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης συνδέονται μεταξύ τους, υπό την έννοια ότι ένας έλεγχος της ενέργειας χωρίς να λάβει υπόψιν του το ρυθμό μετάδοσης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του SINR, μειώνοντας έτσι το ρυθμό και άρα τη ρυθμαπόδοση του δικτύου. Για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς επιλέγουν ένα (ελάχιστο) επίπεδο ισχύος για ένα σύνδεσμο που δεν διακινδυνεύει τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης.

Επιπρόσθετα, λόγω του ότι στην περίπτωση κινητικότητας δεν μπορούν να επιτευχθούν αξιόπιστες μετρήσεις και αναφορές σχετικές με το SINR λόγω αυξημένου

overhead, οι συγγραφείς βασίζονται στην εκτίμηση των συνθηκών του καναλιού χρησιμοποιώντας την αναλογία παράδοσης ενός παραθύρου πακέτων. Ωστόσο, στην περίπτωση που η αναλογία παράδοσης των πακέτων επιδεινωθεί, η αντίδραση θα είναι είτε η μείωση του ρυθμού είτε η αύξηση της ισχύος. Παρόλο που μια αύξηση στην ισχύ φαίνεται να είναι μια καλή επιλογή, είναι πιθανό να μην μπορεί να υποστηριχθεί ο τρέχων ρυθμός ακόμα και με τη μέγιστη ισχύ, οπότε και επιβάλλεται να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Συμπεραίνεται, ότι έλλειψη γνώσης σχετικά με το αν υποστηρίζεται ένας ρυθμός με την αύξηση της ισχύος στο μέγιστο δυνατό, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου σύγκλισης, γεγονός που είναι απαγορευτικό στην περίπτωση ύπαρξης κινητικότητας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σύμφωνα με την προτεινόμενη στρατηγική οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου εναλλάσσονται μεταξύ δύο φάσεων σε συγχρονισμό: τη φάση αναφοράς και τη φάση λειτουργίας. Στη φάση αναφοράς, το σύστημα υπολογίζει για κάθε σύνδεσμο την καλύτερη δυνατή απόδοση. Κάθε αποστολέας, που μπορεί να είναι είτε σταθμός είτε σημείο πρόσβασης, πραγματοποιεί προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης για κάθε σύνδεσμο στη μέγιστη ισχύ, έτσι ώστε να επιλεγεί ο καλύτερος ρυθμός δεδομένων για τις τρέχουσες συνθήκες του καναλιού. Στη φάση λειτουργίας, το σύστημα ρυθμίζει το σύνδεσμο στη χαμηλότερη δυνατή ισχύ έτσι ώστε να επιτύχει την ίδια απόδοση με τη φάση αναφοράς. Εδώ ο αποστολέας εκτελεί τόσο προσαρμογή του ρυθμού όσο και της ενέργειας μετάδοσης. Λόγω κινητικότητας των χρηστών ή του περιβάλλοντος, η καλύτερη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί μπορεί να αλλάζει συνεχώς, ενώ μια ρύθμιση της ενέργειας και του ρυθμού μετάδοσης μπορεί ξαφνικά να επηρεαστεί εξαιτίας κάποιας ασυμμετρίας. Η φάση αναφοράς παρέχει μία λύση ώστε να επαληθεύεται ότι ο έλεγχος της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης δεν έχουν απαραίτητα υποβαθμίσει την απόδοση του συστήματος.

Η προτεινόμενη στρατηγική χρησιμοποιεί ένα νέο αλγόριθμο προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης, ο οποίος αποτελεί βελτίωση του προϋπάρχοντος RRAA. Η επιλογή του νέου αλγορίθμου οφείλεται στη δυνατότητά του να προσφέρει ευκινησία όσο αφορά την ικανότητα προσαρμογής στην κινητικότητα του δικτύου, ενώ παράλληλα αποφεύγει τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης στην περίπτωση εμφάνισης παρεμβολής στον παραλήπτη, και αντ' αυτού επιχειρεί να βοηθήσει τον αλγόριθμο προσαρμογής της ισχύος ώστε να διορθώσει το πρόβλημα.

Με τη βοήθεια προσομοιώσεων, παρατηρείται ότι το προτεινόμενο σύστημα καταφέρνει να μειώσει την ενέργεια μετάδοσης και άρα την κατανάλωση ενέργειας ακόμα και παρουσία πολλών μη συμβατών με το σύστημα συνδέσμων σε διάφορες αποστάσεις.

### 3.3: Χρήση των RSSI και SNR ως μετρικές για τη διατήρηση της ποιότητας και τη μείωση της κατανάλωσης

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες εστιάστηκαν στο πεδίο της βελτιστοποίησης ενέργειας και της αξιοποίησης του RSSI (μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος) για τον υπολογισμό της ποιότητας σύνδεσης.

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα ad-hoc δίκτυο οι αλγόριθμοι που τυπικά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μονοπατιού που θα ακολουθήσουν τα πακέτα για να φτάσουν στον προορισμό τους βασίζονται στον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ πηγής και προορισμού, ενώ στην περίπτωση που υφίσταται ασύρματο μέσο, στην ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια δρομολόγησης. Ωστόσο τέτοιοι αλγόριθμοι δεν μπορούν να εγγυηθούν ότι τα πακέτα θα φτάσουν στον προορισμό τους, είτε λόγω συμφόρησης στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου είτε λόγω ύπαρξης θορύβου στους συνδέσμους μεταξύ των κόμβων. Επίσης, το γεγονός ότι οι κόμβοι είναι κινητοί οδηγεί σε ένα ζήτημα όπου η κατάσταση των συνδέσμων αλλάζει συνεχώς.

Παράγοντες όπως η ισχύς του σήματος με το οποίο ένα πακέτο φτάνει σε ένα κόμβο διαμέσω ενός συνδέσμου καθώς και το πόση ενέργεια χρησιμοποιεί ο κόμβος για να μεταδώσει το πακέτο παρέχουν μία καλή ένδειξη για την αξιοπιστία του συνδέσμου. Επομένως ο συνυπολογισμός αυτών των μετρικών για τη διαπίστωση της καταλληλότητας ενός συνδέσμου, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση πακέτων μεταξύ κόμβων σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο κρίνεται επιθυμητός και ίσως απαραίτητος.

Στο [21] αναπτύσσεται μία μέθοδος η οποία λαμβάνοντας υπόψιν το RSSI και τα ανά πακέτο επίπεδα ισχύος εκπομπής υπολογίζει το path loss για τους συνδέσμους μεταξύ των κόμβων, με σκοπό να επιλεγεί ο κατά το δυνατόν καταλληλότερος σύνδεσμος για τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων.

Στα μονοπάτια πολλαπλών αλμάτων (multi-hop) ενός ασύρματου δικτύου μπορεί να προκύψει διάδοση σφαιμάτων. Για να αντιμετωπιστεί κάτι τέτοιο, πρέπει να αυξηθούν τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης σήματος, κάτι που όμως θα οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας μέσα στο δίκτυο. Είναι δυνατό από την άλλη, σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο το λαμβανόμενο σήμα να αποκωδικοποιηθεί και να επανακωδικοποιηθεί και έπειτα να προωθηθεί στον προορισμό του ή στον επόμενο ενδιάμεσο κόμβο. Αυτό θα έχει ως

αποτέλεσμα την αποφυγή της διάδοσης σφαλμάτων, με κόστος όμως την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω των περιπλοκών που δημιουργούνται από τη διαδικασία κωδικοποίησης.

Η απόφαση για το αν θα ενισχυθεί και μεταδοθεί το σήμα ή αν θα αναδημιουργηθούν τα δεδομένα εξαρτάται από τη θέση του ενδιάμεσου κόμβου σε σχέση με τους κόμβους πηγής και προορισμού και από το επίπεδο που κυμαίνεται η απώλεια ισχύος. Όλα αυτά δημιουργούν την ανάγκη ύπαρξης μιας μεθόδου η οποία θα δύναται να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο. Να σημειωθεί ότι σε πολλά ad-hoc ασύρματα δίκτυα οι περισσότεροι αν όχι όλοι οι κόμβοι λειτουργούν με μπαταρία, και επομένως η ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι μεγάλη.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [22] περιλαμβάνει τη μετάδοση ενός σήματος, το οποίο περιέχει ένα αίτημα αναμετάδοσης σε έναν ενδιάμεσο κόμβο. Το σήμα αυτό περιέχει επίσης τις απαιτήσεις ισχύος, οι οποίες έχουν ήδη καθοριστεί στον κόμβο πηγής. Ο ενδιάμεσος κόμβος θα αποδεχτεί το αίτημα, εάν η διαθέσιμη ισχύς στον κόμβο είναι υπεραρκετή για να μεταδοθούν τα δεδομένα στον τελικό κόμβο. Έπειτα βασιζόμενος σε κάποια τοπικά κριτήρια όπως είναι ο φόρτος επεξεργασίας, θα επιλέξει είτε να ενισχύσει και να αναμεταδώσει το σήμα, είτε να ακολουθήσει τη διαδικασία αναδημιουργίας του σήματος, δηλαδή να αποκωδικοποιήσει και να επανακωδικοποιήσει και έπειτα να ενισχύσει και να μεταδώσει το σήμα. Τα δεδομένα στη συνέχεια μεταδίδονται στον προορισμό τους.

Αξιοποιώντας αυτές τις πληροφορίες ισχύος επιτυγχάνεται ένας μηχανισμός διαχείρισης ενέργειας, ο οποίος καταφέρνει να μειώσει τα επίπεδα κατανάλωσης στο υπάρχων δίκτυο.

Στο [23] αναπτύσσεται ένας μηχανισμός που διαχειρίζεται και προσαρμόζει την ενέργεια μετάδοσης σε ασύρματες κάρτες δικτύου αξιοποιώντας επίσης το RSSI, έτσι ώστε να επιτευχθεί τόσο μια επιθυμητή ποιότητα σύνδεσης όσο και η ελάχιστη πιθανή κατανάλωση. Στο δεδομένο πρόβλημα της ύπαρξης ενός σταθμού βάσης και ενός αριθμού από συνδεδεμένους σε αυτόν (ασύρματους) κόμβους, παρατηρείται η προσαρμοστική συμπεριφορά του σταθμού βάσης, υπό την έννοια ότι επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια μετάδοσης οποτεδήποτε αυτό είναι δυνατό.

Για να υπολογιστεί η ενέργεια μετάδοσης, οι αποδέκτες στέλνουν ένα μήνυμα ανατροφοδότησης (feedback) στους αποστολείς, το οποίο περιέχει την τιμή RSSI. Επιπλέον

για να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα, χρησιμοποιείται ένας πίνακας που περιλαμβάνει τους κόμβους που είναι συνδεδεμένοι με το σταθμό βάσης καθώς και το path loss για καθέναν από αυτούς. Ο σταθμός βάσης ρυθμίζει την ενέργειά του σύμφωνα με το μέγιστο path loss. Στην περίπτωση που ληφθεί ένα RSSI μήνυμα, ο πίνακας ανανεώνεται. Οι συνδεδεμένοι με το σταθμό βάσης κόμβοι μεταβάλλουν την ενέργειά τους σύμφωνα με έναν αλγόριθμο.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποδεικνύουν ότι για όσους κόμβους είναι στάσιμοι ή κινούνται με αργό ρυθμό, η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικά μικρότερη. Για κόμβους που κινούνται γρήγορα μπορεί να γίνει ένας συμβιβασμός (trade-off) μεταξύ απώλειας πακέτων και ενέργειας μετάδοσης.

Εκτός όμως από το RSSI, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετα και άλλες μετρικές με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης στους ασύρματους προσαρμογείς, κάτι που οπωσδήποτε θα οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου ζωής της μπαταρίας μιας κινητής συσκευής. Οι συγγραφείς επεκτείνουν την προηγούμενη έρευνά τους και αξιοποιώντας επιπλέον το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR - Signal-to-noise ratio), παρέχουν ένα μηχανισμό ο οποίος επιτυγχάνει να βελτιστοποιήσει την ενέργεια που καταναλώνεται, διατηρώντας παράλληλα μια επιθυμητή ποιότητα σύνδεσης [24].

Καθώς δεν είναι δυνατό να γίνει άμεσος υπολογισμός των παραμέτρων που πρέπει να προσαρμόσει ένας κόμβος, είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός ανατροφοδότησης. Πιο συγκεκριμένα, όσο οι κόμβοι μετακινούνται γύρω από το σταθμό βάσης, τα επίπεδα του σήματος αλλάζουν συνεχώς. Κάθε φορά που ο σταθμός βάσης λαμβάνει ένα πακέτο, συγκεντρώνει δεδομένα όσο αφορά την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος καθώς και το θόρυβο που υπάρχει στο κανάλι, και τα στέλνει πίσω στον αντίστοιχο κόμβο. Έπειτα ο κόμβος επιχειρεί να προσαρμόσει την ενέργεια μετάδοσης, ώστε να επιτευχθεί τόσο μείωση της κατανάλωσης όσο και κατά το δυνατό υψηλό SNR. Σημειώνεται ότι είναι ζωτικής σημασίας να διατηρηθεί ο θόρυβος σε χαμηλά επίπεδα, στην προσπάθεια να πραγματοποιηθεί επιτυχημένη μετάδοση της πληροφορίας και επαρκής συνδεσιμότητα.

Η διενέργεια των πειραμάτων επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού στο να αυξάνει την ενέργεια μετάδοσης όταν το SNR πέφτει από τα επιθυμητά επίπεδα, και αντίστοιχα στο να την μειώνει όταν το SNR είναι ιδιαίτερα υψηλό διατηρώντας μια ικανοποιητική ποιότητα σύνδεσης και χωρίς απώλειες πακέτων. Η μέση μείωση της κατανάλωσης σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται σε πολύ μεγάλα ποσοστά, με τα πειράματα

να πραγματοποιούνται σε ρεαλιστικές συνθήκες και για σχετικά μικρές αποστάσεις.

Στο [25] οι συγγραφείς επιβεβαιώνουν ότι το SNR μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια ως ένα εργαλείο πρόβλεψης της ποιότητας του καναλιού. Επιπλέον, παρουσιάζουν ένα καινοτόμο σχέδιο προσαρμογής ρυθμού καθοδηγούμενο από το SNR (SGRA - SNR-Guided Rate Adaptation), με το οποίο επιχειρούν να διευθετήσουν ζητήματα όπως είναι η εξάρτηση των τιμών του SNR από το υλικό, και η αρνητική επίδραση των παρεμβολών στη σχέση του SNR με το λόγο παράδοσης πλαισίων (FDR - Frame delivery ratio). Οι μετρήσεις σε αυτήν την περίπτωση δείχνουν ότι υπό συνθήκες ύπαρξης παρεμβολών, η χρήση του SNR μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της ποιότητας του καναλιού.

Το SGRA κατατάσσει το κανάλι σε δύο καταστάσεις, αυτή της ύπαρξης παρεμβολών και αυτή που δεν τις περιλαμβάνει. Το προτεινόμενο σχέδιο ανιχνεύει την ύπαρξη παρεμβολών και ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση επιλέγοντας διαφορετική στρατηγική ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού. Αν το κανάλι είναι ελεύθερο από παρεμβολές, γίνεται δυναμική εκμετάλληση της τιμής του SNR ώστε να επιλεγεί ο βέλτιστος ρυθμός. Στην αντίθετη περίπτωση όπου υφίστανται παρεμβολές, οι πληροφορίες του SNR χρησιμοποιούνται ως κατευθυντήρια γραμμή για την επιλογή ενός συνόλου υποψήφιων ρυθμών, αλλά η τελική επιλογή γίνεται έπειτα από διερεύνηση.

Οι αλγόριθμοι προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης μπορεί να είναι είτε βασισμένοι σε απώλειες είτε στο SNR. Στην πρώτη περίπτωση, αύξηση του ρυθμού απώλειας πλαισίων σημαίνει επιδείνωση της ποιότητας του καναλιού και επομένως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων πρέπει να μειωθεί με τη χρήση μιας πιο κατάλληλης διαμόρφωσης ή κωδικοποίησης. Ωστόσο, εάν η προαναφερθείσα απώλεια πλαισίων δεν οφείλεται σε υποβάθμιση της ποιότητας του καναλιού αλλά σε παρεμβαλλόμενους κόμβους, τότε η μείωση του ρυθμού όχι μόνο δε θα μετριάσει τις απώλειες αλλά αντίθετα μπορεί να προκαλέσει έναν ακόμη υψηλότερο ρυθμό απώλειας πλαισίων, αφού ο χαμηλότερος ρυθμός απλά θα παρατείνει το χρόνο μετάδοσης ενός πλαισίου. Ένας τρόπος να ανιχνευθούν οι απώλειες εξαιτίας των παρεμβολών είναι μέσω της χρήσης RTS/CTS πλαισίων, κάτι που όμως εισάγει σημαντικό overhead στο δίκτυο και έχει αμφίβολη αποτελεσματικότητα στην πράξη, καθώς το εύρος παρεμβολών είναι γενικά μεγαλύτερο απ' ό,τι το αξιόπιστο εύρος μετάδοσης ενός πλαισίου.

Όσο αφορά τη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή την αξιοποίηση του SNR, είναι εύλογο να υποθέσει κανείς ότι αξιοποιώντας πληροφορίες του φυσικού επιπέδου που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του καναλιού μπορεί να γίνει πιο εύκολη και σωστή προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν το SNR για την προσαρμογή του ρυθμού, όμως, δεν έχουν δοκιμαστεί σε ρεαλιστικό περιβάλλον σε αντίθεση με την παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα της οποίας έδειξαν σημαντική αύξηση στο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων σε σχέση με υπάρχουσες λύσεις.

### **3.4: Ανάλυση και αντιμετώπιση των παρεμβολών**

Καθώς η ασύρματη επικοινωνία κυριαρχεί στην καθημερινότητα, η ύπαρξη πολλών συσκευών οδηγεί σε προβλήματα παρεμβολών με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται σε μεγάλο βαθμό η απόδοση του δικτύου. Η αλληλεπικάλυψη ή η κοινή χρήση των καναλιών μειώνει τη χωρητικότητα του καναλιού που μπορεί να χρησιμοποιήσει κάθε δίκτυο και αυτό έχει ως συνέπεια να πραγματοποιούνται αποτυχίες μετάδοσης, γεγονός που μειώνει το ποσοστό των πακέτων που παραλαμβάνονται με επιτυχία σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν αρχικά (PDR - Packet Delivery Ratio). Οι συγγραφείς του [26] συνδυάζουν το μηχανισμό που ανέπτυξαν στο [24], στον οποίο εκμεταλλεύομενοι το SNR επιτυγχάνουν μείωση στην ενέργεια μετάδοσης, με ένα μηχανισμό προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης, έτσι ώστε να περιοριστούν οι συνέπειες των παρεμβολών εξαιτίας ασύρματων δικτύων που βρίσκονται στον ίδιο χώρο, ενώ ταυτόχρονα να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του ασύρματου δικτύου.

Ο συνολικός μηχανισμός που παρουσιάζεται αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο αφορά και εφαρμόζεται στο σημείο πρόσβασης και περιλαμβάνει την αποστολή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του πακέτου, καθώς και την εκτέλεση των ενεργειών που ζητήθηκαν από τους σταθμούς. Το δεύτερο τμήμα εφαρμόζεται στους σταθμούς και είναι υπεύθυνο για την προσαρμογή της ενέργειας μετάδοσης κάθε σταθμού ξεχωριστά, με βάση τις πληροφορίες που στάλθηκαν από το σημείο πρόσβασης.

Πιο συγκεκριμένα και δεδομένης της ύπαρξης ενός δικτύου με ένα σημείο πρόσβασης και ένα αριθμό από σταθμούς, κάθε φορά που το σημείο πρόσβασης λαμβάνει ένα πακέτο από κάποιο σταθμό, θα φροντίσει να στείλει έπειτα στο σταθμό το επίπεδο του σήματος, του θορύβου καθώς και το SNR κατά τη διάρκεια λήψης του πακέτου. Ο σταθμός τότε, θα συγκρίνει το SNR του σημείου πρόσβασης με αυτό ενός κατωφλίου, πάνω από το

οποίο η μετάδοση θεωρείται επιτυχημένη και χωρίς λάθη. Στην περίπτωση που οι δύο τιμές δεν είναι κοντά, τότε ο σταθμός θα προσαρμόσει την ενέργεια μετάδοσης αναλόγως. Ο σταθμός έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει τις παρεμβολές υπολογίζοντας την απόκλιση του SNR και μπορεί να ειδοποιήσει το σημείο πρόσβασης ώστε είτε να μειώσει το ρυθμό μετάδοσης στην περίπτωση που ανιχνευθούν, είτε να τον αυξήσει εάν ένας συγκεκριμένος αριθμός πακέτων έχει ληφθεί επιτυχώς.

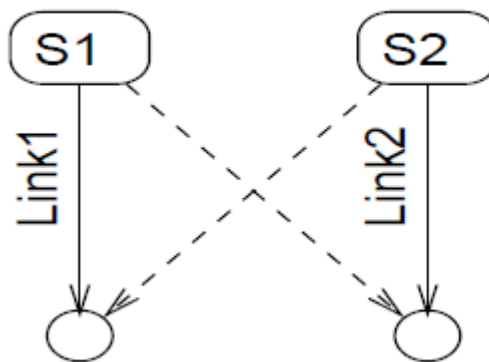
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι στην περίπτωση ύπαρξης παρεμβολών η απώλεια των πακέτων μειώθηκε σημαντικά, ενώ ταυτόχρονα ο ρυθμός μετάδοσης διατηρήθηκε όσο το δυνατό υψηλότερος. Με δεδομένο ότι η εξάλειψη των παρεμβολών είναι αδύνατη, ο προτεινόμενος μηχανισμός επιτυγχάνει να ελαχιστοποιήσει την επίδρασή τους καθώς και να μειώσει την ενέργεια που καταναλώνεται.

Όπως προαναφέρθηκε, οι παρεμβολές είναι ένας βασικός παράγοντας υποβάθμισης της απόδοσης ενός δικτύου. Ένας τρόπος να μετριαστεί η επίδρασή τους είναι η εφαρμογή ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης, βελτιώνοντας έτσι τη χωρική επαναχρησιμοποίηση μέσω ελέγχου της ενέργειας ανά σύνδεσμο. Με τον έλεγχο της ενέργειας ανά σύνδεσμο, ο κόμβος έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει πακέτα στους γειτονικούς κόμβους με διαφορετικά επίπεδα ισχύος, επιτρέποντας έτσι τη μετάδοση με μειωμένη ενέργεια για κόμβους που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και ως εκ τούτου την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Από την άλλη, μία αύξηση στην ενέργεια μετάδοσης μπορεί μεν να βελτιώσει την ποιότητα και το ρυθμό απόδοσης (throughput) ενός συνδέσμου, θα οδηγήσει όμως σε αύξηση των επιπέδων των παρεμβολών. Τα αποτελέσματα μπορούν να χαρακτηριστούν συγκρουόμενα όσο αφορά την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ρυθμαπόδοσης.

Το βασικό πρωτόκολλο MAC του προτύπου 802.11 είναι το DCF (Distributed Coordination Function), το οποίο βασίζεται στη μέθοδο CSMA/CA. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τόσο φυσική (physical carrier sensing) όσο και εικονική (virtual carrier sensing) ακρόαση φέροντος. Στην πρώτη περίπτωση, για να αποφευχθεί κάποια σύγκρουση, ο κόμβος που επιθυμεί να μεταδώσει ένα πακέτο αρχικά διαισθάνεται το μέσο. Αν ανιχνευθεί ότι υπάρχει κάποια μετάδοση σε εξέλιξη, ο κόμβος θα ξαναπροσπαθήσει να στείλει το πακέτο μετά από ένα χρονικό διάστημα που καθορίζεται από το πρότυπο. Αν δεν υπάρχει κίνηση, ο κόμβος μεταδίδει. Ωστόσο, στο physical carrier sensing εμφανίζεται το πρόβλημα των κρυμμένων και των εκτεθειμένων τερματικών. Όταν δύο μεταδότες δεν μπορούν να διαισθανθούν ο



ένας τον άλλο, οι μεταδόσεις τους είναι πιθανό να συγκρουστούν στον προοριζόμενο δέκτη. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μεταδότες λέγεται ότι είναι «κρυμμένοι» ο ένας από τον άλλο. Επιπλέον, υπάρχει περίπτωση ένας μεταδότης, ανιχνεύοντας ότι το κανάλι είναι κατειλημένο, να καταστείλει τη μετάδοσή του. Κάτι τέτοιο όμως μπορεί να μην απαιτείται, καθώς οι ταυτόχρονες μεταδόσεις είναι κάποιες φορές εφικτές, παρόλο που ένας κόμβος μπορεί να διαιθανθεί τη μετάδοση από ένα γειτονικό μεταδότη. Εδώ, ο μεταδότης που θα αποτραπεί από το να στείλει πακέτα λέγεται ότι είναι «εκτεθειμένος» στη μετάδοση του γειτονικού κόμβου. Το virtual carrier sensing, χρησιμοποιώντας τα πλαίσια ελέγχου RTS (Request-To-Send) και CTS (Clear-To-Send), λύνει το πρόβλημα των κρυμμένων τερματικών, ενώ αντίθετα το πρόβλημα των εκτεθειμένων τερματικών μπορεί να οξυνθεί.



Εικόνα 5: Πρόβλημα κρυμμένου τερματικού. Κάθε ένας από τους αποστολείς δε γνωρίζει την ύπαρξη του άλλου, με αποτέλεσμα τα πακέτα που στέλνονται από αυτούς να συγκρούονται στους παραλήπτες

Στο [27] γίνεται προσπάθεια να αναλυθούν οι επιπτώσεις που έχει ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης όσο αφορά τις παρεμβολές, ενώ με τη βοήθεια πειραμάτων σε εσωτερικό περιβάλλον αξιολογείται ως μέσο για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποδεικνύουν την ύπαρξη τριών περιπτώσεων παρεμβολών: την περίπτωση επικάλυψης (overlapping), κρυμμένου τερματικού (hidden

terminal) και την περίπτωση πιθανού διαχωρισμού (potentially disjoint).

Η πρώτη περίπτωση, στην οποία δύο σύνδεσμοι επικαλύπτονται, προκύπτει όταν το κανάλι μεταξύ των δύο αποστολέων είναι καλύτερο από αυτό τουλάχιστον ενός αποστολέα προς τον παραλήπτη του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί κάθε αποστολέας να «ακούσει» τις μεταδόσεις του άλλου και να κάνει πίσω αναλόγως. Επομένως, μόνο ένας από τους δύο συνδέσμους θα είναι ενεργός και θα μεταφέρει κίνηση κάθε φορά και η μέγιστη συνολική απόδοση των δύο συνδέσμων δε θα είναι ποτέ μεγαλύτερη από το μέγιστο που είναι εφικτό στον καλύτερο από τους δύο συνδέσμους. Η χρήση ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης δε συνεισφέρει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης. Στη δεύτερη περίπτωση, αυτή του κρυμμένου τερματικού, η οποία αποτελεί και την πλειοψηφία, οι αποστολείς δεν μπορούν να ανιχνεύσουν τις μεταδόσεις των υπολοίπων. Καθώς πολλαπλές μεταδόσεις φτάνουν ταυτόχρονα σε έναν παραλήπτη, δημιουργείται ένας ανταγωνισμός μεταξύ σήματος και θορύβου. Αν η ισχύς του σήματος της επιθυμητής μετάδοσης είναι ισχυρότερη απ' ότι της παρεμβαλλόμενης μετάδοσης, ο κόμβος είναι σε θέση να αποκρυπτογραφήσει το ζητούμενο πακέτο. Ο σωστός έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης σε αυτήν την περίπτωση είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της δικαιοσύνης. Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση, οι πιθανά διαχωρισμένοι σύνδεσμοι είναι αυτοί στους οποίους οι ρυθμίσεις ενέργειας επιτρέπουν ταυτόχρονες επιτυχείς μεταδόσεις, γεγονός που οδηγεί σε διπλασιασμό της συνολικής απόδοσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι για να επιτευχθεί υψηλή δικτυακή απόδοση, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί κατάλληλα η ενέργεια μετάδοσης. Με άλλα λόγια, απαιτείται ένας μηχανισμός προσαρμογής της ενέργειας, ο οποίος θα είναι σε θέση να αποφασίζει για κάθε σύνδεσμο το ποσό της ενέργειας που χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κάθε στιγμή.

Οι συγγραφείς εξέτασαν επιπρόσθετα την επίδραση της προσθήκης του virtual carrier sensing στις παρεμβολές, επαναλαμβάνοντας τα προηγούμενα πειράματα προσθέτοντας RTS/CTS πλαίσια ελέγχου. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι για την περίπτωση της επικάλυψης η απόδοση των συνδέσμων χειροτέρευσε ελαφρώς εξαιτίας του overhead των RTS/CTS πλαισίων, ενώ για την περίπτωση του κρυμμένου τερματικού τόσο η απόδοση όσο και η δικαιοσύνη υποβαθμίστηκαν σημαντικά, σε αντίθεση με τις προσδοκίες. Τέλος, και οι πιθανά διαχωρισμένοι σύνδεσμοι επηρεάστηκαν αρνητικά, αφού η χρήση των πλαισίων στερεί την ευκαιρία για ταυτόχρονες μεταδόσεις οδηγώντας έτσι σε μειωμένη συνολική απόδοση.

Συμπερασματικά, ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συνολική απόδοση του δικτύου και αποδεικνύεται πολλά υποσχόμενος. Επίσης παρατηρείται ότι οι σύνδεσμοι δεν είναι απαραίτητο να μεταδίδουν πάντα με τη μέγιστη ενέργεια για να επιτύχουν μέγιστη απόδοση. Τέλος, η χρήση του virtual carrier sensing σε συνδυασμό με τον έλεγχο της ενέργειας φαίνεται να είναι επιβλαβής για τα εσωτερικά ασύρματα δίκτυα, αφού εντείνει το πρόβλημα των εκτεθειμένων τερματικών υποβαθμίζοντας έτσι την απόδοση.

Καθώς ο αριθμός των συσκευών αυξάνεται σε μια περιοχή, με τις συσκευές αυτές να παρεμβάλλουν στο ίδιο κανάλι συχνότητας, η μεταφορά των δεδομένων αντιμετωπίζει προβλήματα όσο αφορά την απόδοση. Επιπλέον, το γεγονός ότι η προκαθορισμένη ενέργεια μετάδοσης και το κατώφλι ακρόασης φέροντος (CCA - Clear Channel Assessment threshold), το οποίο χρησιμοποιείται για να διαπιστωθεί αν το ασύρματο μέσο είναι απασχολημένο, που χρησιμοποιούνται στις συσκευές 802.11 οδηγούν σε μη αποδοτική χρήση του φάσματος συχνοτήτων, επιδεινώνει την κατάσταση. Για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς του [28] παρουσιάζουν ένα πρωτόκολλο το οποίο επιλέγει την κατάλληλη ενέργεια μετάδοσης καθώς και το κατώφλι εκτίμησης της αδράνειας του καναλιού, έτσι ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές και να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου, ενώ παράλληλα μεριμνά για τη διατήρηση της δικαιοσύνης με το να φροντίζει να αποδώσουν καλύτερα οι περισσότεροι σύνδεσμοι που υποφέρουν από χαμηλή ρυθμιζόμενη απόδοση.

Οι συγγραφείς αρχικά παρουσιάζουν έναν επαναληπτικό άπληστο αλγόριθμο, ο οποίος έχοντας πλήρη γνώση της τοπολογίας του δικτύου (δηλαδή του path loss μεταξύ των κόμβων) και της τρέχουσας διαμόρφωσης (δηλαδή τα επίπεδα ενέργειας που χρησιμοποιούν οι πηγές), αποφασίζει την ενέργεια μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για όλες τις μεταδόσεις. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι να προσαρμόσει με τέτοιο τρόπο την ενέργεια μετάδοσης, έτσι ώστε να μειωθεί ο αριθμός των ακμών στο γράφημα σύγκρουσης μετάδοσης, το οποίο χρησιμοποιείται από ερευνητές για την αναπαράσταση των παρεμβολών που υφίστανται σε ένα δίκτυο. Ο στόχος είναι η αύξηση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης, δηλαδή η δυνατότητα περισσότερων ταυτόχρονων μεταδόσεων. Εφόσον η έλλειψη μιας ακμής στο γράφημα είναι ισοδύναμη με την ενεργοποίηση ταυτόχρονων μεταδόσεων, ο στόχος γίνεται ισοδύναμος με την προσπάθεια ελαχιστοποίησης του αριθμού των ακμών. Ο αλγόριθμος, λοιπόν, προσαρμόζει επαναληπτικά τα επίπεδα ισχύος με σκοπό να εξαλείψει τις ακμές, έως ότου το γράφημα να

μην επιδέχεται περαιτέρω αφαίρεση. Παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος είναι άπληστος, αποδεικνύεται με τη βοήθεια προσομοιώσεων ότι η απόδοσή του πλησιάζει το άνω φράγμα.

Ο παραπάνω αλγόριθμος ελέγχου της ενέργειας ενσωματώνεται έπειτα σε ένα πρωτόκολλο για κόμβους συμβατούς με το πρότυπο 802.11. Σύμφωνα με αυτό, κάθε κόμβος που μεταδίδει ένα πακέτο, εισάγει σε αυτό πληροφορίες σχετικά με τη μετάδοση: το επίπεδο ενέργειας που χρησιμοποιείται, την εκτίμηση του path loss προς τον προορισμό, ένα bit που υποδεικνύει πλαίσιο υψηλής ισχύος, καθώς και την εκτίμηση του path loss προς έναν επιλεγμένο κόμβο, με το συνολικό overhead της επιπλέον πληροφορίας που εισάγεται να είναι πολύ μικρό. Λόγω του ότι κάποιος κόμβος μπορεί να επιλέξει να χρησιμοποιήσει ένα χαμηλό επίπεδο ενέργειας καθιστώντας αδύνατη την αποκωδικοποίηση των πακέτων του και τη συλλογή των πληροφοριών που περιέχονται σε αυτό από τους άλλους μεταδότες, οι κόμβοι περιοδικά μεταδίδουν ανακοινώσεις μέσω πλαισίων ACK στο μέγιστο επίπεδο ισχύος. Η χρήση των πλαισίων ACK οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των παρεμβολών που προκαλούνται από το υψηλής ενέργειας πακέτο. Οι περιοδικές ανακοινώσεις αποδεικνύονται ζωτικής σημασίας για την απόδοση του πρωτοκόλλου, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος του συστήματος τοποθετείται σε λειτουργία παρακολούθησης, γεγονός που του επιτρέπει να παρακολουθεί τις μεταδόσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη και να αποκτά πληροφορίες τοπολογίας. Κάθε κόμβος διατηρεί κατάλληλες λίστες με τις πληροφορίες που συλλέγει και κάθε φορά που ο κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο, εξάγει τις πληροφορίες που περιέχονται σ' αυτό και ενημερώνει τις λίστες. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά, ο κόμβος εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου της ενέργειας ο οποίος αυξάνει επαναληπτικά τον αριθμό των ταυτόχρονων μεταδόσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν.

Καθώς ο συντονισμός του CCA έχει αποδειχτεί πολύ σημαντικός στην προσπάθεια ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων και τη διασφάλιση μιας πολιτικής δικαιοσύνης, πολλές τεχνικές ρύθμισής του έχουν προταθεί με τα χρόνια. Για παράδειγμα, στον αλγόριθμο «Echos» κάθε κόμβος πηγής επιλέγει ένα κατώφλι CCA που του επιτρέπει να «ακούσει» όλες τις μεταδόσεις που παρεμβαίνουν με την τρέχουσα μετάδοσή του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ωστόσο, η συγκεκριμένη τεχνική σε ορισμένες περιπτώσεις αποδεικνύεται άπληστη για τους κόμβους, οδηγώντας σε λιμοκτονία για κάποιες μεταδόσεις. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, οι συγγραφείς προτείνουν μια παραλλαγή του αλγορίθμου αυτού, την οποία καλούν «Altruistic Echos», σύμφωνα με την οποία το κατώφλι CCA ρυθμίζεται ώστε να «ακούει» όλες τις μεταδόσεις

που θα επηρεάσουν την τρέχουσα μετάδοση ή θα επηρεαστούν από την τρέχουσα μετάδοση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υποδεικνύουν ότι μεταξύ των χρησιμοποιούμενων σχεδίων CCA, ο προτεινόμενος αλγόριθμος φαίνεται να παρέχει μια καλή ισορροπία μεταξύ δικαιοσύνης και ρυθμαπόδοσης.

Η αξιολόγηση μέσω προσομοιώσεων δείχνει ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο διαχείρισης της ενέργειας με επίγνωση των παρεμβολών επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου συγκριτικά με τη ρύθμιση μόνο του κατωφλίου CCA και τη χρήση της ελάχιστης δυνατής ενέργειας μετάδοσης.

Οι τεχνικές ελέγχου της ενέργειας έχουν ως στόχο να μειώσουν την καταναλισκόμενη ενέργεια με τέτοιο τρόπο, ώστε για την πληροφορία που μεταδίδει ο αποστολέας να καταναλώνεται μόνο η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της πληροφορίας ή από την ποιότητα του καναλιού. Ο αυξημένος αριθμός των δικτύων που υπάρχουν στα σύγχρονα αστικά περιβάλλοντα καθώς και η χρησιμοποίηση του περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων έχει ως αποτέλεσμα πολλά δίκτυα να λειτουργούν σε κοινόχρηστα κανάλια. Αν οι σταθμοί και τα σημεία πρόσβασης μειώσουν τα επίπεδα της ενέργειας μετάδοσης σε ένα ελάχιστο κατώφλι όπου δεν επηρεάζεται αρνητικά η ποιότητα της σύνδεσης επικοινωνίας, τότε η ποιότητα θα βελτιωθεί στα γειτονικά δίκτυα όσο αφορά τις παρεμβολές.

Στις περισσότερες περιπτώσεις των ασύρματων τεχνολογιών, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί βελτίωση της ρυθμαπόδοσης ενώ ταυτόχρονα μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται λόγω των περιορισμένων πόρων, που επιπλέον επιφέρουν μεγάλο κόστος. Σε ένα ασύρματο δίκτυο, η ρυθμαπόδοση είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ποιότητα του καναλιού. Για το λόγο αυτό πρέπει να βρεθούν πιο αποτελεσματικοί τρόποι επιλογής καναλιού, έτσι ώστε να επιτευχθεί τόσο υψηλότερη ρυθμαπόδοση όσο και μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, αφού η συμφόρηση των πακέτων συνεπάγεται αυξανόμενο αριθμό επαναμεταδόσεων.

Στο [29] προτείνεται ένα μοντέλο συστήματος για ασύρματα δίκτυα υποδομής που έχει ως στόχο να μειώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια, αξιοποιώντας τεχνικές κατανομής του καναλιού. Πρόκειται για ένα αλγόριθμο δυναμικής επιλογής συχνοτήτων (DFS - Dynamic Frequency Selection), ο οποίος λαμβάνοντας υπόψιν την κίνηση του δικτύου μεταβαίνει στο κανάλι που θα προκαλέσει τις λιγότερες επαναμεταδόσεις πλαισίων. Πιο

συγκεκριμένα, οι συγγραφείς εισήγαγαν ένα περιοδικό παράθυρο παρακολούθησης, κατά τη διάρκεια του οποίου το σημείο πρόσβασης όπως και κάθε σταθμός παίρνουν μετρήσεις για το χρονικό διάστημα στο οποίο δεν υπάρχουν συγκρούσεις σε κάθε κανάλι. Στο τέλος κάθε παραθύρου παρακολούθησης, οι σταθμοί μεταδίδουν τις μετρήσεις τους στο σημείο πρόσβασης. Μόλις αυτές έχουν συγκεντρωθεί, καλείται μια συνάρτηση η οποία βρίσκει το καλύτερο κανάλι με βάση μια προκαθορισμένη εξίσωση, και έπειτα το δίκτυο μεταβαίνει στο νέο κανάλι.

Το προτεινόμενο μοντέλο αξιολογήθηκε με τη βοήθεια πειραμάτων, ενώ επιπρόσθετα συγκρίθηκε με δύο άλλα υπάρχοντα μοντέλα. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ανωτερότητα του προτεινόμενου μοντέλου όσο αφορά το ποσοστό των επαναμεταδόσεων καθώς και της ενέργειας που καταναλώνεται.

Η σημερινή ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων βασισμένων στο πρότυπο 802.11 οδήγησε στη δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο οποτεδήποτε και οπουδήποτε είναι επιθυμητό. Η απόδοση των δικτύων αυτών ωστόσο πέφτει σημαντικά όταν υπάρχουν πολλοί σταθμοί που μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων με έναν μη συντονισμένο τρόπο. Για το λόγο αυτό, η ανάγκη αποδοτικής κατανομής των πόρων γίνεται όλο και πιο επιτακτική, στην προσπάθεια να μειωθούν οι αρνητικές επιδράσεις των παρεμβολών.

Στο [30] οι συγγραφείς επιχειρούν να μελετήσουν και να κατανοήσουν τις συνδυασμένες δυνατότητες που παρέχουν ο έλεγχος της ενέργειας και του ρυθμού μετάδοσης. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύσσουν ένα προσαρμοστικό ελεγκτή ρυθμού-ενέργειας, ενεργοποιώντας μια διαστρωματική διεπαφή επικοινωνίας μεταξύ του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου MAC του προτύπου 802.11.

Ο ελεγκτής αποτελείται από δύο αλγόριθμους, με τον πρώτο να είναι υπεύθυνο για την επιλογή του κατάλληλου ρυθμού μετάδοσης και τον δεύτερο να υποστηρίζει τον ίδιο ρυθμό με τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Για να αποφασίσει τον καλύτερο ρυθμό, ο πρώτος αλγόριθμος (Minstrel), χρησιμοποιεί έναν πίνακα ανά σύνδεσμο (δηλαδή για κάθε γείτονα), ο οποίος περιέχει την πιθανότητα επιτυχίας και την επιτεύξιμη ρυθμαπόδοση για κάθε ένα από τους τέσσερις δυνατούς ρυθμούς μετάδοσης. Έπειτα, αξιολογεί κάθε λίγο τον πίνακα αυτό και χρησιμοποιώντας κάποιους υπολογισμούς επεξεργάζεται το ιστορικό επιτυχίας κάθε ρυθμού. Για να υπολογίσει τις πιθανότητες επιτυχίας κάθε ρυθμού, ο Minstrel συλλέγει στατιστικά δεδομένα από όλες τις προσπάθειες

μετάδοσης πακέτων. Προκειμένου να αποφασίσει το επίπεδο ενέργειας με το οποίο θα λειτουργήσει ο δεύτερος αλγόριθμος (Piano), αποστέλλει τρία διαφορετικά είδη πακέτων, το καθένα με διαφορετικό επίπεδο ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό επιχειρεί να κατανοήσει την επίδραση της ενέργειας μετάδοσης πάνω στη ρυθμαπόδοση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποδεικνύουν ότι η ρυθμαπόδοση είναι μια μη φθίνουσα συνάρτηση της ενέργειας μετάδοσης ενώ είναι εφικτό να διατηρηθεί η ίδια ρυθμαπόδοση με χαμηλότερα επίπεδα ισχύος.

Με τον έλεγχο του ρυθμού και της ενέργειας ανά σύνδεσμο, ο ελεγκτής επιτυγχάνει να μειώσει σημαντικά την ενέργεια μετάδοσης ανά επικοινωνία, κάνοντας χρήση με αποδοτικό τρόπο του διαθέσιμου κοινόχρηστου φάσματος και ταυτόχρονα παρέχοντας την ίδια απόδοση συνδέσμων όσο αφορά τον έλεγχο του ρυθμού μετάδοσης. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε απευθείας μείωση της παραγόμενης παρεμβολής, και επομένως αναμένεται να βελτιώσει την κατανομή των πόρων στο δίκτυο.

### **3.5: Επίδραση των στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας στην απόδοση των ασύρματων δικτύων**

Ο κύριος σκοπός των ασύρματων δικτύων είναι να προσφέρουν υψηλό εύρος ζώνης στους χρήστες που βρίσκονται σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Οι χρήστες αυτοί ελπίζουν ότι ιδανικά θα έχουν τις ίδιες υπηρεσίες και τις ίδιες δυνατότητες όπως στα ενσύρματα δίκτυα. Τα ασύρματα δίκτυα, ωστόσο, υποφέρουν από περιορισμούς, γεγονός που καθιστά δύσκολη την επίτευξη των στόχων αυτών.

Ένα θέμα που προκύπτει με τα δίκτυα WLAN είναι η ασφάλεια. Ενώ στα ενσύρματα δίκτυα το μέσο μετάδοσης μπορεί να ασφαλιστεί μέσω ελέγχου των συνδεδεμένων σταθμών, στα ασύρματα δίκτυα δεν ισχύει το ίδιο. Το μέσο σ' αυτήν την περίπτωση είναι διαθέσιμο στον οποιονδήποτε που βρίσκεται εντός του γεωγραφικού εύρους του πομπού, γεγονός που δυσχεραίνει την ασφάλεια. Η ιδιωτικότητα των δεδομένων μπορεί βέβαια να εξασφαλιστεί πάνω από ένα ραδιοφωνικό μέσο με τη χρήση της κρυπτογράφησης, αλλά κάτι τέτοιο θα οδηγήσει σε αυξημένο κόστος και μειωμένη απόδοση.

Ένα ακόμα ζήτημα που προκύπτει με τα ασύρματα δίκτυα είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή. Μια αιτία μπορεί να είναι η ταυτόχρονη μετάδοση εκ μέρους δύο ή περισσότερων χρηστών που μοιράζονται την ίδια συχνότητα, δημιουργώντας έτσι

συγκρούσεις. Οι συγκρούσεις αυτές προκύπτουν όταν πολλοί σταθμοί, που περιμένουν να γίνει αδρανές το κανάλι, ξεκινούν να μεταδίδουν την ίδια στιγμή. Ένας άλλος τύπος παρεμβολής περιλαμβάνει την παρουσία μη επιθυμητών παρεμβατικών ραδιοφωνικών σημάτων, τα οποία διασπούν τις κανονικές δικτυακές λειτουργίες. Μια τέτοια παρεμβολή μπορεί να προέρχεται από ένα γειτονικό δίκτυο που μεταδίδει με υψηλότερη ισχύ και επομένως προκαλεί υποβάθμιση της αξιοπιστίας του δικτύου.

Οι συγγραφείς του [31] ερευνούν τις επιδράσεις των στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας πάνω στην απόδοση των ασύρματων δικτύων, ενώ επιχειρούν να αποδείξουν ότι οι προγραμματιστές δικτύων μπορούν να επιτύχουν την ίδια ή και καλύτερη απόδοση μειώνοντας παράλληλα την ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυο. Για να το επιτύχουν αυτό, αρχικά διατυπώνουν το πρόβλημα της διαχείρισης ενέργειας ως ένα ακέραιο γραμμικό πρόβλημα με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ενέργειας μετάδοσης ενός δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο μοντέλο αποτελείται από τέτοια επιλογή κατανομής της ισχύος στα σημεία πρόσβασης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική παρεμβολή ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζεται ότι ο λόγος του σήματος προς την παρεμβολή (SIR - Signal to Interference Ratio) κάθε χρήστη είναι υψηλότερος από ένα προκαθορισμένο κατωφλι. Με τη βοήθεια ενός ρεαλιστικού σεναρίου, αποδεικνύεται ότι μπορεί να εξοικονομηθεί περίπου 55% της ενέργειας μετάδοσης ενώ το SIR αυξάνεται κατά 6dB, γεγονός που υποδεικνύει βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας.

Στη συνέχεια διεξάγεται μία μελέτη με τη βοήθεια προσομοιώσεων σε ένα δίκτυο που αποτελείται από δύο σημεία πρόσβασης, για καθένα από τα οποία χρησιμοποιούνται τρία επίπεδα ενέργειας μετάδοσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στην περίπτωση που οι χρήστες βρίσκονται στην επικαλυπτόμενη περιοχή κάλυψης, όταν και τα δύο σημεία πρόσβασης μεταδίδουν με το ίδιο επίπεδο ενέργειας, τότε επιτυγχάνουν περίπου την ίδια ρυθμαπόδοση σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια.

Αξίζει να παρατηρηθεί, ότι όταν ένα δίκτυο βιώνει κακή ποιότητα υπηρεσίας, δεν έχει άλλη επιλογή από το να αυξήσει την ενέργειά του. Κάτι τέτοιο ωστόσο θα επηρεάσει αρνητικά τους γειτονικούς χρήστες, καθώς θα αυξήσει την παρεμβολή. Σε κάποιες περιπτώσεις το αποτέλεσμα θα είναι και τα δύο δίκτυα να αυξήσουν την ενέργειά τους με σκοπό να επιτύχουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, χωρίς να λάβουν υπόψιν τους την παρεμβολή. Όταν οι χρήστες, λοιπόν, βρίσκονται στην περιοχή επικάλυψης και τα δύο σημεία πρόσβασης αυξάνουν ταυτόχρονα την ενέργεια μετάδοσης, δε θα καταφέρουν να βελτιώσουν την ποιότητα υπηρεσίας, αλλά αντίθετα θα βιώσουν την ίδια με αυτήν στην



περίπτωση που χρησιμοποιούν την ελάχιστη ενέργεια μετάδοσης. Αυξάνοντας και οι δύο την ενέργειά τους, θα καταφέρουν μόνο να σπαταλήσουν ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση προτείνεται η μετάδοση με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια ή όταν είναι δυνατό, η χρήση μη επικαλυπτόμενων καναλιών.

Συμπερασματικά, η πεποίθηση ότι αύξηση στην ενέργεια μετάδοσης θα οδηγήσει σε καλύτερη δικτυακή απόδοση δεν είναι απαραίτητα σωστή και μπορεί να οδηγήσει σε σπατάλη ενέργειας.

### **3.6: Πρωτόκολλα δρομολόγησης και εξοικονόμηση**

Καθώς τα ad-hoc δίκτυα κυριαρχούν όλο και περισσότερο λόγω της ευκολίας στη χρήση και των ευκαιριών για συνεχή συνδεσιμότητα που προσφέρουν, η ύπαρξη εξειδικευμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης συνέβαλε στη βελτίωση της απόδοσης και ως εκ τούτου στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Αποδεικνύεται, ωστόσο, ότι η ανάγκη ενός μηχανισμού ελέγχου της ενέργειας είναι μεγάλη, ενώ ο συνδυασμός των δύο μπορεί να αποφέρει σημαντική εξοικονόμηση.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης απαιτούν την ανταλλαγή διάφορων μηνυμάτων ελέγχου, με σκοπό τη διατήρηση ενημερωμένων πινάκων δρομολόγησης και την παροχή έγκυρων πληροφοριών. Τα μηνύματα αυτά, όμως, χρειάζονται επιπλέον ενέργεια, η μείωση της οποίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του απαιτούμενου εύρους, γεγονός που για τα πρωτόκολλα αυτά και την προσπάθειά τους να φτάσουν απομακρυσμένους προορισμούς θα είναι επιβλαβές.

Από την άλλη, πολλά από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν αποσκοπούν μόνο στην εύρεση κατάλληλης διαδρομής σε ένα δίκτυο για την αποστολή των πακέτων, αλλά και στην επιλογή μονοπατιών με το μικρότερο δυνατό αριθμό από άλματα (hops), γεγονός που θα ελαχιστοποιήσει τις απαιτούμενες επαναμεταδόσεις και την καταναλισκόμενη ενέργεια. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τόσο τη μείωση της ενέργειας, όσο και της συνολικής καθυστέρησης.

Παρόλο που τα παραπάνω οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, δε συμπεριλαμβάνουν την ενέργεια μετάδοσης των κόμβων. Ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της ενέργειας μετάδοσης είναι επομένως απαραίτητος ώστε να εξοικονομηθεί ενέργεια κατά τη μετάδοση, ενώ ταυτόχρονα να βελτιώνεται η απόδοση του δικτύου.

Οι συγγραφείς του [32] προτείνουν ένα μηχανισμό ελέγχου της ενέργειας, ο οποίος βασίζεται στο SNR για την προσαρμογή της ενέργειας μετάδοσης και χρησιμοποιώντας την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου σε ένα συγκεκριμένο γειτονικό κόμβο, επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την καταναλισκόμενη ενέργεια.

Καθώς ο υπολογισμός της ενέργειας μετάδοσης δεν μπορεί να γίνει χωρίς κάποια ανατροφοδότηση (feedback) από τον παραλήπτη και εφόσον τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούν πολύ συχνά μηνύματα ελέγχου για να επιτελέσουν τις λειτουργίες τους, δίνεται η δυνατότητα προσθήκης της επιθυμητής πληροφορίας στις επικεφαλίδες των μηνυμάτων αυτών, ελαχιστοποιώντας μ' αυτόν τον τρόπο τον φόρτο και την κίνηση στο δίκτυο.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός περιλαμβάνει την επέκταση της δομής των μηνυμάτων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση γειτόνων του πρωτοκόλλου OLSR, που είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο για ad-hoc δίκτυα. Η επέκταση περιλαμβάνει την προσθήκη πληροφορίας που είναι απαραίτητη για το μηχανισμό ελέγχου ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια λήψης του μηνύματος εκ μέρους του παραλήπτη, την οποία χρειάζεται ο αποστολέας για να υπολογίσει το path loss και έτσι να προσαρμόσει την ενέργεια μετάδοσης. Το αποτέλεσμα θα είναι η εναλλαγή σε διαφορετικά επίπεδα ενέργειας, ανάλογα με τον προορισμό κάθε πακέτου.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν εξοικονόμηση ενέργειας έως και 85% σε ασύρματα δίκτυα όπου γίνεται χρήση του μηχανισμού, χωρίς κάποιο σημαντικό αντίκτυπο στη ρυθμαπόδοση. Η κινητικότητα των κόμβων απαιτεί ωστόσο την αποστολή πιο συχνών μηνυμάτων από μέρους του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, έτσι ώστε να παρέχονται πιο πρόσφατα δεδομένα στους κόμβους καθώς και να καταστεί πιο ακριβής η διαδικασία υπολογισμού της ενέργειας μετάδοσης.

### **3.7: Εξοικονόμηση στο 802.11n**

Καθώς πολλά σημεία πρόσβασης υιοθετούν το πρότυπο IEEE 802.11n έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις αυξημένες απαιτήσεις λόγω της κίνησης, τα νέα χαρακτηριστικά του προτύπου αυτού δημιουργούν νέες προκλήσεις στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας. Το πρώτο από αυτά τα χαρακτηριστικά αφορά την εισαγωγή του μηχανισμού συσσωμάτωσης πλαισίων, με δύο ειδών μεθόδους. Αρχικά, η μέθοδος A-MSDU

περιλαμβάνει τη σειριακή ένωση αρκετών μονάδων δεδομένων υπηρεσίας MAC (MSDUs) ως ωφέλιμο φορτίο (payload) για μια μεγάλη μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου MAC (MPDU), με τα MSDUs να μοιράζονται μια κοινή επικεφαλίδα MAC και ένα κοινό τμήμα ακολουθίας ελέγχου πλαισίου (FCS - Frame check sequence), σχηματίζοντας έτσι μια μονάδα δεδομένων υπηρεσίας φυσικού επιπέδου (PSDU). Η δεύτερη μέθοδος, A-MPDU, περιλαμβάνει το σχηματισμό υπομονάδων MPDUs από MSDUs που έχουν τις δικές τους επικεφαλίδες MAC και το δικό τους τμήμα ακολουθίας ελέγχου πλαισίου, οι οποίες έπειτα συσσωματώνονται με οριοθέτες και bits γεμίματος σχηματίζοντας ένα PSDU.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων, είναι απαραίτητο να σταλεί ένα πλαίσιο αναγνώρισης (ACK) στον αποστολέα, επιβεβαιώνοντας την επιτυχή παράδοση των δεδομένων. Ένα πλαίσιο συσσωμάτωσης, ωστόσο, αποτελείται από έναν αριθμό από υποπλαίσια, καθένα από τα οποία πρέπει να επιβεβαιωθεί. Για το λόγο αυτό εισάγεται ένας μηχανισμός αναγνώρισης τμήματος, ο οποίος χρησιμοποιώντας μόνο ένα πλαίσιο αναγνώρισης (Block ACK) επιβεβαιώνει μια επιτυχημένη μετάδοση για όλα τα MPDUs.

Οι συγγραφείς του [33] μελετούν το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας των ασύρματων συσκευών συμβατών με το πρότυπο IEEE 802.11n από δύο σκοπιές. Η πρώτη αφορά τα κριτήρια μέτρησης των συσκευών εξοικονόμησης, ενώ η δεύτερη την επίδραση των νέων χαρακτηριστικών του προτύπου 802.11n στη διαδικασία μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Με βάση την ανάλυσή τους, προτείνουν ένα μηχανισμό προσαρμοστικού ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης, που καλούν A-TPCM, ο οποίος επιχειρεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση στις 802.11n συσκευές.

Ο μηχανισμός αυτός βασικά προσαρμόζει την ενέργεια μετάδοσης με βάση την εκτίμηση του καναλιού. Επιτρέπει έτσι στις συσκευές WLAN να χρησιμοποιήσουν ένα πολύ χαμηλότερο επίπεδο ισχύος στη λειτουργία μετάδοσης, ενώ συντονίζει την ενέργεια μετάδοσης έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις διαφορετικές συνθήκες του καναλιού. Έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι μπορεί να υλοποιηθεί τόσο στην πλευρά του χρήστη όσο και στα σημεία πρόσβασης, ενώ είναι προς τα πίσω συμβατό με τα πρότυπα IEEE 802.11a/b/g με μικρές μόνο τροποποιήσεις. Πιο συγκεκριμένα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιλαμβάνει τρεις διαδικασίες. Η πρώτη αφορά την εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού χρησιμοποιώντας τις στατιστικές των πλαισίων Block ACK. Η δεύτερη παράγει τις αποφάσεις προσαρμογής της ενέργειας με βάση την εκτίμηση του καναλιού. Τέλος, η τρίτη

διαδικασία εφαρμόζει τις αποφάσεις αυτές πριν από κάθε μετάδοση. Συνολικά, καλή κατάσταση του καναλιού θα οδηγήσει σε μείωση της ενέργειας μετάδοσης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση σε αύξηση.

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή εξοικονόμηση ενέργειας, πρέπει να επιλεγεί μία κατάλληλη ενέργεια μετάδοσης. Ενώ η επιλογή υψηλής ισχύος στη λειτουργία μετάδοσης θα σπαταλήσει ενέργεια, χαμηλή ισχύς θα προκαλέσει απώλεια των πακέτων και επαναμεταδόσεις, κάτι που θα οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη σπατάλη. Είναι επομένως σημαντικό για τη μέθοδο ελέγχου της ενέργειας να θέσει την ενέργεια μετάδοσης όσο πιο χαμηλά γίνεται, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα επιτυχή μετάδοση. Η κατάσταση του καναλιού είναι άρα απαραίτητο να γίνει γνωστή στον αποστολέα. Γενικά, υπάρχουν δύο κοινοί τρόποι για να γίνει αυτό. Ο πρώτος περιλαμβάνει τη μεταφορά της πληροφορίας που αφορά το path loss μέσω κάποιου είδους πλαισίων (συνήθως χρησιμοποιούνται πλαίσια ACK ή CTS) που στέλνονται από τον παραλήπτη. Κάτι τέτοιο ωστόσο θα προσθέσει νέο περιεχόμενο στην πάγια μορφή του πλαισίου, οδηγώντας σε μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος. Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει την εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού μέσω της καταγραφής της ποσότητας των επιτυχημένων και αποτυχημένων πλαισίων, και είναι αυτός που χρησιμοποιείται σ' αυτήν την περίπτωση για να μην απαιτηθούν αλλαγές στο 802.11 πρότυπο.

Υπάρχουν, ωστόσο, κάποιες διαφορές στην καταγραφή του αποτελέσματος μετάδοσης μεταξύ των υπαρχόντων προτύπων IEEE 802.11a/b/g και του 802.11n. Ενώ για τα πρώτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αριθμός των πλαισίων ACK που φτάνουν για την καταγραφή των αποτελεσμάτων μετάδοσης, αφού η λήψη ενός πλαισίου ACK υποδεικνύει επιτυχή παράδοση ενός πακέτου ενώ το τέλος του χρονικού ορίου αντιπροσωπεύει αποτυχία στην παράδοση, στην περίπτωση του 802.11n χρησιμοποιείται πλαίσιο Block ACK, το οποίο παρουσιάζει τα αποτελέσματα μετάδοσης όλως των συγκεντρωτικών υποπλασίων. Επομένως, δεν είναι κατάλληλη η επιβεβαίωση ενός πλαισίου δεδομένων με τη λήψη του πλαισίου Block ACK. Για το λόγο αυτό οι συγγραφείς προτείνουν την εφαρμογή του ποσοστού λάθους υποπλασίων (SFER - Subframe error rate) για τη μέτρηση του αποτελέσματος μετάδοσης των αθροιστικών πλαισίων. Αν το SFER είναι μικρότερο από το κατώτερο όριο, τότε η μετάδοση θεωρείται επιτυχημένη. Στην αντίθετη περίπτωση που το SFER είναι μεγαλύτερο από το ανώτατο όριο, η μετάδοση θεωρείται αποτυχημένη.

Η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού αξιολογήθηκε με τη βοήθεια προσομοιώσεων για διαφορετικά σενάρια, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν ότι ο

μηχανισμός μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων συσκευών συμβατών με το πρότυπο 802.11n όσο αφορά παράγοντες όπως το μέγεθος της κίνησης, το επίπεδο συσσωμάτωσης κλπ.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1: Εισαγωγή και χαρακτηριστικά των πειραμάτων

Ο μηχανισμός που περιγράφεται στο [26] επιχειρεί να μειώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια και να αυξήσει τη συνολική απόδοση ενός δικτύου, αξιοποιώντας ένα συνδυασμό ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης και προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης που υλοποιούνται στους σταθμούς και στο σημείο πρόσβασης αντίστοιχα. Ο μηχανισμός αυτός επιπρόσθετα, στοχεύει στη μείωση των παρεμβολών που οφείλονται στην ύπαρξη ενός κοντινού δικτύου που μεταδίδει. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, έδειξαν ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός καταφέρνει να μειώσει την απώλεια πακέτων, διατηρώντας το ρυθμό μετάδοσης όσο το δυνατό πιο υψηλό παρουσία παρεμβολών, ενώ ταυτόχρονα η ενέργεια μετάδοσης διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

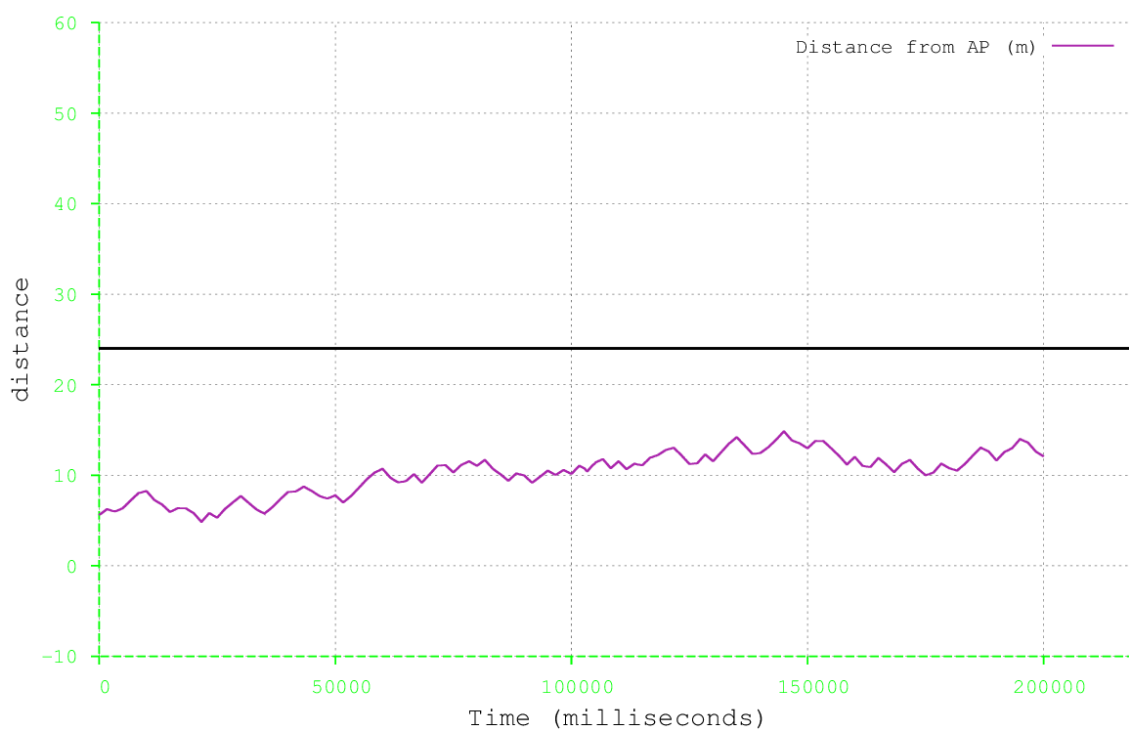
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να επαληθευτεί ο παραπάνω μηχανισμός, διενεργώντας προσομοιώσεις με διαφορετικές παραμέτρους και δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος μετάδοσης χωρίζεται σε τρεις ζώνες με βάση το μέγιστο εύρος σε μέτρα, με το σταθμό να κινείται μέσα σε κάθε ζώνη χρησιμοποιώντας σταθερή και μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Το σημείο πρόσβασης είναι σταθερό και δεν κινείται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όπως συμβαίνει στο [26]. Επιπλέον, όπως ακριβώς και στο [26], ένα γειτονικό ad-hoc δίκτυο μεταδίδει, προκαλώντας παρεμβολή.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον προσομοιωτή ns3 (έκδοση 21), με τη διάρκεια σε κάθε ένα από τα πειράματα να είναι 200 δευτερόλεπτα, ενώ το μέγιστο εύρος μετάδοσης είναι 45 μέτρα. Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν οι ίδιες εκτός από την ταχύτητα του σταθμού, με την επίδραση της οποίας να είναι ένας από τους στόχους των διενεργούμενων πειραμάτων. Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση που ο σταθμός κινείται με 0.6 m/s, έπειτα με 0.8 m/s και τέλος με 1.2 m/s. Στη συνέχεια η ταχύτητα του σταθμού γίνεται μεταβαλλόμενη και κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 1.2 m/s, αλλάζοντας κάθε φορά που ο σταθμός διανύει 10 μέτρα. Ο σταθμός τοποθετείται σε μία τυχαία αρχική θέση εντός της αντίστοιχης ζώνης, και έπειτα κινείται σε αυτή χρησιμοποιώντας το μοντέλο κίνησης RandomWalk2DMobilityModel που παρέχει ο ns3.

## 4.2: Ταχύτητα σταθμού – 0.6 m/s

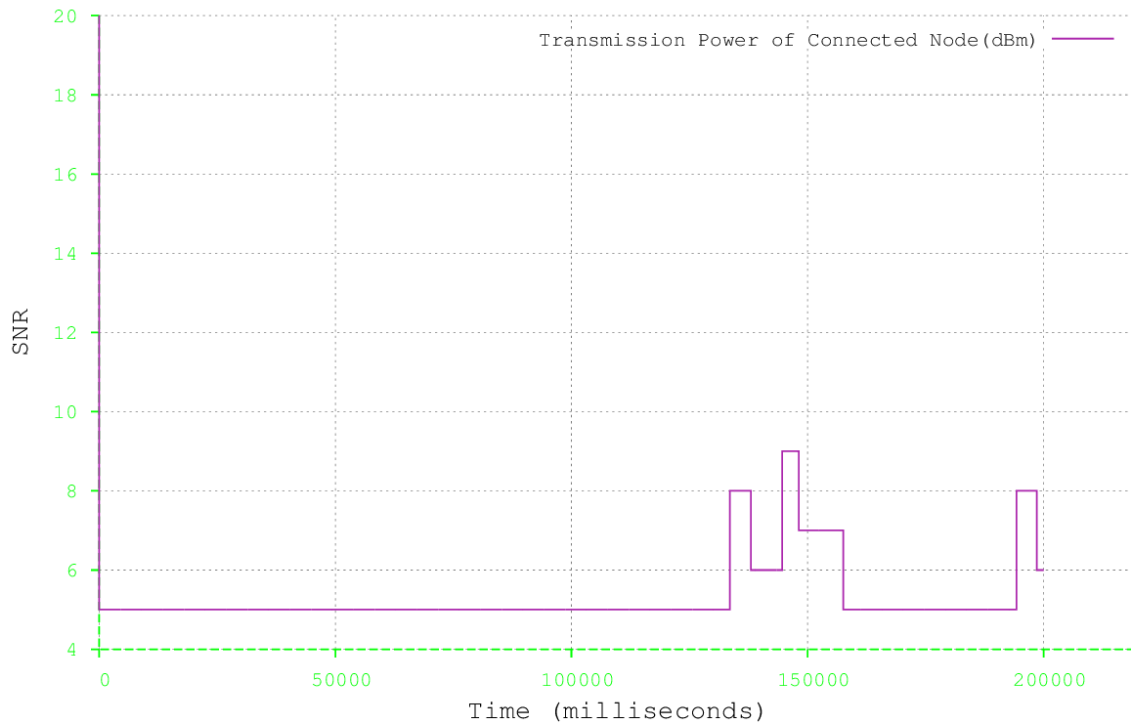
### 4.2.1: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15 μέτρων γύρω από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.

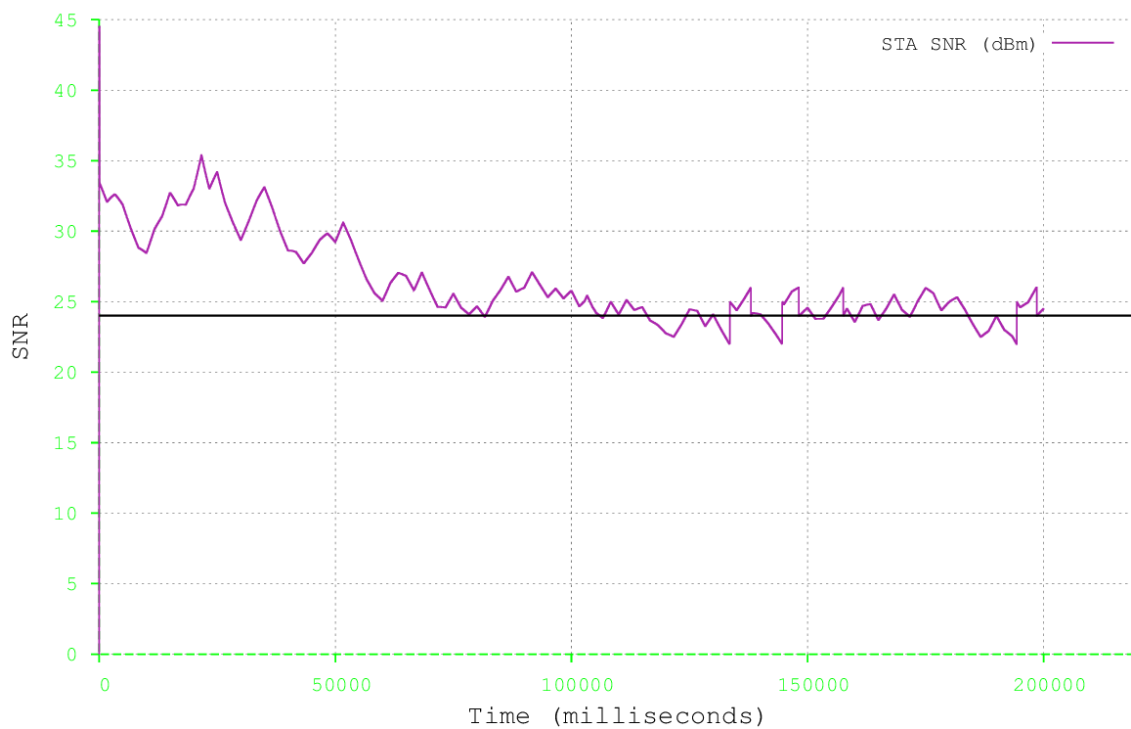


Εικόνα 6: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης





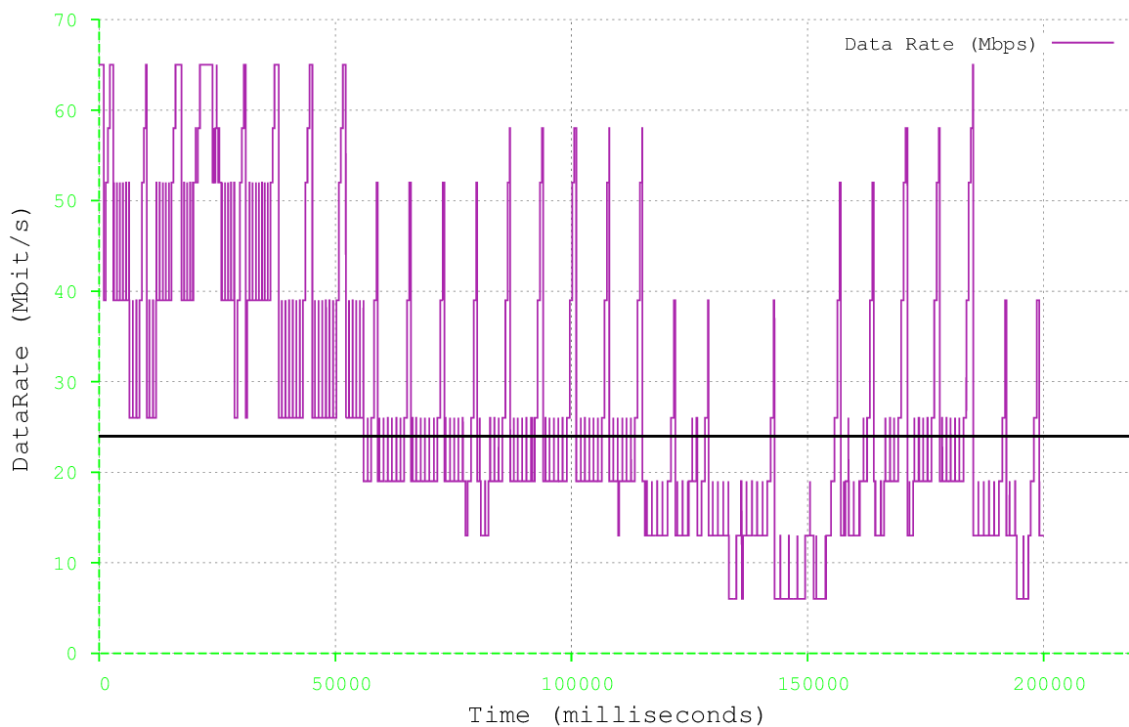
Εικόνα 7: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 8: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι ο σταθμός στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης μεταδίδει με τη ελάχιστη ισχύ των 5 dB, ενώ το SNR βρίσκεται πάνω από το κατώφλι των 24 dB. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σταθμός βρίσκεται κοντά στο σημείο πρόσβασης, γεγονός που συνεπάγεται τη δυνατότητά του να μειώσει σημαντικά την ενέργεια μετάδοσης και ως εκ τούτου να εξοικονομήσει ενέργεια.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Στην περίπτωση ύπαρξης παρεμβολών, ο ρυθμός μειώνεται κατάλληλα.

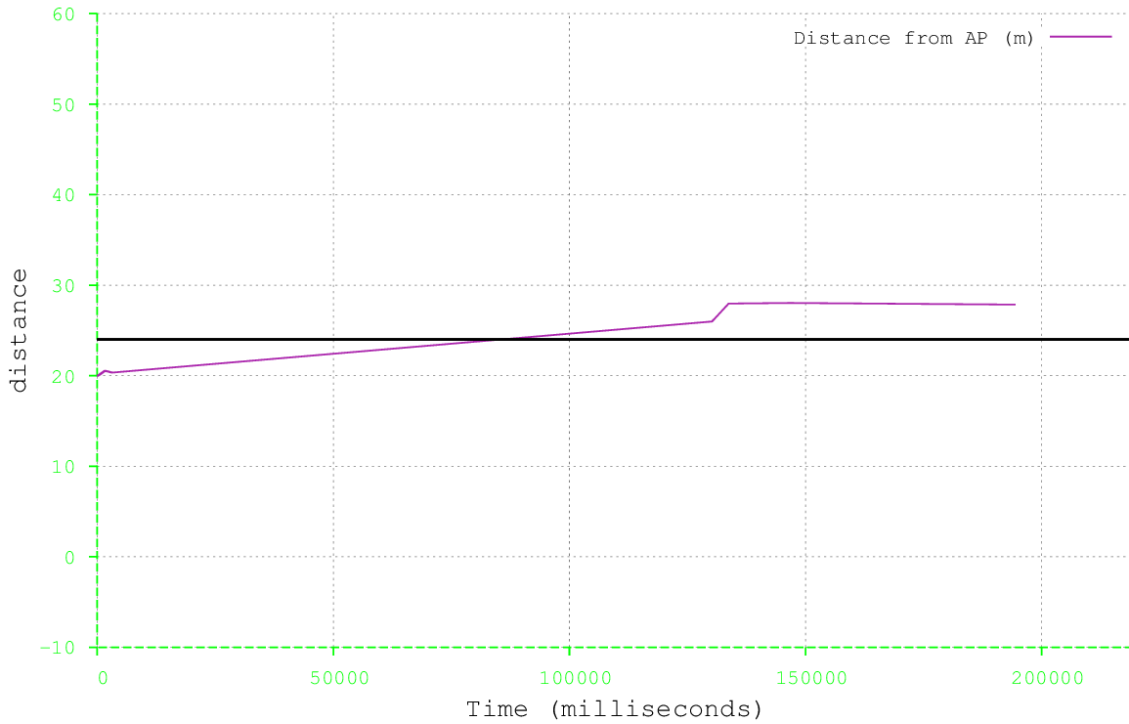


Εικόνα 9: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

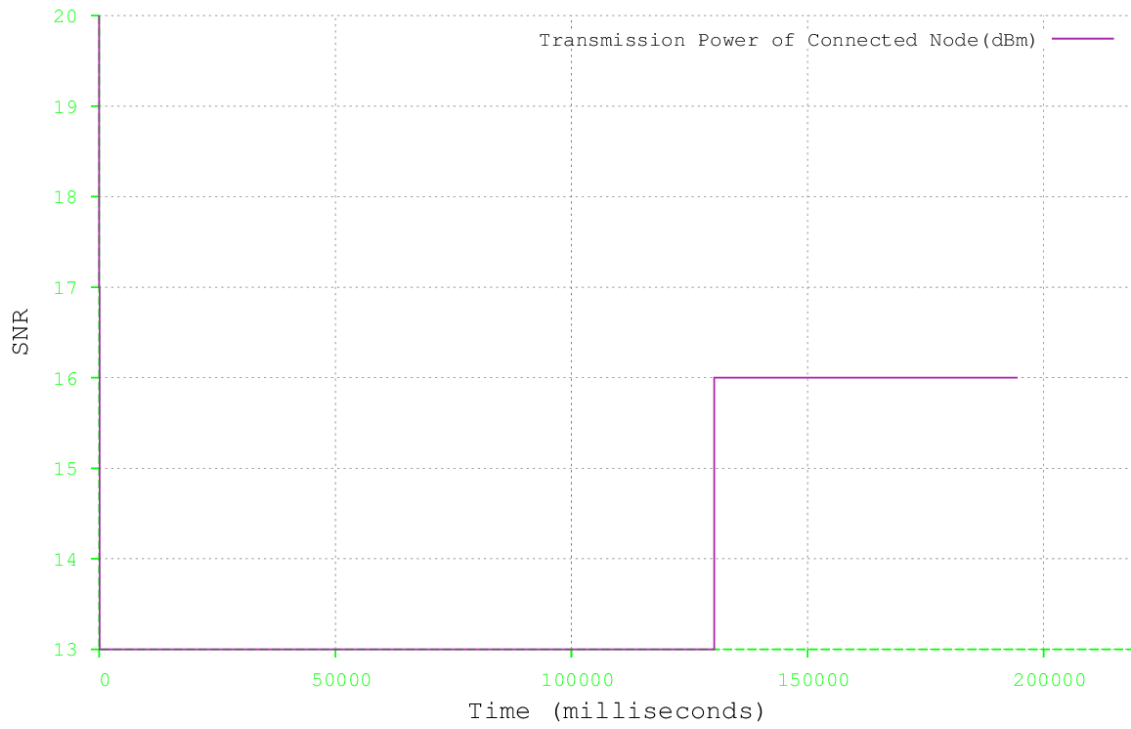
Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 10.27% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.26% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή).

#### 4.2.2: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

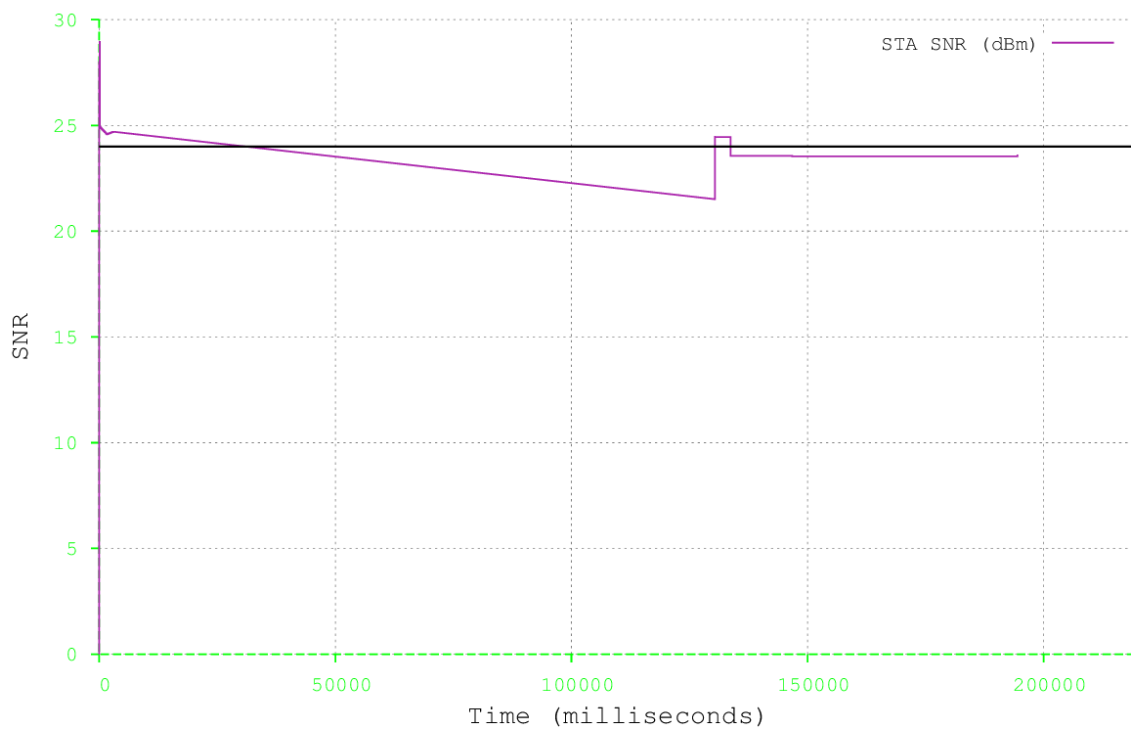
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15-30 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 10: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



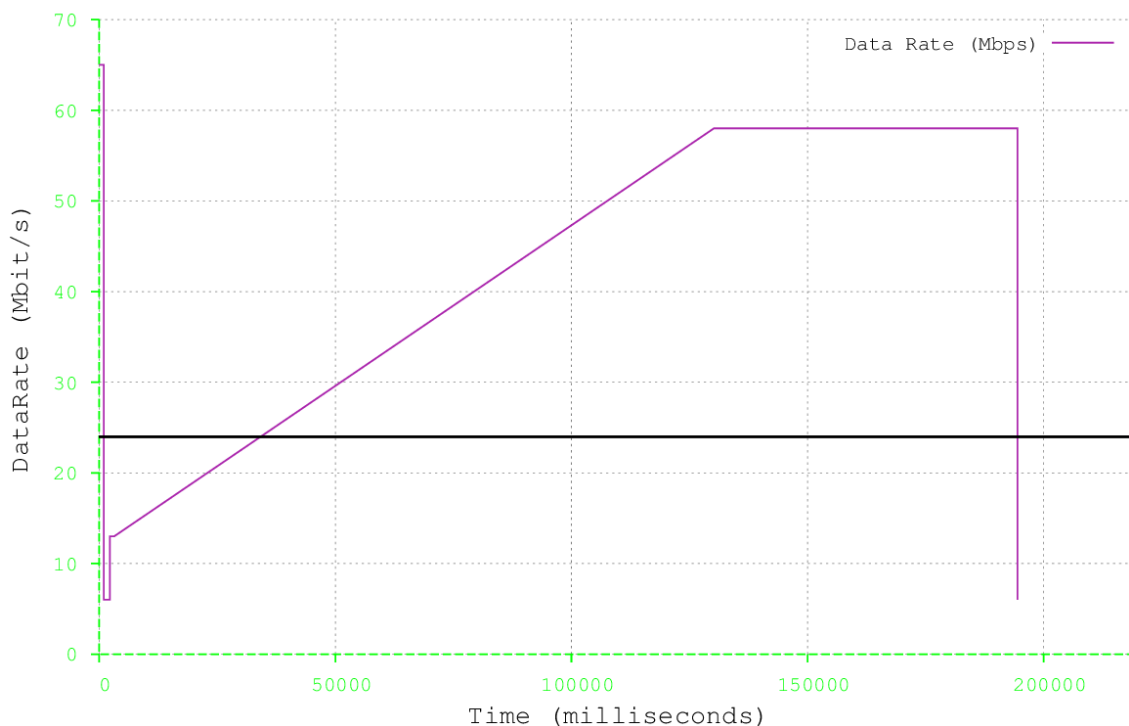
Εικόνα 11: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 12: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι ο σταθμός στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης μεταδίδει με την ισχύ των 13 dB, η οποία αυξάνεται στα 16 dB όταν η απόσταση μεγαλώνει αρκετά. Καθώς η απόσταση αυξάνεται, το SNR αρχικά σημειώνει μία μείωση, στη συνέχεια όμως παραμένει σταθερό λίγο κάτω από τα 24 dB. Ο σταθμός σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται και κινείται πιο μακριά από το σημείο πρόσβασης, γεγονός που δικαιολογεί την αύξηση στην ισχύ μετάδοσης και την αντίστοιχη μείωση στο SNR.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται ότι αρχικά ο ρυθμός μετάδοσης «πέφτει», στη συνέχεια όμως αυξάνεται σταδιακά και έπειτα παραμένει για κάποιο διάστημα σταθερός, πριν μειωθεί πάλι.



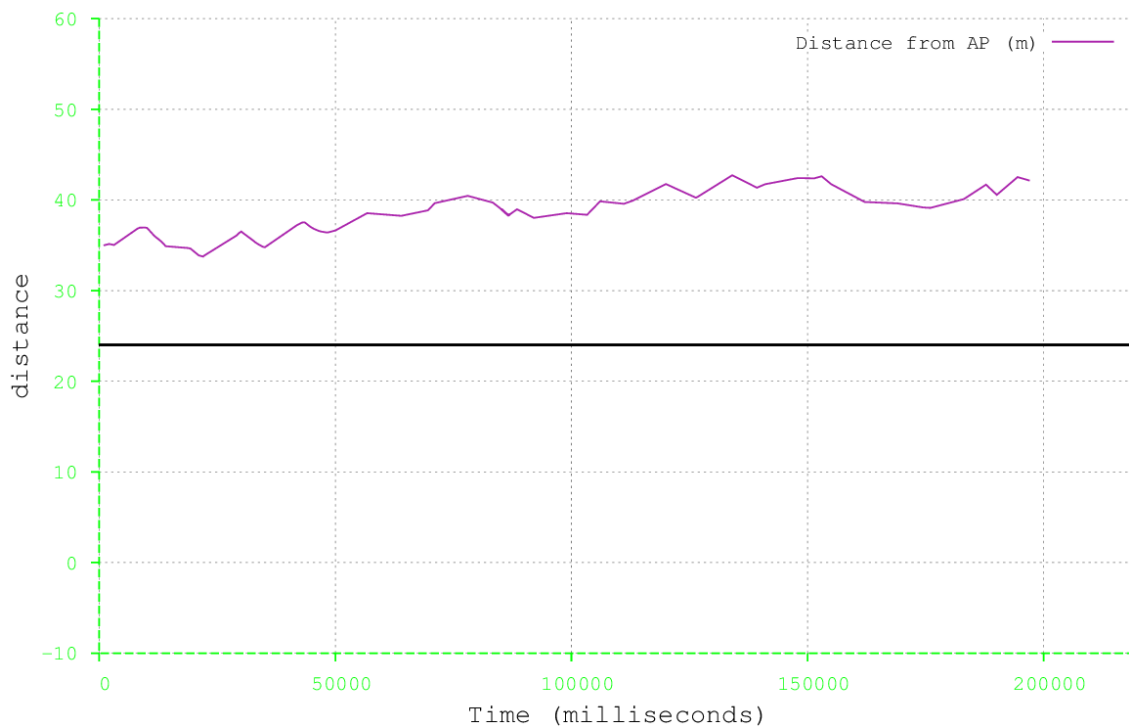
Εικόνα 13: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 40.82% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για

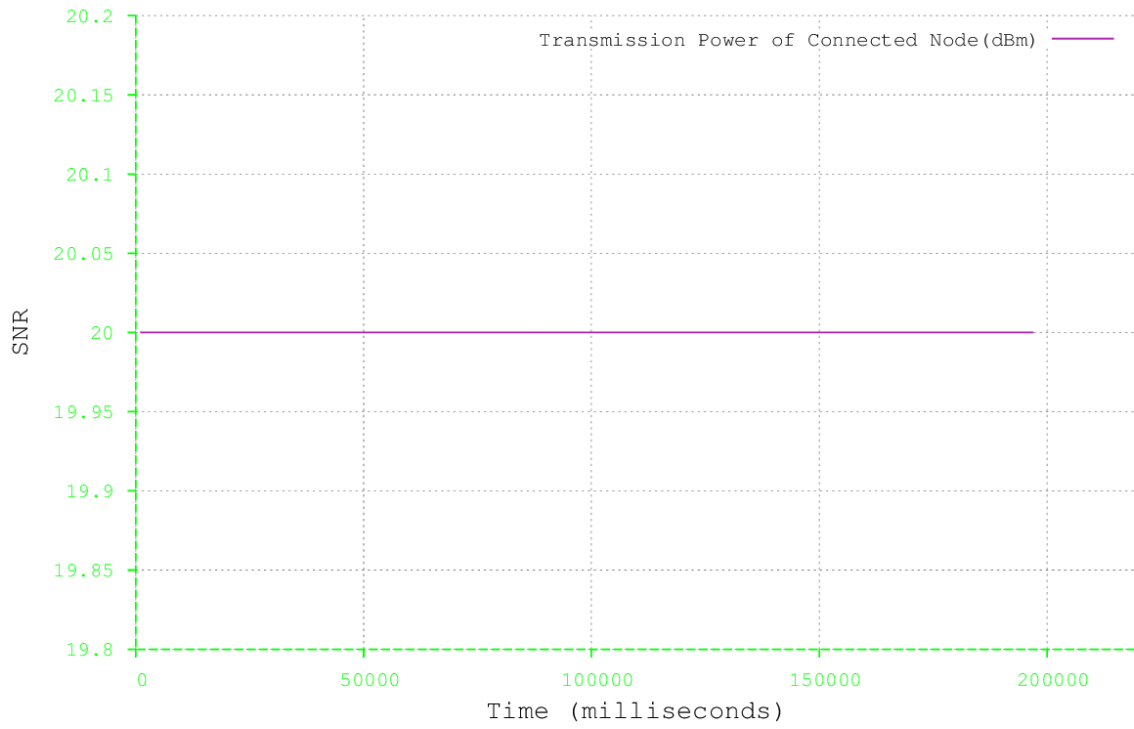
την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.46% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή).

#### 4.2.3: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

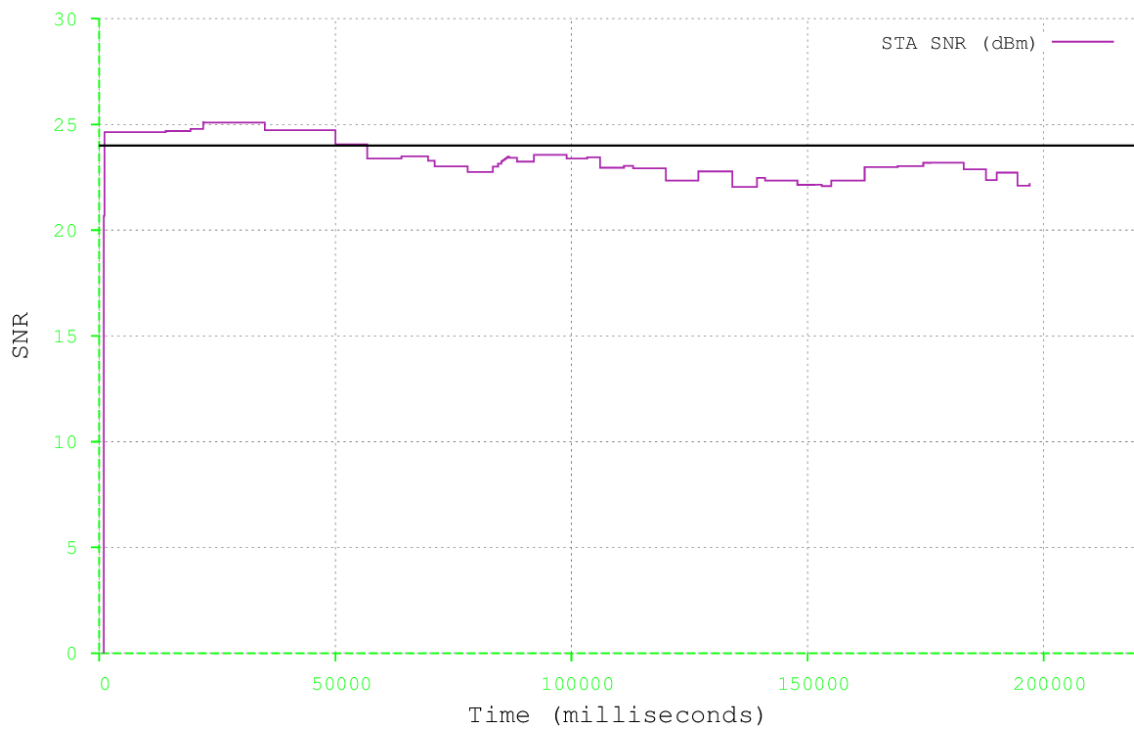
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 30-45 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 14: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



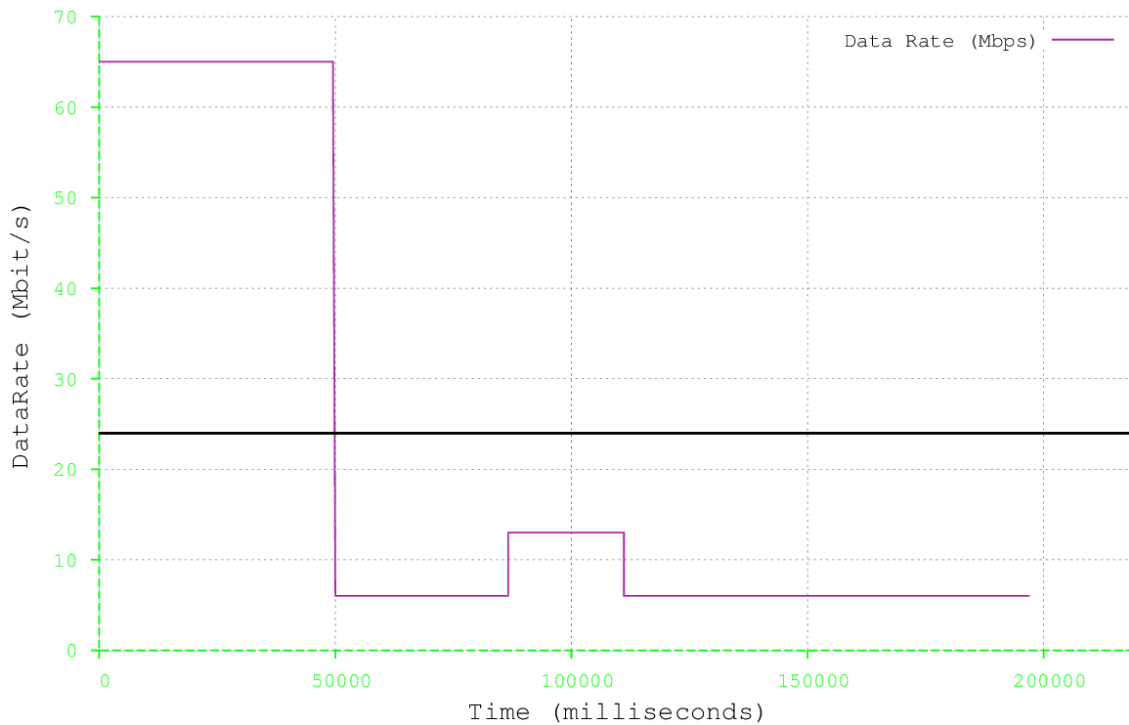
Εικόνα 15: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 16: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι ο σταθμός μεταδίδει σταθερά με 20 dB. Το SNR ενώ αρχικά βρίσκεται πάνω από τα 24 dB, στη συνέχεια κυμαίνεται κάτω από αυτό το κατώφλι. Ο σταθμός σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται και κινείται ακόμη πιο μακριά από το σημείο πρόσβασης, γεγονός που συνεπάγεται πολύ μικρό κέρδος από την εφαρμογή του μηχανισμού.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται ότι στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης ο ρυθμός μετάδοσης «πέφτει» αναλόγως, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ύπαρξη παρεμβολών υποβαθμίζει το κανάλι επικοινωνίας.



Εικόνα 17: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 64.35% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι 3.45% (περίπτωση χωρίς

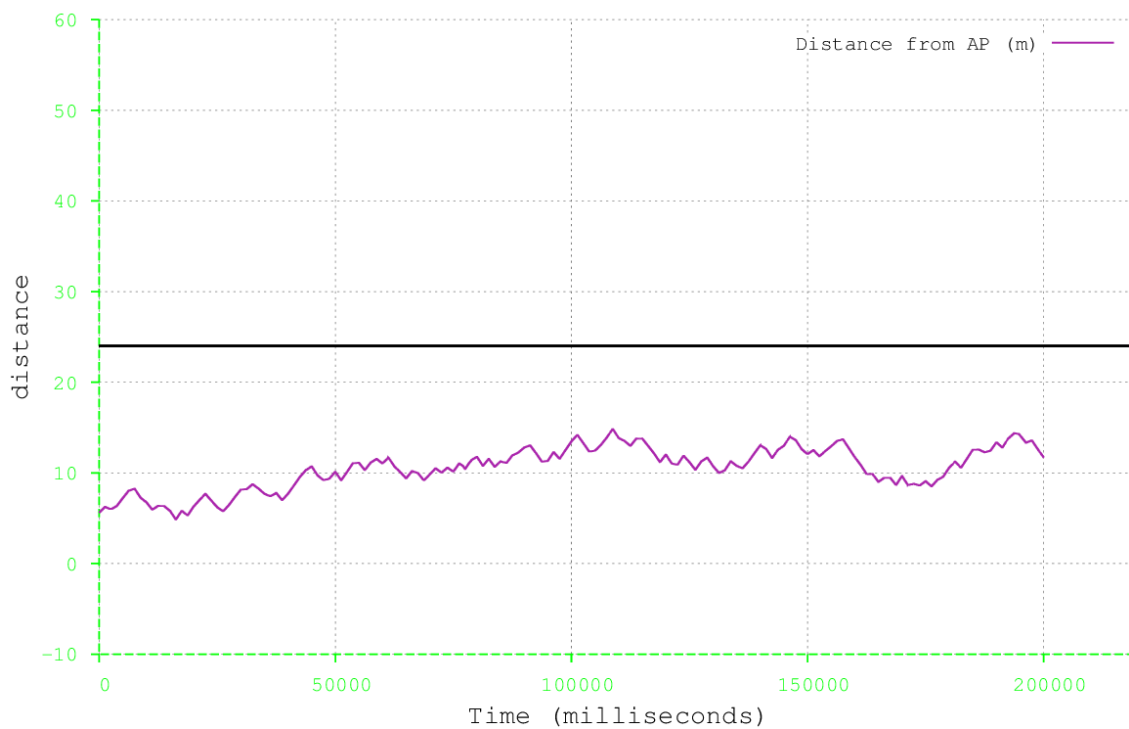


παρεμβολή).

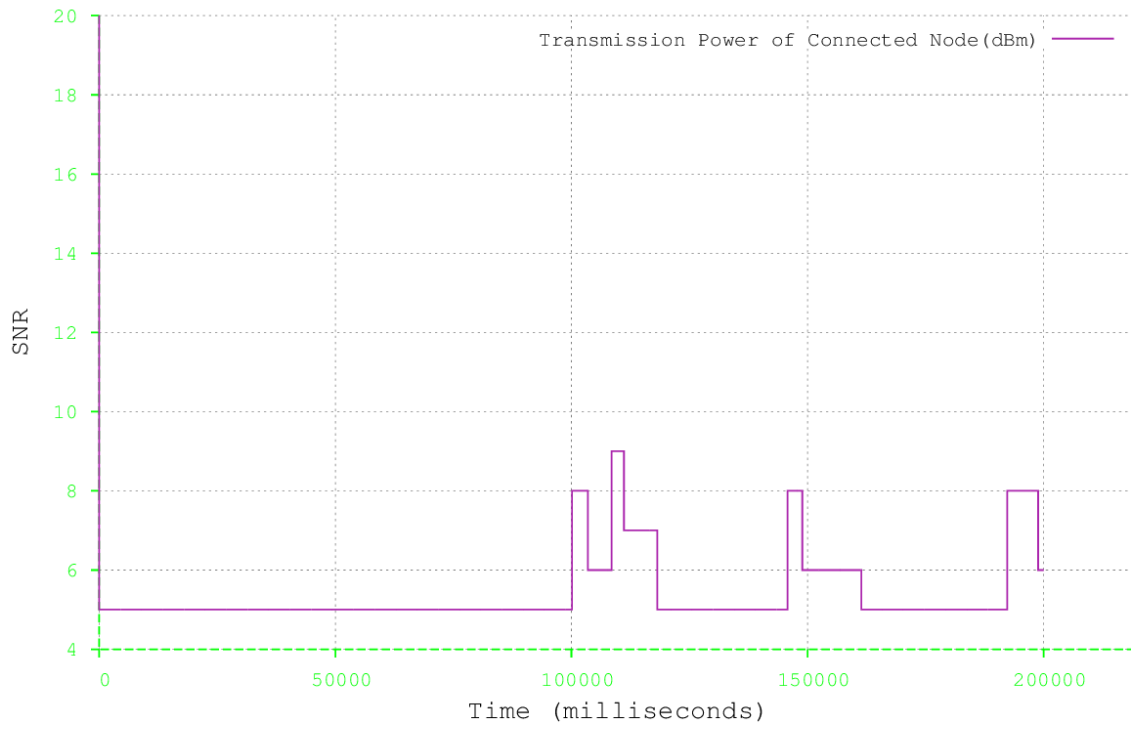
### 4.3: Ταχύτητα σταθμού – 0.8 m/s

#### 4.3.1: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

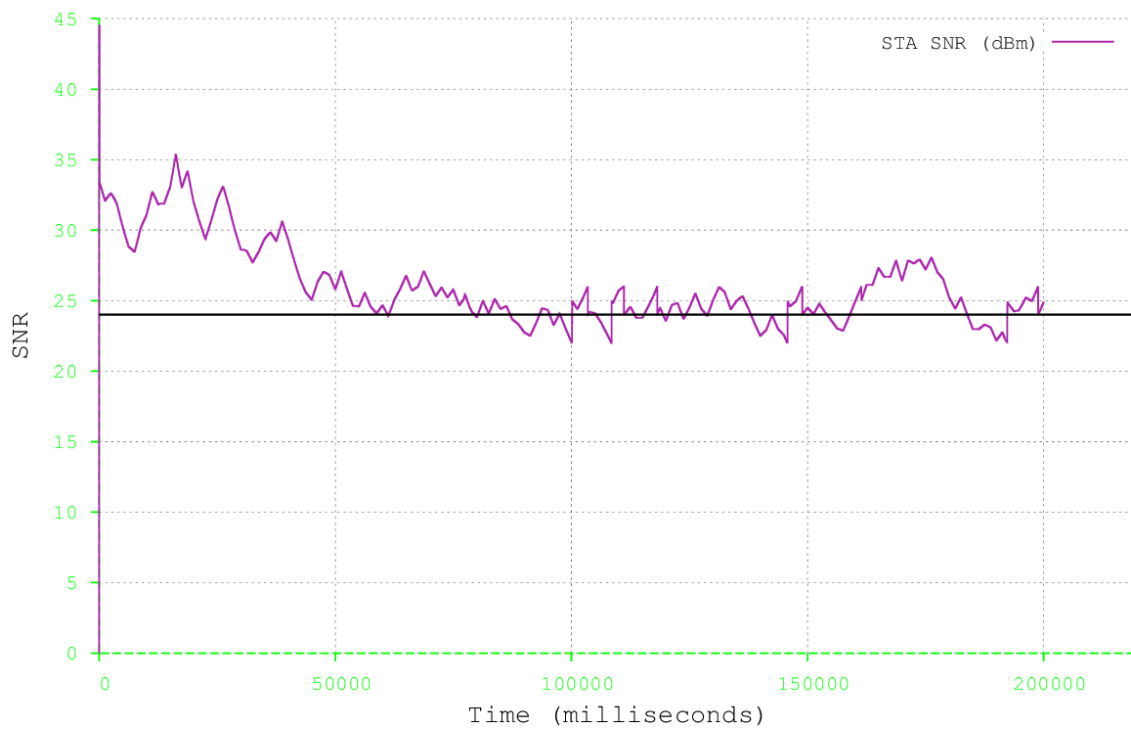
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15 μέτρων γύρω από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 18: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



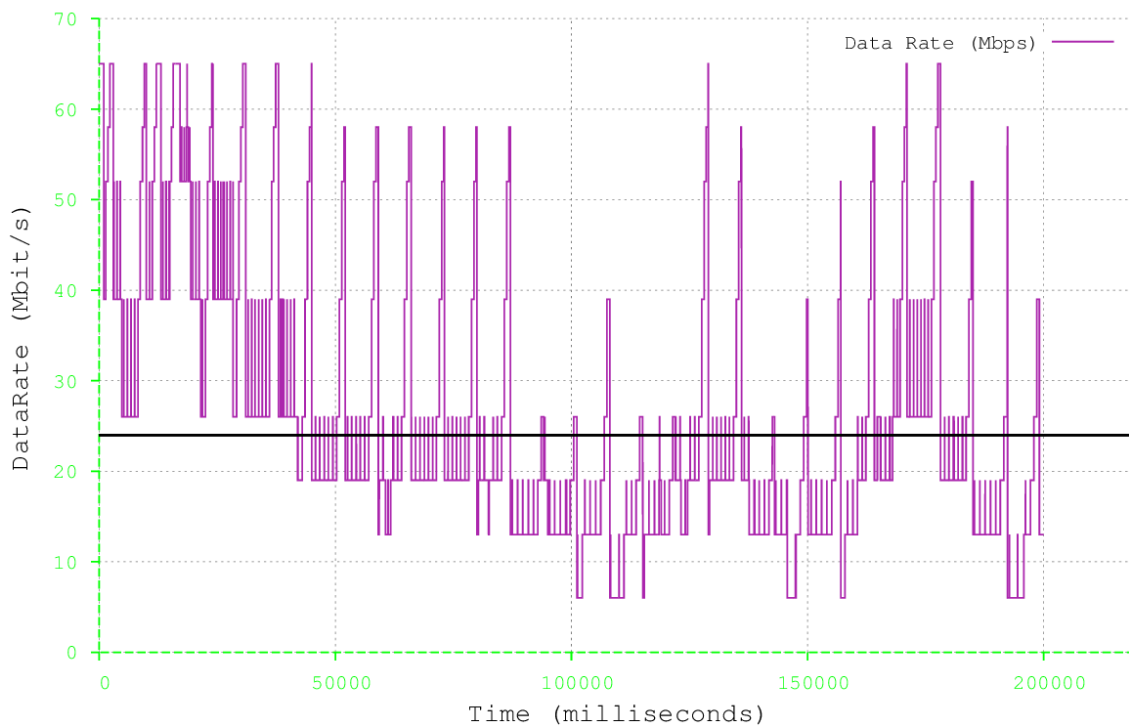
Εικόνα 19: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 20: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι όπως και στην περίπτωση που η ταχύτητα έχει ρυθμιστεί στα 6 m/s, ο σταθμός στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης μεταδίδει με την ελάχιστη ισχύ των 5 dB με κάποιες επιπλέον διακυμάνσεις, ενώ το SNR βρίσκεται και εδώ πάνω από το κατώφλι των 24 dB. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σταθμός βρίσκεται κοντά στο σημείο πρόσβασης, γεγονός που συνεπάγεται τη δυνατότητά του να μειώσει σημαντικά την ενέργεια μετάδοσης και ως εκ τούτου να εξοικονομήσει ενέργεια.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Στην περίπτωση ύπαρξης παρεμβολών, ο ρυθμός μειώνεται κατάλληλα.



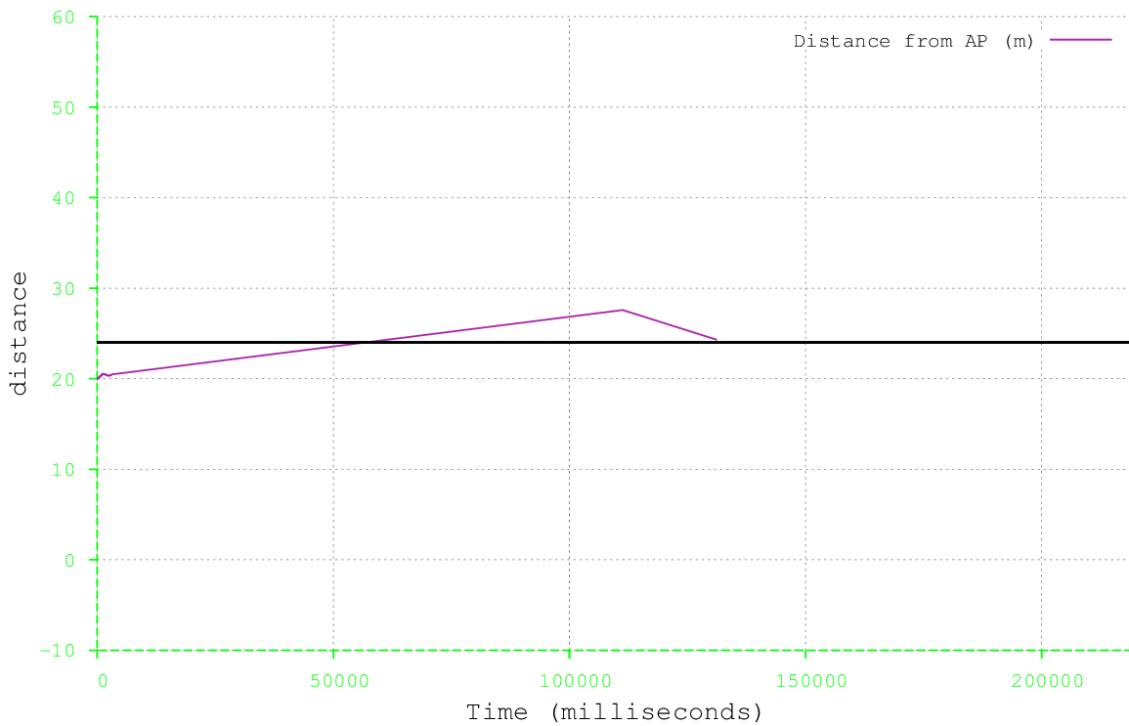
Εικόνα 21: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 10.24% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.32% (περίπτωση χωρίς

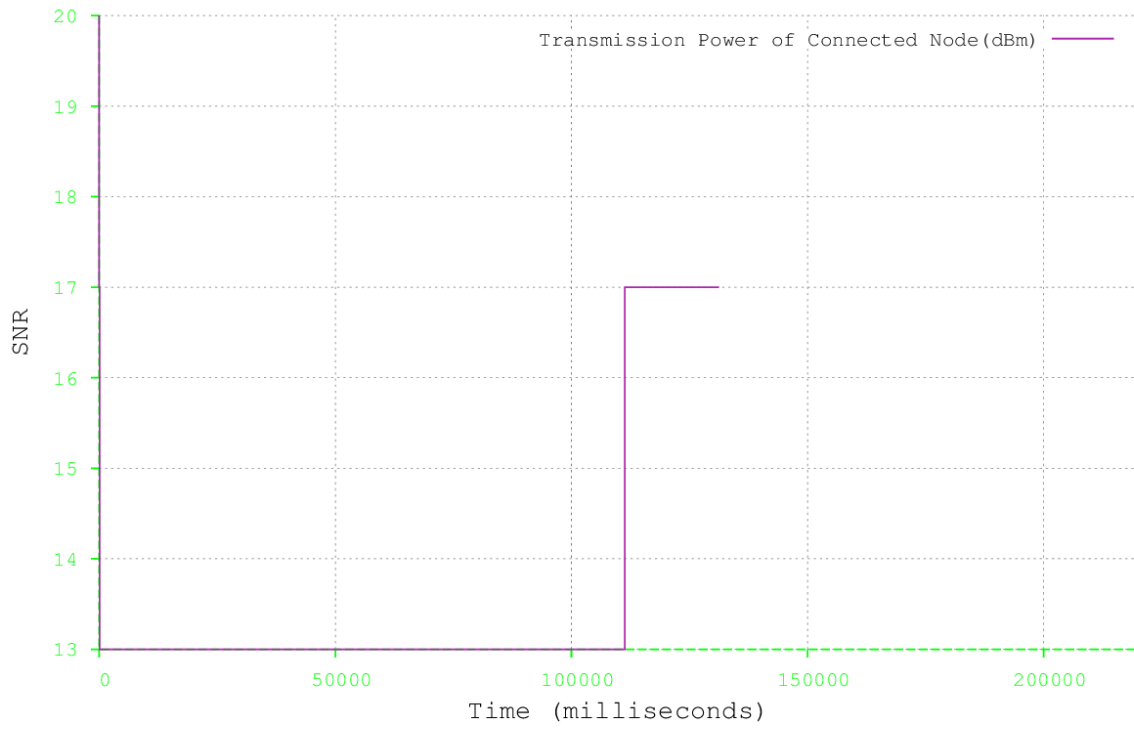
παρεμβολή).

#### 4.3.2: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

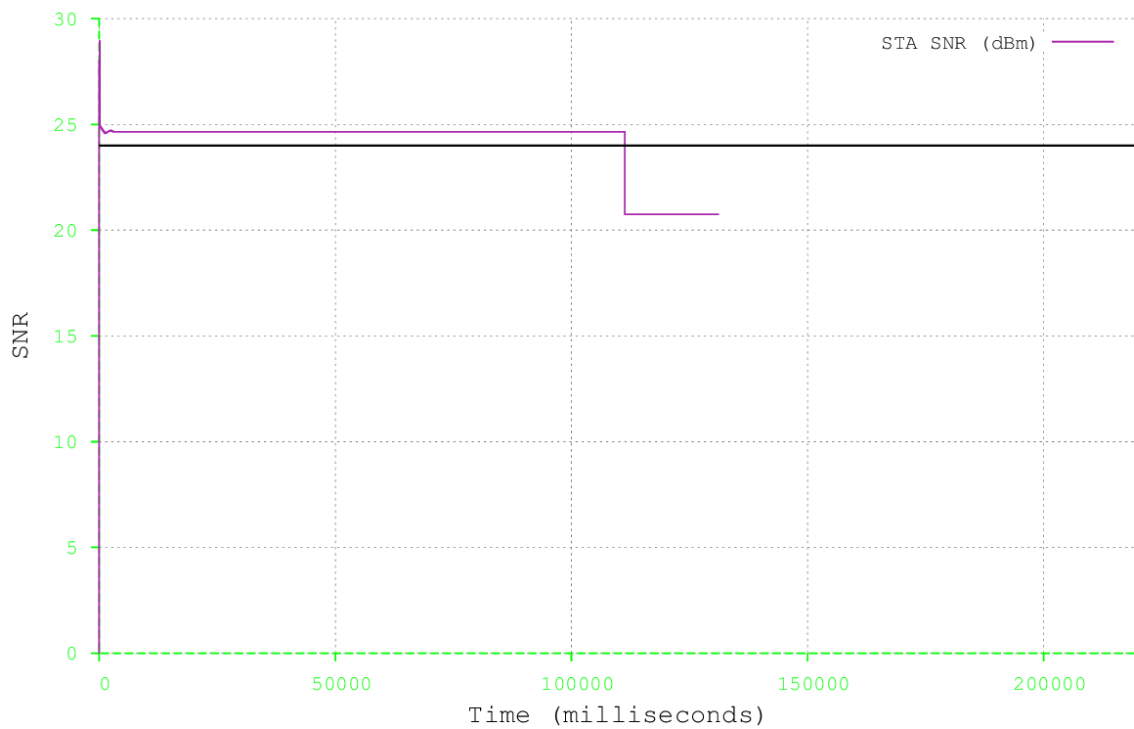
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15-30 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 22: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



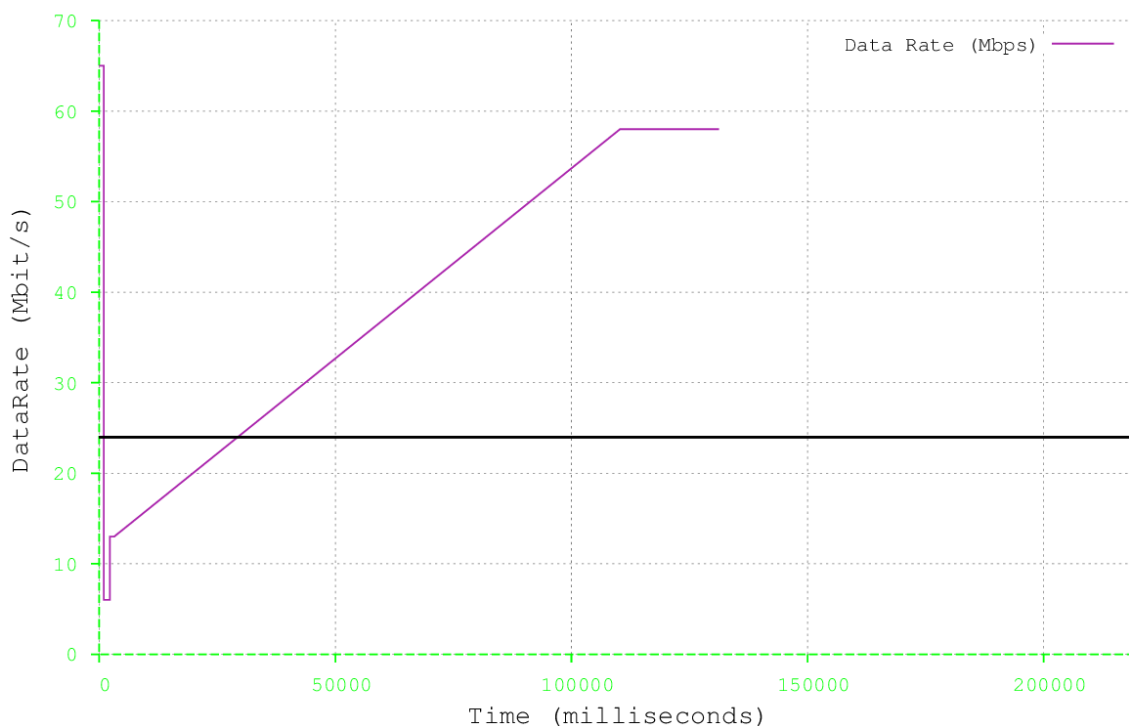
Εικόνα 23: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 24: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι ο σταθμός μεταδίδει με ισχύ 13 dB μέχρι τα 110 sec, όπου η ενέργεια αυξάνεται για λίγο έως όπου δεν υπάρχει επαφή με το σημείο πρόσβασης. Το SNR αρχικά είναι σταθερό λίγο πάνω από τα 24 dB, ενώ μετά τα 110 sec μειώνεται αρκετά. Ο σταθμός σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται και κινείται πιο μακριά από το σημείο πρόσβασης, γεγονός που δικαιολογεί την αύξηση στην ισχύ μετάδοσης και την αντίστοιχη μείωση στο SNR.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται, ότι αρχικά ο ρυθμός μετάδοσης «πέφτει», στη συνέχεια όμως αυξάνεται σταδιακά και έπειτα παραμένει για κάποιο διάστημα σταθερός.



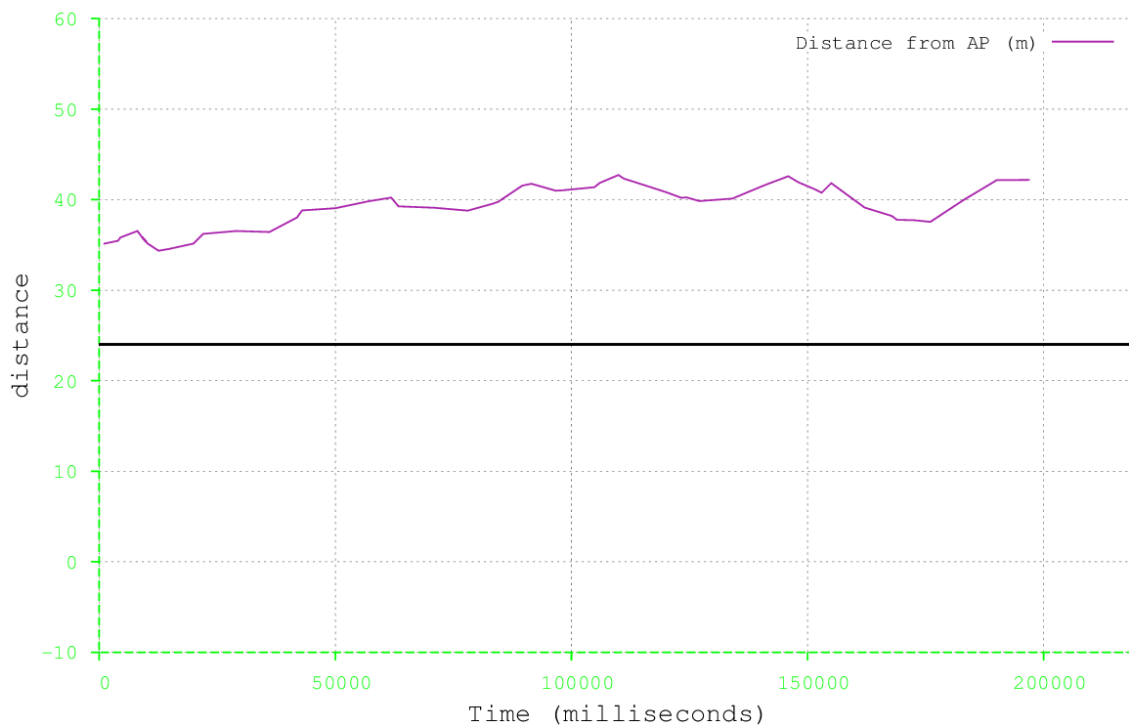
Εικόνα 25: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 40.61% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για

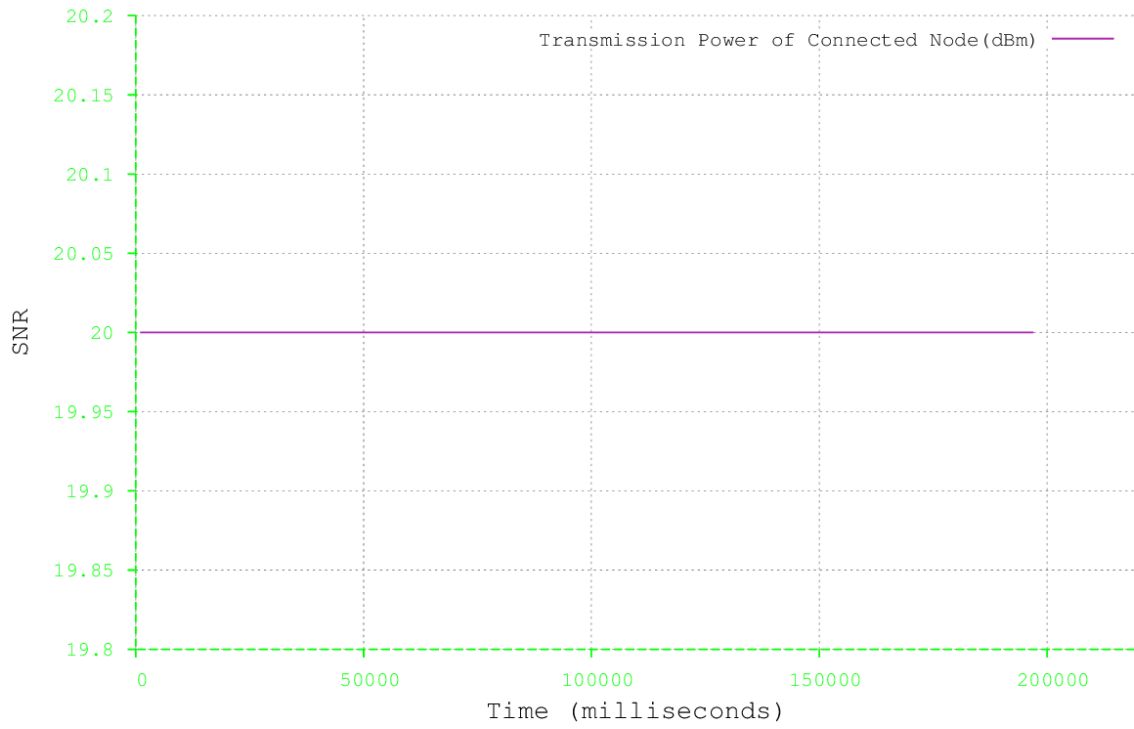
την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.96% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή).

#### 4.3.3: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

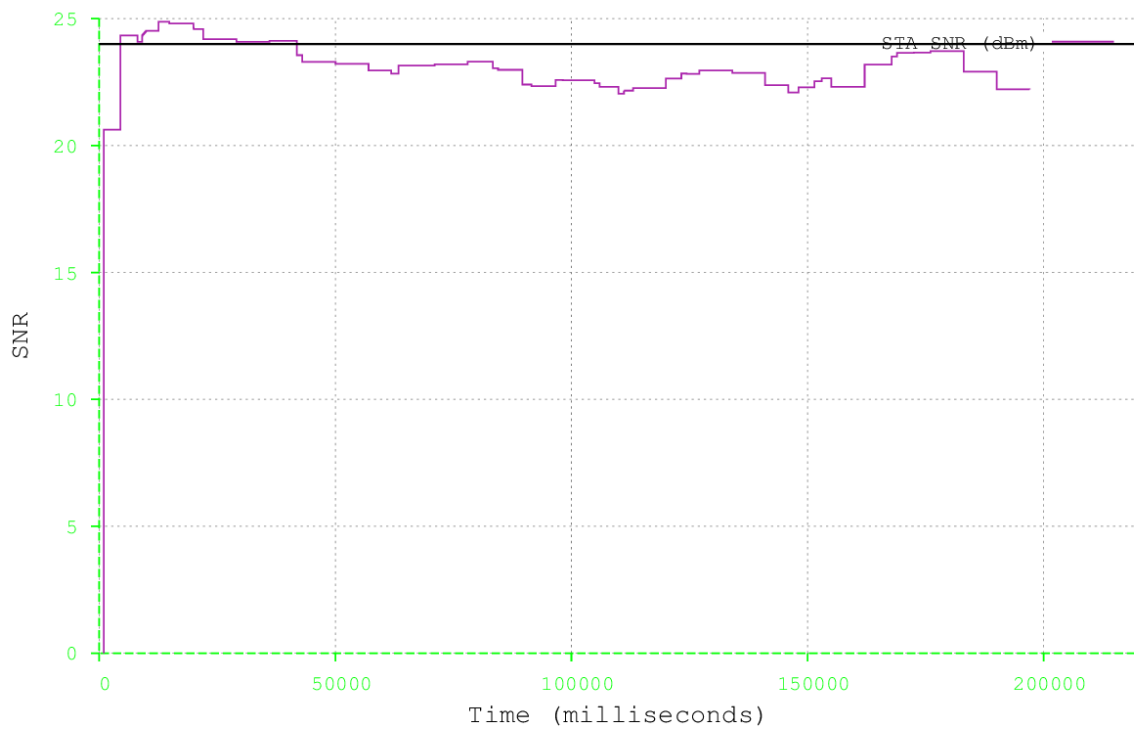
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 30-45 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 26: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



Εικόνα 27: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού

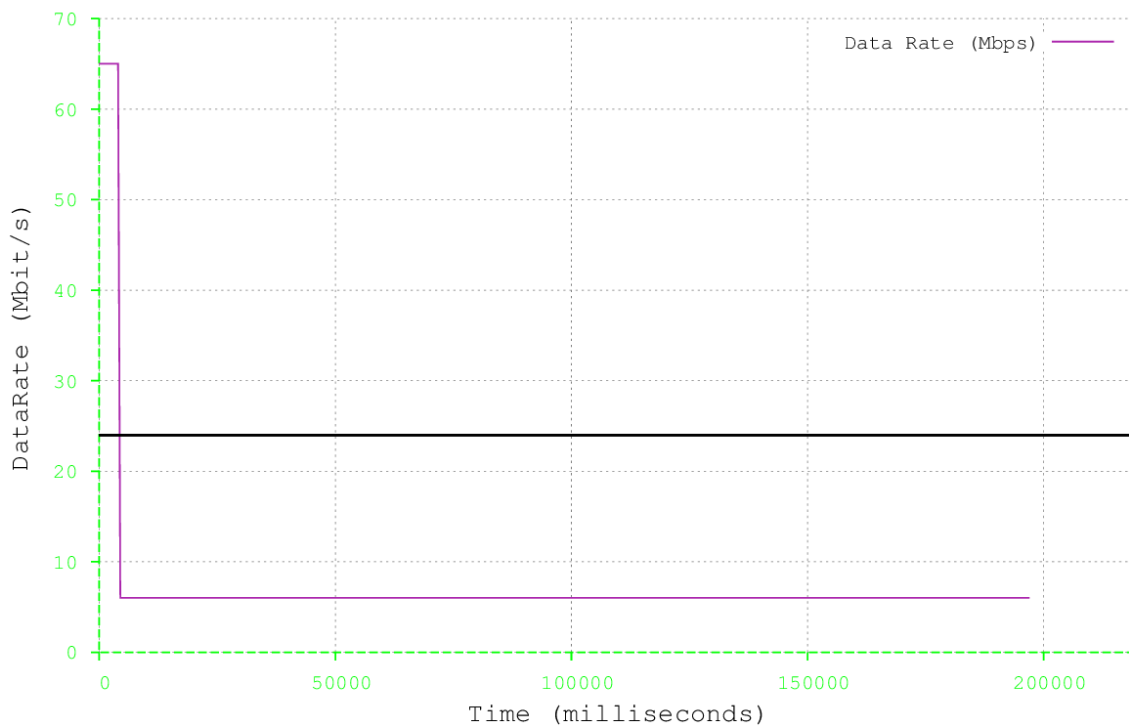


Εικόνα 28: SNR του σταθμού



Παρατηρείται ότι όπως στην περίπτωση της κίνησης με 0.6 m/s, ο σταθμός μεταδίδει σταθερά με 20 dB. Επίσης, ενώ το SNR αρχικά βρίσκεται πάνω από τα 24 dB, στη συνέχεια κυμαίνεται κάτω από αυτό το κατώφλι. Ο σταθμός σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται και κινείται ακόμη πιο μακριά από το σημείο πρόσβασης, γεγονός που συνεπάγεται πολύ μικρό κέρδος από την εφαρμογή του μηχανισμού.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλη την προσομοίωση ο ρυθμός μετάδοσης είναι σταθερά χαμηλός, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ύπαρξη παρεμβολών υποβαθμίζει το κανάλι επικοινωνίας.



Εικόνα 29: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

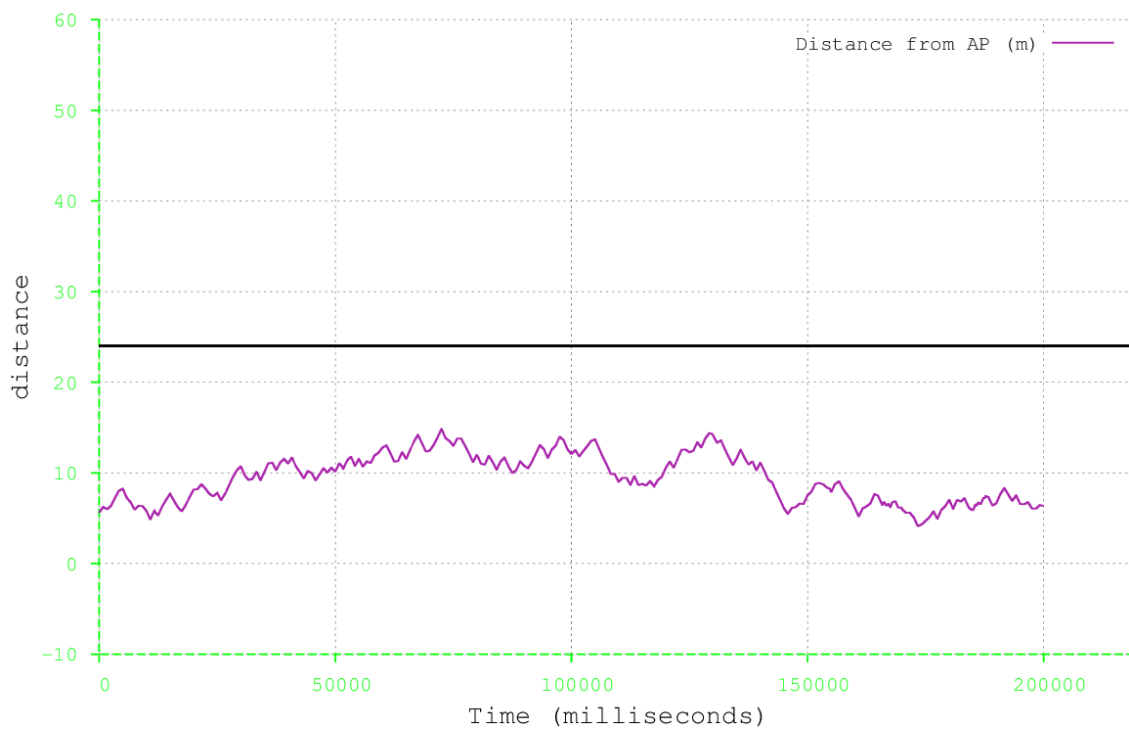
Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 78.58% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι 4.5% (περίπτωση χωρίς

παρεμβολή).

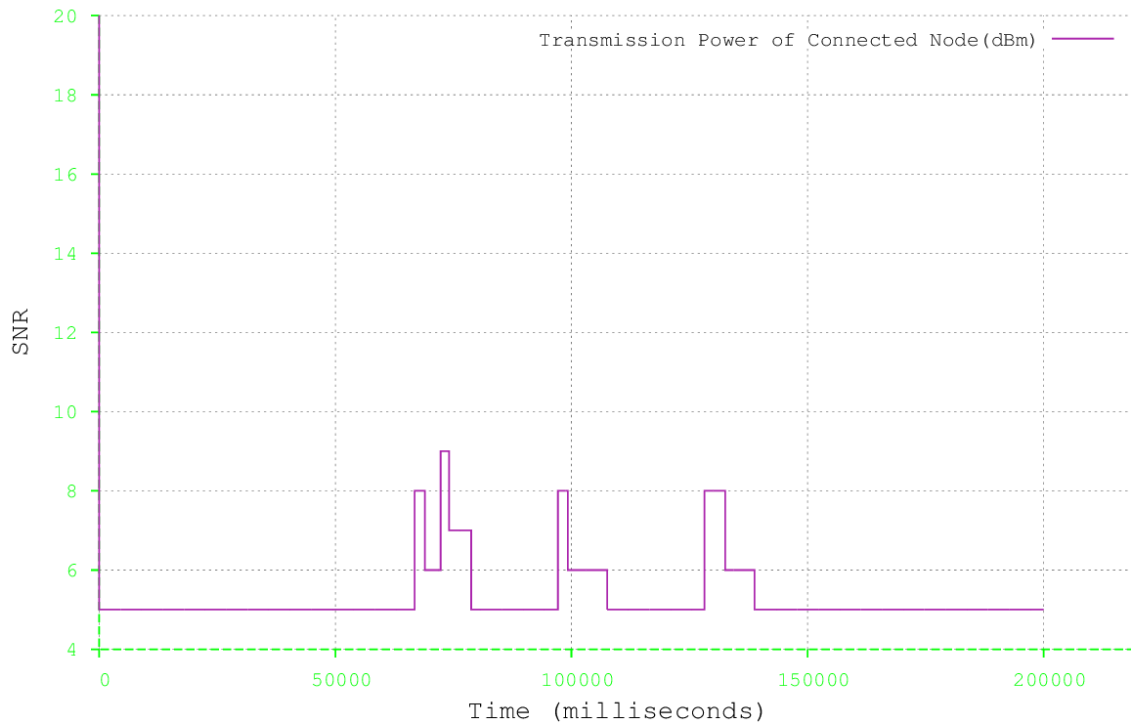
#### 4.4: Ταχύτητα σταθμού – 1.2 m/s

##### 4.4.1: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

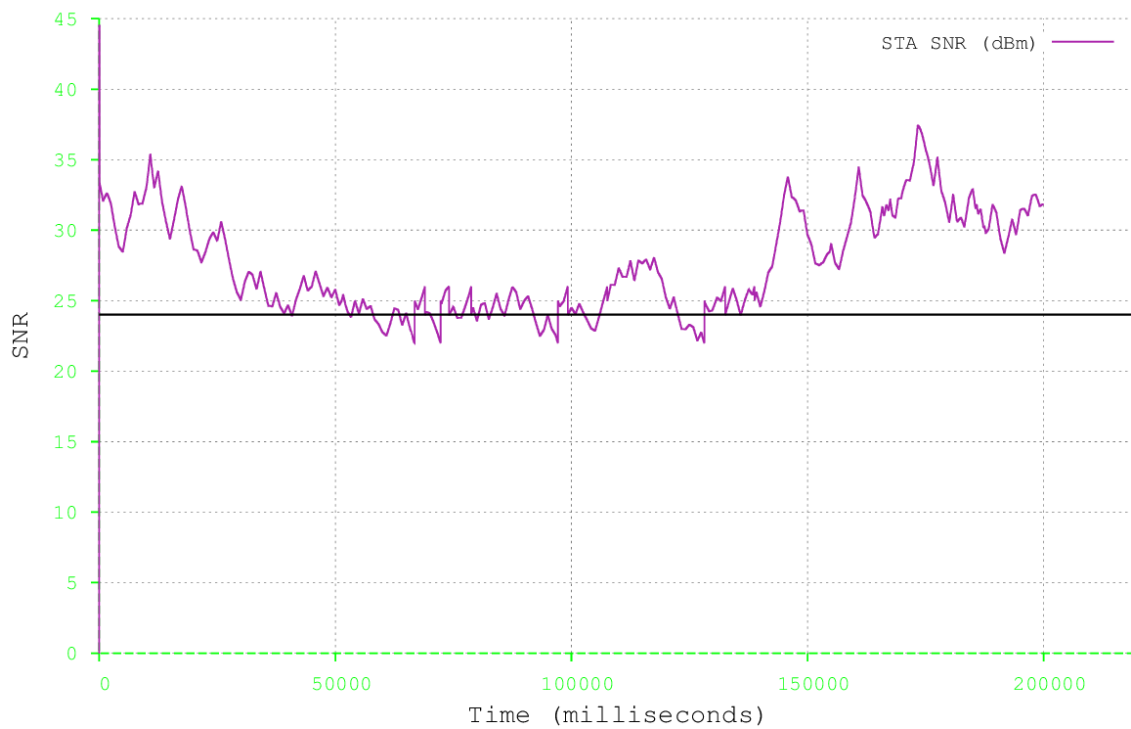
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15 μέτρων γύρω από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 30: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



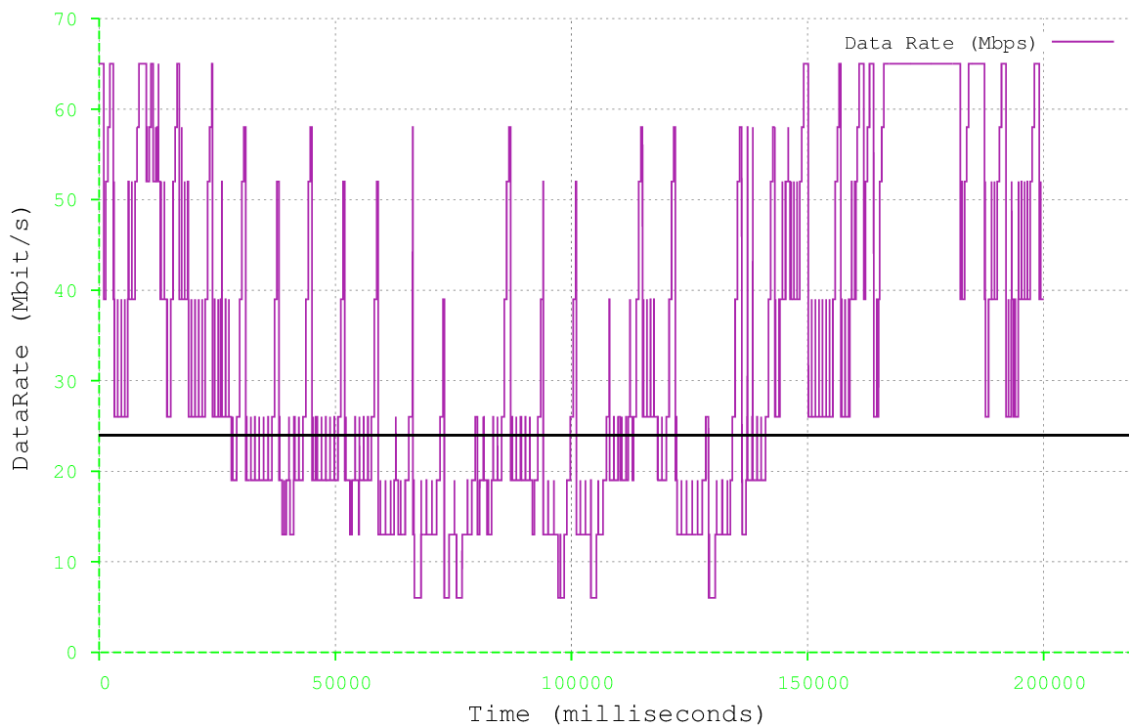
Εικόνα 31: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 32: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι όπως στην προηγούμενη περίπτωση κίνησης με 0.8 m/s, ο σταθμός στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης μεταδίδει με την ελάχιστη ισχύ των 5 dB με κάποιες διακυμάνσεις, ενώ το SNR βρίσκεται και εδώ πάνω από το κατώφλι των 24 dB. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σταθμός βρίσκεται κοντά στο σημείο πρόσβασης, γεγονός που συνεπάγεται τη δυνατότητά του να μειώσει σημαντικά την ενέργεια μετάδοσης και ως εκ τούτου να εξοικονομήσει ενέργεια.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Στην περίπτωση ύπαρξης παρεμβολών, ο ρυθμός μειώνεται κατάλληλα.



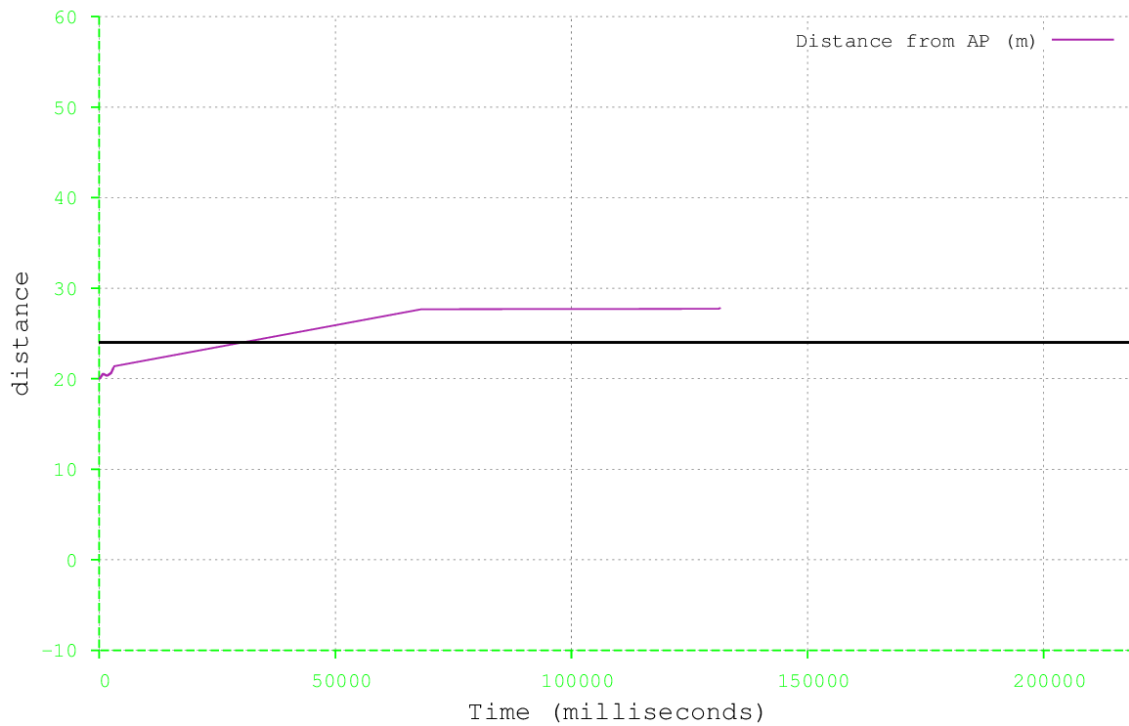
Εικόνα 33: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 8.85% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.3% (περίπτωση χωρίς

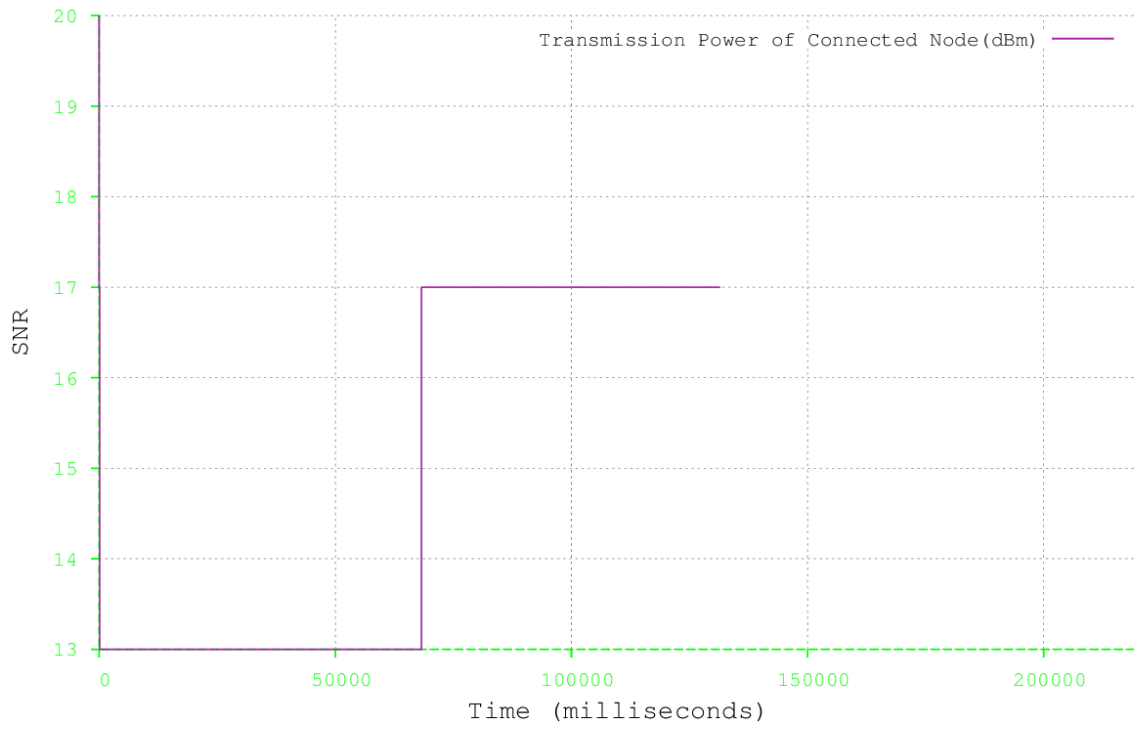
παρεμβολή).

#### 4.4.2: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

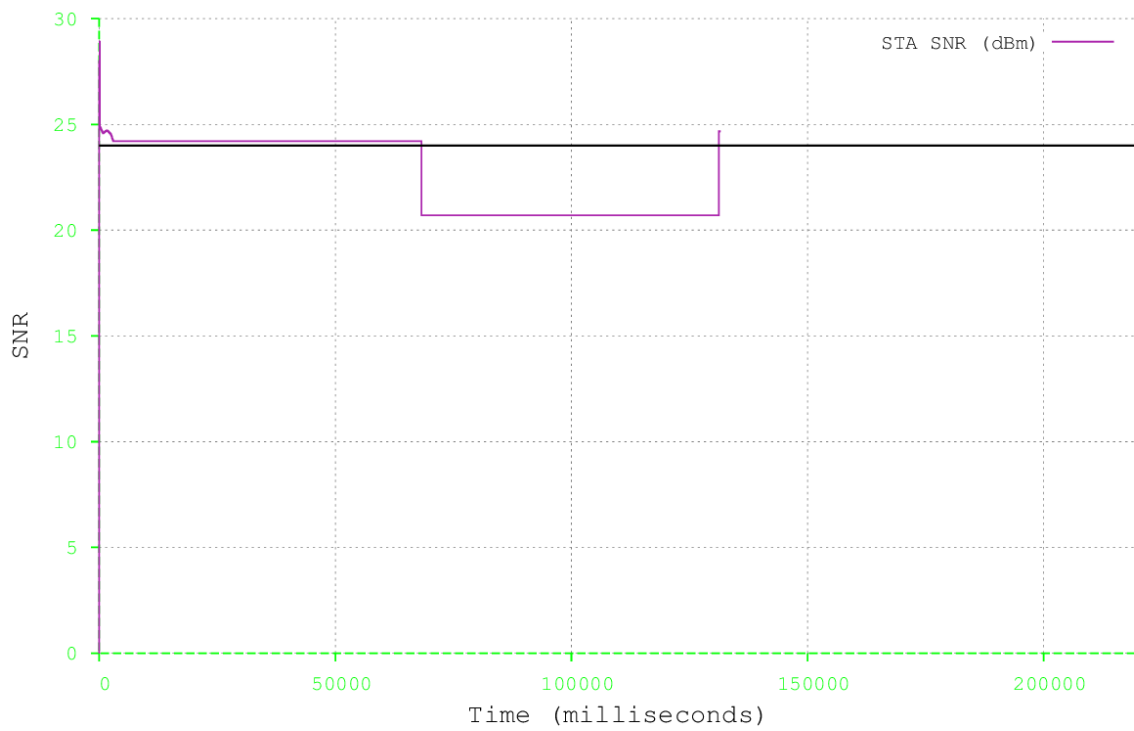
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15-30 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 34: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



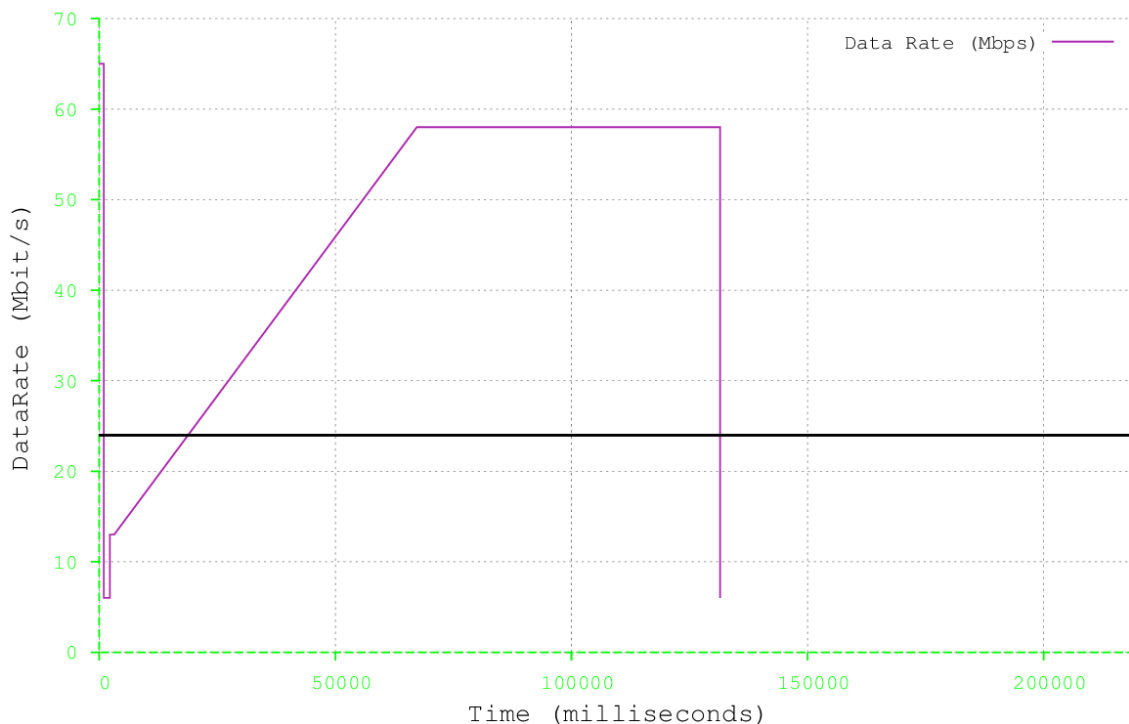
Εικόνα 35: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 36: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι ο σταθμός μεταδίδει με ισχύ 13 dB για τα πρώτα 65 sec, έπειτα η ενέργεια αυξάνεται και παραμένει σταθερή μέχρι τα 130 sec περίπου, όπου δεν υπάρχει πλέον επαφή με το σημείο πρόσβασης. Αντίστοιχα, το SNR αρχικά είναι σταθερό λίγο πάνω από τα 24 dB, ενώ μετά τα 65 sec που η απόσταση φτάνει στη μέγιστη δυνατή μειώνεται αρκετά. Ο σταθμός σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται και κινείται πιο μακριά από το σημείο πρόσβασης, γεγονός που δικαιολογεί την αύξηση στην ισχύ μετάδοσης και την αντίστοιχη μείωση στο SNR.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται, ότι όπως στην περίπτωση της κίνησης με 0.6 m/s, αρχικά ο ρυθμός μετάδοσης «πέφτει», στη συνέχεια όμως αυξάνεται σταδιακά και έπειτα παραμένει για κάποιο διάστημα σταθερός, πριν μειωθεί πάλι.



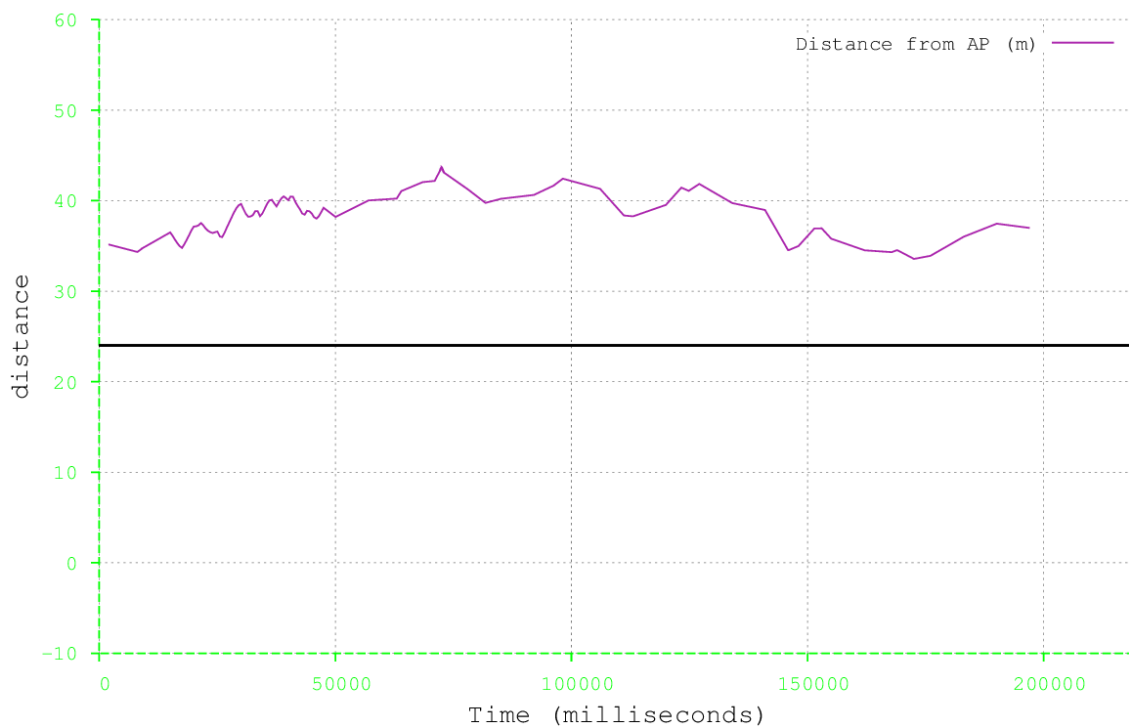
Εικόνα 37: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 41.56% για την

κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.93% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή).

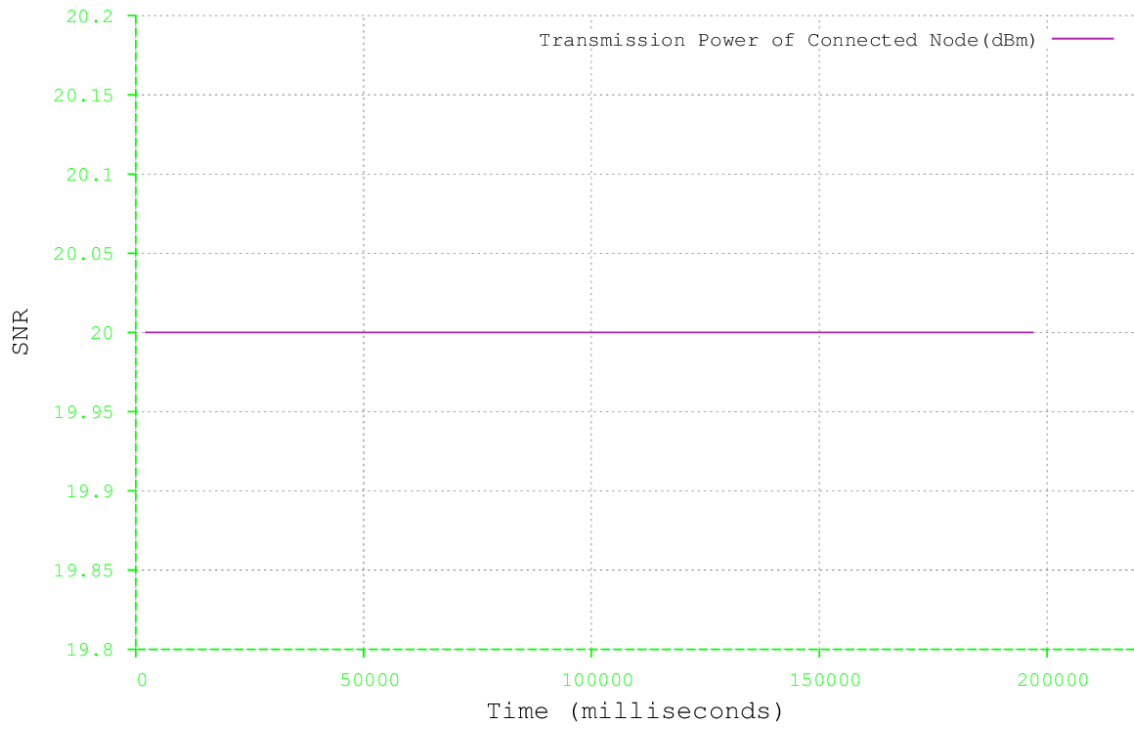
#### 4.4.3: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 30-45 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.

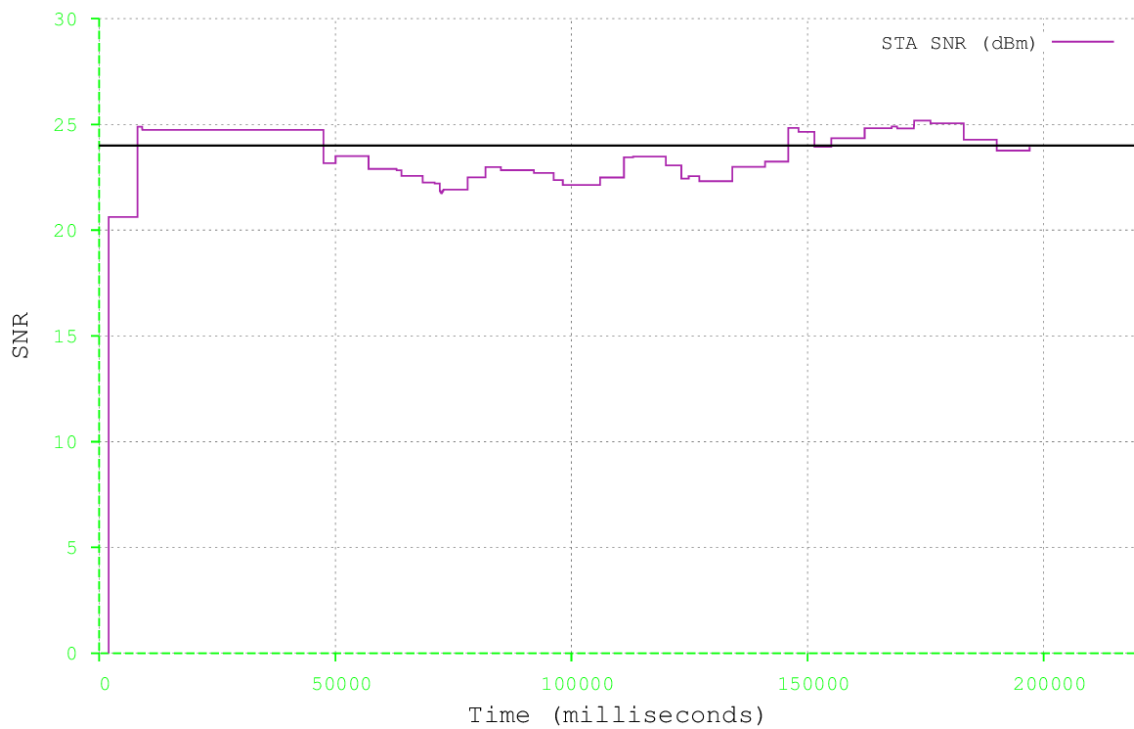


Εικόνα 38: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης





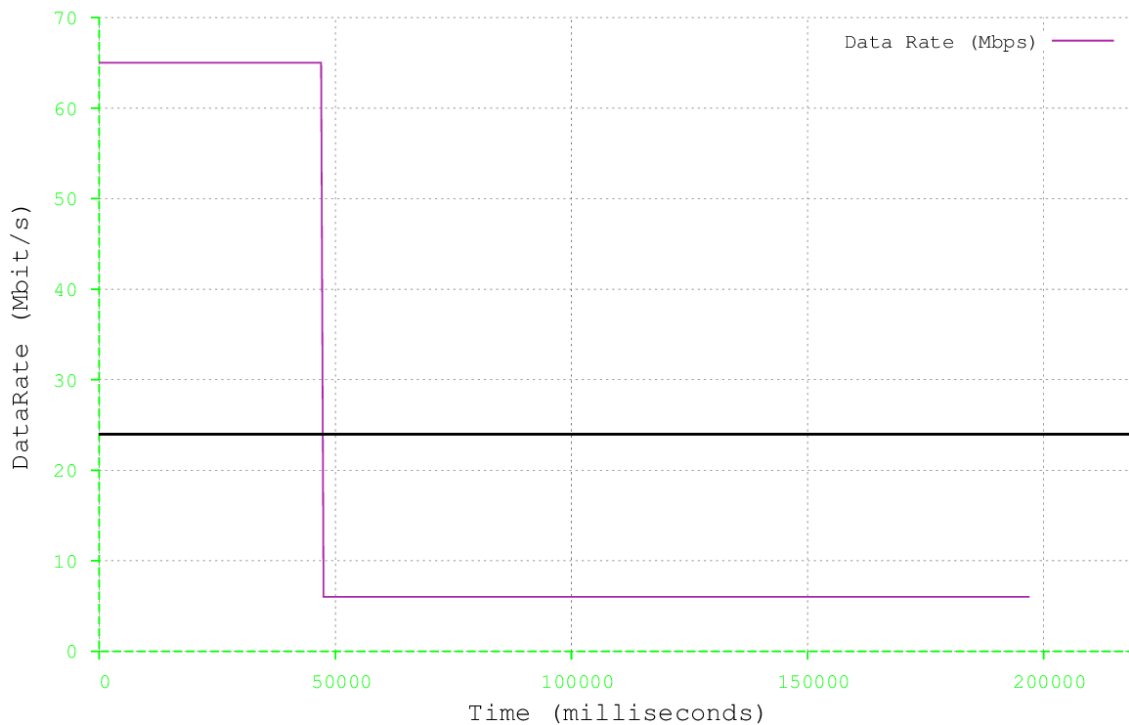
Εικόνα 39: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 40: SNR του σταθμού

Παρατηρείται, ότι όπως στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, ο σταθμός μεταδίδει σταθερά με 20 dB. Επίσης, ενώ το SNR αρχικά βρίσκεται πάνω από τα 24 dB, στη συνέχεια κυμαίνεται κάτω από αυτό το κατώφλι. Ο σταθμός σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται και κινείται ακόμη πιο μακριά από το σημείο πρόσβασης, γεγονός που συνεπάγεται πολύ μικρό κέρδος από την εφαρμογή του μηχανισμού.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται ότι στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης ο ρυθμός μετάδοσης είναι σταθερά χαμηλός, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ύπαρξη παρεμβολών υποβαθμίζει το κανάλι επικοινωνίας.



Εικόνα 41: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

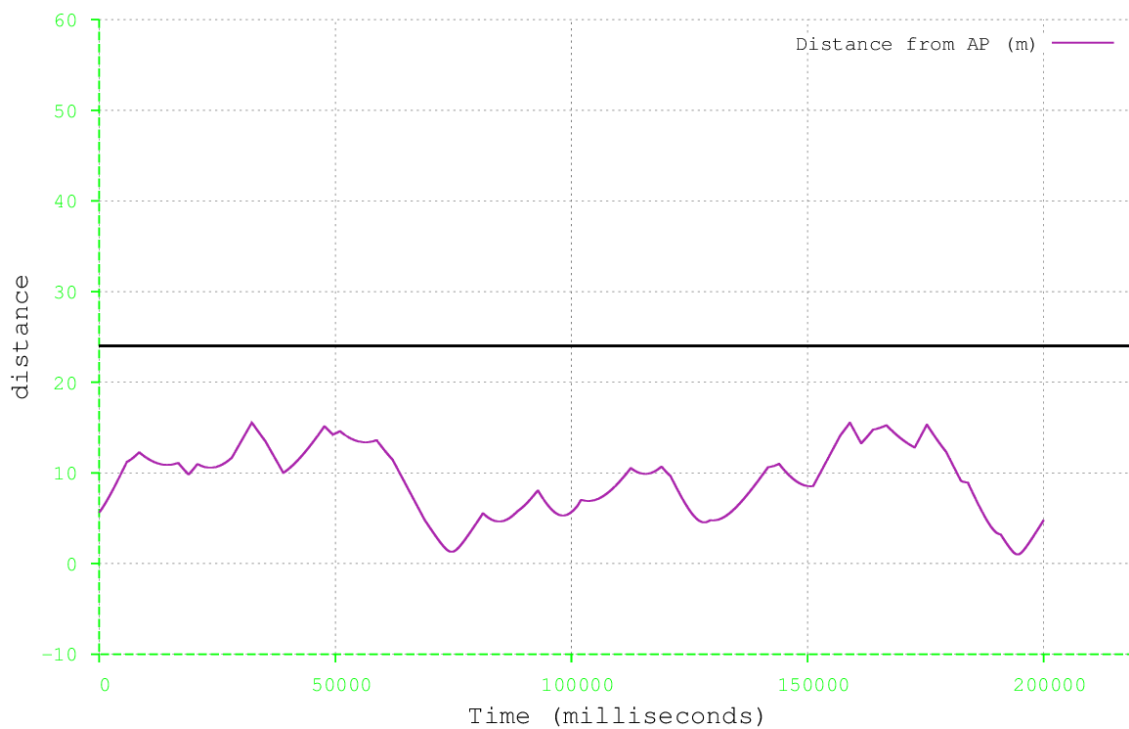
Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 79.33% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι 7.17% (περίπτωση χωρίς

παρεμβολή).

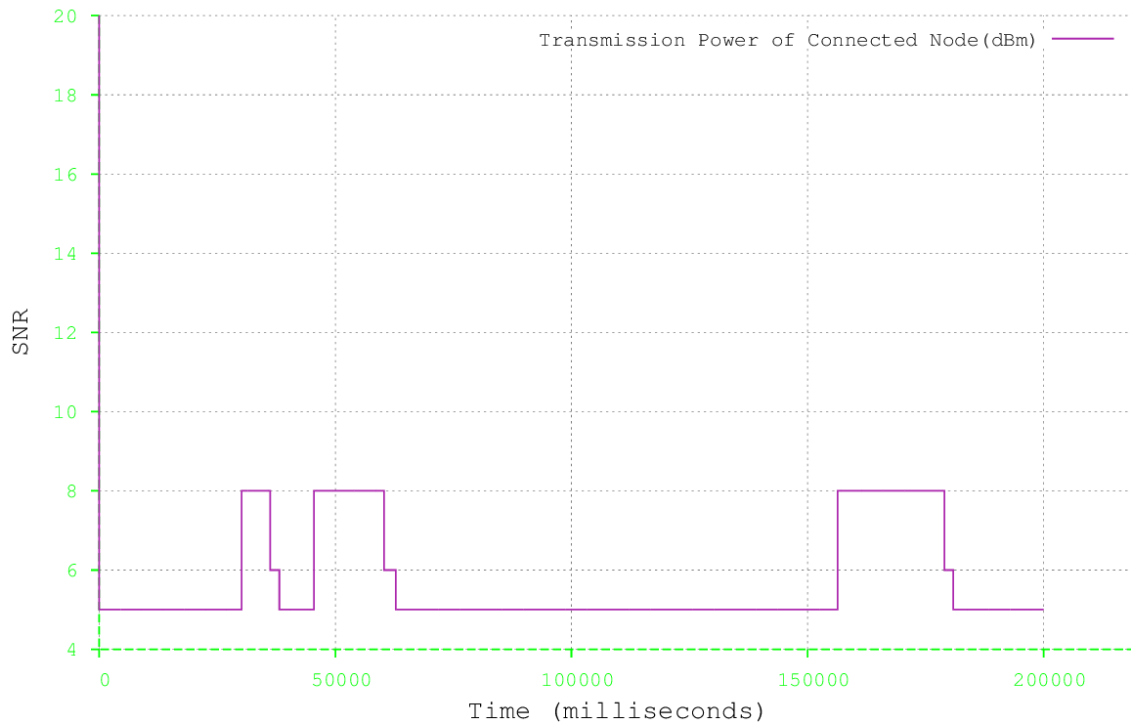
#### 4.5: Ταχύτητα σταθμού – 0.8 - 1.2 m/s

##### 4.5.1: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 0-15 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

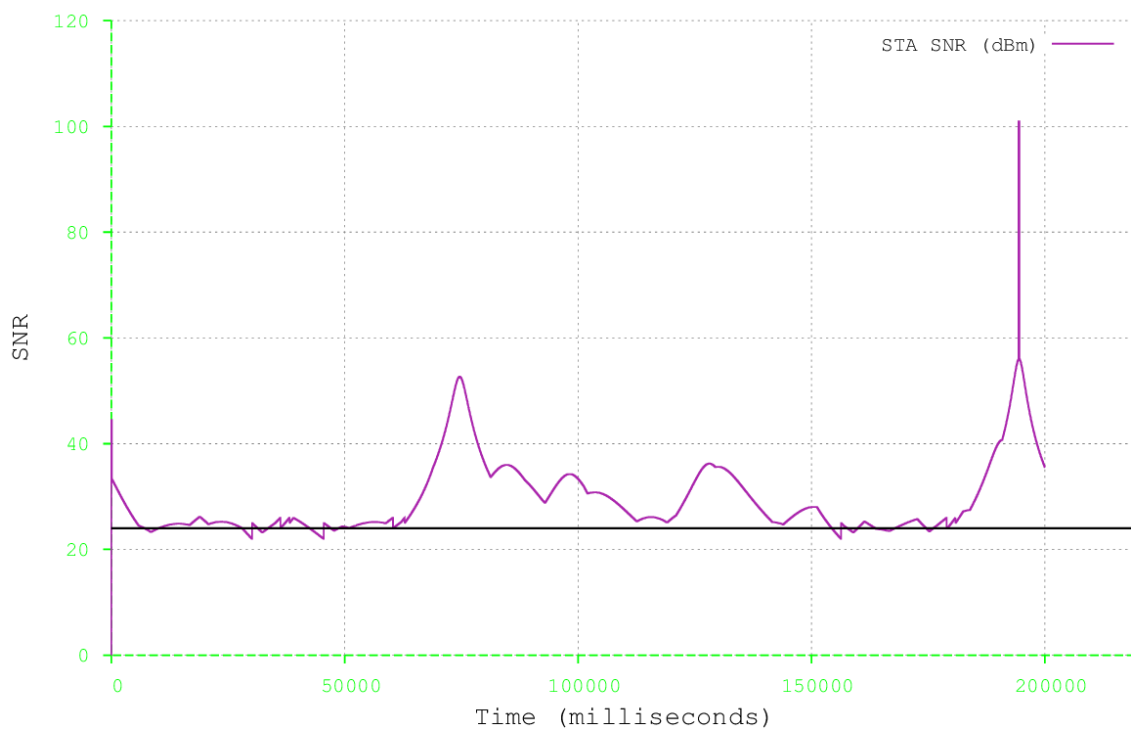
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15 μέτρων γύρω από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 42: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



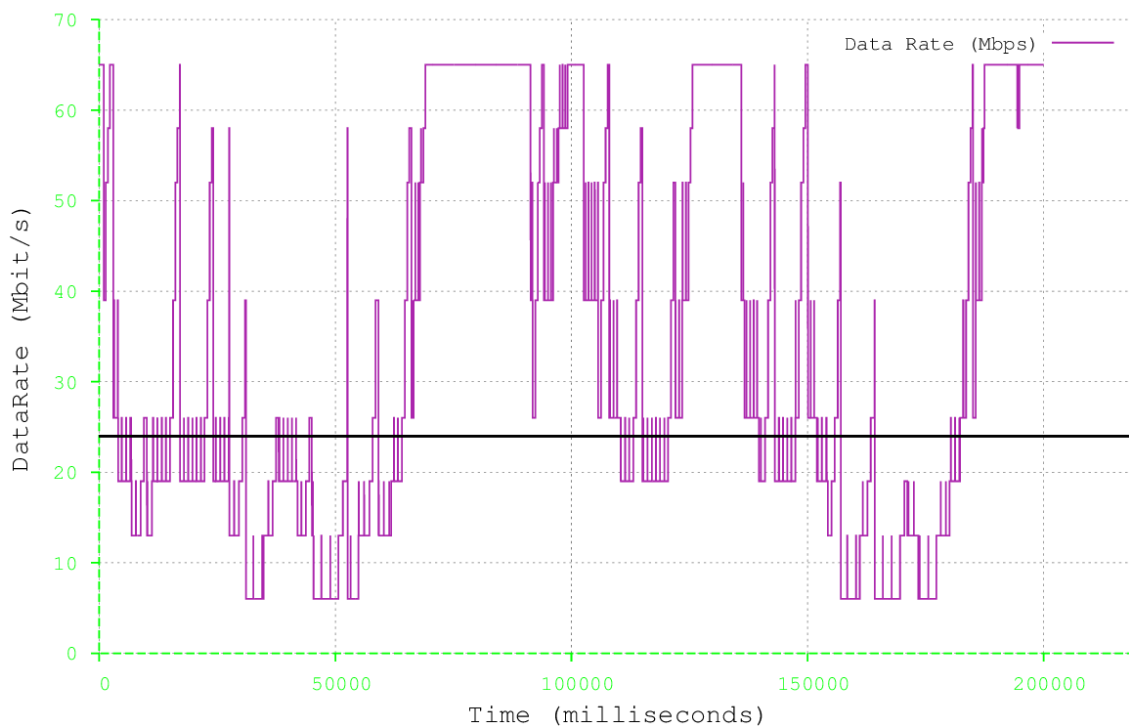
Εικόνα 43: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 44: SNR του σταθμού

Παρατηρείται ότι και εδώ ο σταθμός στη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης μεταδίδει με τη ελάχιστη ισχύ των 5 dB, ενώ στα σημεία που η απόσταση φτάνει το μέγιστο δυνατό η ισχύς αυξάνεται αντίστοιχα. Το SNR βρίσκεται πάνω από το κατώφλι των 24 dB σημειώνοντας κάποιες πολύ μεγάλες τιμές, ενώ για πρώτη φορά φτάνει τα 100 dB λίγο πριν το τέλος της προσομοίωσης, όπου η απόσταση από το σημείο πρόσβασης είναι εξαιρετικά μικρή. Ο σταθμός είναι επομένως σε θέση να μειώσει σημαντικά την ενέργεια μετάδοσης και ως εκ τούτου να εξοικονομήσει ενέργεια.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Στην περίπτωση ύπαρξης παρεμβολών, ο ρυθμός μειώνεται κατάλληλα.



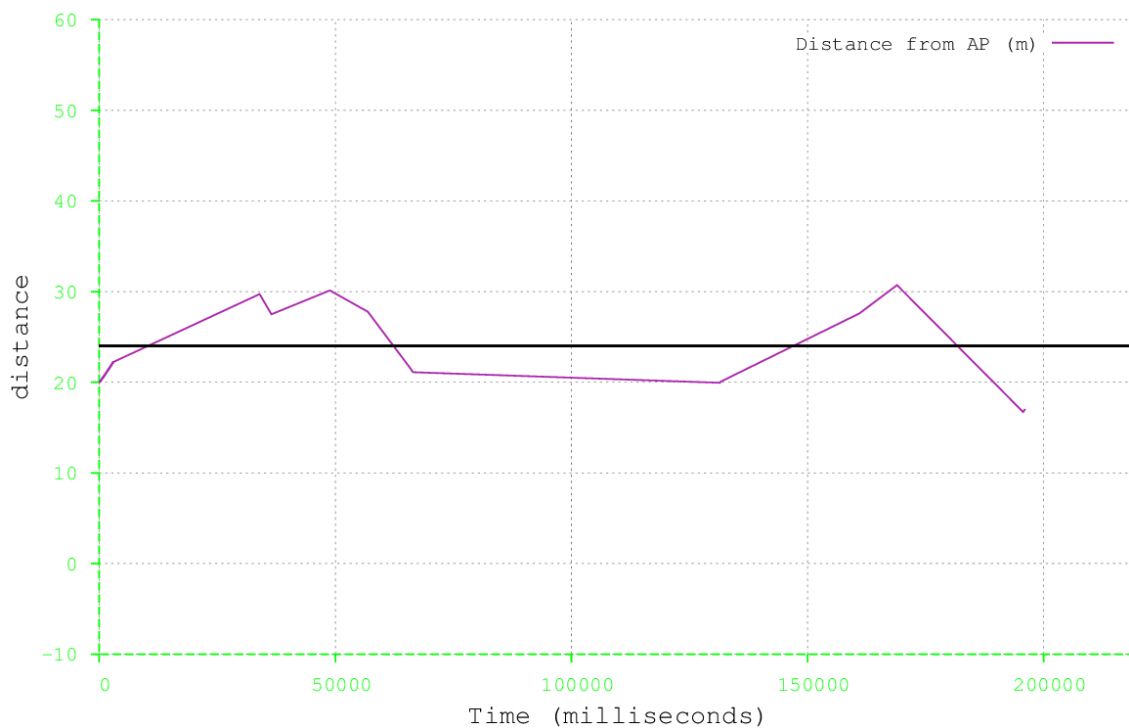
Εικόνα 45: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 7.55% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για

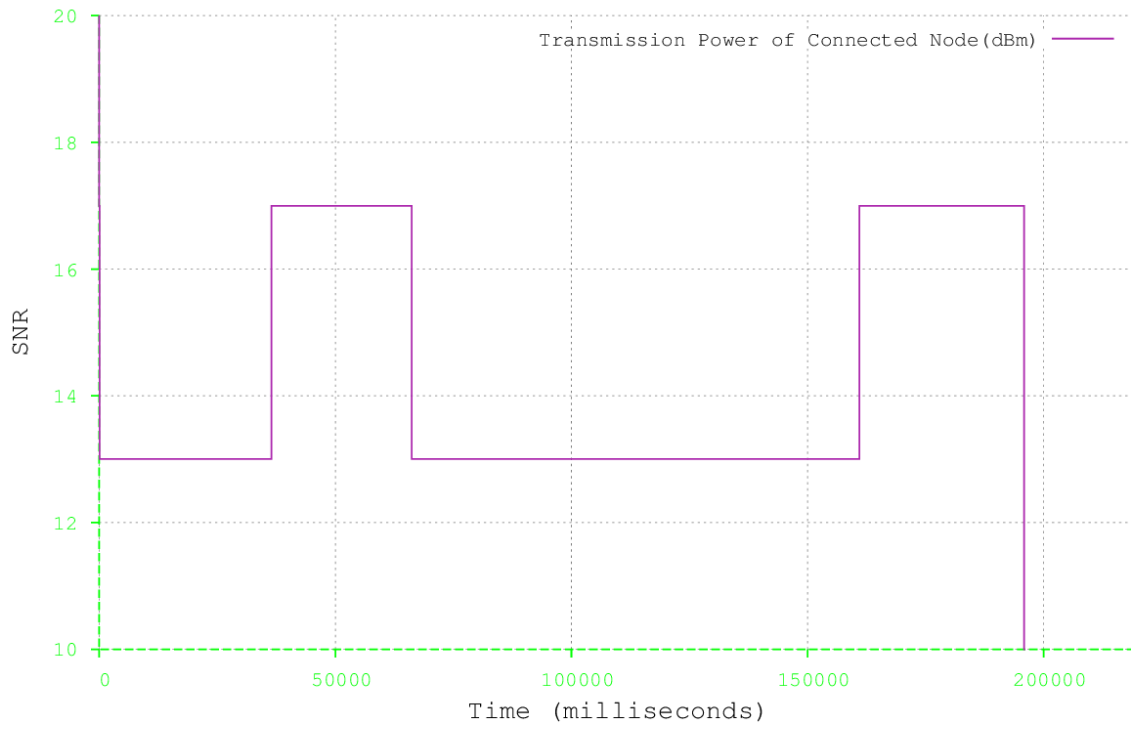
την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι μόλις 2.31% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή).

#### 4.5.2: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

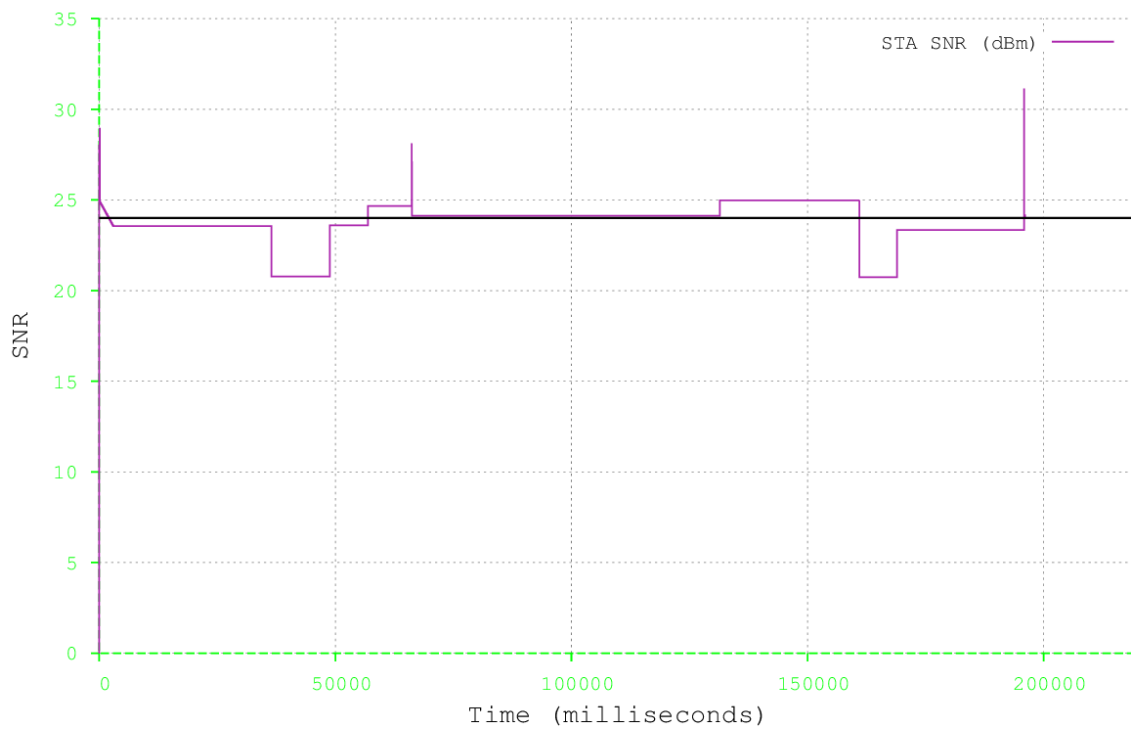
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 15-30 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 46: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



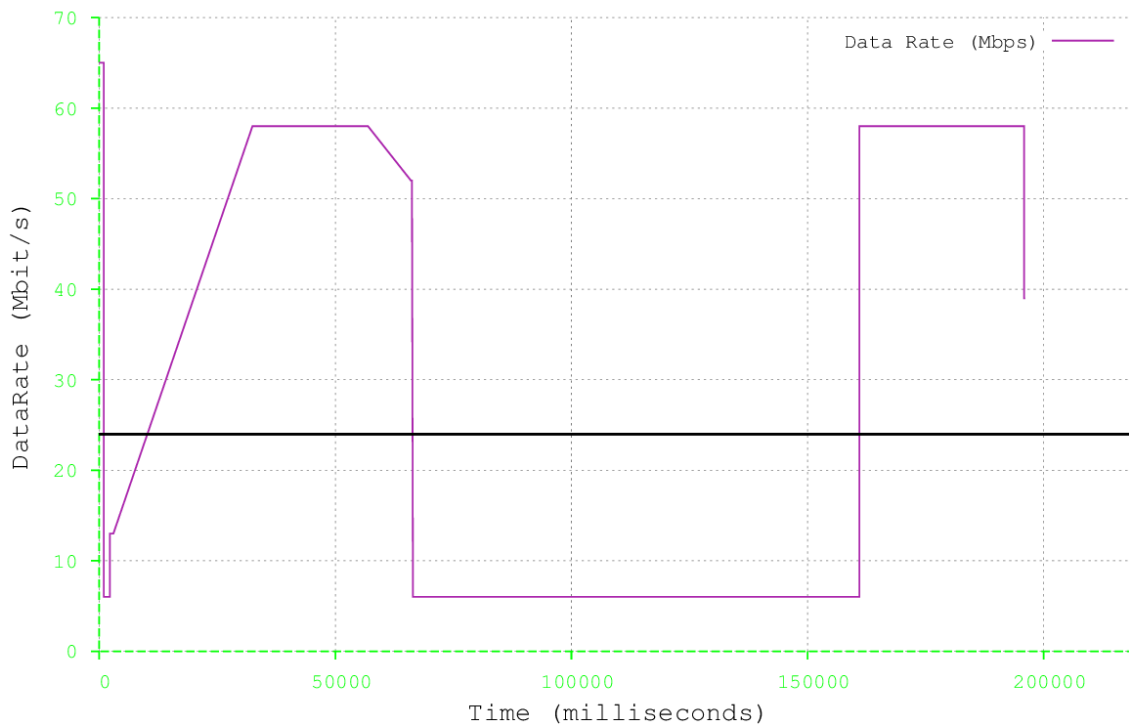
Εικόνα 47: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



Εικόνα 48: SNR του σταθμού

Από τις παραπάνω εικόνες συμπεραίνεται, ότι τόσο η ενέργεια μετάδοσης όσο και το SNR παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Όταν ο σταθμός βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο πρόσβασης η ισχύς μειώνεται σημαντικά, ενώ στην αντίθετη περίπτωση φτάνει μέχρι τα 17 dB. Όσο αφορά το SNR υπάρχει αντίστοιχη συμπεριφορά, παρατηρώντας ότι μειώνεται αισθητά στις περιπτώσεις που ο σταθμός απομακρύνεται αρκετά από το σημείο πρόσβασης.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός μετάδοσης παρουσιάζει και εδώ διακυμάνσεις, στην προσπάθεια να προσαρμοστεί στις συνθήκες του καναλιού.



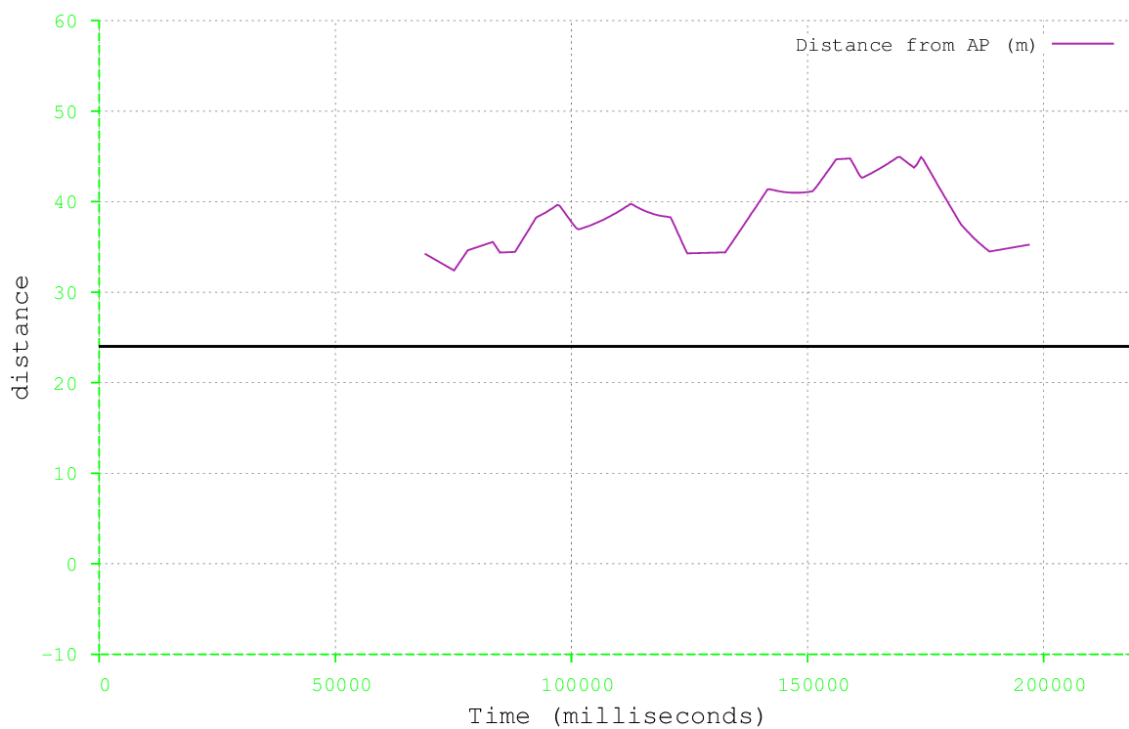
Εικόνα 49: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού

Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 40.91% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» είναι 4.2% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή).

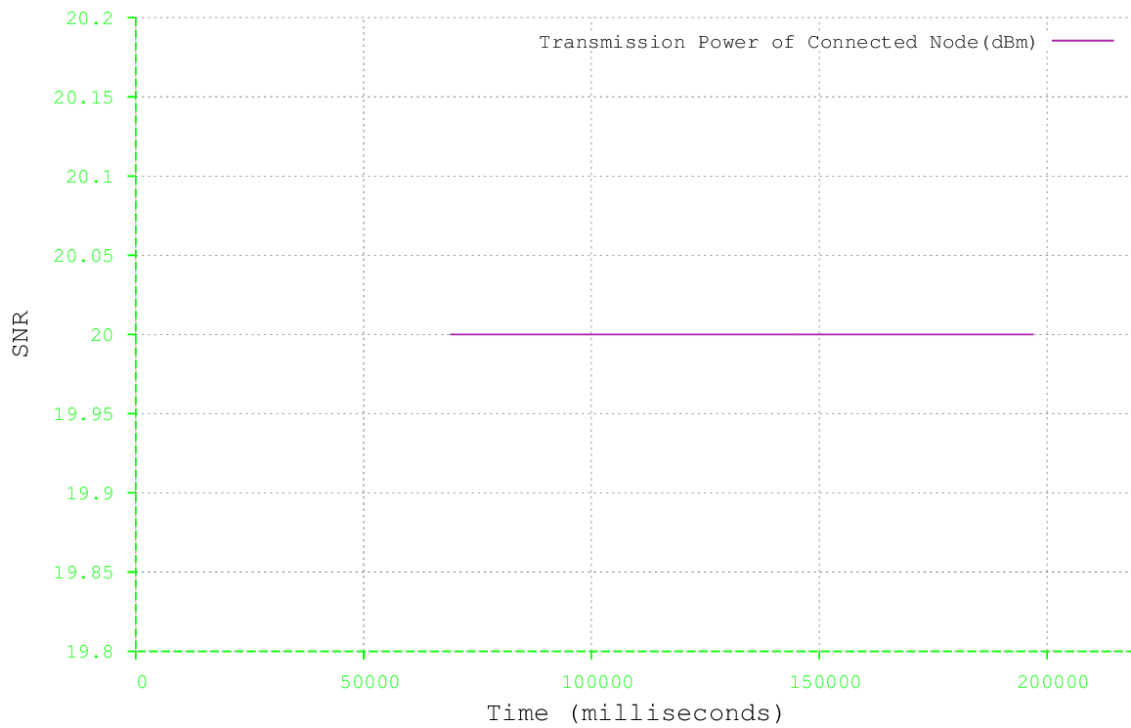


#### 4.5.3: Ο σταθμός βρίσκεται στη ζώνη 30-45 m μακριά από το σημείο πρόσβασης

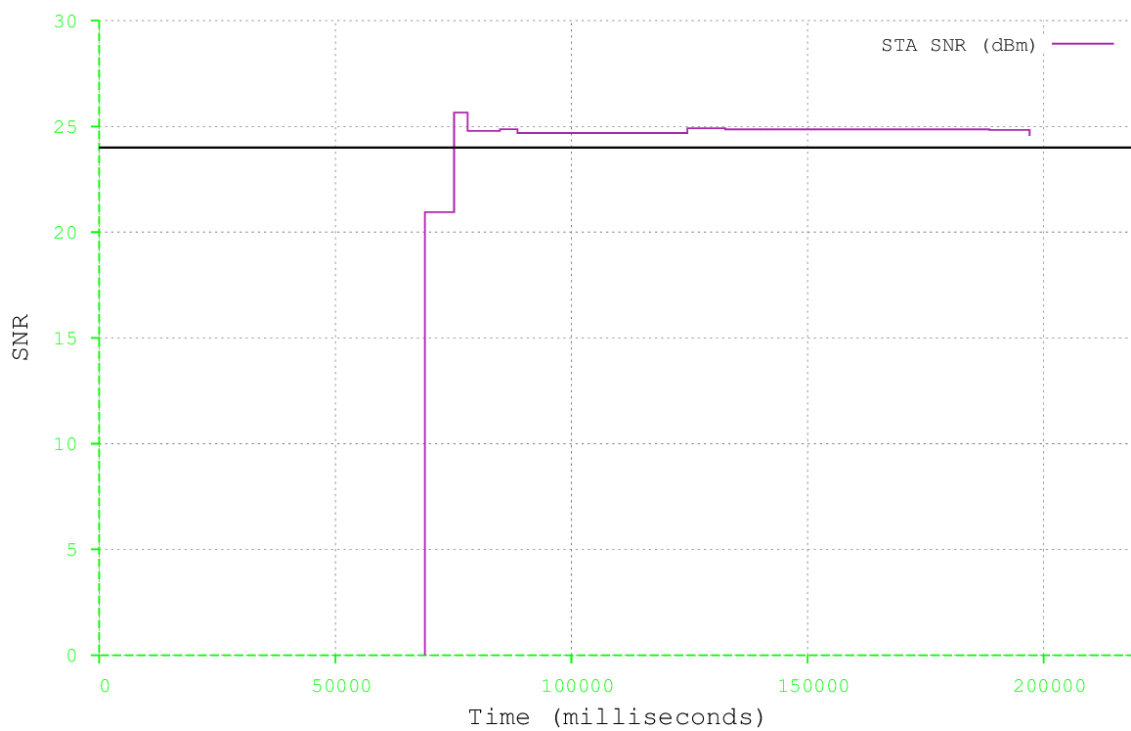
Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός κινείται μέσα σε μία ζώνη 30-45 μέτρα μακριά από το σημείο πρόσβασης. Στη συνέχεια δίνονται τα γραφήματα της απόστασης, της ενέργειας μετάδοσης, του SNR, του ρυθμού μετάδοσης καθώς και ο υπολογισμός της απώλειας πακέτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



Εικόνα 50: Απόσταση του σταθμού από το σημείο πρόσβασης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης



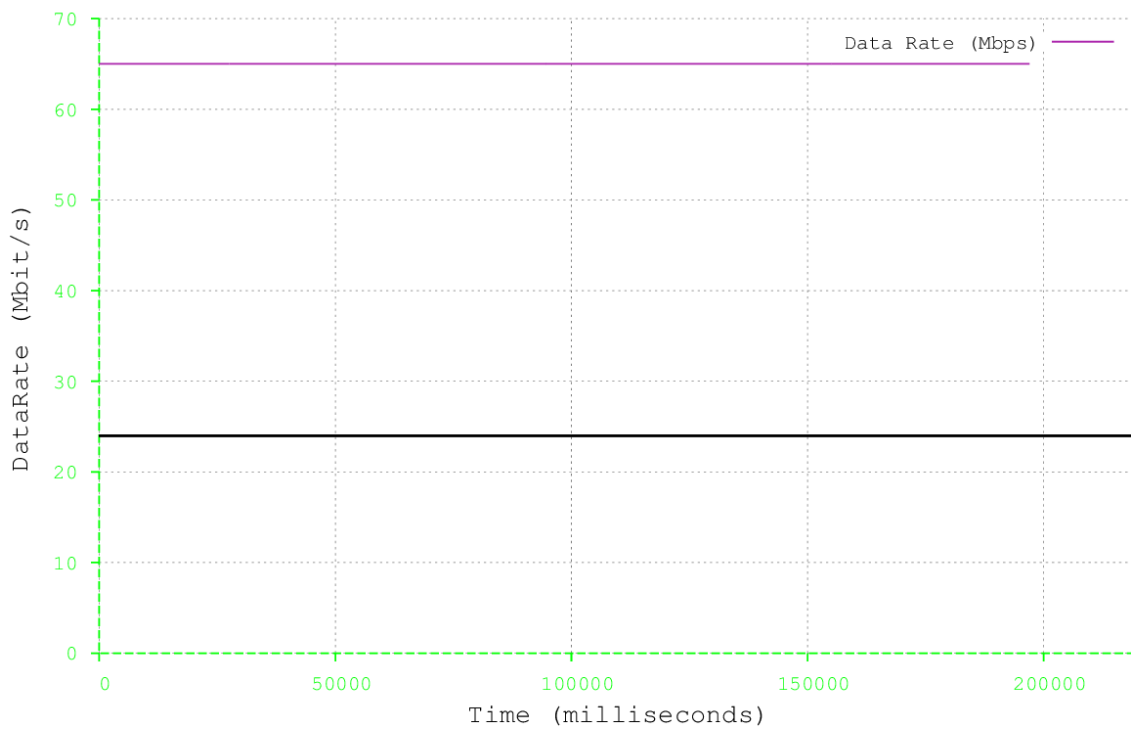
Εικόνα 51: Ενέργεια μετάδοσης του σταθμού



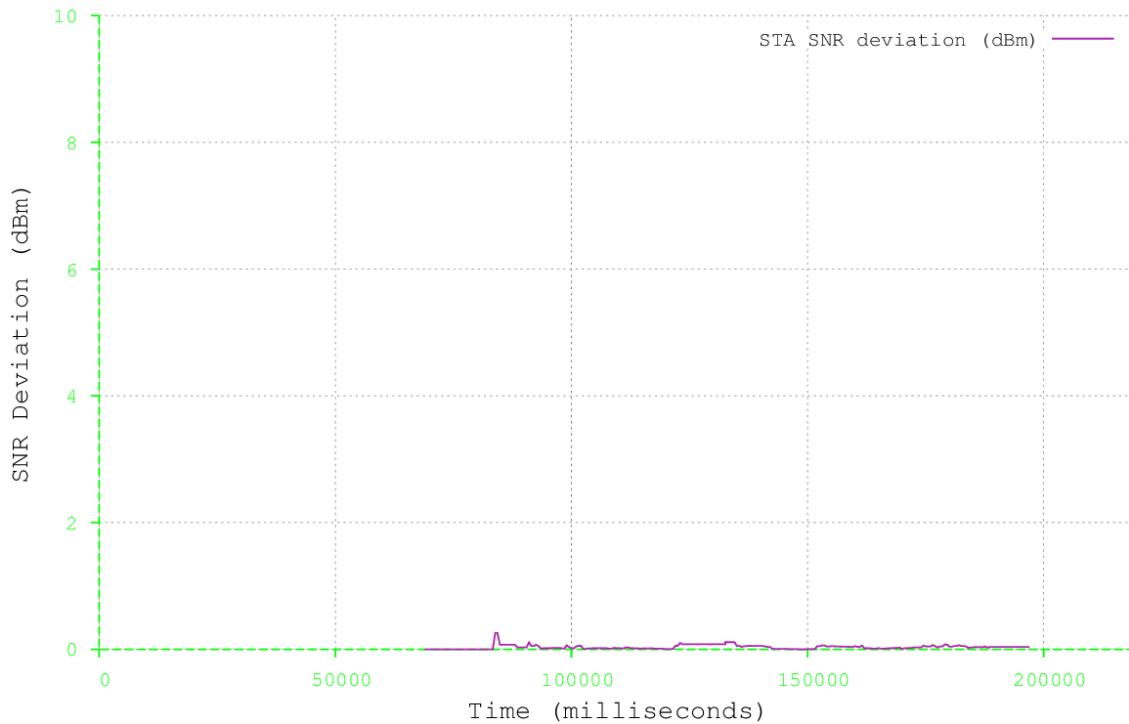
Εικόνα 52: SNR του σταθμού

Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι τα πρώτα 70 sec ο σταθμός δεν έχει επαφή με το σημείο πρόσβασης. Έπειτα η ενέργεια μετάδοσης παραμένει σταθερά στα 20 dB, ενώ σε αντίθεση με τα προηγούμενα πειράματα το SNR βρίσκεται πάνω από το κατώφλι των 24 dB καθ' όλη τη διάρκεια της υπόλοιπης προσομοίωσης.

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης του σημείου πρόσβασης απέναντι στο σταθμό. Ο ρυθμός μετάδοσης παραμένει σταθερά στα 65 Mbps καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, γεγονός που οφείλεται στην πολύ μικρή απόκλιση του SNR, με το γράφημα της τελευταίας να δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 53: Ρυθμός μετάδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού



Εικόνα 54: Απόκλιση του SNR

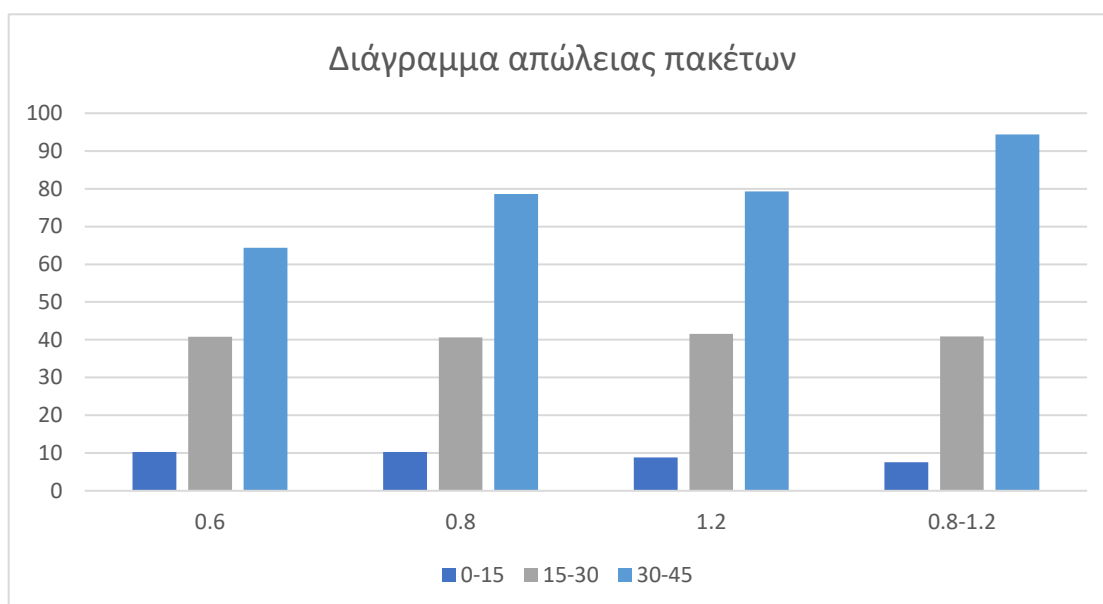
Τέλος, όσο αφορά την απώλεια πακέτων, αυτή βρέθηκε στο 94.35% για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός» (περίπτωση ύπαρξης παρεμβολής), ενώ για την κατεύθυνση «σταθμός → σημείο πρόσβασης» φτάνει το 84.1% (περίπτωση χωρίς παρεμβολή), με τα ποσοστά αυτά να είναι τα υψηλότερα συγκριτικά με όλα τα προηγούμενα πειράματα.

#### 4.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται συγκεντρωτικά τα ποσοστά απώλειας πακέτων και από τα τέσσερα πειράματα, για την κατεύθυνση «σημείο πρόσβασης → σταθμός». Επιπλέον παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα απώλειας πακέτων.

<i>Ταχύτητα σταθμού</i>	<b>0-15 m</b>	<b>15-30 m</b>	<b>30-45 m</b>
0.6	10.27%	40.82%	64.35%
0.8	10.24%	40.61%	78.58%
1.2	8.85%	41.56%	79.33%
0.8-1.2	7.55%	40.91%	94.35%

Πίνακας 1: Ποσοστά απώλειας πακέτων για κάθε σενάριο προσομοίωσης



Εικόνα 55: Διάγραμμα απώλειας πακέτων

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν ο σταθμός βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο πρόσβασης (περίπτωση 0-15 m), η απώλεια πακέτων είναι η μικρότερη δυνατή όταν ο σταθμός κινείται με μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που ο σταθμός βρίσκεται πολύ μακριά από το σημείο πρόσβασης (30-45 m), η απώλεια ελαχιστοποιείται καθώς ο σταθμός κινείται με μικρή ταχύτητα (0.6 m/s). Στην περίπτωση που ο σταθμός βρίσκεται 15-30 m μακριά από το σημείο πρόσβασης, τα ποσοστά για όλες τις δυνατές ταχύτητες είναι παραπλήσια.

Συνολικά, μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα κίνησης του σταθμού δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του μηχανισμού, ο οποίος σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις καταφέρνει να μειώσει την αρνητική επίδραση των παρεμβολών και να εξοικονομήσει ενέργεια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καθώς τα WLANs αναπτύσσονται και κυριαρχούν όλο και περισσότερο, η ανάγκη μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας των κινητών συσκευών γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Στην εργασία αυτή αρχικά μελετήθηκε η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (PSM) του προτύπου IEEE 802.11 όσο αφορά τη δικτυακή απόδοση και την αποτελεσματικότητά της στην εξοικονόμηση ενέργειας. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν μέθοδοι οι οποίοι στοχεύουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που φέρει το PSM, όπως είναι η αρνητική επίδραση του φόρτου κυκλοφορίας που υπάρχει στο υπόβαθρο στην κατανάλωση ενέργειας, ο μεγάλος αριθμός αφυπνίσεων των σταθμών κτλ, καθώς και μέθοδοι που επιχειρούν να το βελτιστοποιήσουν αξιοποιώντας χαρακτηριστικά όπως η κινητικότητα των χρηστών και του δικτύου. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκαν μηχανισμοί που επιχειρούν να εξοικονομήσουν ενέργεια εφαρμόζοντας τεχνικές ελέγχου της ενέργειας μετάδοσης, σε αρκετούς από τους οποίους εφαρμόστηκε ταυτόχρονα προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ενώ σε άλλους αξιοποιήθηκαν μετρικές όπως το RSSI και το SNR. Ακόμα, αναλύθηκε η επίδραση της ύπαρξης παρεμβολών στην απόδοση ενός δικτύου και διαπιστώθηκε ότι ο έλεγχος της ενέργειας μετάδοσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συνολική απόδοσή του. Τέλος, με τη βοήθεια κατάλληλων πειραμάτων επιβεβαιώθηκε η λειτουργία και η αποτελεσματικότητα ενός από τους προτεινόμενους μηχανισμούς, ενώ παράλληλα μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας των σταθμών στην απόδοση του μηχανισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ο μηχανισμός που μελετήθηκε με τη διενέργεια προσομοιώσεων θα μπορούσε μελλοντικά να υλοποιηθεί με την προσθήκη παρεμβολής, η οποία να μη προέρχεται από ένα εξωτερικό ad-hoc δίκτυο όπως γίνεται στο [26], αλλά να πρόκειται για ένα ή περισσότερα μη Wi-Fi σήματα, προερχόμενα από άλλες τεχνολογίες, που να βρίσκονται και να προκαλούν θόρυβο μέσα στο κανάλι. Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να δοκιμαστεί με την προσθήκη περισσότερων του ενός σταθμού, έτσι ώστε να εξακριβωθεί η επίδραση του αριθμού των σταθμών στην απόδοση του μηχανισμού.





## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] James Bornholt, Todd Mytkowicz, Kathryn S. McKinley “The Model Is Not Enough: Understanding Energy Consumption in Mobile Devices” Hot Chips: A Symposium on High Performance Chips (Hot Chips 2012), San Jose, CA, USA, August 2012
- [2] A. Carroll, G. Heiser “An Analysis of Power Consumption in a Smartphone” Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference, 2010
- [3] Daji Qiao, Sunghyun Choi, Kang G. Shin “Interference Analysis and Transmit Power Control in IEEE 802.11ah Wireless LANs” IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, VOLUME 15, ISSUE 5, OCTOBER 2007
- [4] Muhammad Yasir Malik “Power Consumption Analysis of a Modern Smartphone” arXiv, 2012
- [5] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802.11, March 2012
- [6] Eric Rozner, Vishnu Navda, Ramachandran Ramjee, Shravan Rayanchu “NAPman: Network-Assisted Power Management for WiFi Devices” International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys), San Fransisco, CA, June 2010
- [7] Yong He, Ruixi Yuan, Xiaojun Ma, Jun Li, Charles Wang “Scheduled PSM for minimizing energy in wireless LANs” Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocols, October 2007
- [8] H. Tabrizi, G. Farhadi, J. Cioffi “An intelligent power save mode mechanism for IEEE 802.11 WLAN” Proceedings of IEEE GLOBECOM, 2012
- [9] P. Agrawal, A. Kumar, J. Kuri, M. Panda, V. Navda, R. Ramjee “OPSM - Opportunistic power save mode for infrastructure IEEE 802.11 WLAN” IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), May 2010
- [10] Y. Xie, X. Luo, R. K. C. Chang “Centralized PSM: An AP-centric power saving mode for 802.11 infrastructure networks” Proceedings of the 32nd International Conference on Sarnoff symposium, April 2009
- [11] X. Chen, S. Jin, D. Qiao “M-PSM: Mobility-Aware Power Save Mode for IEEE

802.11 WLANs” Proc. 31<sup>st</sup> ICDCS, June 2011

[12] Sangkyu Baek and Bong Dae Choi “Performance analysis of power save mode in IEEE 802.11 infrastructure wlan” International Conference on Telecommunications (ICT), June 2008

[13] Rong Zheng, Jennifer C. Hou, Lui Sha “Performance analysis of the IEEE 802.11 power saving mode” Proc. CNDS, January 2004

[14] Y.-H. Zhu and V. C. M. Leung, “Efficient power management for infrastructure IEEE 802.11 WLANs” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 7, pp. 2196–2205, Jul. 2010

[15] Y. Zhu, S. Luan, V. Leung and K. Chi "Enhancing Timer-based Power Management to Support Delay-Intolerant Uplink Traffic in Infrastructure IEEE 802.11 WLANs" IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 1, January 2015

[16] Daji Qiao, Sunghyun Choi “IEEE 802.11h: Technology and Application” IT Professional, vol. 8, no. 2, pp. 43-48, March/April 2006

[17] Iñaki Ucar, Carlos Donato, Pablo Serrano, Andres Garcia-Saavedra, Arturo Azcorra, Albert Banchs “On the Energy Efficiency of Rate and Transmission Power Control in 802.11” Computer Communications, Volume 117, February 2018, pp. 164-174

[18] Byoung Hoon Jung, Hu Jin, Dan Keun Sung “Adaptive transmission power control and rate selection scheme for maximizing energy efficiency of IEEE 802.11 stations” IEEE 23<sup>rd</sup> International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 9-12 Sept. 2012

[19] Pierre Chevillat, Jens Jelitto, Hong Linh Truong “Dynamic data rate and transmit power adjustment in IEEE 802.11 wireless LANs” International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 12, No. 3, July 2005

[20] Kishore Ramachandran, Ravi Kokku, Honghai Zhang, Marco Gruteser “Symphony: Synchronous Two-phase Rate and Power Control in 802.11 WLANs” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 18, Issue 4, August 2010

[21] William Vann Hasty, Jr., Peter J. Stanforth “System and method for using per-packet receive signal strength indication and transmit power levels to compute path loss for a link for use in layer II routing in a wireless communication network” U.S. Patent 7,672,246, filled Feb 23, 2006, and issued March 2, 2010

- [22] Philip Orlik, Zafer Sahinoglu, Jinyun Zhang “System and method for reducing power consumption in a wireless communication network” U.S. Patent 7,035,677, filed Jan 21, 2003, and issued April 25,2006
- [23] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, Kostas Stamos, Nikos Tavoularis “Feedback-based Adaptation for Improved Power Consumption” IEEE 27<sup>th</sup> International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Barcelona, 2013
- [24] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, Kostas Stamos, Nikos Stathopoulos, Nikos Tavoularis “Power management for wireless adapters using multiple feedback metrics” 10<sup>th</sup> International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Nicosia, 2014
- [25] Jiansong Zhang, Kun Tan, Jun Zhao, Haitao Wu, Yongguang Zhang “A Practical SNR-Guided Rate Adaptation” IEEE INFOCOM 2008
- [26] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, Kostas Stamos, Nikos Tavoularis “Power Management and Rate Control Mechanism for Wi-Fi Infrastructure Networks” 6<sup>th</sup> International Workshop on Wireless Networks and Multimedia, Liverpool, 2015
- [27] I. Broustis, J. Eriksson, S. V. Krishnamurthy, M. Faloutsos “Implications of Power Control in Wireless Networks: A Quantitative Study” Proceedings of Passive and Active Measurement Conference (PAM), April 2007
- [28] Xi Liu, Srinivasan Seshan, Peter Steenkiste “Interference-aware transmission power control for dense wireless networks” Proceedings of the Annual Conference of ITA, 2007
- [29] V. Miliotis, A. Apostolaras, T. Korakis, Z. Tao and L. Tassiulas “New Channel Allocation Techniques for Power Efficient WiFi Networks” Proc. IEEE 21<sup>st</sup> PIMRC, September 2010
- [30] T. Huehn and C. Sengul, "Practical Power and Rate Control for WiFi" 21<sup>st</sup> International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Munich, July 30-2 Aug. 2012
- [31] M. Boulmalf, T. Aouam, M. Ghogho, S.A.R Zaidi, N. Yaagoubi “Power savings and performance analysis in wireless networks” IEEE Vehicular Technology Conference (VCT Fall), 3-6 Sept. 2012
- [32] C. Bouras, V. Kapoulas, K. Stamos, N. Stathopoulos “Evaluation of Power Control Mechanism on OLSR Routing Protocol” 11<sup>th</sup> International Workshop on the Performance Analysis and Enhancement of Wireless Networks (PAWEN 2016), Crans - Montana,

Switzerland, 2016

[33] Yuan Li, Ke Li, Wenwen Li, Yan Zhang, Min Sheng, Jianxiang Chu “An Energy-Efficient Power Control Approach for IEEE 802.11n Wireless LANs” IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT), 11-13 Sept. 2014

[34] Άρης Αλεξόπουλος - Γιώργος Λαγογιάννης, “Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών”, Εκδόσεις Γιαλός, 8<sup>η</sup> έκδοση

## **Εικόνες**

Εικόνα 1: <https://blog.aerohive.com/2-4-ghz-channel-planning>

Εικόνα 2: <http://www.mirazon.com/whats-802-11ac-keep-hearing>

# AKRONYMIA

<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>AP</b>	Access Point
<b>BSS</b>	Basic Service Set
<b>CSMA/CA</b>	Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific and Medical
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>MIMO</b>	Multiple Input, Multiple Output
<b>MU-MIMO</b>	Multi User-Multiple Input, Multiple Output
<b>PSM</b>	Power Save Mode
<b>TPC</b>	Transmit Power Control
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>CAM</b>	Constantly Awake Mode
<b>TIM</b>	Traffic Indication Map
<b>OWD</b>	One-Way Delay
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>IBSS</b>	Independent Basic Service Set
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>DFS</b>	Dynamic Frequency Selection
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator
<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme

<b>SINR</b>	Signal to Interference and Noise Ratio
<b>FDR</b>	Frame Delivery Ratio
<b>PDR</b>	Packet Delivery Ratio
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>RTS/CTS</b>	Request To Send/Clear To Send
<b>CCA</b>	Clear Channel Assessment
<b>SIR</b>	Signal to Interference Ratio
<b>FCS</b>	Frame Check Sequence
<b>ACK</b>	Acknowledgement
<b>OLSR</b>	Optimized Link State Routing