

Πειραιάς, Ιούλιος 2017

Experimental implementation of link quality estimations in 802.11 communication protocol

Πτυχιακή Εργασία



Επιβλέπων Καθηγητής:

Δρ. Χρήστος Δουληγέρης

Λαχανάς Σπύρος Π07174

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ – ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε συνεργασία με την πτυχιακή εργασία του Βασίλη Ράλλη *Link quality estimators and their experimental implementation in the communication protocol 802.11*.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου δρ. Χρήστο Δουληγέρη και τον επιβλέπων διδάκτορα κ. Δημήτρη Ζορμπά για την εμπιστοσύνη και την επιμονή που έδειξαν κατά τη διάρκεια τις υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους για την επίλυση των διαφόρων θεμάτων που εμφανίστηκαν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη που μου δίνουν στις σπουδές μου όλα αυτά τα χρόνια και είναι πάντα δίπλα μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο κύριος στόχος είναι η παρουσίαση και η ανάλυση των εκτιμητών ποιότητας σύνδεσης (LQEs). Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην σύγχρονη πραγματικότητα, για μια πληθώρα συνδέσεων μεταξύ όμοιων ή και διαφορετικών συσκευών, έτσι δημιουργείται η ανάγκη για τον έλεγχο της ποιότητας αυτών των συνδέσεων προκειμένου να γίνεται ποιο αποδοτική η δρομολόγηση των δεδομένων μέσα στο δίκτυο αλλά και η εύρεση καλύτερων διαδρομών για την σύνδεση των κόμβων.

Προκειμένου να παρουσιαστεί αυτό το ζήτημα του ελέγχου της ποιότητας των συνδέσεων θα παρουσιαστούν μια πληθώρα εκτιμητών ποιότητας σύνδεσης και θα δειχθούν τα προτερήματα και τα ελαττώματα κάθε μετρητή. Έπειτα υλοποιούνται κάποιοι μετρητές σε εξωτερικό και εσωτερικό χώρο και μέσα από τα αποτελέσματά τους δείχνεται το πόσο αποδοτικός είναι ο καθένας μεμονωμένα, συγκριτικά με τους υπόλοιπους αλλά και σε συνδυασμό μεταξύ τους και τέλος το πως επηρεάζονται τα δίκτυα με βάση το που βρίσκονται.

Abstract

The main purpose of this research thesis is to present and analyze the link quality estimation metrics of the wireless networks. As the wireless networks are used more and more in the everyday life, for an abundance of wireless connections between same or different devices, it creates the need to monitor the quality of these connections in order to have more efficient data routing between the nodes.

In order to address this issue of link quality estimation there will be shown some of the LQEs along with their advantages and disadvantages. Then some of these LQEs are implemented in indoors and outdoors terrain. Through their respective results is shown how the links of a network is affected based on where they are implemented and also how efficient is every one of them individually, in correlation with one another and in comparison with each other.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Abstract.....	3
1.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	6
1.1 Η ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ IEEE 802.11	6
1.1.1 802.11a	6
1.1.2 802.11b	7
1.1.3 802.11g.....	7
1.1.4 802.11n	8
1.2 Δίκτυα Ad-Hoc.....	8
1.3 Τοπογραφικά στοιχεία των δικτύων.....	9
1.4 Χρονικά στοιχεία των δικτύων.....	9
1.5 Ασυμμετρία των Συνδέσεων.....	10
1.6 Παρεμβολές	10
2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΚΤΙΜΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	12
2.1 Βασικά στοιχεία της εκτίμησης ποιότητας σύνδεσης	12
2.2 Βήματα για την αξιολόγηση μιας σύνδεσης.....	12
2.3 Βασικά στοιχεία των Εκτιμητών Ποιότητας Σύνδεσης	13
3. ΕΚΤΙΜΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (Link Quality Estimators).....	14
3.1 LQEs Βασισμένοι στο υλικό	14
3.1.1 RSSI.....	14
3.1.2 LQI	15
3.1.3 SNR.....	16
3.2 LQEs Βασισμένοι στο λογισμικό	16
3.2.1 ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ PRR	16
3.2.2 ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ RNP	18
3.2.3 ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ SCORE	21
4. Μετρήσεις LQEs και κίνηση router	23
4.1 Testbed	23
4.2 Μετρήσεις RSSI-LQI.....	24
4.2.1 Εσωτερικός χώρος	26
4.2.2 Εξωτερικός Χώρος.....	31
4.3 Μετρήσεις PRR.....	37
4.3.1 Εσωτερικός Χώρος	38

4.3.2 Εξωτερικός Χώρος.....	43
4.4 Μετρήσεις WMEWMA.....	47
4.4.1 Εσωτερικός χώρος	48
4.4.2 Εξωτερικός χώρος	56
4.5 Συμπεράσματα Μετρήσεων	65
5. Βιβλιογραφία	68

1.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Η ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ IEEE 802.11

Η οικογένεια των πρωτοκόλλων που αποτελεί το καθιερωμένο πρότυπο της βιομηχανίας στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων είναι το IEEE 802.11. Αυτό το σύνολο προτύπων της IEEE για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το 802.3 (Ethernet - το συνηθέστερο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών) στην ασύρματη περιοχή. Τα πρότυπα 802.11 είναι ευρύτερα γνωστά ως «WiFi». Αποτελούνται από μια σειρά εναέριων τεχνικών διαμόρφωσης που είναι half-duplex και χρησιμοποιούν το ίδιο βασικό πρωτόκολλο. Το 802.11-1997 ήταν το πρώτο ασύρματο δικτυακό πρότυπο της οικογένειας, όμως το 802.11b ήταν το πρώτο ευρέως διαδεδομένο, και μετά ακολούθησαν τα 802.11a, 802.11g, 802.11n, και 802.11ac.

802.11 Protocol	Frequency(GHz)	Bandwidth(MHz)	Stream data rate(Mbit/s)	Approximate range	
				Indoor(m)	Outdoor(m)
a	5	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	35	120
b	2.4	22	1, 2, 5.5, 11	35	140
g	2.4	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	38	140
n	2.4/5	20/40	400 ns GI : 15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150 800 ns GI : 13.5, 27, 40.5, 54, 81, 108, 121.5, 135	70	250

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι σταθμοί a,b,g και n της εξέλιξης του προτύπου IEEE 802.11.

1.1.1 802.11a

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz και επιτρέπει εκπομπή και λήψη δεδομένων με ταχύτητες από 1.5 μέχρι και 54 Mbit/s.

Μιας και η συχνοτική ζώνη 2.4 GHz χρησιμοποιείται μαζικά, η χρήση της σχετικά αχρησιμοποίητης συχνότητας των 5 GHz, δίνει στο 802.11a ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

Ωστόσο αυτή η επιλογή υψηλότερης συχνότητας έχει και το εξής μειονέκτημα: το ωφέλιμο συνολικό εύρος του 802.11a είναι μικρότερο από του 802.11b/g. Θεωρητικά, τα σήματα του 802.11a απορροφώνται ευκολότερα από τοίχους και άλλα συμπαγή αντικείμενα λόγω του μικρότερου μήκους κύματος, έχοντας σαν αποτέλεσμα να μην φτάνουν τόσο μακριά όσο τα σήματα του 802.11b. Πρακτικά, το 802.11b έχει μεγαλύτερο εύρος σε χαμηλές ταχύτητες αναμετάδοσης (το 802.11b θα μειώσει την ταχύτητα στα 5.5 Mbit/s ή ακόμα και στο 1 Mbit/s σε αδύναμα σήματα.) Επίσης το 802.11a είναι πιο ευπαθές στις παρεμβολές (interference), ωστόσο τοπικά ενδέχεται να υπάρχουν λιγότερα σήματα τα οποία μπορούν να παρεμβληθούν, οδηγώντας σε μικρότερο ποσοστό παρεμβολών και καλύτερο throughput.

1.1.2 802.11b

Το πρωτόκολλο 802.11b έχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 11 Mbit/s, και χρησιμοποιεί την ίδια μέθοδο ροής δεδομένων που έχει καθοριστεί στο αρχικό πρωτόκολλο. Το 802.11b αποτελεί μια άμεση επέκταση του modulation technique, όπως αποτυπώνεται στο αρχικό πρότυπο. Η δραματική αύξηση του throughput στο 802.11b (σε σύγκριση με το αρχικό πρότυπο) παράλληλα με την ουσιαστική μείωση του κόστους παραγωγής των συσκευών που το υλοποιούν, οδήγησε στην ταχεία αποδοχή του 802.11b ως την ευρέως χρησιμοποιούμενη ασύρματη LAN τεχνολογία.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν το 802.11b έχουν συχνά παρεμβολές από άλλες συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη των 2.4 GHz, όπως φούρνοι μικροκυμάτων, συσκευές Bluetooth, baby monitors, ασύρματα τηλέφωνα, κ.α.

1.1.3 802.11g

Το πρότυπο 802.11g λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz, ωστόσο χρησιμοποιεί το ίδιο transmission scheme με το 802.11a. Λειτουργεί σε ένα μέγιστο bit rate των 54 Mbit/s με μέση τιμή throughput 22 Mbit/s. Το hardware του 802.11g είναι πλήρως συμβατό με το hardware του 802.11b, και κατ' επέκταση επιβαρύνεται με τα legacy issues που οδηγούν σε μείωση του throughput έως και 21% σε σύγκριση με το 802.11a.

Το πρότυπο 802.11g υιοθετήθηκε ταχέως από την αγορά, ακόμα και πριν την επικύρωση του, λόγω της ζήτησης για υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και των μειώσεων στο κόστος παραγωγής. Έτσι, τα περισσότερα dual-band 802.11a/b προϊόντα υιοθέτησαν ένα dual-band/tri-mode, υποστηρίζοντας τα a και b/g σε μια μόνο ασύρματη κάρτα δικτύου ή σε ένα access point. Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας έτσι ώστε τα b και g να συνεργάζονται αρμονικά, προήλθαν κυρίως από μακροχρόνια τεχνική διαδικασία. Ωστόσο σε ένα δίκτυο 802.11g, η δραστηριότητα ενός κόμβου που υλοποιεί το 802.11b επιφέρει μείωση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων.

Όπως και για το 802.11b, οι συσκευές που χρησιμοποιούν το 802.11g, αντιμετωπίζουν προβλήματα με παρεμβολές από άλλες συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη των 2.4 GHz, για παράδειγμα ασύρματα πληκτρολόγια.

1.1.4 802.11n

Το 802.11n αποτελεί μια τροποποίηση/διόρθωση που θέτει βελτιώσεις πάνω στα προηγούμενα 802.11 πρότυπα. Το συγκεκριμένο πρότυπο λειτουργεί εξίσου στις ζώνες συχνοτήτων των 2.4 GHz και 5 GHz, με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που κυμαίνεται από 54 Mbit/s έως 600 Mbit/s, διατηρώντας παράλληλα συμβατότητα με τα πρότυπα 802.11a, 802.11b και 802.11g. Η τεχνική που αξιοποιήθηκε από το 802.11n είναι η MIMO (Multiple Input Multiple Output) ή αλλιώς τεχνική επικοινωνίας Πολλαπλής Εισόδου Πολλαπλής Εξόδου. Σύμφωνα με την παραπάνω τεχνική, χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα πολλές κεραίες (τέσσερις) στον πομπό και τον δεκτή, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση στην ταχύτητα, καλύτερη εμβέλεια και αξιοπιστία. Το IEEE ενέκρινε τη συγκεκριμένη τροποποίηση, με τις επιχειρήσεις/ εταιρίες να ξεκινούν την υλοποίηση των δικτύων τους με το 802.11n ακόμα και πριν την τελική της επικύρωσή του.

1.2 Δίκτυα Ad-Hoc

Τα ασύρματα ad hoc δίκτυα (WANET) είναι ένα είδος αποκεντρωμένων ασύρματων δικτύων. Αυτό σημαίνει ότι δεν βασίζονται σε κάποια ήδη υπάρχουσα υποδομή όπως τα routers (δρομολογητές) σε δίκτυα με καλωδιώσεις ή τα access points σε ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα κάθε κόμβος παίρνει το ρόλο του δρομολογητή με το να προωθεί τα δεδομένα σε άλλους κόμβους. Το ποιος κόμβος προωθεί τα δεδομένα κάθε φορά γίνεται δυναμικά ανάλογα με την σύνδεση των κόμβων και το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται.

Τα ασύρματα *κινούμενα* ad hoc δίκτυα (MANET) δεν θέλουν κάποια ιδιαίτερη ρύθμιση από τον χρήστη, είναι δυναμικά και επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση των κόμβων.

Τα θετικά των ad hoc δικτύων είναι:

- Δίκτυα υψηλής απόδοσης
- Δεν χρειάζεται η εγκατάσταση κάποιας δαπανηρής υποδομής
- Χρησιμοποιεί φασματικές συχνότητες που δεν χρειάζονται κάποιο license
- Γρήγορη διανομή των δεδομένων γύρο από τον αποστολέα
- Δεν υπάρχει μοναδικό critical point of failure

Τα αρνητικά τους είναι τα εξής:

- Οι λειτουργίες του δικτύου πρέπει να έχουν υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας
- Δεν υπάρχουν κεντρικοί κόμβοι και οι λειτουργίες κατανέμονται σε όλους τους κόμβους οπότε επιβαρύνονται
- Όλοι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να είναι κινητοί και η τοπολογία είναι δυναμική οπότε και επιρρεπής σε διακοπές σύνδεσης

Η δρομολόγηση μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:

1. Με την proactive δρομολόγηση
2. Με την reactive δρομολόγησης
3. Με την hybrid δρομολόγηση

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η proactive δρομολόγηση μιας και έχουν περαστεί οι

διαδρομές μέσω των iptables.

1.3 Τοπογραφικά στοιχεία των δικτύων

Έχειδειχθεί ότι η απόσταση διάδοσης του σήματος δεν είναι ισοτοπική (δεν έχει δηλαδή σφαιρικό σχήμα). Αντίθετα υπάρχουν τρεις κύριες περιοχές, με κάθε μία να έχει ακανόνιστο σχήμα, δυναμικά όρια (που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου) και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Αυτές οι περιοχές είναι:

- I. Η περιοχή σύνδεσης
- II. Η μεταβατική περιοχή
- III. Η περιοχή αποκοπής

Η περιοχή σύνδεσης έχει συνήθως συνδέσεις καλής ποιότητας, όπου είναι σταθερές και συμμετρικές. Η μεταβατική περιοχή έχει συνδέσεις μέτριας ποιότητας (σε μετρήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας), είναι ασταθείς, δεν συσχετίζονται με την απόσταση και είναι συχνά ασύμμετρες. Η περιοχή αποκοπής έχει συνδέσεις με κακή ποιότητα, ανεπαρκή για επικοινωνία.

Συγκεκριμένα η περιοχή μετάβασης έχει γίνει αντικείμενο για πολλές εμπειρικές μελέτες γιατί οι συνδέσεις μέσα σε αυτήν την περιοχή είναι εξαιρετικά απρόβλεπτες και αναξιόπιστες. Αυτές οι συνδέσεις μέτριας ποιότητας έχουν σύνηθες κοινό χαρακτηριστικό ένα μέτριο PRR μεταξύ του 10% και 90%. Έχειδειχθεί ότι το μέγεθος της περιοχής αυτής εξαρτάται από το περιβάλλον που βρίσκεται (εσωτερικός ή εξωτερικός χώρος, εμπόδια) και από τα χαρακτηριστικά του υλικού του πομπού και του δέκτη (κάρτα δικτύου, κεραία).

1.4 Χρονικά στοιχεία των δικτύων

Όπως η ποιότητα των συνδέσεων μεταβάλλεται χωρικά, κατά τον ίδιο τρόπο μεταβάλλεται και χρονικά, ανάλογα το παράθυρο μέτρησης και τον αριθμό επανάληψης των μετρήσεων.

Έχειδειχθεί ότι συνδέσεις με πολύ μεγάλο ή πολύ μικρό μέσο PRR είναι ποιο σταθερές σε αντίθεση με συνδέσεις με μέτριο μέσο PRR. Ειδικά για την μεταβατική περιοχή οι τιμές του PRR έχουν δραματική απόκλιση, μεταξύ του 0% και 100%, με το μέσο PRR να κυμαίνεται μεταξύ του 20% και 80%.

Σε μετρήσεις μικρών χρονικών διαστημάτων η λήψη πακέτων μπορεί να είναι από 0% μέχρι και 100%. Το ποσοστό αυτών των συνδέσεων φτάνει στο 95% ενώ αντίθετα το ποσοστό των συνδέσεων που έχουν ενδιάμεσες λήψεις πακέτων είναι περίπου 5%. Αυτές οι απότομες αυξομειώσεις στην λήψη των πακέτων έχουν αποδοθεί σε burst των συνδέσεων. Λόγο αυτού του φαινομένου οι μετρήσεις χρειάζεται να έχουν ένα επαρκώς μεγάλο χρονικό παράθυρο παρατήρησης προκειμένου να λαμβάνονται υπόψιν οι αυξομειώσεις της έντασης του σήματος και ταυτόχρονα να διατηρείται ο χαρακτήρας της σύνδεσης.

Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι οι διακυμάνσεις στην ποιότητα της σύνδεσης συνδέεται στενά με τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι οι κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, αέρας), η ανθρώπινη παρουσία, παρεμβολές και εμπόδια.

Οι χρονικές διακυμάνσεις έχουν χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

1. Τις μικρές διακυμάνσεις
2. Τις μεγάλες διακυμάνσεις
3. Τις συνεχόμενα μεγάλες διακυμάνσεις

Οι μικρές διακυμάνσεις οφείλονται κυρίως στην στιγμιαία εξασθένηση του σήματος. Οι μεγάλες διακυμάνσεις οφείλονται από το φαινόμενο της κάλυψης (shadowing) του σήματος λόγω ανθρώπινης παρουσίας, των πορτών και άλλων αντικειμένων. Τέλος οι συνεχόμενα μεγάλες διακυμάνσεις οφείλονται στην παρουσία παρεμβολών.

1.5 Ασυμμετρία των Συνδέσεων

Η ασυμμετρία των συνδέσεων είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ασύρματων συνδέσεων μιας και έχει μεγάλη επίπτωση στην απόδοση των πρωτοκόλλων που λειτουργούν στα ανώτερα επίπεδα του μοντέλου OSI. Υπολογίζεται συνήθως ως η διαφορά στην συνδεσιμότητα μεταξύ του uplink και του downlink. Ένα δίκτυο χαρακτηρίζεται ως ασύμμετρο όταν αυτή η διαφορά είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο (πχ. Όταν η διαφορά μεταξύ του uplink PRR και του downlink PRR είναι μεγαλύτερη του 40%.)

Έχει δειχθεί ότι τα ασύμμετρα δίκτυα βρίσκονται κυρίως στην μεταβατική περιοχή. Συνδέσεις με πολύ υψηλό ή πολύ χαμηλό μέσο PRR, οι οποίες βρίσκονται στις περιοχές σύνδεσης και αποκοπής αντίστοιχα τείνουν να είναι συμμετρικά. Αντίθετα οι συνδέσεις με μέτριο PRR, στην μεταβατική περιοχή, τείνουν να είναι ασύμμετρες. Επίσης η ασυμμετρία των συνδέσεων δεν είναι συσχετισμένη με την απόσταση των μεταξύ κόμβων όπως και χρονικά μπορεί να είναι διατηρείται ή και όχι. Ωστόσο φαίνεται η χρονική διατήρηση της ασυμμετρίας να σχετίζεται με το αν είναι σταθερή ή όχι η σύνδεση και να επηρεάζεται από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται οι κόμβοι και γίνεται η μέτρηση.

Τέλος η ασυμμετρία του υλικού και οι ανωμαλίες της εκπομπής σήματος είναι οι βασικοί λόγοι για την ασυμμετρία των συνδέσεων.

1.6 Παρεμβολές

Οι παρεμβολές είναι ένα εγγενή φαινόμενο των ασύρματων δικτύων, μιας και τα δεδομένα διαμοιράζονται μεταξύ πολλών ασύρματων κόμβων. Μπορούν να είναι είτε εσωτερικές είτε εξωτερικές.

Οι εξωτερικές παρεμβολές μπορούν να προέρχονται από άλλα δίκτυα που βρίσκονται στον ίδιο ή στον γειτονικό χώρο και εκπέμπουν στο ίδιο συχνοτικό εύρος. Επίσης παρεμβολές

μπορούν να προκαλέσουν και οικιακές συσκευές όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων και τα ασύρματα τηλέφωνα. Οι εξωτερικές παρεμβολές μπορούν να έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην σύνδεση μιας και αυξάνουν το ποσοστό των χαμένων πακέτων, το οποίο με την σειρά του προκαλεί αύξηση στις αναμεταδόσεις τους και έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της μεταφοράς δεδομένων (latency). Τέλος οι εξωτερικές παρεμβολές συχνά απλώνονται και σε πολλά γειτονικά συχνοτικά κανάλια πέραν του καναλιού εκπομπής.

Οι εσωτερικές παρεμβολές μπορεί να προκληθούν από παράλληλες μεταδόσεις σήματος από κόμβους που ανήκουν στο ίδιο δίκτυο. Επίσης παρεμβολές μπορεί να προκληθούν ακόμα κι αν οι κόμβοι δεν «βλέπονται» μεταξύ τους. Τέλος παρόλες τις παρεμβολές οι τρεις περιοχές διάδοσης του σήματος μπορούν να αναγνωριστούν.

Οι παρεμβολές μπορούν επίσης να ενισχύουν ή να αποδυναμώνουν το σήμα. Αυτό δεν εξαρτάται από την απόσταση ή τον προσανατολισμό των μεταξύ κόμβων αλλά κυρίως στη φύση της διαδρομής μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη.

2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΚΤΙΜΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

2.1 Βασικά στοιχεία της εκτίμησης ποιότητας σύνδεσης

Η εκτίμηση της ποιότητας μιας σύνδεσης και οι αλγόριθμοι που την υλοποιούν είναι αναπόσπαστο κομμάτι των ασύρματων συνδέσεων. Οι εκτιμητές ποιότητας σύνδεσης συνδυάζονται με τα ανώτερα στρώματα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης προκειμένου να βρίσκονται βέλτιστες διαδρομές για την δρομολόγηση των δεδομένων και να αποφεύγονται διαδρομές με κακή ποιότητα σύνδεσης. Τέλος μηχανισμοί ελέγχου της τοπολογίας μπορούν να κάνουν χρήση αυτών των αλγορίθμων για να εγκαθιστούν νέες σταθερές συνδέσεις ή να αναπροσαρμόζουν υπάρχουσες μεταξύ των κόμβων.

2.2 Βήματα για την αξιολόγηση μιας σύνδεσης

Τα βήματα προκειμένου να γίνει η εκτίμηση της ποιότητας μιας σύνδεσης είναι τρία. Πρώτα γίνεται η παρακολούθηση μίας σύνδεσης μέσα σε ένα παράθυρο w . Έπειτα μετράμε κάποιο χαρακτηριστικό της σύνδεσης ή/και συλλέγουμε κάποια δεδομένα. Τέλος επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει μέσω ενός αλγόριθμου που υλοποιεί κάποιον μετρητή αξιολόγησης σύνδεσης. Μέσα από αυτήν την διαδικασία παράγεται μια εκτίμηση της ποιότητας μιας σύνδεσης.

Η παρακολούθηση μιας σύνδεσης μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους:

- Με ενεργή παρακολούθηση (active link monitoring)
- Με παθητική παρακολούθηση (passive link monitoring)
- Με υβριδική παρακολούθηση (hybrid link monitoring)

Η ενεργή παρακολούθηση της σύνδεσης μπορεί να γίνει με probe πακέτα που στέλνονται στους γειτονικούς κόμβους. Τα probe πακέτα μπορούν είτε να σταλούν broadcast είτε unicast. Τα broadcast probe πακέτα, σε αντίθεση με τα unicast, δεν περιέχουν καμία πληροφορία για την τελική τους λήψη από τον δέκτη (ACK πακέτα), ούτε αναμεταδίδονται. Τα probe πακέτα συνήθως έχουν έναν σταθερό ρυθμό αποστολής που κυμαίνεται ανάμεσα στην ενεργειακή οικονομία του κόμβου (χαμηλός ρυθμός αποστολής) και στην εγκυρότητα της μέτρησης (υψηλός ρυθμός).

Οι ενεργές παρακολουθήσεις συνδέσεων που πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας broadcast πακέτα είναι πιο εύκολες στην υλοποίηση μιας και τα broadcast πακέτα χρησιμοποιούν μικρό overhead σε σχέση με τα unicast. Για αυτό το λόγο πολλά δικτυακά πρωτόκολλα και μηχανισμοί βασίζονται σε αυτήν την παρακολούθηση. Από την άλλη η παρακολούθηση με unicast πακέτα επιτρέπει πιο ακριβή μέτρηση της ποιότητας καθώς αναπαριστά κανονική δικτυακή κίνηση δεδομένων. Ωστόσο θεωρείται αρκετά δαπανηρή λόγω των overhead που χρησιμοποιεί.

Η παθητική παρακολούθηση της σύνδεσης, αντίθετα με την ενεργή παρακολούθηση, χρησιμοποιεί υπάρχουσα κίνηση του δικτύου χωρίς να δημιουργεί επιπλέον overhead στην επικοινωνία. Είναι πολύ αποδοτικό ενεργειακά και λόγω αυτού έχει ευρεία χρήση. Ωστόσο όταν το δίκτυο λειτουργεί σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης πακέτων ή η κίνησή του δεν είναι

ισορροπημένη μπορεί να οδηγήσει σε μη επίκαιρες μετρήσεις. Κατά συνέπεια μπορεί να οδηγήσει και σε ανακριβείς εκτιμήσεις της ποιότητας της σύνδεσης.

Η υβριδική παρακολούθηση της σύνδεσης είναι ένας συνδυασμός της ενεργής και παθητικής παρακολούθησης και μπορεί να οδηγήσει σε μια αποδοτική ισορροπία μεταξύ των επίκαιρων μετρήσεων και της ενεργειακής απόδοσης.

Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών γίνεται με την λήψη διάφορων χρήσιμων μετρήσεων είτε από τα πακέτα δεδομένων/ACK που έχουν ληφθεί είτε από πακέτα που έχουν σταλθεί. Δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από πακέτα δεδομένων ή πακέτα ACK που έχουν ληφθεί, όπως αριθμοί μιας ακολουθίας, time stamp, RSSI, και LQI, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εκτιμητών ποιότητας σύνδεσης που υλοποιούνται στην πλευρά του δέκτη. Από την άλλη, δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από πακέτα που έχουν σταλεί, όπως αριθμοί μιας ακολουθίας, timestamp και ο αριθμός ξανασταλμένων πακέτων, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εκτιμητών ποιότητας σύνδεσης που υλοποιούνται στην πλευρά του παραλήπτη.

Με βάση τις μετρήσεις της σύνδεσης που έχουν συγκεντρωθεί, υπολογίζεται κάποιος εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης προκειμένου να παραχθεί μια εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης. Ο κάθε εκτιμητής (στην πλειοψηφία τους) είναι σχεδιασμένος σύμφωνα με κάποια τεχνική εκτίμησης, η οποία μπορεί να είναι από ένας απλός μέσος όρος ή και μια πιο εξεζητημένη τεχνική όπως το φιλτράρισμα, η εκμάθηση, η αναδρομή κ.α.

2.3 Βασικά στοιχεία των Εκτιμητών Ποιότητας Σύνδεσης

Η εκτίμηση της ποιότητας των συνδέσεων έχει αρκετές προϋποθέσεις προκειμένου να είναι αποδοτική:

- Πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτική. Αυτό επιτυγχάνεται με το να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο overhead στην επικοινωνία και να είναι υπολογιστικά οικονομική.
- Να είναι ακριβείς, δηλαδή να χαρακτηρίζει σωστά την κατάσταση της σύνδεσης. Με το να είναι ακριβείς αυξάνεται η αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.
- Να έχει γρήγορη αντίδραση, δηλαδή να αναγνωρίζει τις εναλλαγές στην ποιότητα της σύνδεσης και να αντιδρά σε αυτές. Η ταχύτητα της αντίδρασης του εκτιμητή εξαρτάται από δύο παράγοντες: το παράθυρο εκτίμησης w και τον τρόπο παρατήρησης της σύνδεσης. Επίσης υπάρχουν εκτιμητές που λόγω της φύσης τους έχουν πιο γρήγορη αντίδραση από άλλους όπως οι εκτιμητές που υλοποιούνται στην πλευρά του αποστολέα που είναι πιο αντιδραστικοί από τους εκτιμητές που υλοποιούνται στην πλευρά του δέκτη.
- Να έχει σταθερότητα, δηλαδή να έχει την ικανότητα να δείχνει ανοχή σε σύντομες διακυμάνσεις στην ποιότητα της σύνδεσης. Αυτό επιτυγχάνεται στις μετρήσεις μεγάλης διάρκειας.

Όπως φαίνεται όταν η σταθερότητα αυξάνεται σε έναν εκτιμητή, η αντιδραστικότητα μειώνεται και αντίστροφα.

3. ΕΚΤΙΜΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (Link Quality Estimators)

Ο ακριβής προσδιορισμός της ποιότητας σύνδεσης είναι πολύ σημαντικός για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των κύριων λειτουργιών των ασύρματων δικτύων (όπως τα : intelligent routing, load-balancing, power control και frequency selection). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των Εκτιμητών Ποιότητας Σύνδεσης (LQES).

3.1 LQEs Βασισμένοι στο υλικό

Τρεις LQEs (Link Quality Estimators) ανήκουν σε αυτή την οικογένεια: RSSI, LQI, SNR. Οι εκτιμητές αυτοί υπολογίζονται απευθείας από τον δέκτη. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι δεν απαιτούν περεταίρω υπολογισμούς και αποτελούν ένα γρήγορο και φθινό τρόπο αξιολόγησης μιας σύνδεσης ως καλή ή κακή. Ωστόσο το αν είναι η όχι επαρκείς στην εκτίμηση της ποιότητας μια σύνδεσης έχει υπάρξει θέμα πολλών ερευνητικών μελετών.

Οι LQEs που είναι βασισμένοι στο υλικό μοιράζονται κάποιους περιορισμούς. Αρχικά, τα metric αυτά υπολογίζονται μόνο για επιτυχώς ληφθέντα πακέτα. Έτσι, όταν μια σύνδεση υποφέρει από χαμηλό ποσοστό packet loss (χαμένων πακέτων), οι παραπάνω εκτιμητές πιθανόν να υπερεκτιμήσουν την ποιότητα σύνδεσης μη λαμβάνοντας υπόψιν την ποσότητα πληροφορίας των χαμένων πακέτων. Εκτός αυτού, παρά το γεγονός ότι παρέχουν έναν γρήγορο και χαμηλού κόστους τρόπο ταξινόμησης των συνδέσεων είτε ως καλές, είτε ως κακές, δεν είναι ικανοί να δώσουν μια λεπτομερειακή εκτίμηση της ποιότητας σύνδεσης.

Οι παραπάνω περιορισμοί των εκτιμητών ποιότητας σύνδεσης που είναι βασισμένοι στο υλικό δεν σημαίνουν ότι αυτή η κατηγορία LQEs δεν είναι χρήσιμη. Στην πραγματικότητα, καθένας εκ των παραπάνω εκτιμητών παρέχει κάποια συγκεκριμένη πληροφορία για την κατάσταση της σύνδεσης, χωρίς ωστόσο να είναι ικανός να δώσει ένα συνολικό χαρακτηρισμό της ποιότητας της.

3.1.1 RSSI

Οι περισσότεροι ράδιο - πομποδέκτες, είναι εφοδιασμένοι με ένα μετρητή RSSI. Αυτός ο μετρητής περιγράφει την ισχύ του σήματος του ληφθέντος πακέτου κατά τη μετάδοση. Όταν δεν υπάρχουν μεταδόσεις, ο μετρητής αυτός δίνει το επίπεδο θορύβου (noise floor). Ο συγκεκριμένος εκτιμητής δίνει μια γρήγορη και ακριβή περιγραφή για το αν η σύνδεση είναι πολύ καλής ποιότητας ή όχι (μέσα στην περιοχή σύνδεσης).

Το RSSI είναι μια αδιάστατη ποσότητα (dimensionless quantity) η οποία αντιπροσωπεύει την ισχύ του σήματος που παρατηρείται στην κεραία του δέκτη κατά τη διάρκεια της λήψης ενός πακέτου. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως και R_{max} . Η μέγιστη τιμή εξαρτάται από το κύκλωμα και την τεχνολογία της ασύρματης κάρτας που χρησιμοποιείται.

Μια τυπική μέτρηση του RSSI περιλαμβάνει την ενέργεια της συγκεκριμένης/ στοχευμένης μετάδοσης, τον εξωτερικό θόρυβο και την ενέργεια από ταυτόχρονα παρεμβαλλόμενες μεταδόσεις. Για την αποφυγή προσωρινών κορυφών (μεγίστων ακροτάτων) στην τιμές του RSSI των σημάτων που λαμβάνονται, οι περισσότερες WiFi κάρτες διατηρούν ένα σταθμισμένο κινούμενο μέσο όρο WMA (weighted moving average):

$$RSSI_{new\ ave} = RSSI_{old\ ave} * X + RSSI_{last\ measured} * Y$$

Σαν παράδειγμα, για τις κάρτες Intel-2915, έχουμε: $X = 0.9$ and $Y = 0.1$.

Η τιμή του RSSI που υπολογίζεται από τη λήψη ενός πακέτου, αναπαριστά τη ληφθείσα ισχύ σήματος μόνο κατά τη διάρκεια της λήψης του PCLP (Physical Layer Convergence Protocol) preamble και της PLCP header. Το PCLP preamble επιτρέπει το συγχρονισμό του παραλήπτη(δέκτη) με τον αναμεταδότη(πομπό). Προσπάθεια για αποκωδικοποίηση του πακέτου γίνεται μόνο κατά την επιτυχή λήψη του PLCP header. Σε περίπτωση που η λήψη του PLCP αποτύχει λόγω παρεμβολών, το RSSI απλά δεν θα καταγραφεί. Επιπρόσθετα, ακόμα και αν το υπόλοιπο μέρος του πακέτου (πέραν του PLCP) επηρεαστεί από παρεμβολές, η τιμή του RSSI θα παραμείνει σχετικά σταθερή, καθώς υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του PLCP. Με άλλα λόγια, και σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11 (a, b ή g), το RSSI δεν είναι ο μέσος όρος της ισχύς του σήματος που μετρείται κατά τη λήψη ολόκληρου του πακέτου. Σαν παράδειγμα, μπορεί να θεωρηθεί η ακραία περίπτωση όπου ο εξωτερικός θόρυβος και οι παρεμβολές επηρεάζουν μόνο το μέσο όρο της ληφθείσας ισχύς σήματος της κατά πολύ μεγαλύτερης ποσότητας δεδομένων του πλαισίου PPDU. Σε αυτή την περίπτωση, η επίδραση των παρεμβολών δεν αποτυπώνεται στην μέτρηση του RSSI.

Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα, ότι το RSSI είναι ακατάλληλο για χρήση σαν ένα stand-alone metric. Κρίνεται επίσης ως αναποτελεσματικό για την ακριβή ποσοτικοποίηση της ποιότητας σύνδεσης, ειδικά σε υψηλές συχνότητες μετάδοσης δεδομένων, αφού δεν συλλεγεί το ποσοστό της καταστροφικής παρεμβολής των σημάτων.

3.1.2 LQI

Ο εκτιμητής LQI (Link Quality Indicator) αποτελεί μια στατιστική τιμή και είναι ένα metric της ισχύουσας ποιότητας του ληφθέντος σήματος. Ο LQI δίνει μια εκτίμηση του κατά πόσο εύκολα ή δύσκολα ένα σήμα που έχει ληφθεί μπορεί να αποδιαμορφωθεί υπολογίζοντας το μέγεθος λάθους μεταξύ αυτού και ενός ιδανικού, ελέγχοντας τα 64 σύμβολα που ακολουθούν τη λέξη συγχρονισμού (sync word). Ο δέκτης μετράει τη συχνότητα του κάθε bit και τη συγκρίνει με την αναμενόμενη συχνότητα βασιζόμενος στη συχνότητα εκπομπής του καναλιού και την απόκλιση από αυτήν.

Με βάση τον LQI μπορεί να προσδιορίσει αν η σύνδεση είναι πολύ καλής ποιότητας ή όχι. Ωστόσο, δεν αποτελεί αξιόπιστο δείκτη για συνδέσεις μέτριας ποιότητας λόγω της υψηλής του διακύμανσης, εκτός και αν αυτή εξομαλυνθεί μέσω πλήθους επαναληπτικών μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, για πολύ υψηλές τιμές του LQI, όπου η ποιότητα σύνδεσης χαρακτηρίζεται ως τέλεια, η διακύμανση του συγκεκριμένου εκτιμητή βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα ακόμα και μια μόνο μέτρηση να είναι επαρκής. Από την άλλη, για τιμές του LQI που ανταποκρίνονται σε συνδέσεις ενδιάμεσης ποιότητας, η διακύμανση του

metric ανεβαίνει σε σημαντικό επίπεδο, καθιστώντας μη επαρκή μια μέτρηση για τον ακριβή χαρακτηρισμό της ποιότητας του σήματος.

3.1.3 SNR

Ο SNR (Signal to Noise Ratio) είναι ένας εκτιμητής που συγκρίνει την ένταση του επιθυμητού σήματος σε σχέση με τον θόρυβο του περιβάλλοντος και μετριέται σε ντεσιμπέλ (dB). Όταν η αναλογία είναι μεγαλύτερη του 1:1 (μεγαλύτερη του 0dB) σημαίνει ότι το σήμα είναι πιο ισχυρό από τον θόρυβο. Ο τύπος του SNR δίνεται παρακάτω:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

, όπου το P είναι ο μέσος όρος της δύναμης.

Ο SNR είναι ένας καλός εκτιμητής του PRR αλλά δεν είναι ακριβής, ιδικά για συνδέσεις μέτριας ποιότητας και έχειδειχθεί ότι αλλαγές στο PRR μπορούν να συνδέονται με αλλαγές στο SNR. Ωστόσο έχειδειχθεί ότι ο SNR απόμόνος του δεν είναι αρκετά καλός εκτιμητής και λειτουργεί καλύτερα μαζί με το PRR. Επίσης ο SNR είναι καλύτερος εκτιμητής από τον RSSI καθώς ο δεύτερος μετράει το άθροισμα του σήματος του πομπού και του θορύβου του περιβάλλοντος ενώ ο πρώτος μετράει τη δύναμη του σήματος του πομπού προς τον θόρυβο του περιβάλλοντος.

3.2 LQEs Βασισμένοι στο λογισμικό

Οι εκτιμητές ποιότητας σύνδεσης που βασίζονται στο λογισμικό μπορούν να καταχωρηθούν σε τρεις κατηγορίες. Τους βασισμένους στο PRR που είτε το υπολογίζουν είτε το προσεγγίζουν. Τους βασισμένους στο RNP που είτε το υπολογίζουν είτε το προσεγγίζουν. Τους βασισμένους σε score οι οποίοι παρέχουν μια τιμή μέσα από μια κλάση τιμών προκειμένου να γίνει η εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης.

3.2.1 ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ PRR

PRR

Ο PRR (Packet Reception Ratio) είναι ένας εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης στην πλευρά του δέκτη. Είναι εύκολος στον υπολογισμό και έχει ευρεία χρήση στα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ο τύπος του δίνεται παρακάτω:

$$PRR_w = \frac{\text{Πακέτα που παραλήφθηκαν}}{\text{Συνολικός αριθμός πακέτων που στάλθηκαν}}$$

, όπου w το παράθυρο δειγματοληψίας.

Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί μαζί με εκτιμητές βασισμένους στο υλικό προκειμένου να τους αξιολογήσει. Στην πραγματικότητα οι εκτιμητές που βασίζονται στο υλικό όταν συνδυάζονται με το PRR θεωρούνται καλοί εκτιμητές.

Ωστόσο η αποδοτικότητα του PRR εξαρτάται από το παράθυρο δειγματοληψίας. Έχειδειχθεί ότι για συνδέσεις με πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές του PRR η ακριβής εκτίμησή τους μπορεί να γίνει μέσα σε μικρά παράθυρα δειγματοληψίας. Αντίθετα, σε συνδέσεις με μέτριες τιμές του PRR χρειάζονται πολύ μεγαλύτερα παράθυρα δειγματοληψίας προκειμένου να γίνει καλός χαρακτηρισμός τους.

Στόχος των LQEs που χρησιμοποιούν τον PRR στις εκτιμήσεις τους είναι να παρέχουν μια ποιο αποδοτική εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης από τον PRR.

WMEWMA

Ο WMEWMA (Window Mean Exponentially Weighted Moving Average - Μέσος όρος παραθύρου με εκθετικά σταθμισμένο κινητό μέσο όρο) είναι ένας εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης, ο οποίος υπολογίζεται στην πλευρά του δέκτη σε πακέτα που έχουν ήδη ληφθεί και βασίζεται στο passive monitoring.

Το φίλτρο EWMA χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των τιμών του PRR, προσφέροντας ένα metric που αντιστέκεται στην παροδική διακύμανση του PRR. Ωστόσο ανταποκρίνεται σε σημαντικές αλλαγές της ποιότητας σύνδεσης. Ο WMEWMA δίνεται από τον τύπο:

$$WMEWMA(a, w) = a * WMEWMA + (1 - a) * PRR$$

όπου $a \in [0..1]$ ο παράγοντας εξομάλυνσης (smoothing factor). Ο συγκεκριμένος παράγοντας επιτρέπει να δοθεί περισσότερη σημασία στην τωρινή τιμή του PRR (με $a < 0.5$) ή στην τελευταία υπολογισμένη τιμή του WMEWMA (με $a > 0.5$).

Για την εκτίμηση της απόδοσης του WMEWMA, εισήχθησαν μια σειρά από LQEs που προσεγγίζουν τον PRR χρησιμοποιώντας τεχνικές φιλτραρίσματος διαφορετικές του EWMA. Ύστερα ακολουθήσε σύγκριση του WMEWMA με αυτούς τους εκτιμητές που βασίζονται σε φίλτρα, όσον αφορά στην (i) ικανότητα αντίδρασης τους εκτιμώμενη από το χρονικό παράθυρο της μέτρησης, (ii) ακρίβεια εκτιμώμενη από το μέσο τετραγωνικό λάθος/ μέση τετραγωνική απόκλιση (mean squared error/ mean squared deviation), (iii) σταθερότητα εκτιμώμενη από το συντελεστή μεταβολής, και (iv) αποδοτικότητα εκτιμώμενη από υπολογιστική πολυπλοκότητα. Το αποτέλεσμα της παραπάνω σύγκρισης ήταν ότι ο WMEWMA αποδίδει πολύ καλύτερα από τους άλλους LQEs που βασίζονται σε φίλτρα.

EWMA Filter

Το EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) είναι ένα φίλτρο το οποίο εφαρμόζει συντελεστές βαρύτητας οι οποίοι μειώνονται εκθετικά, χωρίς ωστόσο να φτάνουν στην τιμή μηδέν. Το φίλτρο EWMA περιέχει τη λέξη exponential (εκθετικά) καθώς κάθε νέα φιλτραρισμένη έξοδος χρησιμοποιεί αποτελεσματικά όλες τις προηγούμενες τιμές, με τα εκθετικά φθίνοντα βάρη. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα της φόρμουλας για τον υπολογισμό του επόμενου αποτελέσματος.

Το EWMA για μια σειρά Y μπορεί να υπολογιστεί αναδρομικά:

όπου για $t = 1$, $S_1 = Y_1$

και για $t > 1$, $S_t = a * Y_t + (1 - a) * S_{t-1}$

- Ο συντελεστής a αναπαριστά το βαθμό της μείωσης της βαρύτητας, ένας σταθερός παράγοντας εξομάλυνσης, που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Υψηλότερες τιμές του a προεξοφλούν τις παλαιότερες τιμές γρηγορότερα.
- Y_t είναι η τιμή σε μια δοσμένη χρονική στιγμή t .
- S_t είναι η τιμή του EWMA σε μια δοσμένη χρονική στιγμή t .

Το S_1 μπορεί να αρχικοποιηθεί με έναν αριθμό διαφορετικών τρόπων, κυρίως θέτοντας το ίσο με το Y_1 , όπως φαίνεται παραπάνω. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες τεχνικές, όπως το να τεθεί ίσο με το μέσο όρο των πρώτων 4 ή 5 μετρήσεων/ παρατηρήσεων. Η σημασία της επίδρασης αρχικοποίησης του S_1 στον επακόλουθο κινητό μέσο όρο (moving average), εξαρτάται από το a . Μικρότερες τιμές για το a καθιστούν την επιλογή του S_1 σχετικά πιο σημαντική από υψηλότερες τιμές.

KLE

Ο KLE (Kalman Link Estimator - εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης που βασίζεται στο φίλτρο του Κάλμαν) είχε προταθεί για να αντιμετωπιστεί η φτωχή αντίδραση στις χρονικές μεταβολές των LQEs που βασίζονται στον μέσο όρο, συμπεριλαμβανομένου του PRR. Στόχος του KLE είναι να παρέχει εκτίμηση ποιότητας σύνδεσης βασισμένος στην λήψη ενός μόνο πακέτου αντί να περιμένει για την λήψη ενός συγκεκριμένου αριθμού πακέτων μέσα σε ένα χρονικό παράθυρο και μετά να υπολογίζει τον μέσο όρο. Όταν δεχθεί κάποιο πακέτο εξάγετε το RSS (Δύναμη Σήματος στον Δέκτη) και περνάει μέσα από ένα φίλτρο Κάλμαν το οποίο παράγει μία εκτίμηση του RSS. Έπειτα αφαιρώντας την βάση του θορύβου (white noise, burst noise, atmospheric noise, background noise, cosmic noise) από την εκτίμηση του RSS παίρνουμε μια εκτίμηση του SNR. Χρησιμοποιώντας μια καμπύλη PRR-SNR που έχει προϋπολογιστεί στην πλευρά του δέκτη, η εκτίμηση του SNR ανταποκρίνεται σε μια εκτίμηση του PRR η οποία αντιπροσωπεύει την εκτίμηση του KLE.

Μέσα από πειράματα έχουμε δει ότι ο KLE είναι ποιο αποτελεσματικός σε συνδέσεις που η ποιότητά τους μεταβάλετε γρήγορα απ' ότι ο PRR. Ωστόσο δεν έχει γίνει έλεγχος κατά πόσο αυτές οι εκτιμήσεις του είναι ακριβείς.

3.2.2 ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ RNP

RNP

Ο RNP (Required Number of Packet transmissions) είναι ένας εκτιμητής ποιότητας σήματος στην πλευρά του αποστολέα ο οποίος μετράει τον μέσο αριθμό που χρειάζεται ένα πακέτο να μεταδοθεί/αναμεταδοθεί μέχρι να γίνει η λήψη του. Υπολογίζεται ως ο αριθμός των πακέτων που έχουν μεταδοθεί/αναμεταδοθεί σε ένα παράθυρο εκτίμησης, διαιρούμενος με τον αριθμό που λήφθηκαν επιτυχώς, μείον 1 (προκειμένου να εξαιρέσουμε την πρώτη αποστολή). Ο RNP χρησιμοποιεί ένα ARQ (Automatic Repeat Request)

πρωτόκολλο στο επίπεδο σύνδεσης.

Παρόμοιος εκτιμητής με τον RNP είναι ο ARR (Ρυθμός Αποδοχής πακέτων ACK). Υπολογίζεται ως ο αριθμός των πακέτων ACK που λήφθηκαν προς τον συνολικό αριθμό πακέτων που στάλθηκαν μέσα σε ένα παράθυρο εκτίμησης.

Ο Cerpa [2005] υποστήριξε ότι ο RNP είναι καλύτερος για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας της σύνδεσης. Ο PRR, σε αντίθεση με τον RNP, προσφέρει μια πιο χοντροκομμένη εκτίμηση της ποιότητας σύνδεσης μιας και δεν λαμβάνει υπόψιν του την υποκείμενη κατανομή των απωλειών των πακέτων. Ωστόσο ο RNP έχει το μειονέκτημα ότι είναι εξαιρετικά ασταθής και δεν μπορεί να προσεγγίσει αξιόπιστα την παράδοση των πακέτων σύνδεσης, κυρίως λόγω της ασυμμετρίας των συνδέσεων.

ETX

Ο ETX (Expected Transmission Count) είναι ένας εκτιμητής στην πλευρά του δέκτη και χρησιμοποιεί active monitoring. Λαμβάνει υπόψιν του την ασυμμετρία των συνδέσεων αφού υπολογίζεται ως το αντίστροφο του αποτελέσματος του ρυθμού παράδοσης από τον αποστολέα στον δέκτη, d_f συν τον αντίστροφο ρυθμό παράδοσης (από τον δέκτη στον αποστολέα), d_b . Το d_b αναφέρετε στο PRR και υπολογίζεται βάση των πακέτων που λήφθηκαν. Το d_f αναφέρετε στο ARR και υπολογίζεται βάση των πακέτων ACK που λήφθηκαν. Ωστόσο το d_f μπορεί να υπολογιστεί και ως PRR αν χρησιμοποιούνται probe πακέτα που δεν γίνονται ACK ή αν ο ETX υπολογίζεται σε passive monitoring. Ο τύπος που το υπολογίζει είναι ο:

$$ETX = \frac{1}{PRRd_f + PRRd_b}$$

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στον εκτιμητή ETX προσφέρουν διαδρομές υψηλού throughput σε ασύρματα δίκτυα πολλών διαδρομών μιας και ο ETX ελαχιστοποιεί τον αναμενόμενο συνολικό αριθμό μετάδοσης πακέτων που απαιτείτε προκειμένου να παραδοθεί ένα πακέτο στον προορισμό του. Έχει αποδειχθεί ότι ο ETX που βασίζεται σε passive monitoring αποτυγχάνει σε υπερφορτωμένα (congested) δίκτυα. Η μεγάλη κίνηση (4 πακέτα/δευτερόλεπτο) οδηγεί σε υπερφορτωμένα δίκτυα κι οπότε μπορεί να παρατηρηθούν απώλειες στα πακέτα και κατά συνέπεια μεγάλος αριθμός κόμβων δεν είναι δυνατόν να υπολογίσει τον ETX μιας και δεν δέχεται πακέτα.

LI

Ο LI (Link Inefficiency - Αναποτελεσματικότητα Σύνδεσης) είναι ένας εκτιμητής που βασίζεται στο RNP. Υπολογίζεται ως το αντίστροφο της πιθανότητας να ληφθεί επιτυχώς ένα πακέτο (PSP-packet success probability). Ο PSP είναι ένας εκτιμητής που βασίζεται στον PRR. Ο PSP προτάθηκε ως μια λύση αντί του PRR καθώς για να έχουμε μια καλή εκτίμηση του PRR χρειάζεται η αποστολή και λήψη πολλών πακέτων οπότε και μεγάλο παράθυρο εκτίμησης. Αυτό επιβάλλει τους κόμβους να λειτουργούν κάτω από κύκλους μεγάλου υπολογιστικού

φόρτου το οποίο δεν είναι επιθυμητό για ενεργειακά περιορισμένα δίκτυα. Το PSP υπολογίζεται από μια αναλυτική έκφραση που αποτυπώνει το μέσο SNR στο PSP. Ωστόσο φαίνεται ότι η αποτύπωση του μέσου SNR σε μια προσέγγιση του PRR ενδέχεται να οδηγήσει σε ασταθείς εκτιμήσεις. Οπότε η χρήση του PSP αντί του PRR ίσως τελικά είναι ακατάλληλη για την εκτίμηση ποιότητας σύνδεσης.

Four-Bit

Ο Four-Bit δεν είναι μόνο ένας εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης. Έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται από πρωτόκολλα δρομολόγησης και να προσφέρει τέσσερα bits πληροφορίας τα οποία συλλέγονται από διαφορετικά επίπεδα.

i) Το white bit είναι από το φυσικό επίπεδο και επιτρέπει την γρήγορη εκτίμηση μιας καλής σύνδεσης από την λήψη ενός πακέτου μόνο.

ii) Το ack bit είναι από το επίπεδο σύνδεσης και υποδεικνύει αν έχει γίνει αποδοχή των πακέτων που έχουν σταλεί (ACK packet).

iii-iv) Το rin bit και το compare bit είναι από το επίπεδο δικτύου και χρησιμοποιούνται στον πίνακα πολιτικής αντικατάστασης γείτονα.

Ο four-bit υπολογίζει την ποιότητα σύνδεσης σαν μια προσέγγιση του αριθμού της επαναληπτικής αποστολής πακέτου χρησιμοποιώντας δύο εκτιμητές τους οποίους περνάει μέσα από ένα φίλτρο EWMA. Ο πρώτος εκτιμητής είναι ο RNP και υπολογίζεται βάση των πακέτων που μεταδόθηκαν και κάνει εκτίμηση της σύνδεσης από τον αποστολέα προς τον δέκτη. Ο δεύτερος εκτιμητής είναι ο αντίστροφος του WMEWMA μείον 1. Υπολογίζεται βάση των ληφθέντων beacon πακέτων και κάνει εκτίμηση της σύνδεσης από τον δέκτη στον αποστολέα.

Όπως συμπεραίνουμε ο four-bit είναι ένας εκτιμητής και στην πλευρά του δέκτη και του αποστολέα οπότε λαμβάνει υπόψιν του και την ασυμμετρία των συνδέσεων. Επίσης χρησιμοποιεί και passive monitoring (κίνηση πακέτων δεδομένων) και active monitoring (κίνηση πακέτων beacon).

Έχει δειχθεί, μέσα από πειράματα σε πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούν δεντρική δομή για τους κόμβους, ότι ο four-bit από θέμα κόστους (ο συνολικός αριθμός των μεταδόσεων για κάθε πακέτο), βάθους δένδρου δρομολόγησης και ρυθμού αποστολής είναι πιο αποδοτικός από άλλους όπως ο ETX και ο LQI.

L-NT και L-ETX

Οι L-NT και L-ETX είναι δύο εκτιμητές ποιότητας σύνδεσης στην πλευρά του αποστολέα και υπολογίζουν μια προσέγγιση του RNP. Ο L-NT μετράει τον αριθμό των αποστολών που χρειάζεται ώστε να ληφθεί ένα πακέτο από τον δέκτη και έπειτα τον περνάει μέσα από ένα EWMA φίλτρο. Αντίστοιχα ο L-ETX πρώτα υπολογίζει τον ρυθμό του αριθμού των πακέτων ACK προς τον συνολικό αριθμό των πακέτων που στάλθηκαν μέσα σε ένα παράθυρο μέτρησης. Έπειτα προσθέτει το EWMA φίλτρο και αντιστρέφει το αποτέλεσμα.

Μετά από πειράματα έχει δειχθεί ότι ο L-ETX είναι πιο ακριβής στον υπολογισμό του

ETX από τον L-NT. Είναι επίσης ποιο σταθερός. Αυτό ωστόσο δεν σημαίνει ότι ο L-ETX είναι ακριβής στην εκτίμηση μιας σύνδεσης καθώς ο ETX δεν είναι μια αντικειμενική μέθοδος μέτρησης. Έχειδειχθεί επίσης ότι ο L-NT, όταν χρησιμοποιείται σαν μέθοδος μέτρησης για δρομολόγηση, καταφέρνει να είναι ποιο ενεργειακά αποδοτικός από τον L-ETX και να έχει μεγαλύτερο ρυθμό αποστολής δεδομένων.

3.2.3 ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ SCORE

Κάποιοι εκτιμητές ποιότητας σύνδεσης προσφέρουν μια εκτίμηση σύνδεσης η οποία δεν συσχετίζεται με κάποιο φυσικό φαινόμενο (όπως πχ. η αποστολή και η λήψη πακέτων). Αντ' αυτού προσφέρουν ένα score ή ένα χαρακτηρισμό (ταμπέλα) τα οποία είναι ορισμένα μέσα σε συγκεκριμένα όρια.

MetricMap

Ο MetricMap προτάθηκε σαν εναλλακτικός LQE για το MintRoute, ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, όταν το κανονικό του LQE, ο ETX, αδυνατεί να βρει διαδρομή. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν ένας κόμβος δεν μπορεί να βρει κάποια διαδρομή μέσω του MintRoute. Ο MetricMap χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ταξινόμησης προκειμένου να ταξινομήσει τη σύνδεση σε κάποια κλάση (πχ. “Καλή”, “Κακή”). Αυτός ο αλγόριθμος έχει σαν είσοδο έναν πίνακα χαρακτηριστικών, ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο εκτιμητών ποιότητας σύνδεσης, συμπεριλαμβανομένου του RSSI, της εκτίμησης του φόρτου του ασύρματου καναλιού και το πόσοι ενδιάμεσοι κόμβοι υπάρχουν από αυτόν που γίνεται η μέτρηση μέχρι τον sink. Επίσης βασίζεται σε μια χρονική περίοδο εκπαίδευσης, η οποία γίνεται με μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει δείγματα εκπαίδευσης. Το κάθε δείγμα περιλαμβάνει έναν πίνακα χαρακτηριστικών και μια αντίστοιχη κλάση χαρακτηρισμών – ταμπελών.

Έχειδειχθεί ότι ο MetricMap σε συνδυασμό με τον ETX βελτιώνει την απόδοση του δικτύου όσον αφορά τον ρυθμό παράδοσης πακέτων και τη ισχύ μεταχείριση των κόμβων καθώς μετράει και την αστάθεια στον ρυθμό παράδοσης των πακέτων σε όλους τους κόμβους.

Παρόλα αυτά ο MetricMap μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σαν συμπληρωματικός εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης λόγω του ότι χρησιμοποιεί αλγόριθμους εκμάθησης οι οποίοι είναι ακριβοί υπολογιστικά.

WRE

Ο WRE (Weighted Regression Estimator – Αναδρομικός Εκτιμητής Βαρών) βασίστηκε πάνω στην ιδέα ότι η δύναμη του σήματος σχετίζεται με την απόσταση. Αυτή η παρατήρηση γενικεύτηκε στο σημείο ότι ο κόμβος μπορεί να εκτιμήσει την ποιότητα της σύνδεσης με τον γειτονικό κόμβο με βάση την μεταξύ τους απόσταση. Κατά συνέπεια από τον WRE προκύπτει μια πολύπλοκη αναδρομική συνάρτηση βασισμένη σε έναν πίνακα ως είσοδο ο οποίος

περιέχει κόμβους με τις αποστάσεις τους και την ποιότητα της σύνδεσής τους. Αυτή η συνάρτηση αναπτύσσεται και ενημερώνεται συνεχώς από τις πληροφορίες νέων εισόδων. Όταν υπολογιστεί, αυτή η συνάρτηση επιστρέφει μια εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης λαμβάνοντας υπόψιν την θέση του γειτονικού κόμβου.

Η αποδοτικότητα του WRE αξιολογήθηκε σε συγκρίσεις με τον WMEWMA χρησιμοποιώντας τεχνικές αξιολόγησης όπου ο PRR θεωρείται αντικειμενικός εκτιμητής ποιότητας δικτύων. Οι Xu και Lee δείξαν ότι ο WRE είναι πιο ακριβής από τον WMEWMA. Παρόλα αυτά ο WRE είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος και χρειάζεται πολύ υπολογιστική ισχύς. Επίσης ο WRE υποθέτει ότι η ποιότητα της σύνδεσης είναι συσχετισμένη με την απόσταση, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα σωστό, όπως έχουν δείξει πολλές εμπειρικές μελέτες (κυρίως σε δίκτυα χαμηλής ενέργειας).

F-LQE

Ο F-LQE (Fuzzy Link Quality Estimator) είναι ένας εκτιμητής στην πλευρά του δέκτη. Σε αντίθεση με τους υπάρχοντες LQEs, που μετράνε μόνο ένα στοιχείο της σύνδεσης οπότε έχουμε και μονομερή εκτίμηση του δικτύου, ο F-LQE υπολογίζει την ποιότητα της σύνδεσης με την βοήθεια τεσσάρων στοιχείων της σύνδεσης προκειμένου να προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της σύνδεσης. Αυτά είναι τα SPRR (Smoothed Packet Reception Ratio), SF (Stability Factor), ASL (Link Asymmetry Level) και ASNR (Average Signal to Noise Ratio). Αυτά τα στοιχεία ορίζονται με γλωσσολογικό τρόπο (πχ. υψηλό SF, χαμηλό ASL). Έπειτα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του fuzzy εκτιμητή συνδυάζονται και βγάζουν ένα συνολικό αποτέλεσμα (score). Τα αποτελέσματα κοντά στο 1/0 είναι συνώνυμα με την καλή/κακή ποιότητα σύνδεσης. Τα αποτελέσματα εξομαλύνονται χρησιμοποιώντας ένα EWMA φίλτρο προκειμένου να προσφέρουν σταθερές εκτιμήσεις της ποιότητας της σύνδεσης.

Έχει δειχθεί ότι ο F-LQE συγκριτικά με τους PRR, WMEWMA, ETX, RNP και Four-Bit έχει καλύτερη απόδοση καθώς μετράνε μόνο ένα χαρακτηριστικό της σύνδεσης σε αντίθεση με τον F-LQE που μετράει τέσσερα. Ωστόσο λόγω αυτού του χαρακτηριστικού έχει μεγαλύτερη κατανάλωση πόρων ως προς την μνήμη και την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

4. Μετρήσεις LQEs και κίνηση router

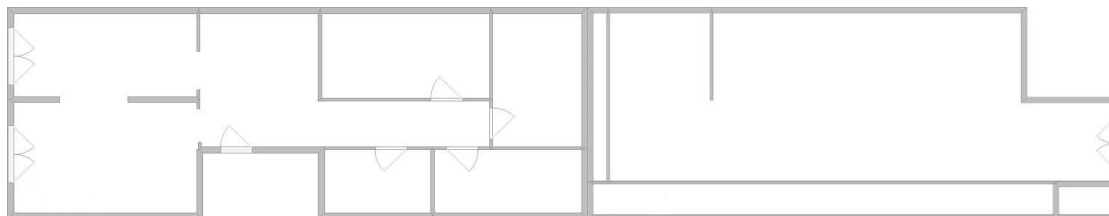
4.1 Testbed

Το testbed αποτελείται από τρία laptop – κόμβους(nodes), τα Source, Router και Destination. Ο κόμβος “Source” είναι ένα Toshiba Satellite C660-11H, εξοπλισμένο με την ασύρματη κάρτα δικτύου Realtek Semiconductor RTL8188CE WiFi Adapter, ο κόμβος “Router” είναι ένα Toshiba Satellite C855D-13W, εξοπλισμένο με την ασύρματη κάρτα δικτύου Realtek Semiconductor RTL8723AE Wireless Network Adapter, και ο κόμβος “Destination” είναι ένα Dell Latitude E5540, εξοπλισμένο με την ασύρματη κάρτα δικτύου Intel Corporation Wireless 7260. Οι κόμβοι “Source” και “Router” τρέχουν το λειτουργικό σύστημα Linux Debian 8.7 με εκδόσεις kernel 3.16 και 4.9 αντίστοιχα, ενώ ο κόμβος “Destination”, το λειτουργικό σύστημα Linux Ubuntu 14.04 με έκδοση kernel 4.4.

Οι κόμβοι αυτοί υλοποιούν ένα ασύρματο δίκτυο με ESSID “wifibot”, σε mode Ad-Hoc, το οποίο βασίζεται στο πρωτόκολλο IEEE 802.11bgn, στο channel 1. Για τους τρεις κόμβους έχουν γραφτεί απλά προγράμματα σε bash script προκειμένου να παίρνει ο καθένας συγκεκριμένη IP address και να δρομολογούν την “κίνηση” τους διαμέσου του “router”.

Οι IPs των κόμβων είναι 10.1.169.1 για τον “source”, 10.1.169.2 για τον “router”, και 10.1.169.3 για τον “destination”.

Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε 2 διαφορετικούς χώρους, έναν εσωτερικό (διαμέρισμα) και έναν εξωτερικό (προαύλιο σχολείου). Οι δυο αυτοί χώροι επιλέχθηκαν με βάση τα φυσικά τους γνωρίσματα. Ο μεν εσωτερικός, λόγω της ύπαρξης φυσικών εμποδίων (τοιχοί, κολόνες, μεταλλικά σκεύη, κ.α.) και παρεμβαλλόμενων σημάτων (ασύρματα δίκτυα, ηλεκτρονικές/ηλεκτρικές συσκευές, κ.α.), ο δε εξωτερικός, λόγω της μη ύπαρξης των παραπάνω, του μεγαλύτερου εύρους σε απόσταση μεταξύ των κόμβων και των φυσικών συνθηκών του περιβάλλοντος (άνεμος, υγρασία, κ.α.). Στη συνέχεια παρατίθενται οι κατόψεις του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου αντίστοιχα.



4.2 Μετρήσεις RSSI-LQI

Για τον υπολογισμό του RSSI και του LQI χρησιμοποιήθηκε η εντολή `iwlist`. Με την παραπάνω εντολή γίνεται scanning στο interface `wlan0` και κρατούνται οι τιμές των 'Quality' και 'Signal Level' για την εύρεση των τιμών των RSSI και LQI αντίστοιχα. Έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Python, σε συνδυασμό με bash script ένα πρόγραμμα, αποτελούμενο από δυο κομμάτια. Σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος είναι να βρίσκει ο ενδιαμέσος κόμβος ('router') μια ικανοποιητική θέση ποιότητας σήματος με βάση το LQI ή το RSSI.

Το κομμάτι του προγράμματος που τρέχει στους κόμβους source και destination καλεί την εντολή `iwlist`. Αρχικά, ζητάει από το χρήστη τον αριθμό των συνολικών μετρήσεων. Έπειτα, αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, παράγεται ο μέσος όρος τους και όλα τα παραπάνω στοιχεία αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο ξεχωριστά, στα αρχεία `rssi_lqi_source_results.txt` και `rssi_lqi_destination_results.txt`. Δόθηκε η δυνατότητα στο χρήστη για παραπάνω από μια μετρήσεις, έτσι ώστε να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια τα RSSI και LQI, δεδομένης της ασυμμετρίας των συνδέσεων (link asymmetry). Τέλος, στέλνονται τα αποτελέσματα στον ενδιαμέσο κόμβο (router). Το κομμάτι του προγράμματος που υλοποιείται στον router εμφανίζει αρχικά στην οθόνη τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί από τους άλλους δυο κόμβους. Στη συνέχεια, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει με βάση ποιον εκτιμητή ποιότητας σύνδεσης (LQE) θα γίνει εκτίμηση της ποιότητας του σήματος και κατ'επέκταση πως και με ποιον τρόπο θα κινηθεί ο router. Αν οι ελεγχόμενες τιμές, από τους source και destination, υπερβαίνουν το threshold που έχει οριστεί για το συγκεκριμένο metric, τότε η θέση του router χαρακτηρίζεται ικανοποιητική και ο αλγόριθμος προτείνει, με μήνυμα στην οθόνη, να παραμείνει σταθερή. Ωστόσο, αν μια από τις δυο ελεγχόμενες τιμές βρίσκεται χαμηλότερα από το threshold, τότε ο router μετακινείται προς τον αντίστοιχο κόμβο, κατά πρόταση του αλγορίθμου. Στην περίπτωση που και οι δυο τιμές βρίσκονται κάτω από το threshold, η μέτρηση επαναλαμβάνεται.

Ο ψευδοκώδικας των Source/Destination δίνεται παρακάτω:

```
εμφάνισε «Δώσε τον αριθμό των επαναλήψεων της μέτρησης»
όσο <αριθμός επαναλήψεων> μεγαλύτερος του 0:
    τρέξε το iwlist και γράψε το αποτέλεσμα στο default_log.txt
    μείωσε το <αριθμός επαναλήψεων> κατά 1
πέρνα τους αριθμούς από το default_log.txt στο dump.txt
πέρνα τα Link Qualities στο link_dump.txt
άθροισε τα αποτελέσματα και διαίρεσέ τα με τον αριθμό επαναλήψεων
πέρνα τα Signal Levels στο signal_dump.txt
άθροισε τα αποτελέσματα και διαίρεσέ τα με τον αριθμό επαναλήψεων
βάλε και τις 2 τιμές σε ένα string και στο τέλος (a/b) αν είναι ο (Source/Destination)
άνοιξε socket
στείλε μέσω του socket το string στον Router
κλείσε το socket
```

Ο ψευδοκώδικας του Router δίνεται παρακάτω:

άνοιξε *socket*

όσο είναι <αληθές>:

 αποθήκευσε στο *data* την είσοδο από το *socket*

 κάνε στην λίστα *i* *append* τα *data*

 αν τα στοιχεία του *i* είναι ίσα των 2:

 θέσε <ψευδές>

για κάθε *item* στην λίστα *i*:

 χώρισε τους 2 αριθμούς του *string* που έχει στο τέλος *a*

 στο *LQI_source* βάλε την τιμή του *Lqi* από τον *source*

 στο *RSSI_source* βάλε την τιμή του *RSSI* από τον *source*

 χώρισε τους 2 αριθμούς του *string* που έχει στο τέλος *b*

 στο *LQI_dest* βάλε την τιμή του *Lqi* από τον *dest*

 στο *RSSI_dest* βάλε την τιμή του *RSSI* από τον *dest*

εμφάνισε «Τα αποτελέσματα του *source* είναι, *LQI*:» *LQI_source* « και *RSSI* :» *RSSI_source*

εμφάνισε «Τα αποτελέσματα του *destination* είναι, *LQI*:» *LQI_dest* « και *RSSI* :» *RSSI_dest*

εμφάνισε «Δώσε *RSSI* ή *LQI* για τον αντίστοιχο έλεγχο:»

αν το *metric* = *LQI*:

 αν το *LQI_dest* ≥ 40 και *LQI_source* ≥ 40 :

 εμφάνισε «Το *robot* είναι σε ικανοποιητική θέση.»

 αλλιώς αν *LQI_dest* < 40 και *LQI_source* < 40 :

 εμφάνισε «Η μέτρηση πρέπει να ξαναγίνει. Υπήρξαν πολλές παρεμβολές.»

 πήγαινε στο τέλος του προγράμματος

 αλλιώς αν *LQI_dest* < 40 :

 εμφάνισε «Κάνε ένα βήμα προς στον *Destination*.»

 αλλιώς *LQI_source* < 40 :

 εμφάνισε «Κάνε ένα βήμα προς στον *Source*.»

αλλιώς αν το *metric* = *RSSI*:

 αν το *RSSI_dest* ≥ -85 και *RSSI_source* ≥ -85 :

 εμφάνισε «Το *robot* είναι σε ικανοποιητική θέση.»

 αλλιώς αν το *RSSI_dest* < -85 και *RSSI_source* < -85 :

 εμφάνισε «Η μέτρηση πρέπει να ξαναγίνει. Υπήρξαν πολλές παρεμβολές.»

 αλλιώς αν *LQI_dest* < -85 :

 εμφάνισε «Κάνε ένα βήμα προς στον *Destination*.»

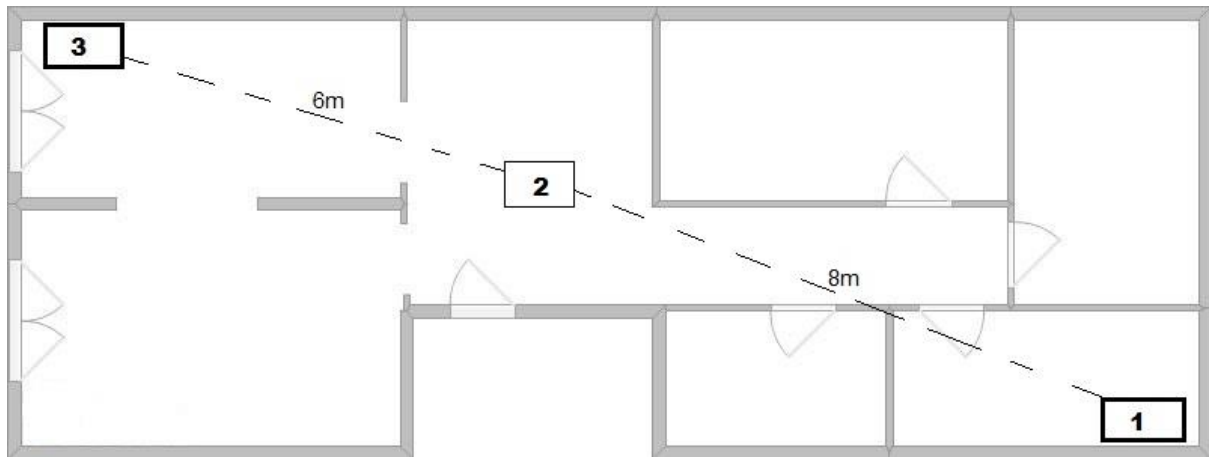
 αλλιώς αν *LQI_source* < -85 :

 εμφάνισε «Κάνε ένα βήμα προς στον *Source*.»

4.2.1 Εσωτερικός χώρος

1^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 8m \rightarrow Router \leftarrow 6m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



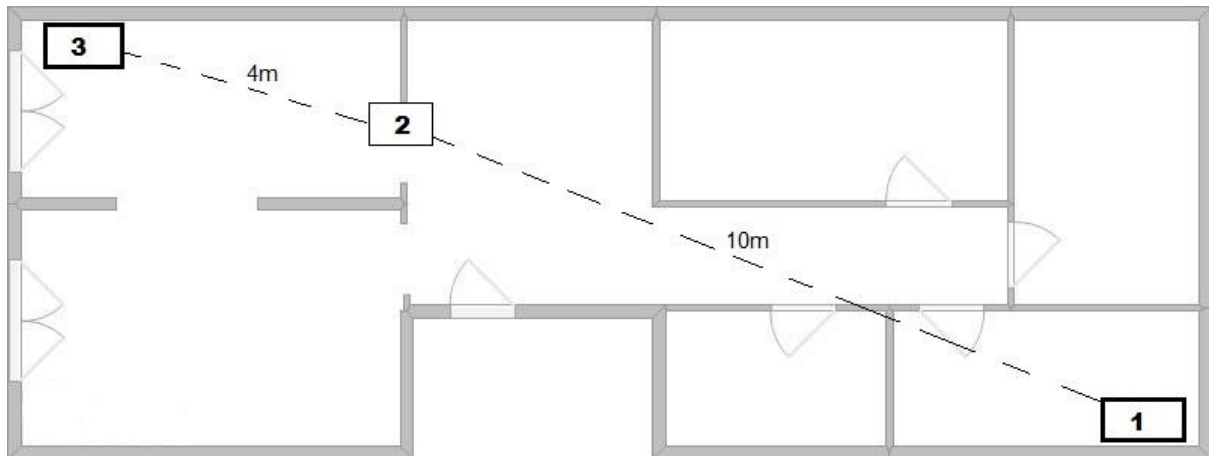
Timestamp: 2017-Apr-18 20:56:44

```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 40.13 kai RSSI: -69.86a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 51.30 kai RSSI: -55.03b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI
To robot einai se oikanopoiitiki thesi
root@Goku:/home/spiros/ptixiaki/rssi-lqi#
```

Ξεκινώντας, πάρθηκε μια πρώτη μέτρηση με τον router να έχει τοποθετηθεί σε μια ενδιάμεση θέση (προσεγγιστικά κεντρική) καθώς οι κομβοί source και destination παραμένουν σταθεροί, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Η απόσταση των κόμβων source και destination είναι περίπου δεκατέσσερα μέτρα. Από την παρακάτω εικόνα παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που έχει δώσει ο αλγόριθμος είναι ικανοποιητικά, δηλαδή υπερβαίνουν το threshold που έχει οριστεί για τους RSSI και LQI, οπότε δεν προβλέπεται κίνηση για τον router.

2^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 10m \rightarrow Router \leftarrow 4m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



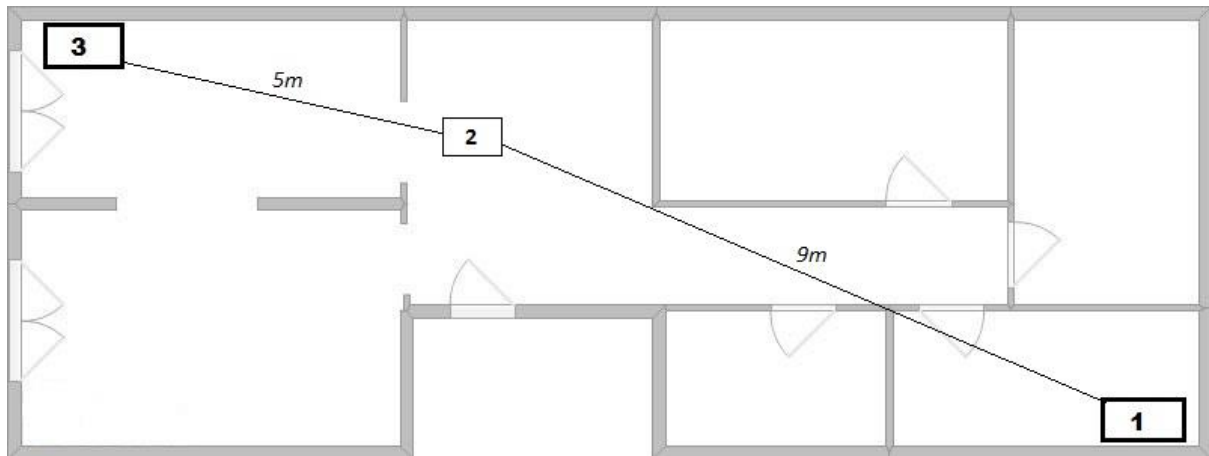
```
Timestamp: 2017-Apr-18 21:11:41
```

```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 38.13 kai RSSI: -71.86a  
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 48.13 kai RSSI: -54.53b  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI  
kane ena vima ston source  
root@Goku:/home/spiros/ptixiaki/rssi-lqi#
```

Η δεύτερη κίνηση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί πιο κοντά στον destination, καθώς υπάρχουν λιγότερα φυσικά εμπόδια μεταξύ των router και destination. Παρατηρείται ότι ενώ οι τιμές του RSSI είναι ικανοποιητικές και για τους δυο κόμβους, το LQI του source βρίσκεται χαμηλότερα από το threshold, και έτσι ο αλγόριθμος προτείνει να κινηθεί ο router προς τον source. Παρατηρείται επίσης, ότι ενώ η απόσταση μεταξύ των router και destination μειώθηκε σε σχέση με την πρώτη μέτρηση, υπάρχει μείωση της τιμής του LQI για τον κόμβο destination, πιθανότατα λόγω παρεμβολών. Για τον κόμβο source, υπάρχει μείωση του LQI όπως αναμενόταν, όπως επίσης μειώθηκε και το RSSI του. Ωστόσο, και για τον κόμβο destination παρατηρείται μείωση του LQI (κατά δυο μονάδες, περίπου ίση με τη μείωση του source) καθώς και μείωση του RSSI. Αφού, η τιμή του LQI του κόμβου source είναι χαμηλότερη του threshold, ο αλγόριθμος υποδεικνύει κίνηση του router προς τον source.

3^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 9m \rightarrow Router \leftarrow 5m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



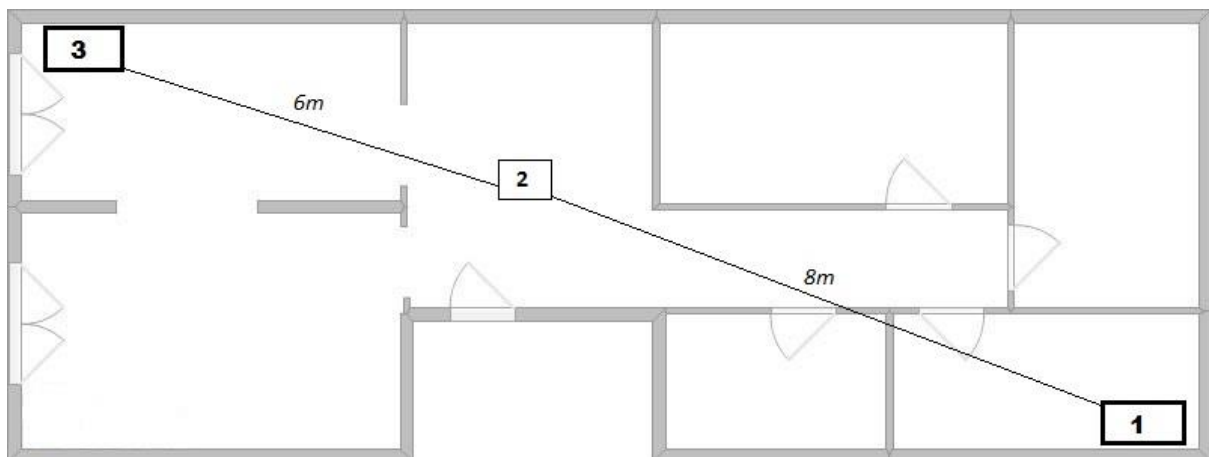
```
Timestamp: 2017-Apr-18 21:18:24
```

```
Ta αποτελεσματα του source einai LQI: 37.20 kai RSSI: -72.80  
Ta αποτελεσματα του destination einai LQI: 47.86 kai RSSI: -54.80  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI  
kane ena vima ston source
```

Μετά την κίνηση του router προς τον source, παρατηρείται μείωση στο LQI και RSSI του κόμβου source. Όσον αφορά τον κόμβο destination, οι τιμές των συγκεκριμένων LQEs παρέμειναν σχετικά σταθερές. Ενώ οι τιμές των metric για τον κόμβο source αναμενόταν να έχουν κάποια αύξηση, υπέστησαν μια μικρή μείωση, η οποία πιθανόν να οφείλεται στα φυσικά εμπόδια του χώρου. Δεδομένου ότι το LQI του κόμβου source βρίσκεται χαμηλότερα του threshold, ο αλγόριθμος υποδεικνύει, όπως και στην προηγούμενη μέτρηση, κίνηση του router προς τον source.

4^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 8m \rightarrow Router \leftarrow 6m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```

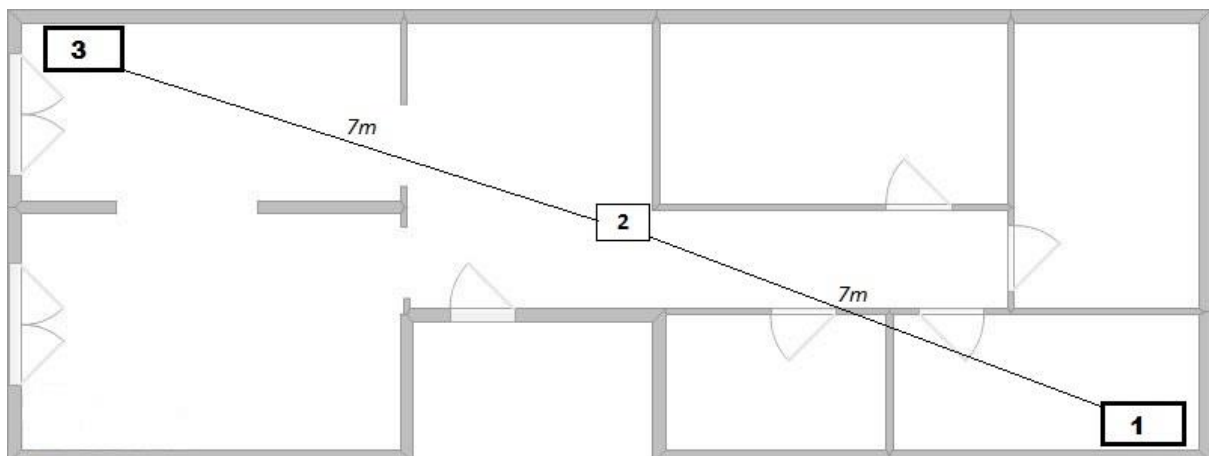
Timestamp: 2017-Apr-18 21:33:11
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 36.80 kai RSSI: -73.20a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 50.83 kai RSSI: -59.16b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI
kane ena vima ston source
root@Goku:/home/spiros/ptixiaki/rssi-lqi# █

```

Ακόμα μια μείωση των τιμών των LQI και RSSI του κόμβου source παρατηρείται μετά την κίνηση του router προς τον source. Για τον κόμβο destination, υπάρχει αύξηση του LQI και μείωση του RSSI. Όπως και στην προηγούμενη μέτρηση, αντίθετα από ότι αναμενόταν, οι τιμές των LQEs στον κόμβο source μειώθηκαν. Επειδή η τιμή του LQI για τον source παραμένει μικρότερη του ορίου που έχει τεθεί, ο αλγόριθμος προτείνει ξανά κίνηση του router προς την ίδια κατεύθυνση, αυτή του source.

5^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 7m \rightarrow Router \leftarrow 7m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```

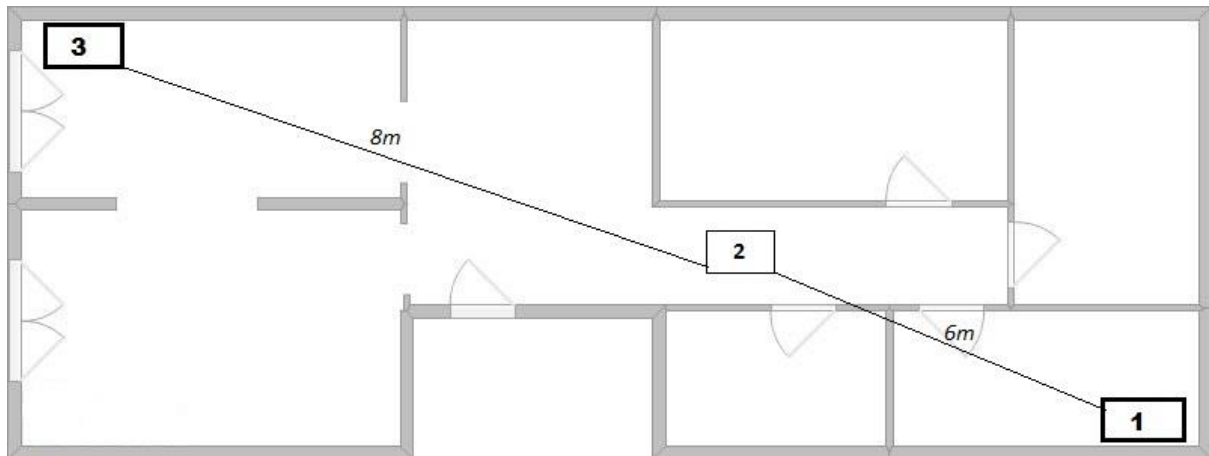
Timestamp: 2017-Apr-18 21:44:13
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 38.53 kai RSSI: -71.46a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 49.36 kai RSSI: -53.30b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI
kane ena vima ston source
root@Goku:/home/spiros/ptixiaki/rssi-lqi# █

```

Σε αυτή τη μέτρηση, παρατηρείται μια αύξηση στο LQI και στο RSSI του source. Για τον κόμβο destination υπάρχει μια μικρή μείωση του LQI και αύξηση του RSSI. Τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης για τον κόμβο source κρίνονται ως αναμενόμενα, σε αντίθεση με την αύξηση της τιμής του RSSI για τον destination. Παρά την αύξηση του LQI στον source, ο αλγόριθμος υποδεικνύει και πάλι κίνηση του router προς τον source, καθώς η τιμή του δεν υπερβαίνει ακόμα το καθορισμένο threshold.

6^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 6m \rightarrow Router \leftarrow 8m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



Timestamp: 2017-Apr-18 21:53:04

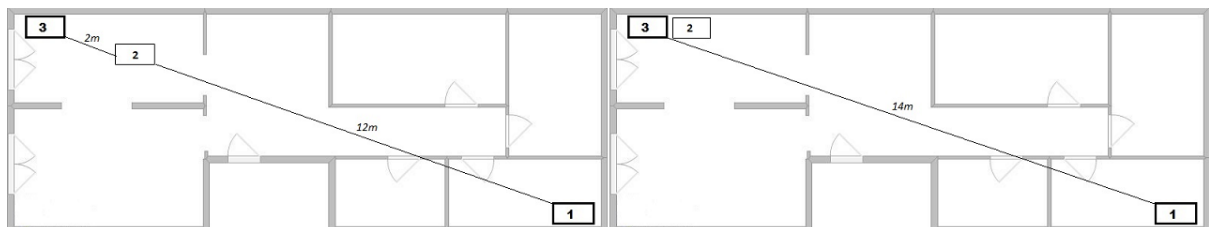
```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 41.06 kai RSSI: -68.93a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 44.66 kai RSSI: -58.00b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI
To robot einai se oikanopoiitiki thesi
root@Goku:/home/spiros/ptixiaki/rssi-lqi#
```

Στην 6^η μέτρηση παρατηρείται σημαντική αύξηση των τιμών των LQI και RSSI του source, ενώ αντίθετα στις αντίστοιχες τιμές του κόμβου destination υπάρχει μια σημαντική μείωση. Εφόσον τα αποτελέσματα των δυο LQEs και για τους δυο κόμβους, βρίσκονται πάνω από τα όρια-threshold που έχουν τεθεί, ο αλγόριθμος κρίνει ικανοποιητική τη θέση του router.

7^η – 8^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 12m \rightarrow Router \leftarrow 2m \rightarrow Destination) Distance : [14m]

(Source \leftarrow 14m \rightarrow Router \leftarrow 0m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```

Timestamp: 2017-Apr-18 21:59:45
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 38.66 kai RSSI: -71.33
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 65.96 kai RSSI: -42.76
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI
kane ena vima ston source
Timestamp: 2017-Apr-18 22:08:12
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 43.26 kai RSSI: -66.73
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 60.16 kai RSSI: -26.86
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI
To robot einai se ikanopoihtikh thesi

```

Τέλος, αφού η τιμή του RSSI δεν εμφανίστηκε σε κανένα σημείο των μετρήσεων να είναι μικρότερη των -85 dB , αποφασίστηκε να ληφθούν δυο ακόμα μετρήσεις σε ακραίες θέσεις, όπου παρατηρήθηκε (μετά από ring ανάμεσα στους κόμβους) ότι η ποιότητα του σήματος δεν είναι καθόλου καλή. Από τα αποτελέσματα του RSSI, των δυο αυτών μετρήσεων, για τον κόμβο Source φαίνεται ότι η μικρότερη τιμή του είναι -71.30 dB. Από το γεγονός αυτό, βγαίνει το συμπέρασμα ότι το RSSI δεν είναι αξιόπιστος εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης για περιοχές μέτριας ποιότητας σήματος, όπως ακριβώς έχει αναφερθεί και στην θεωρητική μελέτη του. Τέλος, στις περιοχές αυτές, παρατηρείται ότι η διακύμανσή του κυμαίνεται μεταξύ -66dB και -73dB.

4.2.2 Εξωτερικός Χώρος

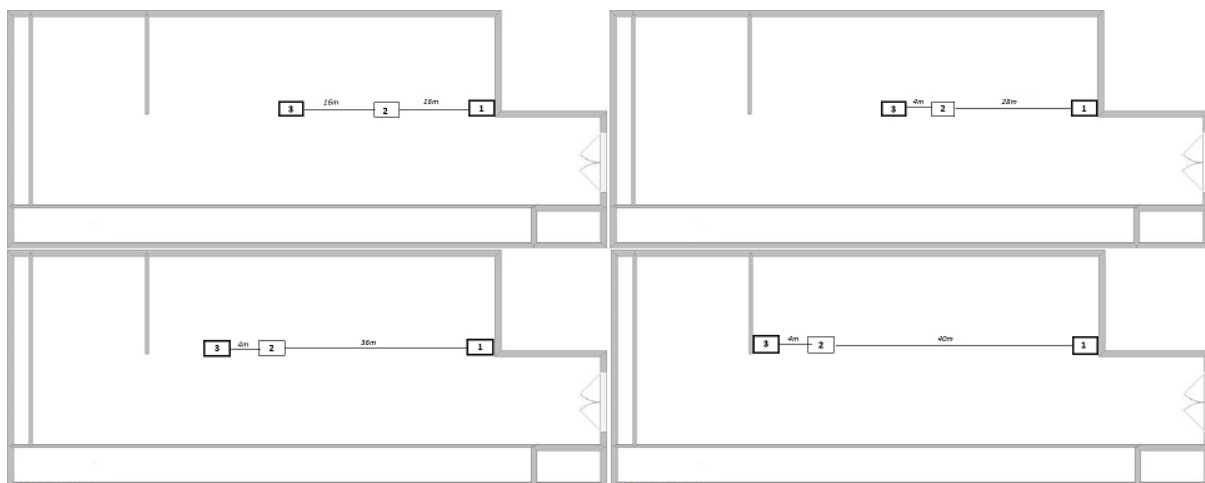
1^η, 2^η, 3^η και 4^η Μέτρηση

(Source ← 16m → Router ← 16m → Destination) Distance : [32m]

(Source ← 28m → Router ← 4m → Destination) Distance : [32m]

(Source ← 36m → Router ← 4m → Destination) Distance : [40m]

(Source ← 40m → Router ← 4m → Destination) Distance : [44m]




```

Timestamp: 2017-Apr-27 19:03:08

Ta apotelesmata tou source einai LQI: 44.86 kai RSSI: -65.13a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 46.63 kai RSSI: -63.36b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI
To robot einai se oikanopoiitiki thesi

Timestamp: 2017-Apr-27 19:08:17

Ta apotelesmata tou source einai LQI: 42.60 kai RSSI: -67.40
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 55.90 kai RSSI: -54.10
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI
To robot einai se ikanopoihtikh thesi

Timestamp: 2017-Apr-27 19:15:46

Ta apotelesmata tou source einai LQI: 45.13 kai RSSI: -64.86
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 51.56 kai RSSI: -43.76
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI
To robot einai se ikanopoihtikh thesi

Timestamp: 2017-Apr-27 19:31:48

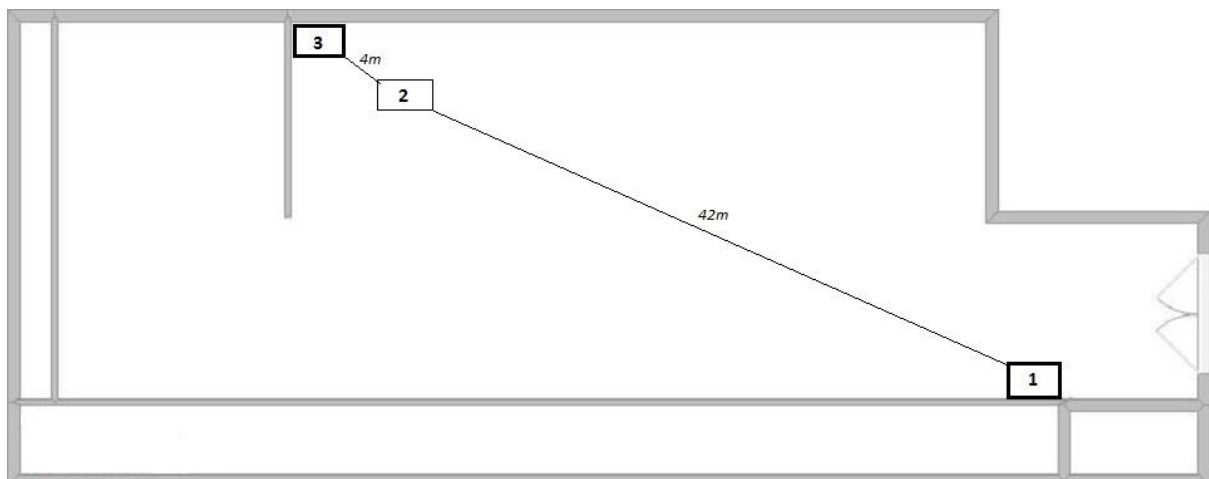
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 40.46 kai RSSI: -69.53a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 48.76 kai RSSI: -61.23b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI
To robot einai se oikanopoiitiki thesi

```

Οι πρώτες αυτές μετρήσεις λήφθηκαν αναγνωριστικά, με σκοπό να εκτιμηθούν οι μεταβολές των τιμών των LQI και RSSI σε συνάρτηση με την απόσταση και τις συνθήκες που επικρατούν στον εξωτερικό χώρο. Ακολουθώντας την ίδια λογική με τις λήψεις μετρήσεων σε εσωτερικό χώρο, ο κόμβος router τοποθετήθηκε πιο κοντά στον κόμβο destination. Στα 16, 28 και 36 μέτρα (μεταξύ source και router), όπως φαίνεται από τις τιμές των μετρήσεων για τα LQI και RSSI, και από το αποτέλεσμα του αλγορίθμου, δεν παρατηρείται σημαντική αλλοίωση της ποιότητας του σήματος. Ωστόσο, στα 40 μέτρα, η τιμή του LQI για τον source οριακά ξεπερνά το threshold που έχει οριστεί έτσι ώστε να προτείνει κάποια κίνηση ο αλγόριθμος.

5^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 42m \rightarrow Router \leftarrow 4m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



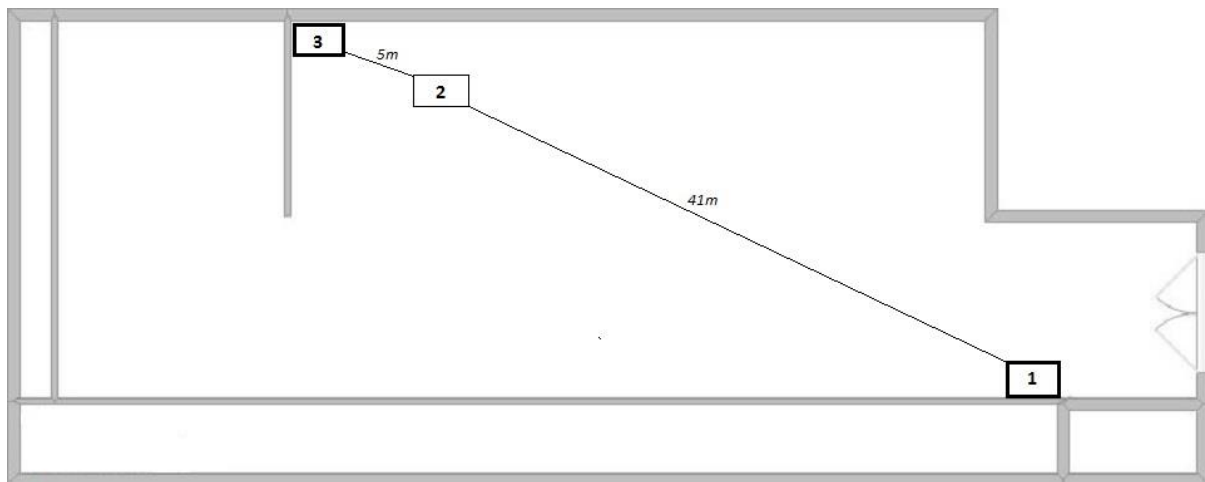
```
Timestamp: 2017-Apr-27 19:40:38
```

```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 35.20 kai RSSI: -74.80  
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 57.30 kai RSSI: -41.70  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI  
kane ena vima ston source
```

Τρέχοντας τον αλγόριθμο παρατηρείται ότι οι τιμές των RSSI και LQI του κόμβου destination είναι ικανοποιητικές. Αντίθετα, η τιμή του RSSI για τον source, αν και πολύ χαμηλή (-74,80 dB) δεν ξεπερνά το threshold που έχει οριστεί, κάτι που δεν ισχύει για την τιμή του LQI. Ο αλγόριθμος, μιας και η τιμή του LQI για τον source δεν ικανοποιεί τα όρια του για πρώτη φορά, προτείνει κίνηση προς τον source.

6^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 41m \rightarrow Router \leftarrow 5m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



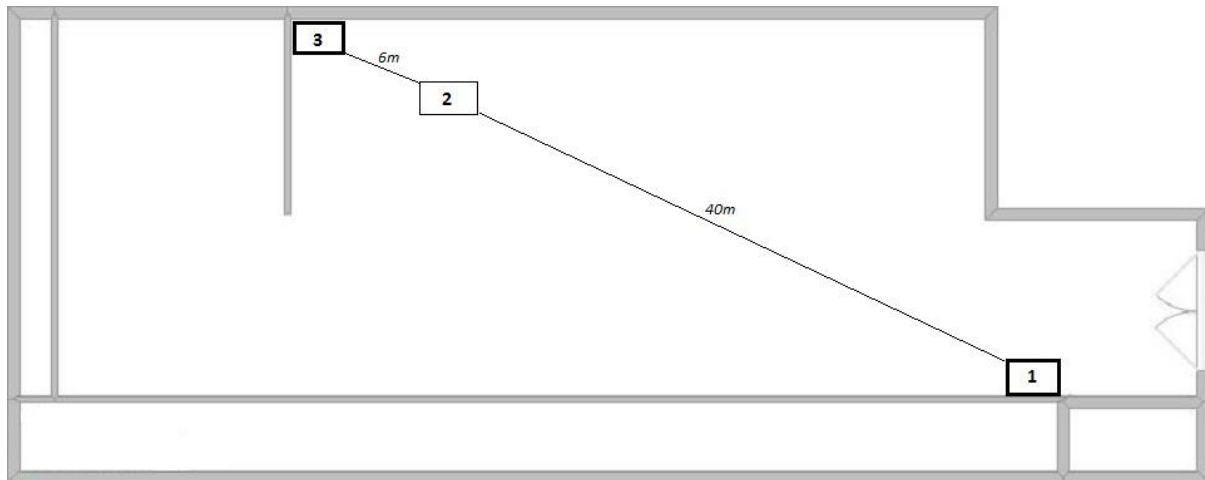
```
Timestamp: 2017-Apr-27 19:59:19
```

```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 36.86 kai RSSI: -73.13a  
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 53.76 kai RSSI: -52.56b  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI  
kane ena vima ston source
```

Μετά την κίνηση του router προς τον source, παρατηρείται μια μικρή αλλά αναμενόμενη μείωση στις τιμές των LQI και RSSI του destination. Από την άλλη, στον κόμβο source εμφανίζεται μικρή αύξηση και στα δυο LQEs, με το LQI ωστόσο, να συνεχίζει να βρίσκεται χαμηλότερα του threshold. Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα, ο αλγόριθμος προτείνει να κινηθεί ο router προς την ίδια κατεύθυνση.

7^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 40m \rightarrow Router \leftarrow 6m \rightarrow Destination) Distance : [46m]

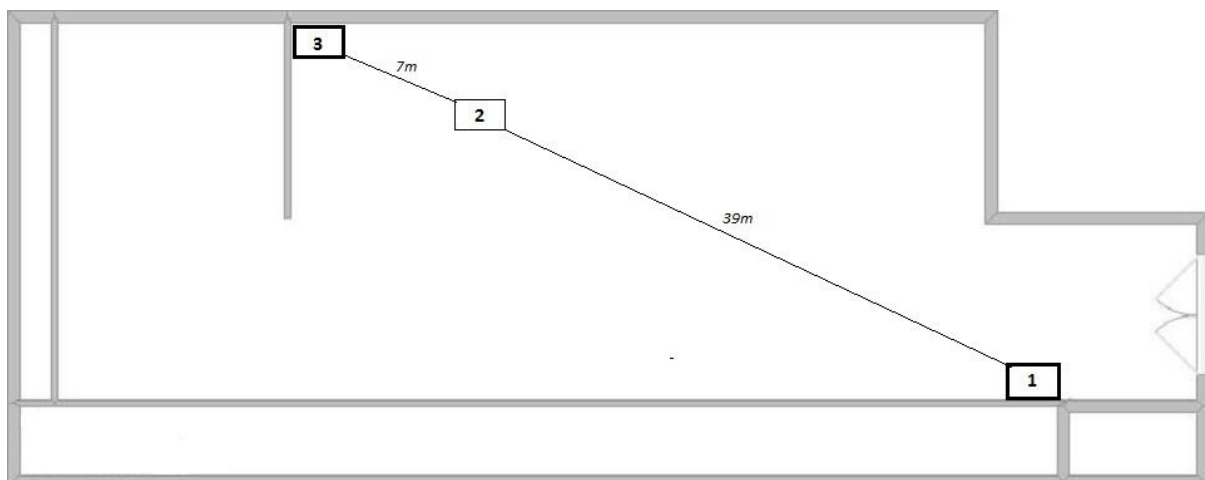


```
Timestamp: 2017-Apr-27 20:05:47
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 35.86 kai RSSI: -74.13a
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 53.40 kai RSSI: -56.60b
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixo elegxo: LQI
kane ena vima ston source
```

Αφού ο router κινήθηκε άλλο ένα βήμα προς την κατεύθυνση του source, το LQI του destination παρέμεινε σχετικά σταθερό ενώ το RSSI του μειώθηκε. Αντίθετα, στον κόμβο source παρατηρείται μια μικρή μεν, μη αναμενόμενη δε, μείωση των τιμών των LQEs. Τα παραπάνω αποτελέσματα πιθανόν να εξηγούνται από το γεγονός ότι ο router βρίσκεται στην μεταβατική περιοχή (σε σχέση με τον source). Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος προτείνει, όπως και πριν, να κινηθεί ο router προς τον source.

8^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 39m \rightarrow Router \leftarrow 7m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



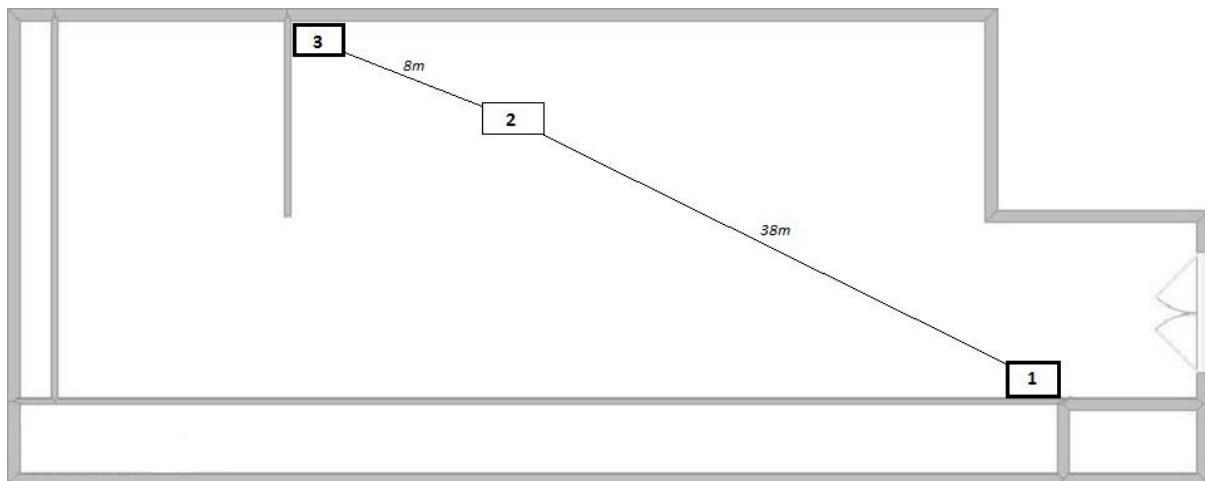
```
Timestamp: 2017-Apr-27 20:13:58
```

```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 39.40 kai RSSI: -70.60a  
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 50.43 kai RSSI: -59.56b  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI  
kane ena vima ston source
```

Αφού πραγματοποιήθηκε η κίνηση που πρότεινε ο αλγόριθμος, οι τιμές των LQI και RSSI στον κόμβο destination μειώθηκαν όπως αναμενόταν. Για τις αντίστοιχες τιμές του κόμβου source παρατηρείται αύξηση. Παρ'όλα αυτά η τιμή του LQI στον source δεν είναι ικανοποιητική, οπότε προτείνεται κίνηση προς την ίδια κατεύθυνση από τον αλγόριθμο.

9^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 38m \rightarrow Router \leftarrow 8m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



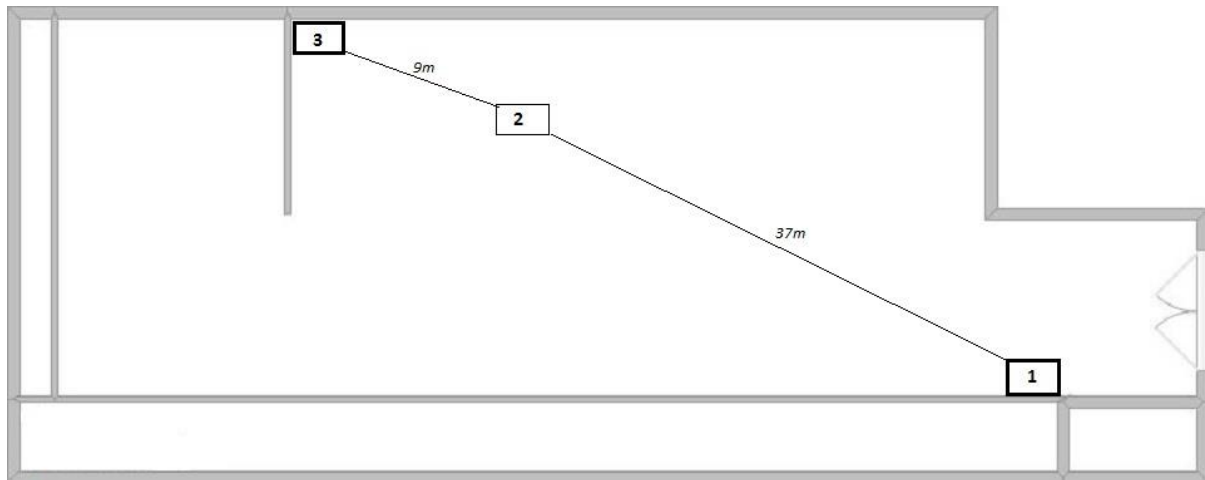
```
Timestamp: 2017-Apr-27 20:20:53
```

```
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 38.80 kai RSSI: -71.20a  
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 42.16 kai RSSI: -53.16b  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI  
kane ena vima ston source
```

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης, στον κόμβο destination μειώθηκε η τιμή του LQI όπως αναμενόταν, με την τιμή του RSSI να έχει μια μικρή αύξηση. Αντίθετα στον κόμβο source, οι τιμές των συγκεκριμένων metric μειώθηκαν ελάχιστα, πιθανότατα για τους ίδιους λόγους που παρατηρήθηκαν και στην 7^η μέτρηση. Κατ' επέκταση η πρόταση κίνησης που δίνει ο αλγόριθμος είναι προς την ίδια κατεύθυνση, αφού η τιμή του LQI παραμένει χαμηλότερη του threshold που έχει οριστεί.

10^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 37m \rightarrow Router \leftarrow 9m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



```
Timestamp: 2017-Apr-27 20:28:58  
Ta apotelesmata tou source einai LQI: 40.40 kai RSSI: -69.60a  
Ta apotelesmata tou destination einai LQI: 50.23 kai RSSI: -59.76b  
Dwse RSSI i LQI gia ton antistoixο elegxo: LQI  
To robot einai se oikanopoiitiki thesi
```

Η συγκεκριμένη μέτρηση είναι και η τελική, μιας και οι τιμές των LQI και RSSI για τον κόμβο source είναι άνω του ορίου/ threshold. Οι αντίστοιχες τιμές, για τον κόμβο destination, αν και μειωμένες, παραμένουν ικανοποιητικές. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο αλγόριθμος εμφανίζει ότι η συγκεκριμένη θέση του router είναι ικανοποιητική και δεν προτείνεται περαιτέρω κίνηση.

Παρατηρήσεις RSSI και LQI

Παρατηρούμε ότι σε σχέση με τις εσωτερικές μετρήσεις, οι μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο έχουν μεγαλύτερο transmission range. Αυτό ωστόσο σημαίνει ότι πέρα από μεγαλύτερη περιοχή σύνδεσης, αυξάνεται και η μεταβατική περιοχή. Εκεί αποδίδεται και το γεγονός ότι ο router κάνει περισσότερα βήματα μέχρι να βρεθεί σε ικανοποιητική θέση από ότι στις εσωτερικές μετρήσεις. Παρατηρείται επίσης μικρότερη διακύμανση στις τιμές των μετρήσεων λόγω της απουσίας φυσικών εμποδίων και παρεμβολών.

4.3 Μετρήσεις PRR

Έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Python ένα πρόγραμμα αποτελούμενο από 3 κομμάτια. Σκοπός αυτού του προγράμματος είναι να βρίσκει ο κόμβος router μια ικανοποιητική θέση ποιότητας σήματος με βάση το PRR.

Το κομμάτι του προγράμματος που τρέχει στον κόμβο source καλεί την εντολή `hping3`, στέλνοντας 200 udp πακέτα στον destination. Αφού σταλεί το σύνολο των πακέτων, περιμένει απάντηση, από το κομμάτι του προγράμματος που τρέχει στον κόμβο destination, τον αριθμό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων. Εφόσον ληφθεί η απάντηση αυτή, υπολογίζεται το PRR και στέλνεται στον κόμβο router.

Το κομμάτι του προγράμματος που υλοποιείται στον destination υπολογίζει των αριθμό των εισερχόμενων πακέτων. Αφού ληφθεί από τον source ότι η αποστολή των πακέτων ολοκληρώθηκε, αποστέλλεται ο αριθμός των πακέτων που ελήφθησαν στον source.

Το κομμάτι του προγράμματος που τρέχει στον κόμβο router, αρχικά λαμβάνει την τιμή του PRR από τον κόμβο source, και την εμφανίζει στην οθόνη. Έπειτα ελέγχει αν η τιμή που έχει έρθει είναι μεγαλύτερη του threshold που έχουμε ορίσει. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος εμφανίζει ότι η θέση του router είναι ικανοποιητική. Αν η παραπάνω τιμή δεν υπερβαίνει το threshold και είναι η πρώτη φορά που τρέχει ο αλγόριθμος, προτείνεται τυχαία κίνηση προς την κατεύθυνση του destination κατά ένα βήμα. Ωστόσο, αν δεν είναι η πρώτη μέτρηση που έχει γίνει, συγκρίνεται η τιμή του PRR για αυτήν, με την προηγούμενη. Σε περίπτωση που η νέα τιμή είναι μεγαλύτερη της προηγούμενης, ο αλγόριθμος προτείνει κίνηση προς την ίδια κατεύθυνση κατά ένα βήμα, αλλιώς προτείνει κίνηση προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά δυο βήματα.

Ο ψευδοκώδικας του Source είναι:

```
κάνε call την εντολή hping3 για αποστολή 200 πακέτων udp στον destination
άνοιξε socket
στείλε σήμα <communication closed> για την λήξη της λήψης από τον destination
εκτύπωσε «Το σήμα για την λήξη της λήψης στάλθηκε.»
```

Ο ψευδοκώδικας του Destination είναι:

```
άνοιξε socket
όσο αληθές:
    δέξου πακέτα
    αν πακέτο = <communication closed>:
        βγες από την επανάληψη
    εμφάνισε την διεύθυνση
    αύξησε τα πακέτα κατά 1
εμφάνισε τα πακέτα που λήφθηκαν
prp = διαίρεσε τα πακέτα που λήφθηκαν με το σύνολο των πακέτων (200)
εμφάνισε το prp
στείλε το prp στον Router
```

Ο ψευδοκώδικας του Router είναι:

άνοιξε *socket*

άνοιξε το αρχείο *prp.txt* για διάβασμα

διάβασε τη προηγούμενη τιμή του *prp*

κλείσε το *prp.txt*

άνοιξε το αρχείο *prp.txt* για γράψιμο

γράψε τη νέα τιμή του *prp*

κλείσε το *prp.txt*

αν το νέο *prp* ≥ 0.95 :

 εμφάνισε «Το σήμα είναι άνω του 95%»

αλλιώς αν το (νέο *prp* < 0.95 και είναι η πρώτη μέτρηση):

 εμφάνισε «Κάνε 1 βήμα προς τον *destination*.»

αλλιώς αν (νέο *prp* $<$ προηγούμενο *prp*) :

 εμφάνισε «Άλλαξε κατεύθυνση κατά 2 βήματα.»

αλλιώς αν (νέο *prp* \geq προηγούμενο *prp*):

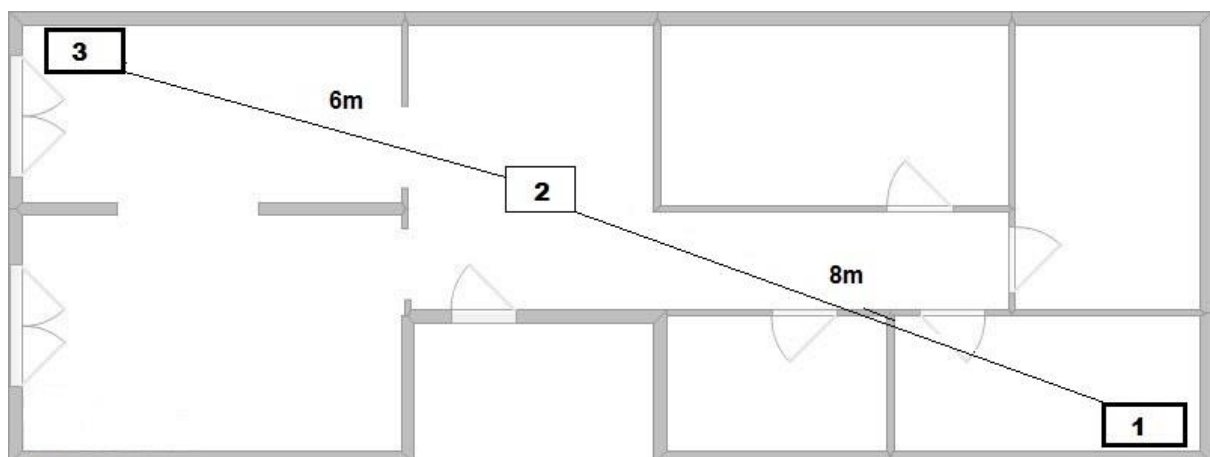
 εμφάνισε «Κάνε 1 βήμα στην ίδια κατεύθυνση.»

4.3.1 Εσωτερικός Χώρος

Πείραμα 1

1^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 8m \rightarrow Router \leftarrow 6m \rightarrow Destination) Distance : [14m]

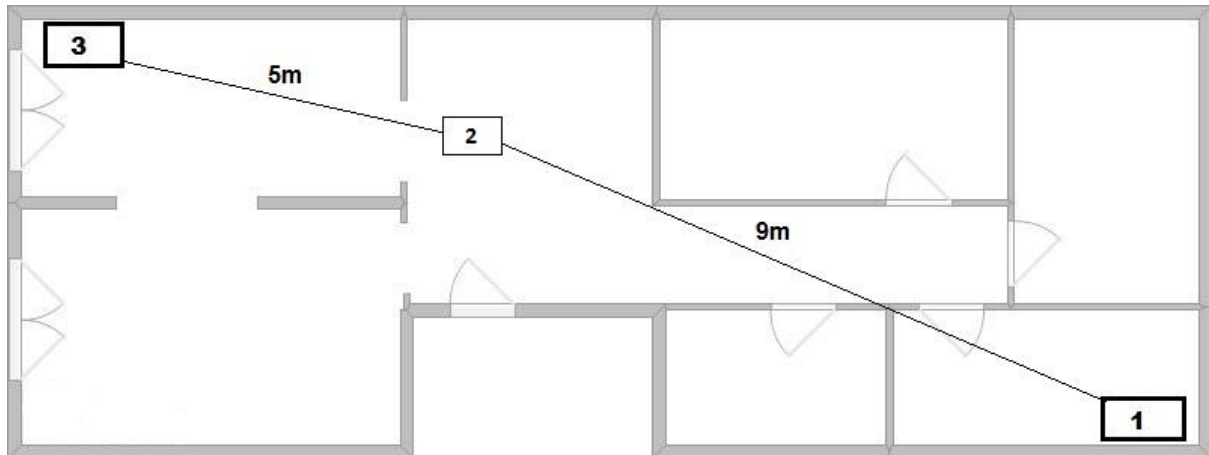


```
number of packets : 188  
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.94  
H prohgoumenh timh tou einai: 0.00  
pigene pros ton destination 1 vima
```

Σε αυτή την πρώτη μέτρηση, ο router τοποθετήθηκε σε μια προσεγγιστικά ενδιάμεση θέση μεταξύ των κόμβων source και destination. Η τιμή του PRR στη συγκεκριμένη μέτρηση βρίσκεται χαμηλότερα του threshold που έχει οριστεί. Οπότε ο αλγόριθμος, δεδομένου ότι είναι η πρώτη μέτρηση, προτείνει τυχαία κίνηση προς την κατεύθυνση του destination.

2^η - 3^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 9m \rightarrow Router \leftarrow 5m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```
number of packets : 199  
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.995  
H prohgoumenh timh tou einai: 0.94  
to shma einai anw tou 95%
```

```
number of packets : 191  
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.955  
H prohgoumenh timh tou einai: 0.995  
to shma einai anw tou 95%
```

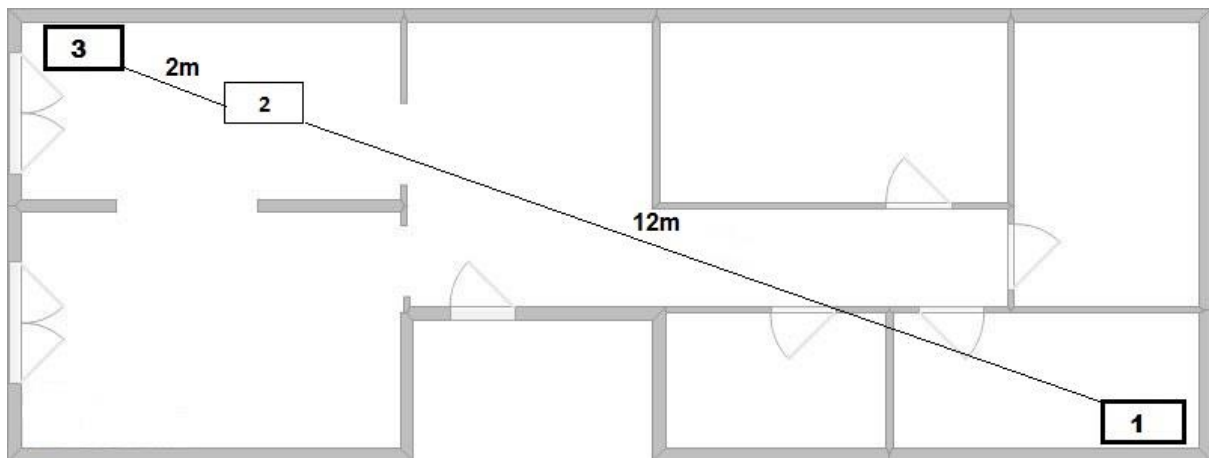
Ύστερα από την κίνηση του κόμβου router προς τον destination, παρατηρείται ότι η τιμή του PRR βρίσκεται ψηλότερα του threshold. Σύμφωνα με αυτό, ο αλγόριθμος εμφανίζει ότι η θέση του router είναι ικανοποιητική.

Η τρίτη μέτρηση είναι επαναληπτική της δεύτερης (τηρουμένων των ίδιων αποστάσεων μεταξύ των κόμβων), προκειμένου να επαληθευτεί το αποτέλεσμα της. Αυτό έγινε διότι η απόσταση μεταξύ των κόμβων source και router ήταν ήδη μεγαλύτερη από την απόσταση των router και destination (σχήμα 1^{ης} μέτρησης) και κατά τη δεύτερη μέτρηση, μετά την κίνηση του router προς τον destination, ενώ αναμενόταν μείωση της τιμής του PRR, παρατηρήθηκε αύξηση (σχήμα 2^{ης} – 3^{ης} μέτρησης). Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα αυτά μπορεί κανείς να υποθέσει ότι από την πρώτη μέτρηση του PRR υπήρξαν παρεμβολές.

Πείραμα 2

1^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 12m \rightarrow Router \leftarrow 2m \rightarrow Destination) Distance : [14m]

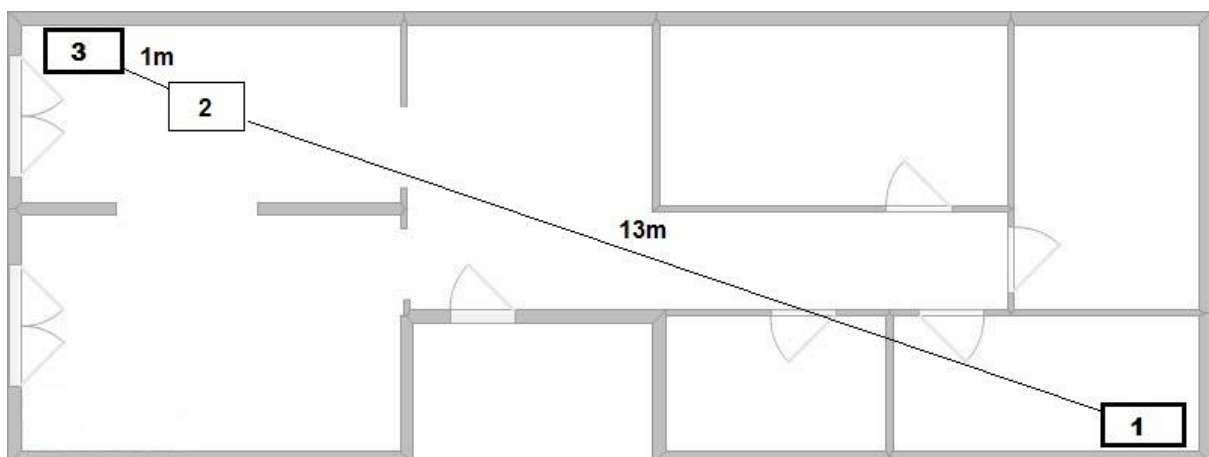


```
number of packets : 0  
το ποσοστο του PRR που irthe apo to destination einai: 0.00  
Η προηγουμενη τιμη του einai: 0.00  
πrigene pros ton destination 1 vima
```

Λόγω του φαινομένου που παρατηρήθηκε στο πείραμα 1, επιλέχθηκε η θέση του router για αυτή τη μέτρηση να είναι πολύ πιο κοντά στον destination. Μετά το τρέξιμο του αλγορίθμου παρατηρήθηκε μη αποστολή πακέτων , οπότε και ο αλγόριθμος πρότεινε τυχαία κίνηση προς τον destination. Η μηδενική τιμή του PRR πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η θέση του router βρίσκεται στην περιοχή αποκοπής του κόμβου source.

2^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 13m \rightarrow Router \leftarrow 1m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```

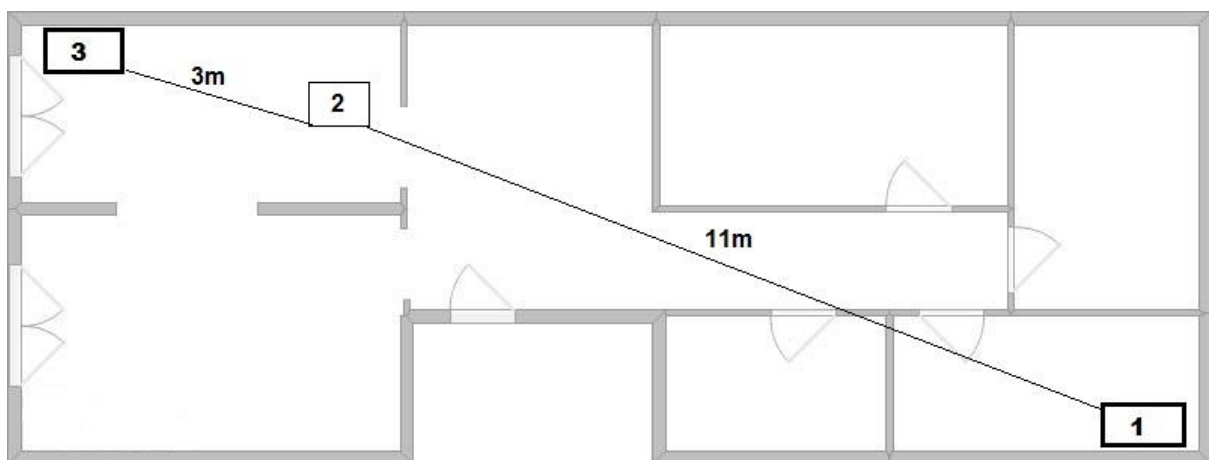
number of packets : 0
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.00
H prohgoumenh timh tou einai: 0.00
kane 2 vimata pros thn antitheti kateuthinsi

```

Κατά τη δεύτερη μέτρηση, έπειτα την κίνηση του router προς τον κόμβο destination, η τιμή του PRR παρέμεινε στο 0 (μηδενική λήψη πακέτων), οπότε προτείνεται από τον αλγόριθμο κίνηση του router κατά δυο βήματα προς την αντίθετη κατεύθυνση.

3^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 11m \rightarrow Router \leftarrow 3m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```

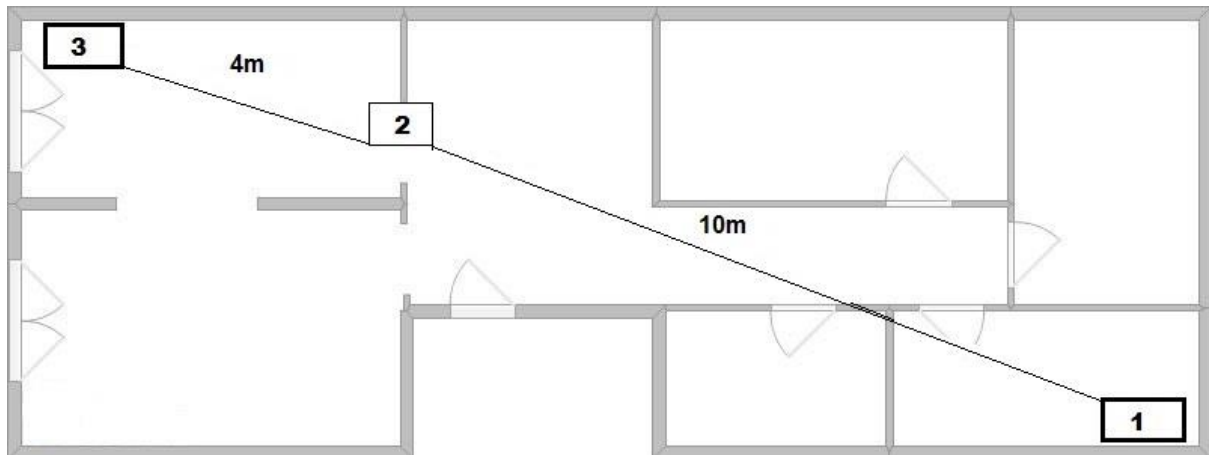
number of packets : 119
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.595
H prohgoumenh timh tou einai: 0.00
kane ena vima pros tin idia kateuthinsi

```

Στην τρίτη μέτρηση, υπήρξε αύξηση της τιμής του PRR. Ωστόσο η τιμή αυτή βρίσκεται χαμηλότερα του threshold, οπότε και προτείνεται από τον αλγόριθμο κίνηση του router προς την ίδια κατεύθυνση.

4^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 10m \rightarrow Router \leftarrow 4m \rightarrow Destination) Distance : [14m]

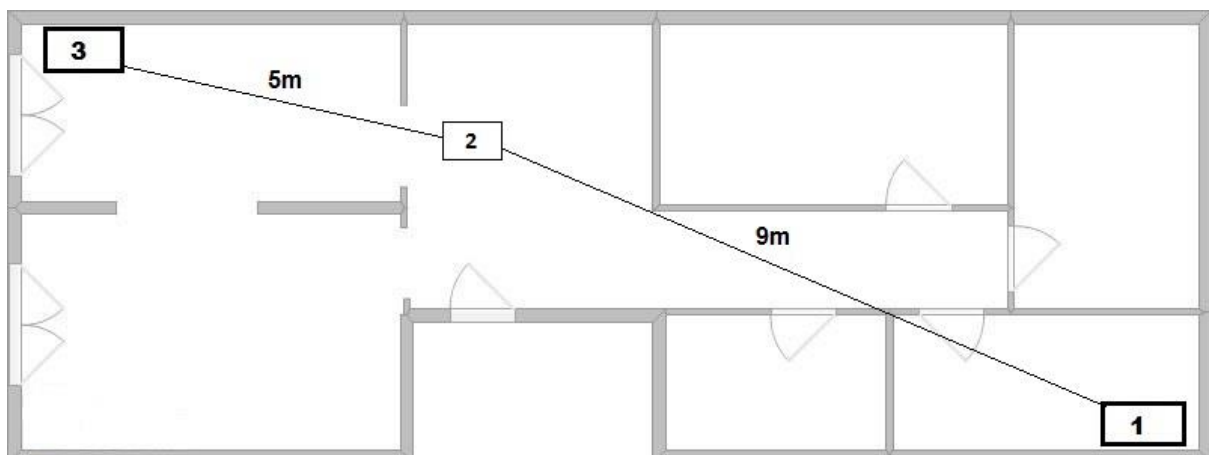


```
number of packets : 189  
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.945  
H prohgoumenh timh tou einai: 0.595  
kane ena vima pros tin idia kateuthinsi
```

Σε αυτή τη μέτρηση, η τιμή του PRR αυξήθηκε σε σχέση με τις προηγούμενες, παρέμεινε ωστόσο κατώτερη του ορίου – threshold. Έτσι, το αποτέλεσμα του αλγόριθμου παρέμεινε το ίδιο με πριν, προτάθηκε δηλαδή κίνηση του router προς την ίδια κατεύθυνση.

5^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 9m \rightarrow Router \leftarrow 5m \rightarrow Destination) Distance : [14m]



```
number of packets : 200  
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 1.0  
H prohgoumenh timh tou einai: 0.945  
to shma einai anw tou 95%
```

Στην τελευταία μέτρηση το ποσοστό του PRR ήταν 100%, ξεπερνώντας το threshold. Ο αλγόριθμος χαρακτήρισε τη θέση του router ικανοποιητική.

Παρατηρήσεις

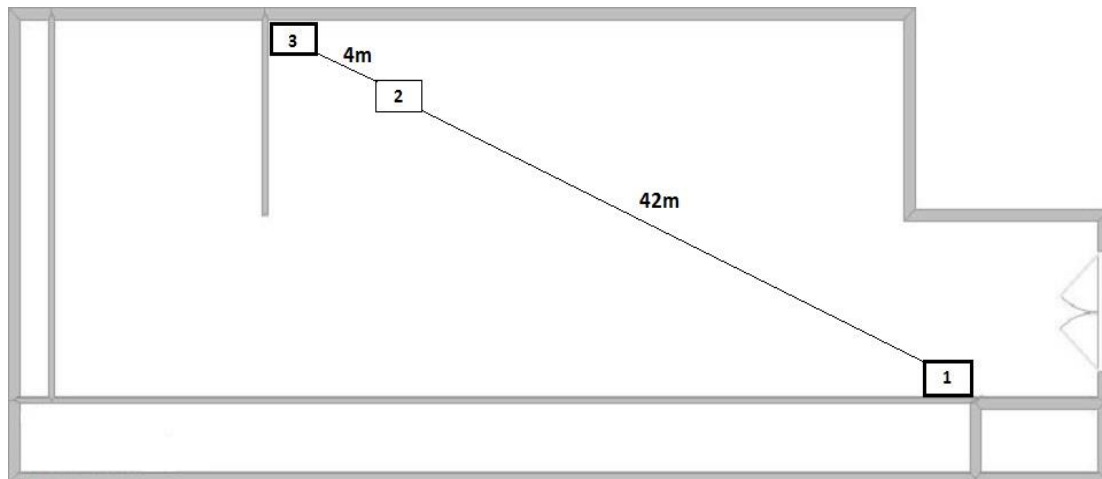
Παρατηρήθηκε ότι στα Πειράματα 1 και 2, η ικανοποιητική θέση του router, με βάση τον εκτιμητή PRR, είναι η ίδια (σχήματα 3^{ης} και 5^{ης} μέτρησης).

4.3.2 Εξωτερικός Χώρος

Πείραμα 1

1^η – 2^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 42m \rightarrow Router \leftarrow 4m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



```
number of packets : 190
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.95
H prohgoumenh timh tou einai: 0.00
to shma einai anw tou 95%
```

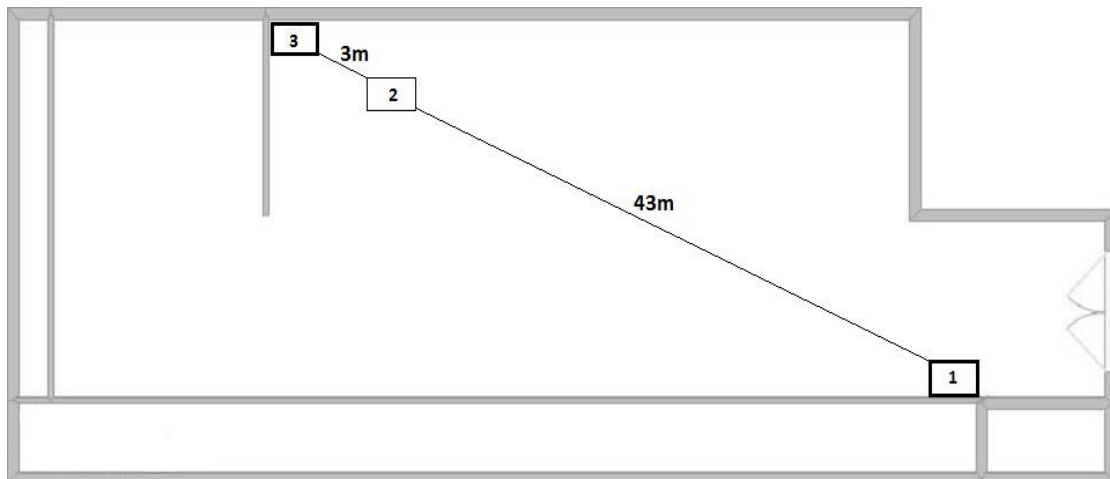
```
number of packets : 188
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.94
H prohgoumenh timh tou einai: 0.95
pigene pros ton destination 1 vima
```

Η θέση του κόμβου router στην πρώτη μέτρηση απέχει αρκετά από τον κόμβο source, ενώ βρίσκεται αρκετά κοντά στον κόμβο destination. Ωστόσο η τιμή του PRR είναι αρκετά υψηλή για αυτή τη μέτρηση, άνω του threshold που έχει οριστεί, οπότε ο αλγόριθμος κρίνει τη θέση του router ως ικανοποιητική.

Η δεύτερη μέτρηση είναι επαναληπτική της πρώτης με τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων να παραμένουν ίδιες. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε προκειμένου να επαληθευτεί το αποτέλεσμα της πρώτης. Με την ολοκλήρωση της μέτρησης η τιμή του PRR εμφανίζεται οριακά χαμηλότερη του threshold. Με βάση αυτό το αποτέλεσμα ο αλγόριθμος προτείνει τυχαία κίνηση προς την κατεύθυνση του destination.

3^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 43m \rightarrow Router \leftarrow 3m \rightarrow Destination) Distance : [46m]



```
number of packets : 195
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.975
H prohgoumenh timh tou einai: 0.94
to shma einai anw tou 95%
```

Ύστερα από την κίνηση του router προς τον destination, πραγματοποιείται μέτρηση του PRR στην καινούρια θέση. Παρά την κίνηση αυτή, η τιμή της μέτρησης αυτής βρίσκεται υψηλότερα του ορισμένου threshold. Σύμφωνα με αυτό, ο αλγόριθμος εμφανίζει ότι η θέση του κόμβου router είναι ικανοποιητική.

Παρατηρήσεις

Λόγω της τελευταίας μέτρησης μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα εκ των 2 συμπερασμάτων. Είτε υπήρξε constructive interference στις μετρήσεις 1 & 3 (πιθανότερο στην 3), είτε destructive στη μέτρηση 2.

Πείραμα 2

Αποφασίστηκε να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των source και destination λόγω της μικρής διακύμανσης των ληφθέντων τιμών του PRR στο Πείραμα 1 που είχε ως αποτέλεσμα τη σχεδόν αμελητέα κίνηση του router.

1^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 54m \rightarrow Router \leftarrow 4m \rightarrow Destination) Distance : [58m]

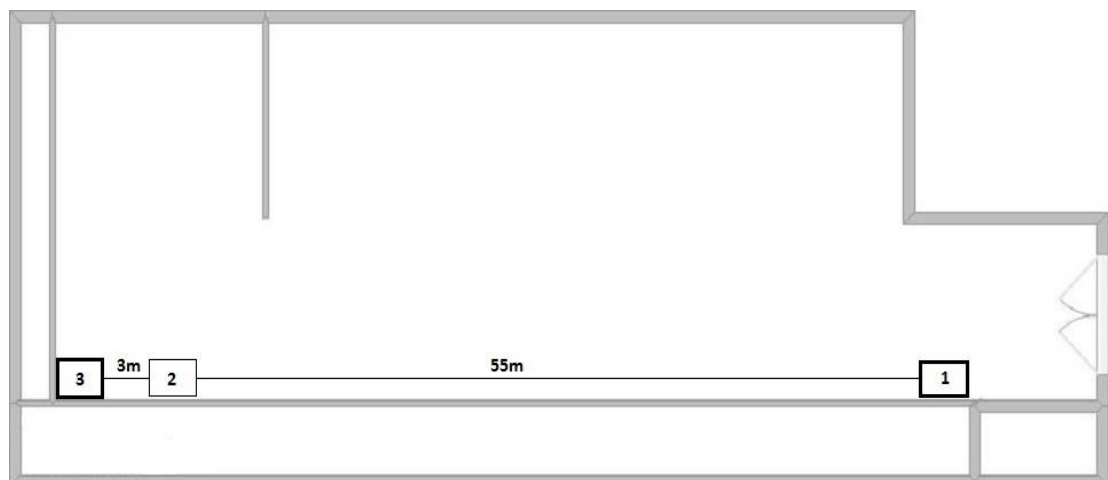


```
number of packets : 162  
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.81  
H prohgoumenh timh tou einai: 0.00  
pigene pros ton destination 1 vima
```

Ακολουθώντας την ίδια λογική με πριν, ο κόμβος router τοποθετείται σε μια αρχική θέση που απέχει μεγάλη απόσταση από τον source, ενώ αντίθετα πολύ μικρή από τον destination. Η τιμή του PRR για αυτή τη μέτρηση είναι αρκετά χαμηλότερη των τιμών που λήφθηκαν κατά το Πείραμα 1 και σαφώς κάτω του ορίου – threshold. Ως συνέπεια αυτού, ο αλγόριθμος προτείνει τυχαία κίνηση προς τον κόμβο destination.

2^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 55m \rightarrow Router \leftarrow 3m \rightarrow Destination) Distance : [58m]



```

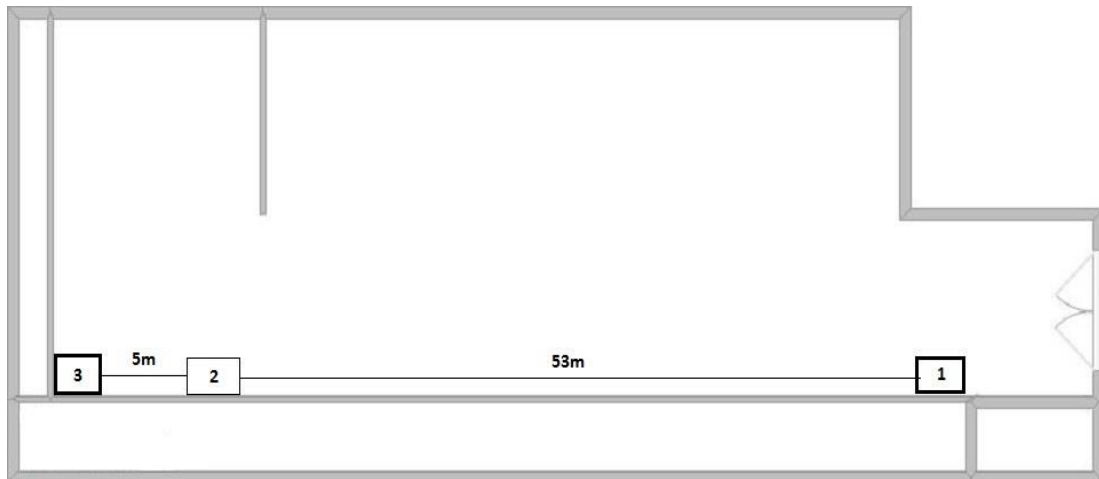
number of packets : 1
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.005
H prohgoumenh timh tou einai: 0.81
allakse kateuthinsi kata 2 vimata

```

Μετά την μετακίνηση του router, πραγματοποιήθηκε λήψη της 2^{ης} μέτρησης, για την οποία η τιμή του PRR ήταν σχεδόν μηδενική, καθώς υπήρξε λήψη μόνο ενός πακέτου. Κατά συνέπεια ο αλγόριθμος προτείνει κίνηση του ενδιαμέσου κόμβου κατά δυο βήματα προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή προς τον κόμβο source.

3^η – 4^η Μέτρηση

(Source \leftarrow 53m \rightarrow Router \leftarrow 5m \rightarrow Destination) Distance : [58m]



```

number of packets : 191
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.955
H prohgoumenh timh tou einai: 0.005
to shma einai anw tou 95%

```

```

number of packets : 192
to pososto tou PRR pou irthe apo to destination einai: 0.96
H prohgoumenh timh tou einai: 0.955
to shma einai anw tou 95%

```

Στην τρίτη μέτρηση, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση της τιμής του PRR, η οποία ξεπέρασε το threshold. Επομένως ο αλγόριθμος έκρινε τη θέση του κόμβου router ως ικανοποιητική. Η μεγάλη απόκλιση των τιμών του εκτιμητή στις 2 τελευταίες μετρήσεις οδήγησε στη λήψη μιας επαναληπτικής μέτρησης της τρίτης προκειμένου να γίνει επαλήθευση της.

Κατά την επαναληπτική μέτρηση, η τιμή του PRR παρέμεινε σχεδόν σταθερή (1 πακέτο διαφορά), επιβεβαιώνοντας το αποτέλεσμα της προηγούμενης μέτρησης.

Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι στον εξωτερικό χώρο, λόγω της μη ύπαρξης φυσικών εμποδίων (τοιχοί, κολόνες, αντικείμενα) αυξάνεται το εύρος της περιοχής διάδοσης του σήματος. Παρ' όλα αυτά και ιδιαίτερα στα δεύτερα πειράματα της εσωτερικής και εξωτερικής μέτρησης, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά του δικτύου στις διακριτικές περιοχές διάδοσης σήματος. Δηλαδή ότι μετά από μικρές μετακινήσεις υπάρχει μεγάλη αυξομείωση – απόκλιση στα αποτελέσματα του PRR.

Έστω και μια μικρή μετακίνηση του κόμβου router μπορεί να επιφέρει μεγάλη απόκλιση στην τιμές του metric – αποτελέσματα του εκτιμητή.

4.4 Μετρήσεις WMEWMA

Σκοπός της παρακάτω εκτίμησης του WMEWMA γίνεται προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του ως stand-alone metric, αλλά και η απόδοσή του σε σύγκριση με τα άλλα metric που έχουμε υλοποιήσει.

Για τον υπολογισμό του WMEWMA πραγματοποιήθηκαν εκτιμήσεις του PRR σε 3 διαφορετικές στατικές θέσεις του router, σε εσωτερικό και σε εξωτερικό χώρο. Ο αριθμός των μετρήσεων PRR που λήφθηκαν σε κάθε θέση είναι 20. Αυτό έγινε καθώς για την υλοποίηση του εκτιμητή WMEWMA απαιτούνται μια σειρά από τιμές PRR, οι οποίες εξομαλύνονται με την εφαρμογή του φίλτρου EWMA. Η τιμή του παράγοντα εξομάλυνσης $\alpha \in [0..1]$ του φίλτρου καθορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha = \frac{2}{window_size + 1}$$

Όπου το window size είναι το πλήθος των μετρήσεων PRR ανά υπολογιστικό βήμα του exponentially weighted moving average(EWMA).

Για το window size, επιλέχθηκαν 3 διαφορετικές τιμές ανά θέση:

- a. Window size = 3
- b. Window size = 5
- c. Window size = 2

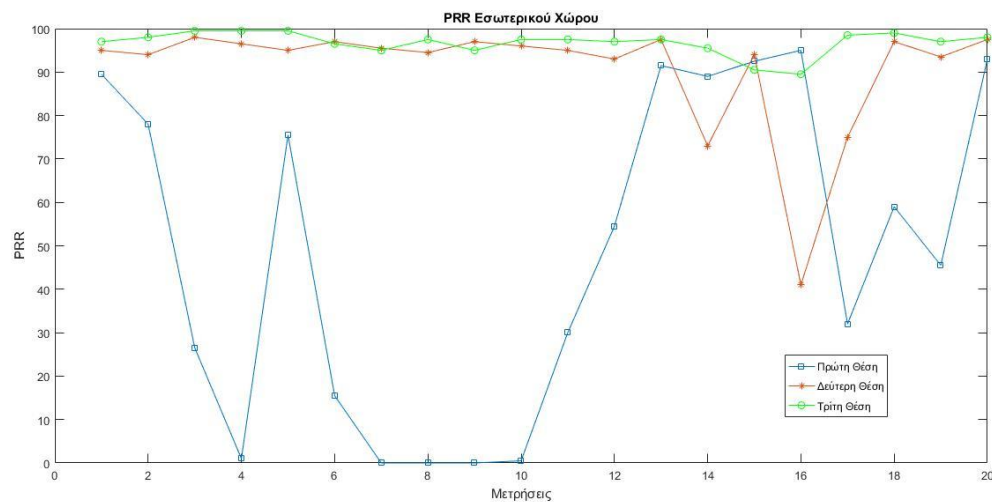
Οπότε οι 3 διαφορετικοί παράγοντες εξομάλυνσης ανά θέση υπολογισμού διαμορφωθήκαν ως εξής:

- I. $\alpha = 0.5$
- II. $\alpha = 0.3$
- III. $\alpha = 0.6$

Κατά συνέπεια πραγματοποιήθηκαν 3 διαφορετικές εκτιμήσεις για τον WMEWMA σε κάθε θέση, κάθε μια από τις οποίες αποτυπώνεται και σε ξεχωριστό plot.

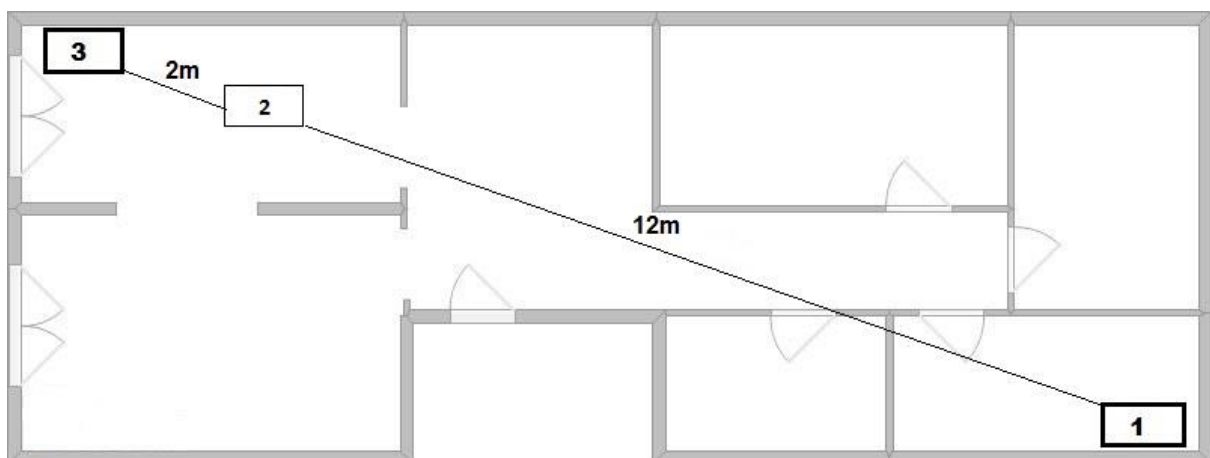
4.4.1 Εσωτερικός χώρος

Πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις με βάση τον εκτιμητή PRR σε εσωτερικό χώρο, κάθε μια σε διαφορετική θέση του router. Η πρώτη θέση είναι στα 12 μέτρα από τον κόμβο source, η δεύτερη στα 10 μέτρα και η τρίτη στα 8 μέτρα.



Σχήμα 1. Plot για τα PRR και των 3 θέσεων μετρήσεων σε εσωτερικό χώρο.

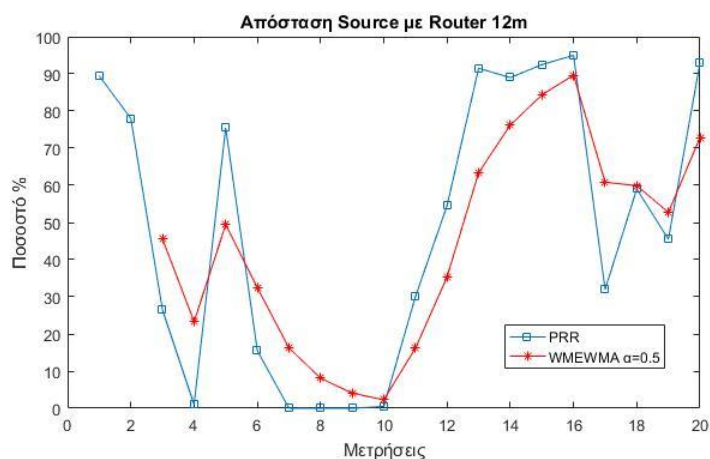
1^η Θέση



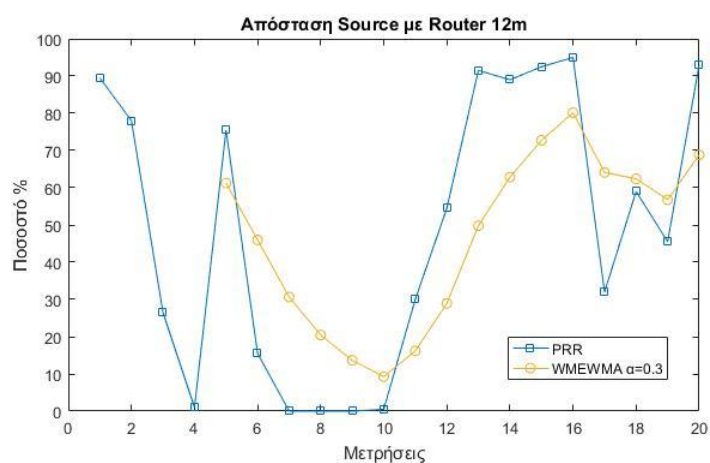
Σχήμα 2. Απεικόνιση αποστάσεων 1ης Θέσης μετρήσεων με PRR σε εσωτερικό χώρο.
(Source ↔ 12m ↔ Router ↔ 2m ↔ Destination. Distance: 14m)

Ο πρώτος υπολογισμός του WMEWMA σε εσωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε στην πρώτη θέση. Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε με βάση την 1^η μέτρηση του 2^{ου} περάματος του PRR σε εσωτερικό χώρο, λόγω της πολύ κακής ποιότητας σήματος που παρουσιάστηκε.

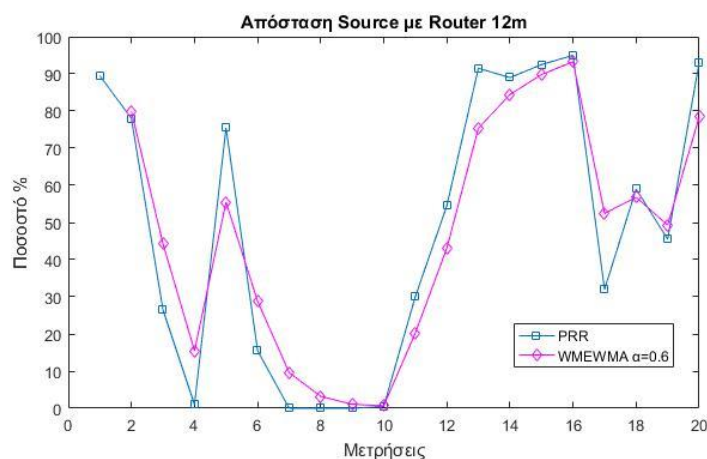
Τα αποτελέσματα του WMEWMA για τις μετρήσεις του PRR στο σημείο αυτό μετά την εφαρμογή του φίλτρου EWMA για smoothing factors $\alpha=0.5$, $\alpha=0.3$ και $\alpha=0.666$ φαίνονται στα παρακάτω plots.



Σχήμα 3. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.5$) της 1^{ης} θέσης σε εσωτερικό χώρο



Σχήμα 4. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.3$) της 1^{ης} θέσης σε εσωτερικό χώρο

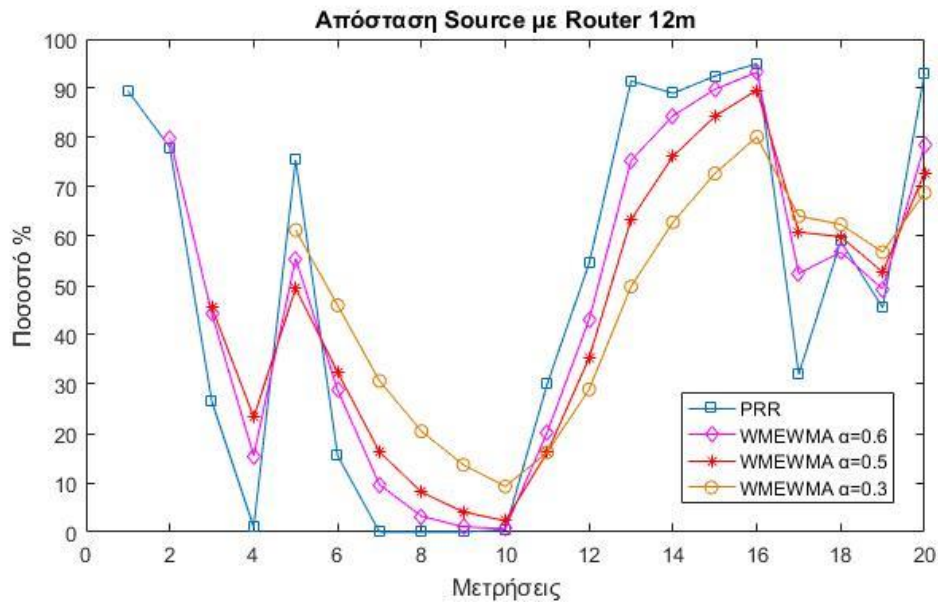


Σχήμα 5. . Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$) της 1^{ης} θέσης σε εσωτερικό χώρο

Παρατηρείται και από τα 3 σχήματα ότι η καμπύλη του WMEWMA για $\alpha = 0.6$, προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη του PRR. Αυτό θεωρείται αναμενόμενο καθώς είναι γνωστό ότι όσο το α πλησιάζει τη μέγιστη τιμή του 1 τόσο μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στις πιο πρόσφατες τιμές του PRR, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στον WMEWMA να αποτυπώνει καλύτερα τις απότομες αλλαγές στην ποιότητα του σήματος (reactiveness). Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3, από την 7^η μέχρι και την 10^η μέτρηση, η τιμή του PRR είναι μηδενική, κάτι που αντικατοπτρίζεται στην τιμή της 10^{ης} μέτρησης από τον WMEWMA. Το ίδιο παρατηρείται και στο σχήμα 1, αν και όπως φαίνεται από την καμπύλη του WMEWMA για $\alpha=0.5$ οι τιμές των 2 LQEs εμφανίζουν ελάχιστα μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με την προηγούμενη σύγκριση.

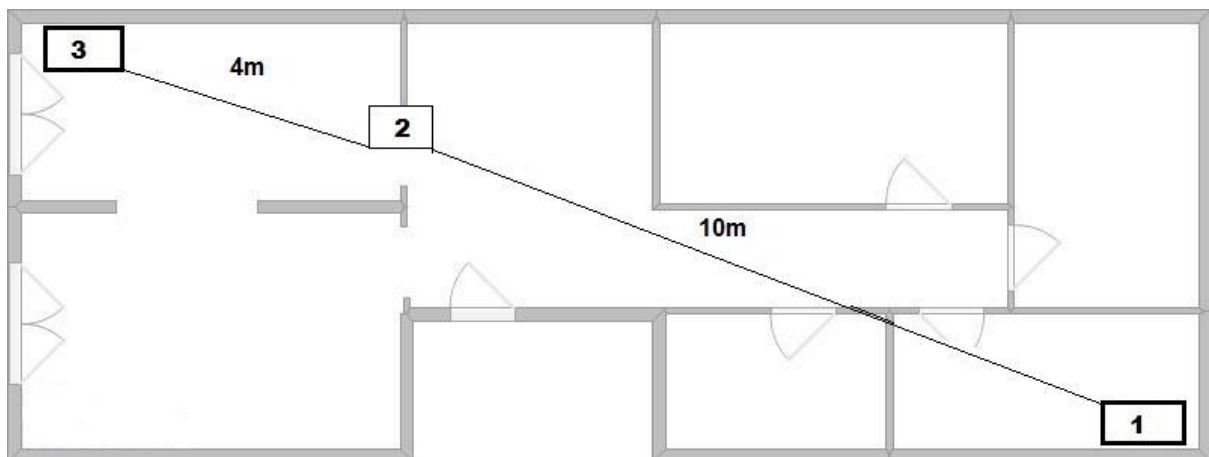
Επομένως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι για συνδέσεις με μεγάλη διακύμανση στις τιμές του PRR (συνδέσεις που βρίσκονται στην ενδιάμεση περιοχή), όπου παρατηρούνται απότομες «κορυφές» και «κοιλιάδες», ο WMEWMA με τη χρήση ενός smoothing factor α λίγο μεγαλύτερου της τιμής 0.5 κάνει μια καλύτερη εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης.

Από την άλλη, μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των τιμών του PRR και του WMEWMA φαίνεται να υπάρχει για $\alpha = 0.3$, κάτι που κρίνεται ως αναμενόμενο, δεδομένου της σταθερότητας (stability) που προσδίδει στον WMEWMA η συγκεκριμένη τιμή του παράγοντα εξομάλυνσης. Όπως φαίνεται λοιπόν από το σχήμα 2, για $\alpha < 0.5$ ο WMEWMA δεν μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια την ποιότητα μιας ενδιάμεσης σύνδεσης.



Σχήμα 6. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$ & $\alpha=0.5$ & $\alpha=0.3$) της 1ης θέσης σε εσωτερικό χώρο

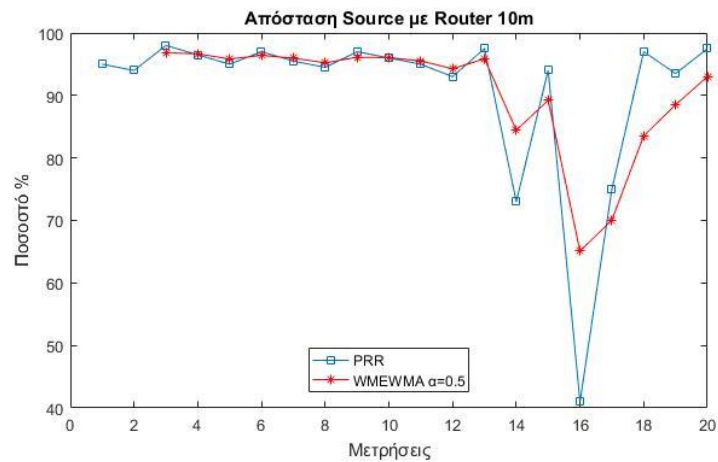
2^η Θέση



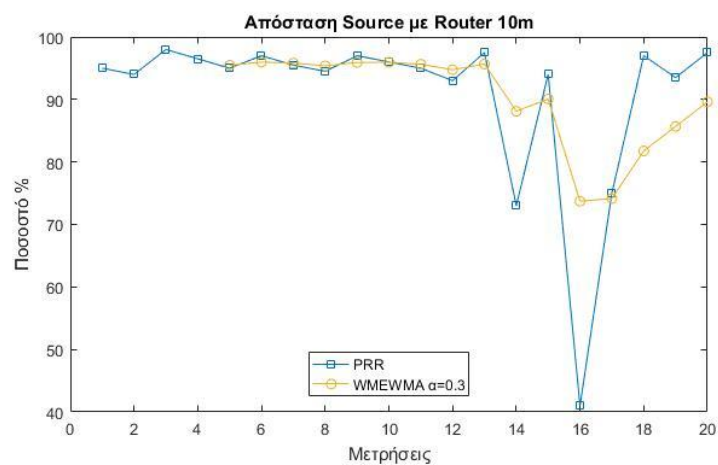
Σχήμα 7. Απεικόνιση αποστάσεων 2ης Θέσης μετρήσεων με PRR σε εσωτερικό χώρο.
(Source \leftrightarrow 10m \leftrightarrow Router \leftrightarrow 4m \leftrightarrow Destination. Distance: 14m)

Ο δεύτερος υπολογισμός του WMEWMA σε εσωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε στην δεύτερη θέση. Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε με βάση την 4^η μέτρηση του 2^{ου} περάματος του PRR σε εσωτερικό χώρο, λόγω της μέτριας ποιότητας σήματος που παρουσιάστηκε.

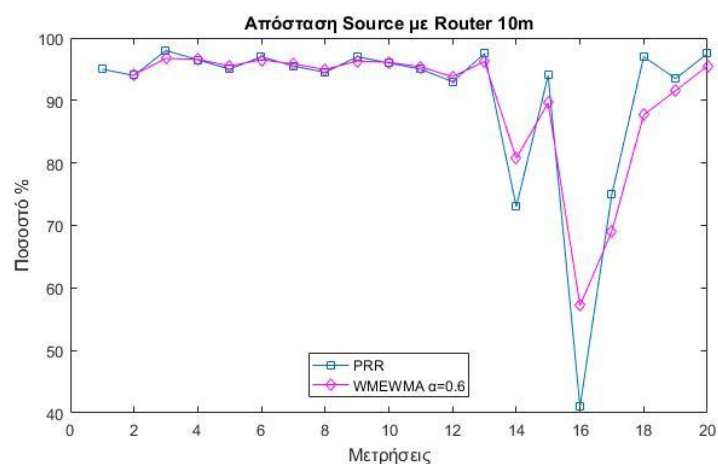
Τα αποτελέσματα του WMEWMA για τις μετρήσεις του PRR στο σημείο αυτό μετά την εφαρμογή του φίλτρου EWMA για smoothing factors $\alpha=0.5$, $\alpha=0.3$ και $\alpha=0.6$ φαίνονται στα παρακάτω plots.



Σχήμα 8. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.5$) της 2ης θέσης σε εσωτερικό χώρο



Σχήμα 9. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.3$) της 2ης θέσης σε εσωτερικό χώρο



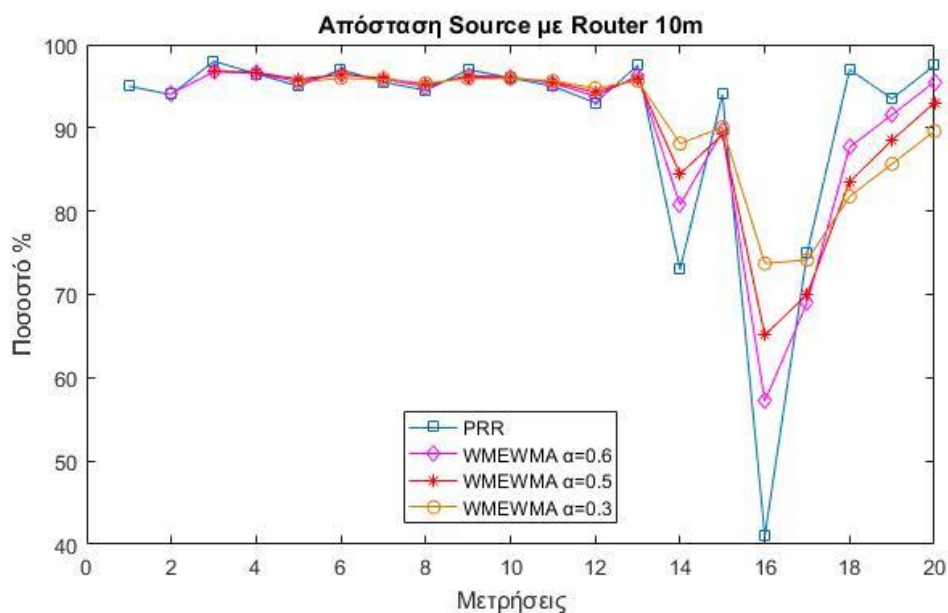
Σχήμα 10. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$) της 2ης θέσης σε εσωτερικό χώρο

Παρατηρείται και από τα 3 σχήματα ότι η καμπύλη του PRR παρουσιάζει μια σχετική σταθερότητα των τιμών του metric έως την 14^η μέτρηση, όπου υπάρχει μια στιγμιαία σχετικά μεγάλη πτώση. Ωστόσο κατά τη 18^η μέτρηση, η τιμή του PRR επαναφέρεται στα αρχικά υψηλά της επίπεδα μέχρι και την τελευταία μέτρηση. Αυτή η σχετικά μεγάλη μεταβολή που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια 4 μετρήσεων του PRR πιθανόν να οφείλεται σε interference

ή αυξομείωση της έντασης του σήματος (burst). Δεδομένης αυτής της απόκλισης μικρού αριθμού μετρήσεων (παράθυρο παρατήρησης), ο WMEWMA με τη χρήση ενός smoothing factor α , ο οποίος παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν ($\alpha < 0.5$), μπορεί να δώσει μια καλύτερη εκτίμηση της ποιότητας σύνδεσης.

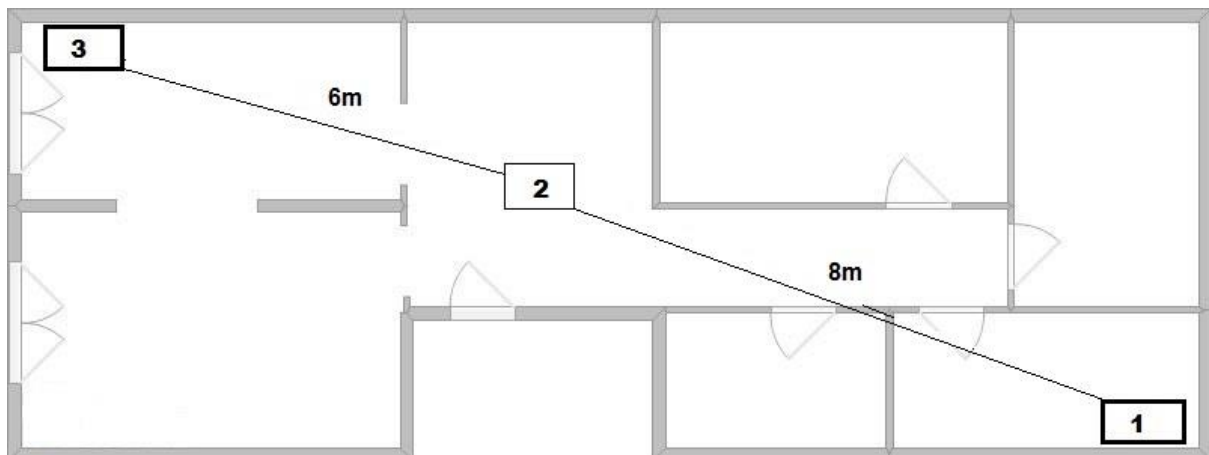
Ο συγκεκριμένος LQE για $\alpha=0.3$ εξομαλύνει την μεταβολή των τιμών του PRR, δίνοντας περισσότερο βάρος σε προηγούμενες μετρήσεις από την τρέχουσα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2. Αυτό προσδίδει μια σταθερότητα στο metric καθιστώντας την εκτίμηση που παρέχει για το σύνολο των μετρήσεων πιο ακριβή.

Οι καμπύλες του WMEWMA για $\alpha=0.5$ και $\alpha=0.6$, όπως φαίνεται και από τα σχήματα 1 και 3 αντίστοιχα, ακολουθούν με μικρότερη απόκλιση την καμπύλη του PRR. Έτσι, η σημαντική επιρροή που φαίνεται να δέχονται από την ξαφνική μείωση κάποιων τιμών του, τις καθιστά λιγότερο ικανές για λεπτομερειακή περιγραφή και κατηγοριοποίηση της σύνδεσης.



Σχήμα 11. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$ & $\alpha=0.5$ & $\alpha=0.3$) της 2ης θέσης σε εσωτερικό χώρο

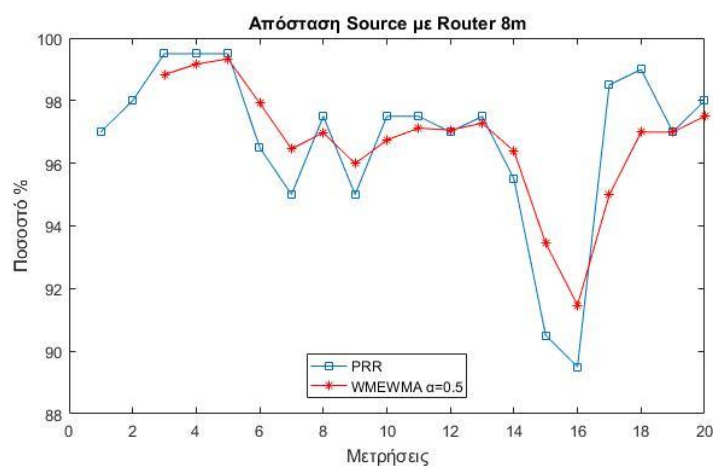
3^η Θέση



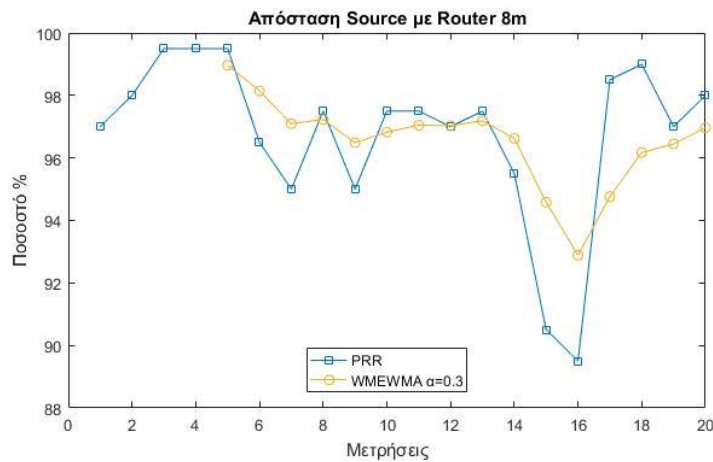
Σχήμα 12. Απεικόνιση αποστάσεων 3ης Θέσης μετρήσεων με PRR σε εσωτερικό χώρο.
(Source \leftrightarrow 8m \leftrightarrow Router \leftrightarrow 6m \leftrightarrow Destination. Distance: 14m)

Ο τρίτος υπολογισμός του WMEWMA σε εσωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε στην τρίτη θέση. Η συγκεκριμένη ενδιάμεση θέση επιλέχθηκε με βάση την 1^η μέτρηση του 1^{ου} περάματος του PRR σε εσωτερικό χώρο, λόγω της καλής ποιότητας σήματος που παρουσιάστηκε.

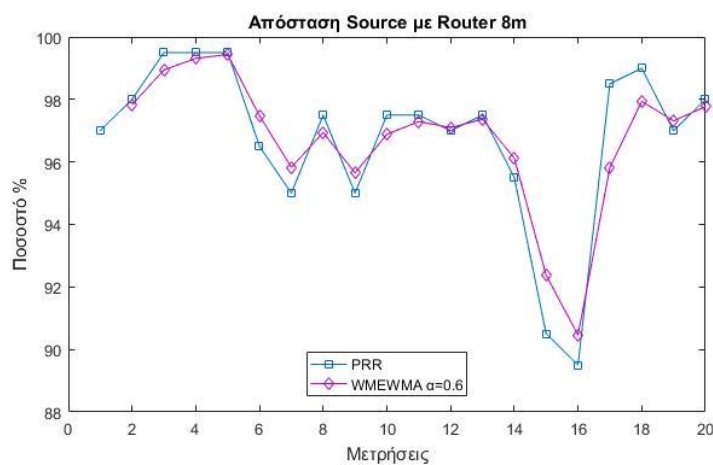
Τα αποτελέσματα του WMEWMA για τις μετρήσεις του PRR στο σημείο αυτό, μετά την εφαρμογή του φίλτρου EWMA για smoothing factors $\alpha=0.5$, $\alpha=0.3$ και $\alpha=0.6$, φαίνονται στα παρακάτω plots.



Σχήμα 13. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.5$) της 3ης θέσης σε εσωτερικό χώρο



Σχήμα 14. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.3$) της 3ης θέσης σε εσωτερικό χώρο

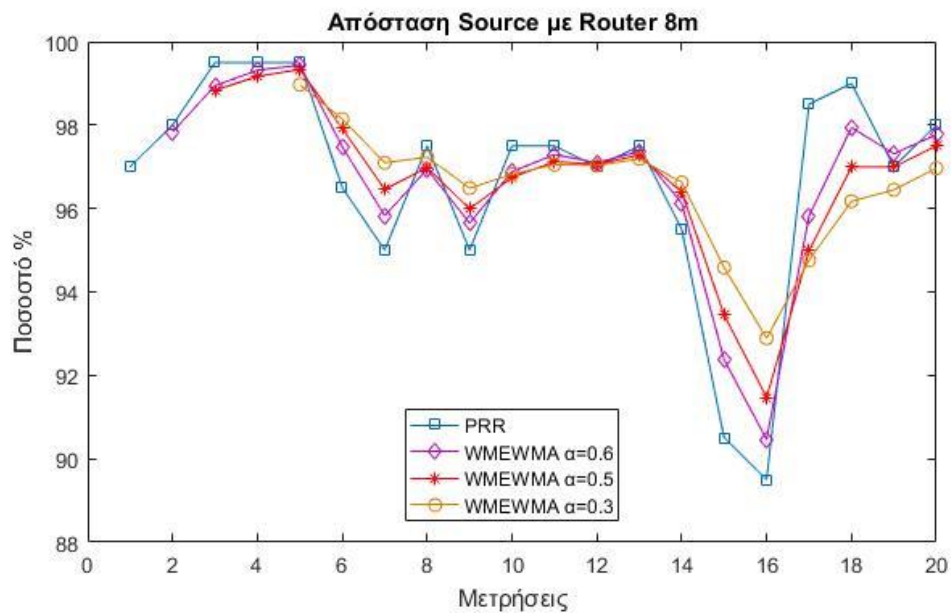


Σχήμα 15. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$) της 3ης θέσης σε εσωτερικό χώρο

Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούνται πολύ μικρές αυξομειώσεις των τιμών του PRR, με τις δεύτερες να κυμαίνονται άνω του 90% σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις. Η καμπύλη του, όπως φαίνεται και στα 3 σχήματα παραμένει σχετικά σταθερή.

Δεδομένου ότι η ποιότητα της σύνδεσης είναι υψηλή, ανάλογα με την επιλογή της τιμής του παράγοντα εξομάλυνσης α , ο εκτιμητής ποιότητας σύνδεσης που βασίζεται στην εφαρμογή του EWMA φίλτρου μπορεί ακόμα και να κατηγοριοποιήσει την σύνδεση ως καλή/πολύ καλή/τελεία.

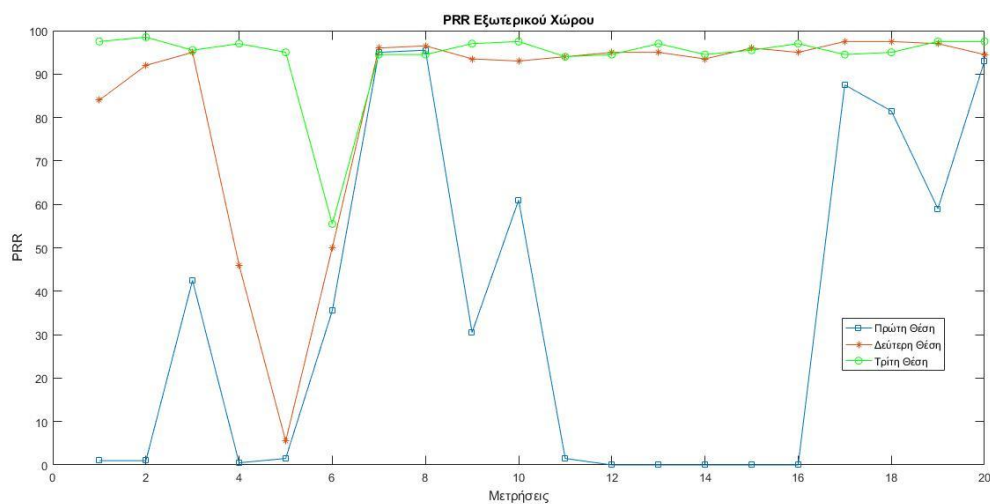
Όπως φαίνεται στα σχήματα 13, 14 και 15, η καμπύλη του WMEWMA για $\alpha=0.6$ προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη του PRR. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται ο παράγοντας εξομάλυνσης α τόσο πιο λεπτομερειακή καθίσταται η εκτίμηση της ήδη υψηλής ποιότητας σύνδεσης. Ωστόσο και για τις άλλες 2 τιμές του α (σχήματα 13 και 14) ο WMEWMA παρέχει μια ακριβή προσέγγιση της ποιότητας του σήματος.



Σχήμα 16. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$ & $\alpha=0.5$ & $\alpha=0.3$) της 2ης θέσης σε εσωτερικό χώρο

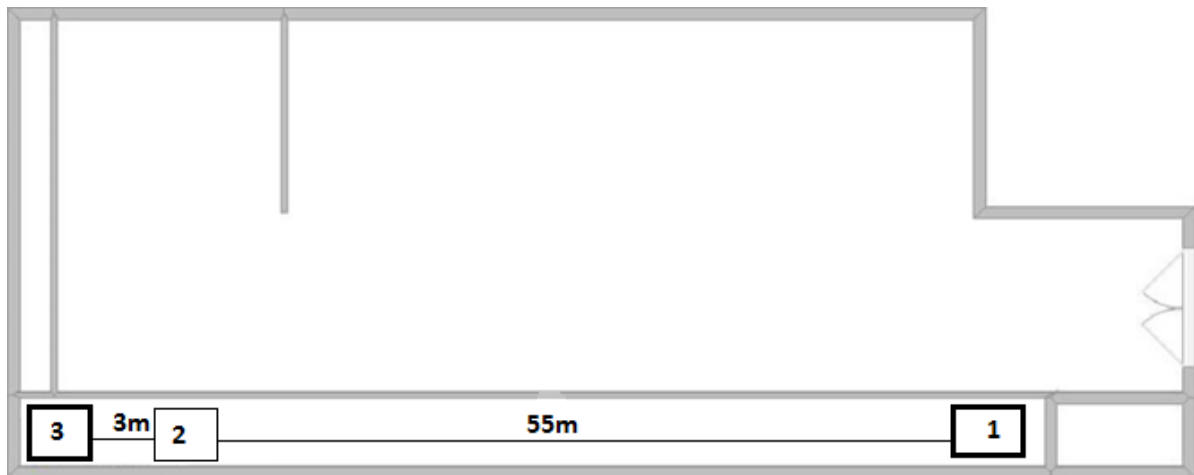
4.4.2 Εξωτερικός χώρος

Πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις με βάση τον εκτιμητή PRR σε εξωτερικό χώρο, κάθε μια σε διαφορετική θέση του router. Η πρώτη θέση είναι στα 55 μέτρα από τον κόμβο source, η δεύτερη στα 54 μέτρα και η τρίτη στα 52 μέτρα.



Σχήμα 17. Plot για τα PRR και των 3 θέσεων μετρήσεων σε εξωτερικό χώρο.

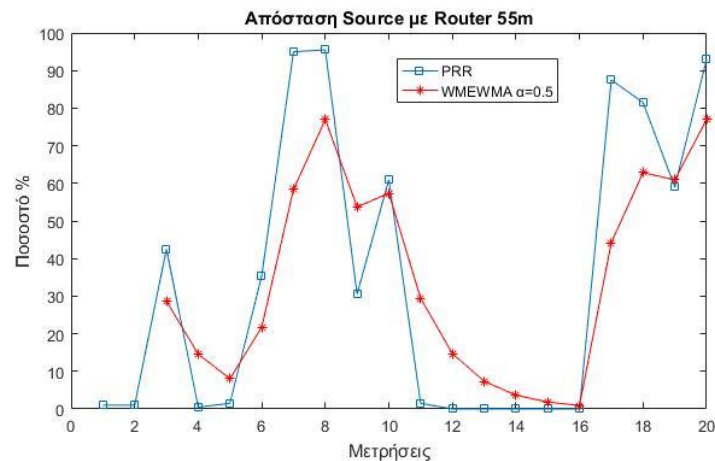
1^η Θέση



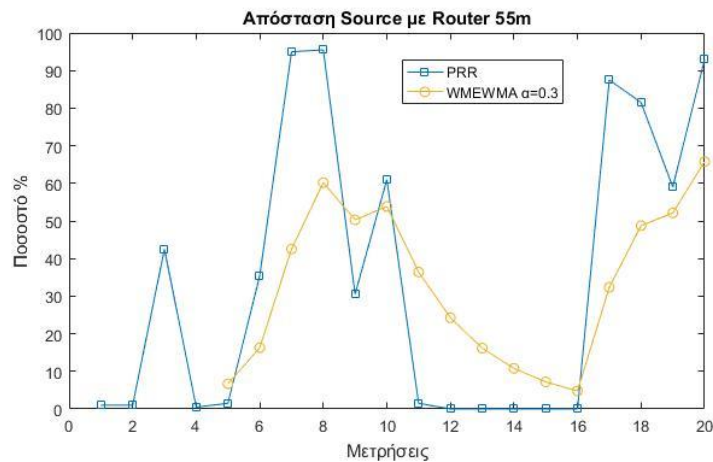
Σχήμα 18. Απεικόνιση αποστάσεων 1ης Θέσης μετρήσεων με PRR σε εσωτερικό χώρο.
(Source \leftrightarrow 3m \leftrightarrow Router \leftrightarrow 54m \leftrightarrow Destination. Distance: 58m)

Ο πρώτος υπολογισμός του WMEWMA σε εξωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε στην πρώτη θέση. Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε με βάση την 2^η μέτρηση του 2^{ου} περάματος του PRR σε εξωτερικό χώρο, λόγω της πολύ κακής ποιότητας σήματος που παρουσιάστηκε.

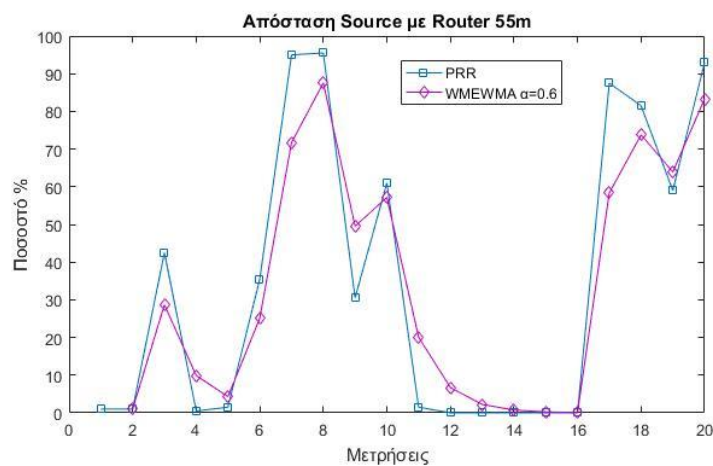
Τα αποτελέσματα του WMEWMA για τις μετρήσεις του PRR στο σημείο αυτό μετά την εφαρμογή του φίλτρου EWMA για smoothing factors $\alpha=0.5$, $\alpha=0.3$ και $\alpha=0.666$ φαίνονται στα παρακάτω plots.



Σχήμα 19. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.5$) της 1ης θέσης σε εξωτερικό χώρο



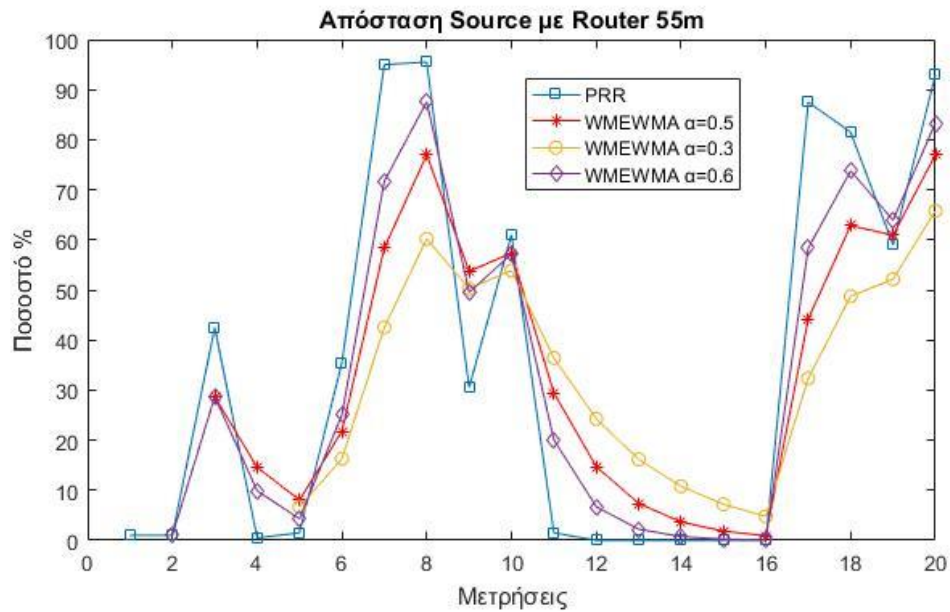
Σχήμα 20. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.3$) της 1ης θέσης σε εξωτερικό χώρο



Σχήμα 21. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$) της 1ης θέσης σε εξωτερικό χώρο

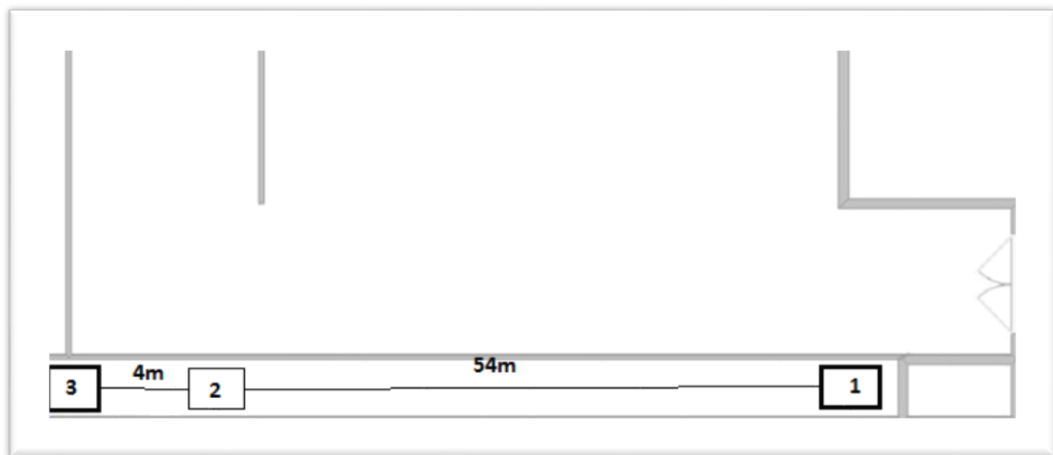
Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούνται μεγάλες αυξομειώσεις στις τιμές του PRR, από 0% έως και σχεδόν 100%. Ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων προσεγγίζει το 0%. Ποιο συγκεκριμένα στην 3^η, 6^η, 9^η, 10^η και 19^η μέτρηση παρατηρούνται κακές εκτιμήσεις του PRR, στην 7^η, 8^η και 20^η παρατηρούνται καλές εκτιμήσεις και στην 17^η και 18^η μέτρες εκτιμήσεις. Αυτή η συμπεριφορά της ποιότητας του σήματος είναι φυσιολογική μιας και ο κόμβος router, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, φαίνεται να βρίσκεται στην περιοχή αποκοπής.

Κατά συνέπεια οι καλές εκτιμήσεις του PRR είναι προϊόν παρεμβολών ή burst του σήματος και οπότε δεν μπορούν να τους δοθεί μεγάλο βάρος στην εξαγωγή συμπερασμάτων οπότε και παρατηρείτε ότι ο wmevma με παράγοντα εξομάλυνσης $\alpha = 0.3$ να εκφράζει καλύτερα το χαρακτήρα της σύνδεσης.



Σχήμα 22. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$ & $\alpha=0.5$ & $\alpha=0.3$) της 1ης θέσης σε εξωτερικό χώρο

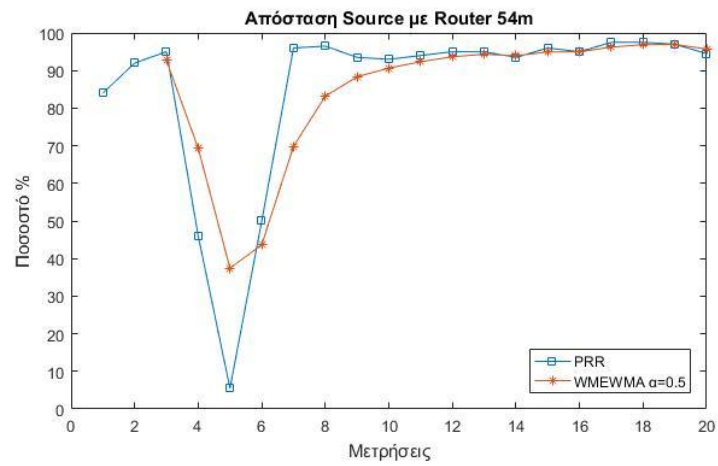
2^η Θέση



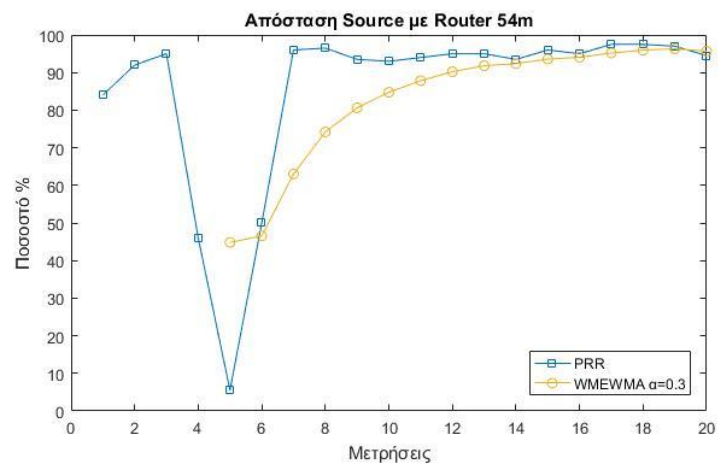
Σχήμα 23. Απεικόνιση αποστάσεων 2ης Θέσης μετρήσεων με PRR σε εσωτερικό χώρο.
(Source \leftrightarrow 4m \leftrightarrow Router \leftrightarrow 54m \leftrightarrow Destination. Distance: 58m)

Ο δεύτερος υπολογισμός του WMEWMA σε εξωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε στην δεύτερη θέση. Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε με βάση την 1^η μέτρηση του 2^{ου} περάματος του PRR σε εξωτερικό χώρο, λόγω της μέτριας ποιότητας σήματος που παρουσιάστηκε.

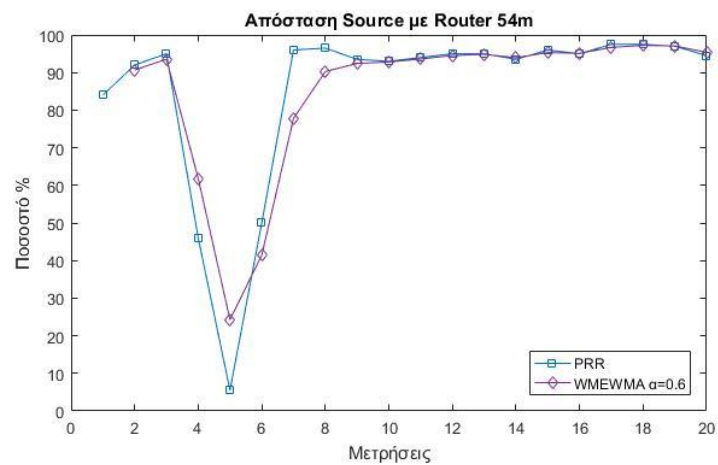
Τα αποτελέσματα του WMEWMA για τις μετρήσεις του PRR στο σημείο αυτό μετά την εφαρμογή του φίλτρου EWMA για smoothing factors $\alpha=0.5$, $\alpha=0.3$ και $\alpha=0.6$ φαίνονται στα παρακάτω plots.



Σχήμα 24. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.5$) της 2ης θέσης σε εξωτερικό χώρο



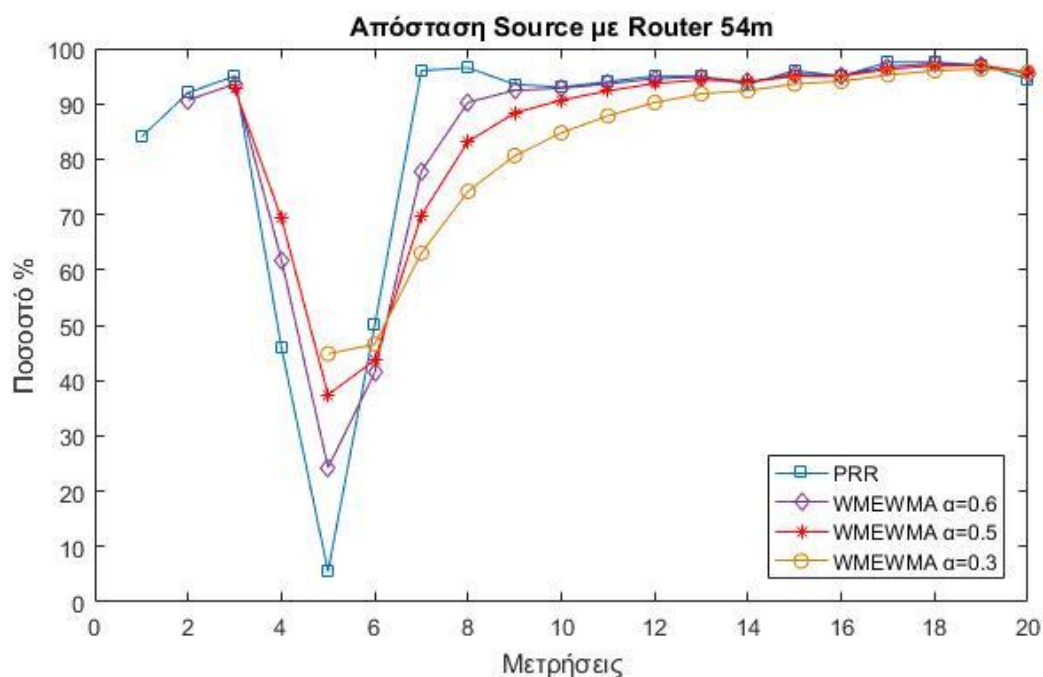
Σχήμα 25. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.3$) της 2ης θέσης σε εξωτερικό χώρο



Σχήμα 26. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$) της 2ης θέσης σε εξωτερικό χώρο

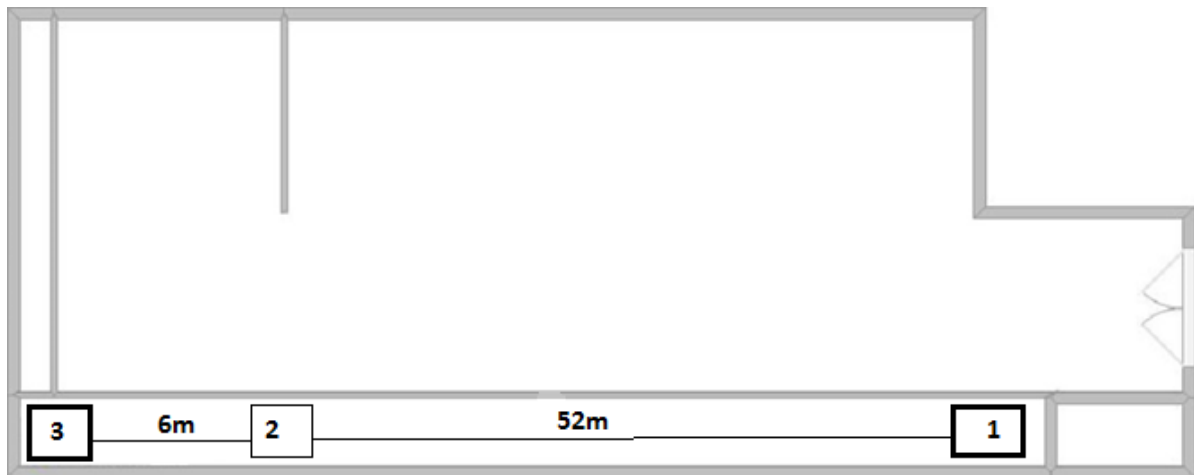
Στη δεύτερη θέση που λήφθηκαν οι μετρήσεις παρατηρείται ότι, πέρα από την 4^η, 5^η και 6^η μέτρηση που υπάρχει μια βύθιση των εκτιμήσεων, το PRR κυμαίνεται στο 95%. Αν και η βύθιση των εκτιμήσεων είναι για μικρό χρονικό διάστημα είναι αρκετά επιβλαβές για την σύνδεση καθώς υπάρχει μεγάλο drop rate στα πακέτα οπότε σε TCP πακέτα που περιλαμβάνουν και επιστροφή ACK πακέτων θα δημιουργούσε αρκετό latency στην σύνδεση και κατά συνέπεια και περαιτέρω απώλεια στα πακέτα δεδομένων.

Στη συγκεκριμένη μέτρηση βλέπουμε ότι οι εκτιμήσεις του wmevma που την χαρακτηρίζουν καλύτερα είναι με παράγοντες εξομάλυνσης μικρότερων ή και ίσων του 0.5 ($\alpha \leq 0.5$) όπως βλέπουμε κι από τα διαγράμματα. Αυτό συμβαίνει μιας και η βύθιση του σήματος, αν και σημαντική, δεν είναι για πολλές εκτιμήσεις οπότε θα πρέπει να εμφανίζεται με έναν τρόπο εξομαλυμένο.



Σχήμα 27. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$ & $\alpha=0.5$ & $\alpha=0.3$) της 2ης θέσης σε εξωτερικό χώρο

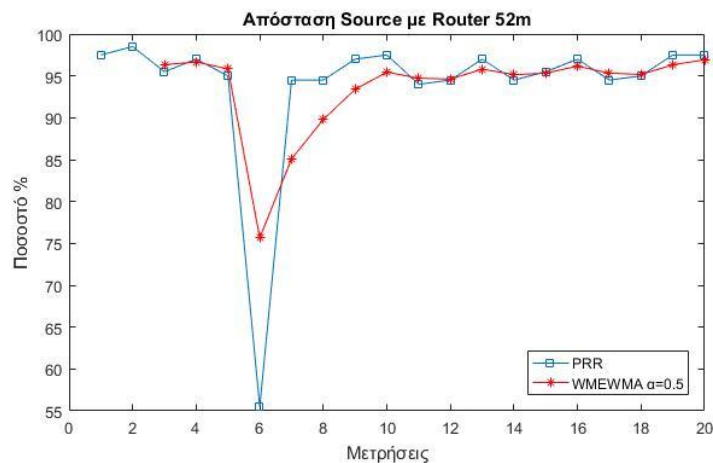
3η Θέση



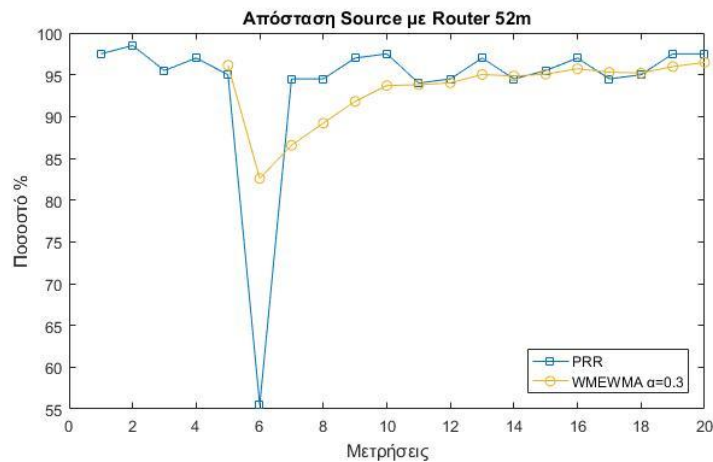
Σχήμα 28. Απεικόνιση αποστάσεων 3ης Θέσης μετρήσεων με PRR σε εσωτερικό χώρο.
(Source ↔ 6m ↔ Router ↔ 52m ↔ Destination. Distance: 58m)

Ο τρίτος υπολογισμός του WMEWMA σε εξωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε στην τρίτη θέση. Η συγκεκριμένη θέση επιλέχθηκε με βάση την 3^η και 4^η μέτρηση του 2^{ου} περάματος του PRR σε εξωτερικό χώρο, λόγω της καλής ποιότητας σήματος που παρουσιάστηκε.

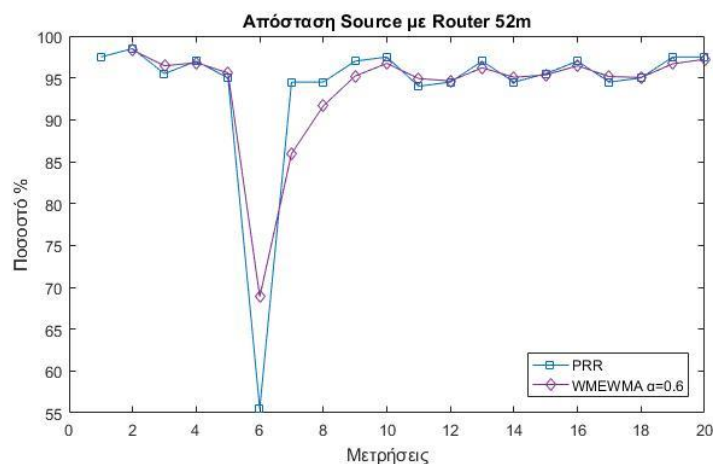
Τα αποτελέσματα του WMEWMA για τις μετρήσεις του PRR στο σημείο αυτό μετά την εφαρμογή του φίλτρου EWMA για παράγοντες εξομάλυνσης $\alpha=0.5$, $\alpha=0.3$ και $\alpha=0.6$ φαίνονται στα παρακάτω plots.



Σχήμα 29. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.5$) της 3ης θέσης σε εξωτερικό χώρο



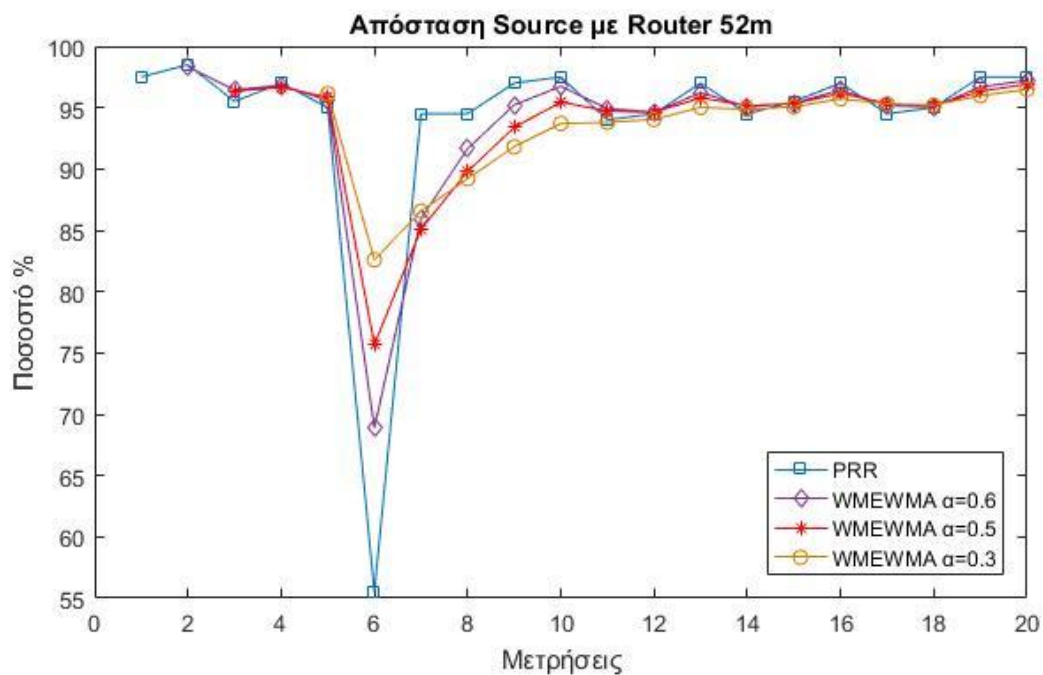
Σχήμα 30. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.3$) της 3ης θέσης σε εξωτερικό χώρο



Σχήμα 31. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$) της 3ης θέσης σε εξωτερικό χώρο

Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρείται ότι το PRR είναι επί το πλείστον άνω του 95% πέρα από μία εκτίμηση που υπήρξε κοντά στο 55%. Αν και η εκτίμηση αυτή είναι άνω του 50% έχει δειχθεί ότι καλή ποιότητα δικτύου υπάρχει όταν ο PRR ξεπερνάει το 90-95% (βάση του αριθμού των πακέτων που πραγματοποιείται η μέτρηση) οπότε η συγκεκριμένη εκτίμηση είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν (μεγάλο βάρος) στην μέτρηση του wmevwma.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία απορρέει το συμπέρασμα ότι ο παράγοντας εξομάλυνσης που χαρακτηρίζει καλύτερα τη σύνδεση είναι άνω του 0.5 ($\alpha > 0.5$) όπως φαίνεται κι από το 30ο σχήμα. Επίσης παρατηρείται ότι ενώ η 7η και 8η μέτρηση του PRR είναι άνω του 95% ο wmevwma τις ρίχνει προκειμένου να εξομαλύνει την απότομη μεταβολή που παρατηρήθηκε στην 6η.

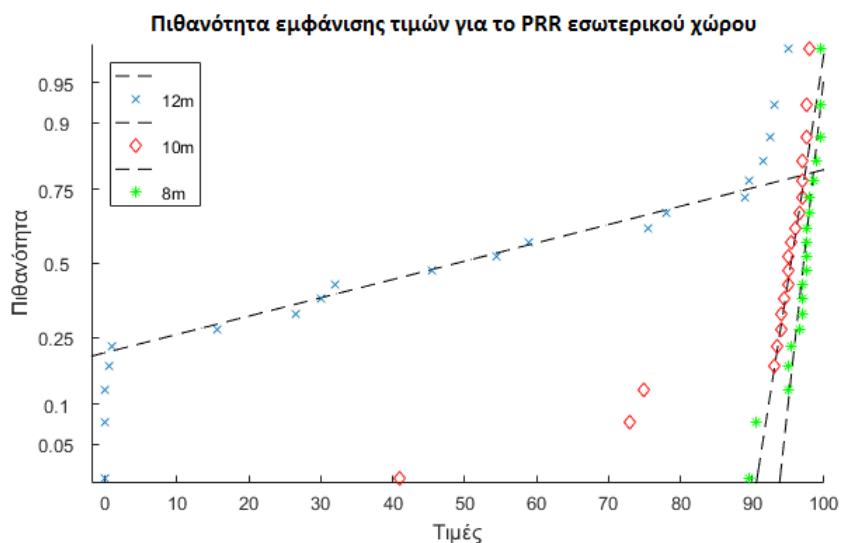


Σχήμα 32. Plot για τα PRR και WMEWMA (με $\alpha=0.6$ & $\alpha=0.5$ & $\alpha=0.3$) της 3ης θέσης σε εξωτερικό χώρο

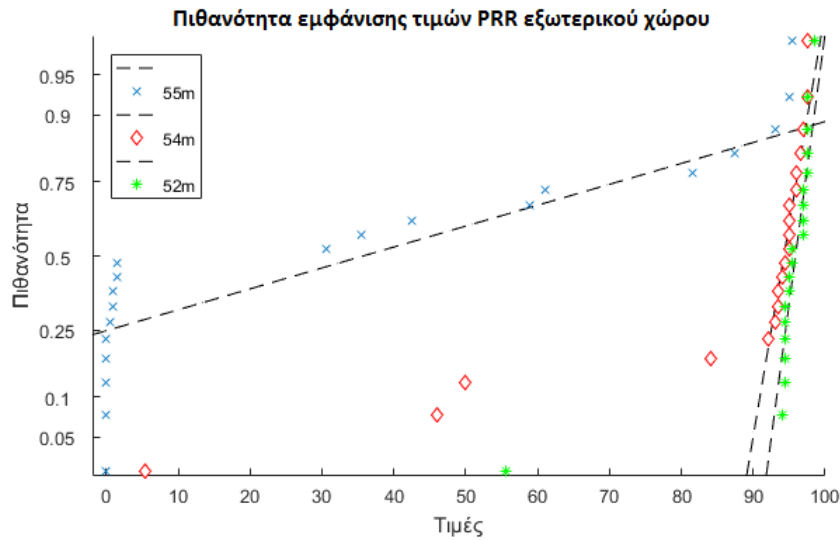
Παρατηρήσεις από τις μετρήσεις του WMEWMA

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων του WMEWMA παρατηρήθηκε ότι όσο καλύτερη είναι η ποιότητα της σύνδεσης τόσο μεγαλύτερος μπορεί να είναι ο παράγοντας εξομάλυνσης α ($0 \leq \alpha \leq 1$). Επίσης παρατηρήθηκε ότι παίζει μεγάλο ρόλο στην ποιότητα της σύνδεσης η θέση της κεραίας κάθε κόμβου μιας και όταν είναι σε παραλληλία μειώνονται σημαντικά οι παρεμβολές και είναι μεγάλη η συσχέτιση των σημάτων.

Παρατίθενται και οι συγκεντρωτικές κανονικές κατανομές στις τρεις θέσεις στις εξωτερικές και εσωτερικές μετρήσεις.



Σχήμα 33. Πιθανότητα εμφάνισης τιμών για τα PRR εσωτερικού χώρου



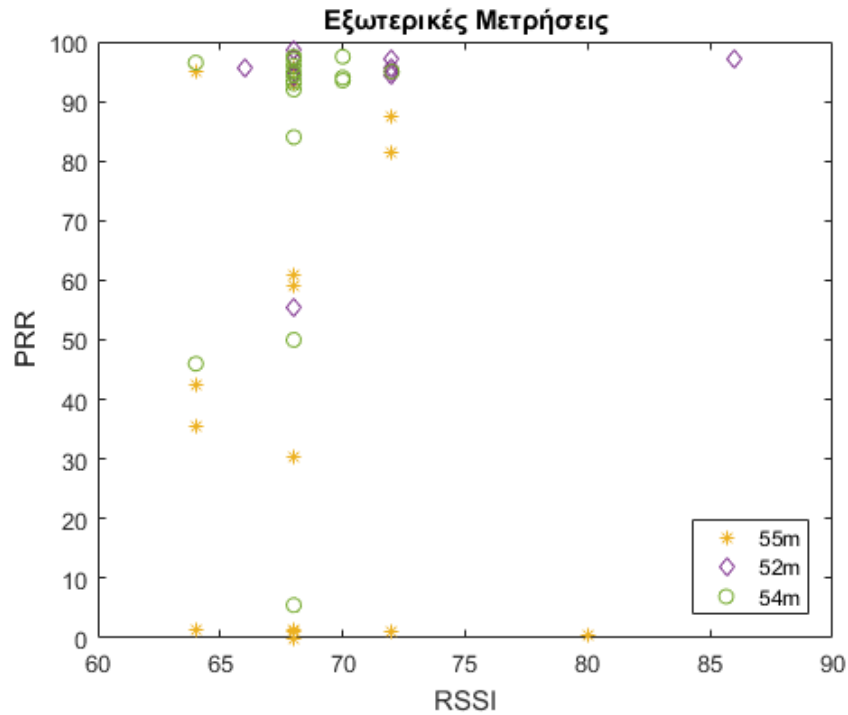
Σχήμα 34. Πιθανότητα εμφάνισης για τα PRR εξωτερικού χώρου

Παρατηρούμε ότι όσο καλύτερο είναι το PRR τόσο ομαλότερη είναι η πρόβλεψη των τιμών του PRR.

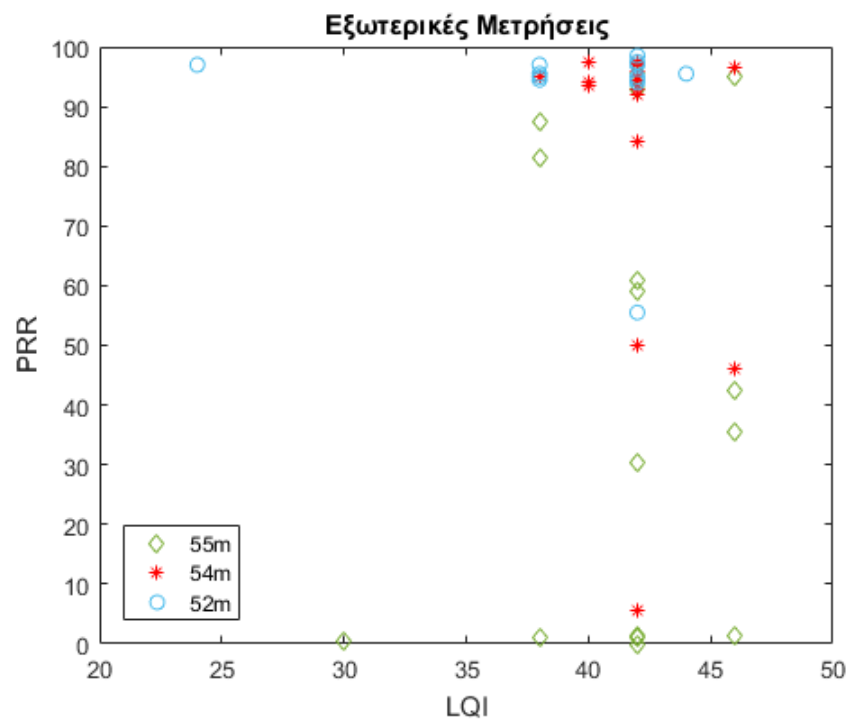
4.5 Συμπεράσματα Μετρήσεων

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και τις μετρήσεις που πάρθηκαν βγήκαν κάποια πολύ σημαντικά συμπεράσματα.

- Οι τρεις κύριες περιοχές διάδοσης σήματος είναι μεγαλύτερες στον εξωτερικό χώρο από τι στον εσωτερικό.
- Οι συνδέσεις στην μεταβατική περιοχή όπως φαίνεται και από τα γραφήματα στα σχήματα 33 και 34 έχουν ασύμμετρες κατανομές σε σχέση με τις συνδέσεις που βρίσκονται στις περιοχές αποκοπής και σύνδεσης.
- Η ασυμμετρία των συνδέσεων όπως φαίνεται κι από το σχήμα 24 μπορεί και να μην είναι συνεχής.
- Οι hardware εκτιμητές ποιότητας σύνδεσης από μόνοι τους δεν είναι όσο αποδοτικοί όσο σε συνδυασμό με τους software εκτιμητές ποιότητας σύνδεσης. Από τα σχεδιαγράμματα 35 και 36 βλέπουμε τις μετρήσεις για RSSI/PRR και LQI/PRR.



Σχήμα 35. Σχεδιάγραμμα εξωτερικών μετρήσεων για RSSI και PRR



Σχήμα 36. Σχεδιάγραμμα εξωτερικών μετρήσεων για LQI και PRR

Όπως φαίνεται κι από τα διαγράμματα, οι τρεις περιοχές διάδοσης σήματος μπορούν να οριστούν βάση των σημείων συγκέντρωσης των μετρήσεων.

Τέλος παρατηρήσαμε ότι στην εκτίμηση ποιότητας μιας σύνδεσης δεν υπάρχει κάποια βέλτιστη λύση για όλα τα δίκτυα αλλά εξαρτάται από τους υπολογιστικούς πόρους που προσφέρονται σε κάθε σύστημα αλλά και σε τι χώρο βρίσκονται (πχ. εσωτερικό, εξωτερικό).

5. Βιβλιογραφία

- I. Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L., Zuniga, M. A., Youssef, H., Boano, C. A., and Alves M., ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), Volume 8 Issue 4, Article No. 34, November 2012, "Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: a Survey."
- II. Angelos Vlavianos, Lap Kong Law, Ioannis Broustis, Srikanth V. Krishnamurthy, Michalis Faloutsos, Department of Computer Science and Engineering, University of California, Riverside, CA 92521, "Assessing Link Quality in IEEE 802.11 Wireless Networks: Which is the Right Metric?"
- III. Nouha B., Anis K., Youssef H., Mario A, Maissa B. J., Denis R. and Leandro B., "F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks"
- IV. Carlo Alberto Boano, Marco Antonio Zuniga, Thiemo Voigt, Andreas Willig, and Kay Romer, "The Triangle Metric: Fast Link Quality Estimation for Mobile Wireless Sensor Networks"
- V. Finn Haugen, March 21, 2008, "Derivation of a Discrete-Time Lowpass Filter"
- VI. Bouyahi Mohamed, Zrelli Amira, Rezig Houria and Ezzedine Tahar, SYSCOM Laboratory –NATIONAL ENGINEERING SCHOOL OF TUNIS- TUNISIA, International Journal on Applications of Graph Theory in Wireless Ad hoc Networks and Sensor Networks (GRAPH-HOC) Vol.6, No.4, December 2014, "Impact of energy and Link Quality Indicator with Link Quality Estimators in wireless sensor networks"
- VII. Lochan Verma, Seongkwan Kim, Sunghyun Choi, School of Electrical Engineering & INMC, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea, Sung-Ju Lee, Media Communications & Networking Lab, Hewlett-Packard Laboratories, Palo Alto, CA 94304, "Reliable, Low Overhead Link Quality Estimation for 802.11 Wireless Mesh Networks"
- VIII. https://en.wikipedia.org/wiki/Ad_hoc
- IX. https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- X. https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_smoothing