



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Μοντέλα
Πρόβλεψης Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) και
Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) σε Σύγχρονα
Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Χαράλαμπου Ν. Πήτα

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
& Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2003)

Αθήνα, Απρίλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Μοντέλα
Πρόβλεψης Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) και
Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) σε Σύγχρονα
Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Χαράλαμπου Ν. Πήτα

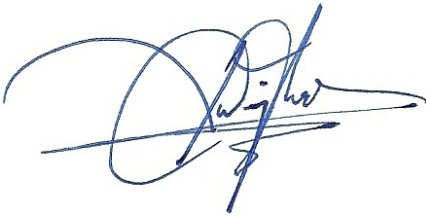
Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
& Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2003)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Φίλιππος Κωνσταντίνου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Παναγιώτης Κωττής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Χρήστος Καψάλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την 7-μελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Απριλίου 2012.

		
Φ. Κωνσταντίνου Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Π. Κωττής Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Χρ. Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π.
		
Αθ. Παναγόπουλος Λέκτορας Ε.Μ.Π.	Μ. Θεολόγου Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Στ. Κωτσόπουλος Καθηγητής Παν/μίου Πάτρας
		
	Αθ. Κανάτας Αναπλ. Καθηγητής Παν/μίου Πειραιά	

Αθήνα, Απρίλιος 2012



...

Χαράλαμπος Ν. Πήτας

Διπλ/χος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2003)

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2012)

© Χαράλαμπος Ν. Πήτας, 2012 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

© Charalampos N. Pitas, 2012 – All rights reserved

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, § 202).

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στέργε μὲν τὰ παρόντα, ζήτει δὲ τὰ βελτίω. Ισοκράτης

Η έναρξη και η ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής δεν θα ήταν εφικτή αν δεν είχαν συμβάλει ένα πλήθος σημαντικών ανθρώπων που είχα την τύχη και την τιμή να με υποστηρίζουν, να με καθοδηγήσουν και να με ενθαρρύνουν σε κάθε προσπάθεια.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου για την επίβλεψη της διδακτορικής μου διατριβής στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών ΕΜΠ (ΕΚΡ/ΕΜΠ). Η προτροπή του να ενασχοληθώ με ευρωπαϊκές ερευνητικές δράσεις COST καθώς και με έργα σχετικά με την μέτρηση ποιότητας των ραδιοδικτύων από το 2005 αποτέλεσε κίνητρο για μένα να εστιάσω στο ιδιαίτερα ενδιαφέρον τεχνικό και ερευνητικό πεδίο της διδακτορικής διατριβής και για τον σκοπό της έρευνας μου παρείχε προηγμένο τεχνολογικό εξοπλισμό. Καθοριστικό σημείο της ερευνητικής μας σχέσης αποτέλεσε το β' εξάμηνο του 2010 όταν συνεργαστήκαμε στενά και μου ανέθεσε την κύρια τεχνική ευθύνη του έργου της συγκριτικής αξιολόγησης (benchmarking) των δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών στην Ελλάδα.

Θελω να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες προς τον κ. Θανάση Παναγόπουλο, Λέκτορα ΕΜΠ, για την ουσιαστική καθοδήγηση της διδακτορικής μου έρευνας τα τελευταία κρίσιμα χρόνια. Είναι ένας χαρισματικός άνθρωπος, νέος και δραστήριος πανεπιστημιακός δάσκαλος, μέντορας και φίλος που δίπλα του έμαθα πως να ανιχνεύω και να ακολουθώ τα δύσκολα μονοπάτια της ποιοτικής έρευνας στηρίζοντας και ενδυναμώνοντας με στις δύσκολες στιγμές.

Θα ήθελα στη συνέχεια να ευχαριστήσω ειλικρινά τα μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής και πρώτους δασκάλους μου στις Ασύρματες Επικοινωνίες, τον κ. Παναγιώτη Κωττή, Καθηγητή ΕΜΠ, για την καθοριστική συμβολή του στην έναρξη των διδακτορικών σπουδών μου στο ΕΜΠ το 2003, καθώς επίσης και τον κ. Χρήστο Καψάλη, Καθηγητή ΕΜΠ, για το συνεχές ενδιαφέρον τους για την πρόοδο της έρευνάς μου. Θερμές ευχαριστίες ανήκουν και στους αξιότιμους κκ. Μιχάλη Θεολόγου, Καθηγητή ΕΜΠ, Θανάση Κανάτα, Αναπληρωτή Καθηγητή Πανεπιστημίου Πειραιά, και Σταύρο

Κωτσόπουλο, Καθηγητή Πανεπιστημίου Πατρών, οι οποίοι είναι σημαντικοί δάσκαλοι της περιοχής των Κινητών Επικοινωνιών στην Ελλάδα και αποτέλεσε τιμή προς το πρόσωπό μου η ενεργός συμμετοχή τους στην 7-μελή επιτροπή κρίσης της διατριβής με τις εύστοχες και έγκριτες παρατηρήσεις και συμβουλές επί του τελικού κειμένου. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες προς τον κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ, για το ευγενικό ενδιαφέρον του στις διδακτορικές σπουδές μου καθώς και την κα. Κωνσταντίνα Νικήτα, Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να παρακολουθήσω το καλοκαιρινό εντατικό ευρωπαϊκό πρόγραμμα “SOCRATES” στην Ιταλία το 2005.

Σημαντική ήταν η συμβολή των ανθρώπων της εταιρίας SwissQual AG στην εξέλιξη της διδακτορικής διατριβής. Αναφέρομαι στον κ. Arthur Tollenaar για την παροχή δεδομένων μετρήσεων για τις ανάγκες της έρευνας καθώς και τον κ. Fabrizio Esposito για την άμεση και άρτια τεχνική υποστήριξη επί του εξοπλισμού *Diversity Benchmark* οποτεδήποτε ήταν αναγκαία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους συνεργάτες μηχανικούς του ΕΚΡ/ΕΜΠ καθώς και εξωτερικούς συνεργάτες και τεχνικούς συμβούλους (*CommSquare Hellas, Space Hellas, P3 Ingenieurgesellschaft, AdaptIT*), που είχα τη χαρά να συνεργαστώ κατά την διάρκεια έργων μέτρησης ποιότητας υπηρεσιών σε κινητά δίκτυα από το 2005. Ιδιαίτερα σημαντική και ευχάριστη ήταν η εμπειρία που αποκτήθηκε σε άφογο κλίμα συνεργασίας με τους έμπειρους μηχανικούς του Τμήματος Βελτιστοποίησης Δικτύων Πρόσβασης στη Διεύθυνση Ραδιοδικτύου της COSMOTE Κινητές Τηλεπικοινωνίες ΑΕ την περίοδο 2005-2008.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον φίλο και συνάδελφο όλα τα χρόνια στο Πολυτεχνείο και στο ΕΚΡ κ. Νίκο Παπανικολάου καθώς και τους νέους ερευνητές μηχανικούς κκ. Δημήτρη Παπανικολάου, Γιώργο Πιτσιλαδή, Μάριο Πουλάκη και Βούλα Βασσάκη με την ευχή για επιτυχή περάτωση των διδακτορικών διατριβών τους. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους κκ. Ανδρέα Τσόπελα, Βασίλη Σοφρά, Ελένη Αυγέρη, Μαριλένα Καλλένου, Κωνσταντίνα Χουρδάκη και Δρ. Δημήτρη Χαρίλα για την ευχάριστη συνεργασία σε κοινά ερευνητικά πεδία επί θεμάτων ποιότητας κινητών δικτύων. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω φιλικά τον Δρ. Απόστολο Φέρτη από το ETH-Zürich για την ενδιαφέρουσα ερευνητική συνεργασία μας σε θέματα βελτιστοποίησης. Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Θανάση Μαρούση για τον πάντα ευγενικό και επικουρικό ρόλο του, καθώς και τους κ. Νίκο Μπούζη και κα. Ντότυ Κελέφα για την τεχνική και διοικητική μέριμνα αντίστοιχα όλα τα χρόνια στο ΕΚΡ/ΕΜΠ.

Θερμές ευχαριστίες ανήκουν στο σύνολο του μόνιμου και έκτακτου επιστημονικού, εργαστηριακού και διοικητικού προσωπικού στο ΤΕΙ Ιονίων Νήσων για την άφογη, δημιουργική και ευχάριστη εκπαιδευτική συνεργασία μας τα δυο όμορφα και παραγωγικά

χρόνια 2008-2010 στη Λευκάδα.

Επίσης ευχαριστώ τους φοιτητές στο Εργαστήριο του μαθήματος “Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες” από το 2005 έως το 2011 στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, και τους σπουδαστές στο ΤΕΙ Λευκάδας την περίοδο 2008 - 2010, για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξαν όταν είχα την τιμή και την χαρά να είμαι δάσκαλός τους. Η πολύχρονη εμπειρία αυτή στον χώρο της Παιδείας και ειδικά σε όλες τις βαθμίδες της Τεχνικής Εκπαίδευσης, από τις Τεχνικές Σχολές Μαθητείας έως το Πολυτεχνείο, αποτέλεσε ένα διαρκές κίνητρο για “*διδάσκεισθαι μαθών διδάσκειν επιστήσει*”.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους προϊσταμένους μου μηχανικούς στη Διεύθυνση Νέων Έργων Μεταφοράς του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ ΑΕ) για την υποστήριξή τους και κυρίως για την χορήγηση βραχυχρόνιας εκπαιδευτικής άδειας για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής.

Θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες απευθύνω στους αγαπητούς και αξιόλογους φίλους μου που είχα την τύχη, την τιμή και την χαρά να γνωρίσω από τα σχολικά χρόνια στο Αγρίνιο, τις σπουδές στο Πανεπιστήμιο και το Πολυτεχνείο της Αθήνας, τη στρατιωτική θητεία καθώς και από το αγαπημένο μου χωριό, τις Πηγές Άρτας. Κοινά βιώματα και εμπειρίες, προβληματισμοί, στόχοι και αξίες, αλλά και η αλληλοϋποστήριξη και αλληλοσυμπάρσταση σε δύσκολες στιγμές αποτέλεσαν καθοριστικοί παράγοντες να συμβαδίζουμε πολλά χρόνια τώρα διατηρώντας συμπαγείς φιλικούς δεσμούς.

Ευχαριστώ εγκάρδια τη Λένα για την πολύπλευρη, συνεχή, ανεξάντλητη και ευχάριστη υπομονή, υποστήριξη, κατανόηση και συμπάρστασή της.

Ευχαριστίες ανήκουν στους στενούς συγγενείς μου που πάντα με υποστηρίζουν ψυχικά. Ειδικά μνημονεύω τον παππού μου †Δημήτρη Μ. Βανάκα που αποτέλεσε για μένα από μικρό παιδί, πρότυπο ανθρώπου και πολυτεχνίτη μάστορα, διδάσκοντας και κληροδοτώντας μου πολύτιμες αξίες, σοφές συμβουλές και το “*φιλομαθείν*”.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Βασίλη ο οποίος πάντα με στηρίζει και συμμετέχει ενεργά τόσο σε χαρούμενες όσο προπάντων σε δύσκολες στιγμές.

Τέλος, ευχαριστώ ολόψυχα τους σεβαστούς γονείς μου, τον πατέρα μου Νίκο και την μητέρα μου Ευαγγελία, οι οποίοι όλα αυτά τα χρόνια υποστήριζαν πάντα έμπρακτα και με βεβαιότητα ότι η “Παιδεία” είναι μια εκ των σημαντικών παραμέτρων για την Ποιότητα της Ζωής μου (Quality of Life), ιδιαίτερα *εν καιρώ κρίσης*, και για τον σκοπό αυτό με στήριζαν από παιδί με την ολόψυχη αγάπη τους, την ευχή τους και κάθε διαθέσιμο οικογενειακό πόρο.

Μπάμπης Πήτας

Καλλιθέα, Απρίλιος 2012

Στους γονείς μου,

Νίκο και Ευαγγελία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο μελέτης της διδακτορικής διατριβής είναι η θεωρητική και πειραματική έρευνα καινοτόμων μεθόδων και τεχνικών για τον χαρακτηρισμό και την πρόβλεψη της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών σε σύγχρονα συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών. Γίνεται μια εισαγωγή στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές των δημόσιων επίγειων κινητών δικτύων επικοινωνιών και τις παρεχόμενες κινητές υπηρεσίες τηλεφωνίας, βιντεο-τηλεφωνίας, πολυμέσων και υπηρεσιών διαδικτύου όπως μεταφορά αρχείων, πλοήγηση στο διαδίκτυο και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Αναλύονται κριτικά οι πολύ σημαντικοί δείκτες επίδοσης ποιότητας εμπειρίας χρήστη και ποιότητας υπηρεσιών δικτύου κινητών επικοινωνιών. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονίσουμε ότι για τον σκοπό της παρούσας έρευνας έγινε χρήση εξειδικευμένου εργαστηριακού εξοπλισμού και επιπλέον ότι διεξήχθησαν διεξοδικές επί το πεδίο (σε πραγματικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών) μετρήσεις ποιότητας.

Το κείμενο της διατριβής χωρίζεται σε δυο κύρια Μέρη:

Στο Μέρος I, γίνεται μια εισαγωγή στα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών GSM/GPRS/EDGE/UMTS/HSPA/LTE/LTE Adv. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παρεχόμενες κινητές υπηρεσίες όπως η τηλεφωνία, η βιντεο-τηλεφωνία, οι υπηρεσίες πολυμέσων και βίντεο και οι υπηρεσίες κινητού διαδικτύου όπως η μεταφορά αρχείων χρήση πρωτοκόλλου FTP, η πλοήγηση σε ιστοσελίδες χρήσει πρωτοκόλλου HTTP και η υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου χρήσει πρωτοκόλλων SMTP/POP3/IMAP. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις έννοιες εμπειρία αντιλαμβανόμενης από τον χρήστη, ποιότητα εμπειρίας χρήστη και ποιότητα υπηρεσιών συστήματος/δικτύου. Έτσι, παρουσιάζονται σύγχρονοι αλγόριθμοι αντικειμενικής και υποκειμενικής αξιολόγησης ποιότητας φωνής, βίντεο, πολυμέσων και εν γένει υπηρεσιών δεδομένων διαδικτύου. Ειδικά για τις υπηρεσίες διαδικτύου, παρουσιάζονται αναλυτικά μοντέλα επίδοσης για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Στη συνέχεια, ορίζονται οι σημαντικοί δείκτες επίδοσης και σημειώνονται ειδικά θέματα συγκριτικής αξιολόγησης αυτών. Ως κεφάλαιο ιδιαίτερης σημασίας σε αυτό το τμήμα της διατριβής αποτελεί η περιγραφή του ειδικού και σύνθετου εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της έρευνας καθώς και η επιλογή των σεναρίων μετρήσεων. Διεξήχθησαν πολυάριθμες καμπάνιες μετρήσεων τόσο για

την αξιολόγηση ορθής λειτουργίας του εξοπλισμού όσο και για τον χαρακτηρισμό ποιότητας των εν λειτουργία δημόσιων δικτύων κινητών επικοινωνιών.

Στο Μέρος II, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων μετρήσεων. Τα δεδομένα μετρήσεων που συλλέχθηκαν, αναλύθηκαν με προχωρημένες στατιστικές και υπολογιστικές μεθόδους αφού εισήχθησαν προηγουμένως σε σύνθετες γεωχρονικές βάσεις δεδομένων και προέκυψαν νέα μοντέλα. Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων ενισχύθηκε με μεθόδους εύρωστης (αλεξιθόρυβης) βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα προτείνονται προηγμένα μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας βασισμένα σε μη γραμμική παλινδρόμηση. Επιπλέον, έγινε εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων υπολογιστικής ευφυίας και εξόρυξης γνώσης από δεδομένα μετρήσεων. Έτσι, προτείνονται μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας με εφαρμογή αλγορίθμων κατηγοριοποίησης όπως δένδρα αποφάσεων, k-πλησιέστεροι γείτονες και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Επιπρόσθετα, εξετάζεται η ασαφής λογική στην πρόβλεψη ποιότητας και προτείνονται μοντέλα βασισμένα σε συστήματα προσαρμοστικού νευροασαφούς συμπερασμού. Τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να έχουν άμεση εφαρμογή στις διαδικασίες σχεδιασμού και βελτιστοποίησης ραδιοδικτύων πρόσβασης καθώς και να χρησιμοποιηθούν για τη συγκριτική αξιολόγηση επίδοσης των παρεχόμενων υπηρεσιών σε εν λειτουργία δημόσια δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

Στα πλαίσια της διατριβής εκπονήθηκε εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα και ιδιαίτερα προτύπων, προδιαγραφών και συστάσεων από τους διεθνείς τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς (ETSI, 3GPP, ITU-T/R, ECC) καθώς και σχετικών αποφάσεων ευρωπαϊκών και εθνικών ρυθμιστικών αρχών των τηλεπικοινωνιών.

Τέλος, εξάχθηκαν ιδιαίτερα καινοτόμα αποτελέσματα που δημοσιεύτηκαν σε διεθνή περιοδικά και σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων.

Λέξεις Κλειδιά— δίκτυα κινητών επικοινωνιών, ποιότητα υπηρεσίας, ποιότητα εμπειρίας, χαρακτηρισμός ποιότητας, συγκριτική αξιολόγηση, μοντέλα πρόβλεψης, βελτιστοποίηση, παλινδρόμηση, ασαφής λογική, εξόρυξη γνώσης από δεδομένα.

ABSTRACT

The objective of the present Ph.D thesis is to propose innovative theoretical and experimental methods and techniques for the characterization and the prediction of quality of modern services in mobile communication systems. There is an Introduction and brief description of the modern architecture of public land mobile communication networks and the mobile services that are provided such as telephony, video telephony, multimedia and Internet services e.g. file transfer, web browsing and e-mail. We present the Key Performance Indicators (KPIs) regarding the quality of user experience (QoE) and the quality of service (QoS). For the scope of our research we used special laboratory equipment and we have conducted extensive field (in real mobile networks) measurements of quality.

The remaining of the thesis is divided into two main parts:

Part I includes an Introduction to modern mobile communications networks (GSM/GPRS/EDGE/UMTS/HSPA/LTE/LTE Adv). Afterwards the provided services such as mobile telephony, video telephony, multimedia and video services as well as mobile internet using file transfer protocol, web browsing use using http protocol and e-mail service using SMTP/POP3/IMAP protocols are presented. We focus on experience as it is perceived by the user (User Experience, UX), quality of end-user experience (Quality of Experience, QoE), and service quality system / network (System QoS). Moreover, modern algorithms are presented regarding the objective and the subjective quality evaluation of voice, video, multimedia and data/Internet services in general. Especially for Internet services, we present analytical models of mobile network performance. Following, the Key Performance Indicators are defined and we mark specific issues such benchmarking. A chapter of utmost importance, in this first Part of the thesis, is the description of the special and complex measurement equipment that has been used in the research and the definition of the measurement scenarios. Numerous measurement campaigns have been conducted on the one hand for assessing the proper function of equipment and on the other hand to characterize the quality of service public mobile networks.

In Part II, the collected measurement data are fully analyzed. Firstly they

have been introduced into complex geospatial-temporal measurements databases and afterwards advanced statistical and computational methods are used to analyze them for the derivation of new models. The statistical data analysis is strengthened by using robust optimization methods. Advanced quality prediction models based on nonlinear regression are obtained and proposed. Moreover, modern methods of computational intelligence and data mining have been applied to the measurement data and the application of categorization algorithms for prediction models such as decision trees, k-nearest neighbors and artificial neural networks are used. Fuzzy logic is also examined in order to predict quality of service and new models based on adaptive neuro fuzzy inference systems (ANFIS) are derived. These results can be directly adopted and used by telecommunication engineers for the radio network access planning, optimization and performance benchmarking of public land mobile networks.

This thesis provides an extensive literature research on relative standards, specifications and recommendations by international Telecommunications Administrations (ETSI, 3GPP, ITU-T/R, ECC) and decisions of european and national telecommunications regulators and committees.

Finally, the new results that have been obtained have been published in International Journals and in International Conference Proceedings.

Key words— *mobile communication networks, quality of service, quality of experience, quality characterization, benchmarking, prediction modeling, optimization, regression, fuzzy logic, data mining.*

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Θεματολογία της διατριβής	1
1.2	Δομή της Διδακτορικής Διατριβής	1
2	Σύγχρονα Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών	7
2.1	Συστήματα Επικοινωνιών 2ης Γενιάς	7
2.2	Συστήματα Επικοινωνιών 3ης Γενιάς	8
2.3	Συστήματα Επικοινωνιών 3.5ης Γενιάς	10
2.3.1	HSPA: High Speed Packet Access	10
2.3.2	HSDPA: High-Speed Downlink Packet Access	11
2.3.3	HSUPA: High-Speed Uplink Packet Access	13
2.4	Συστήματα Επικοινωνιών 4ης Γενιάς	13
2.4.1	LTE: Long Term Evolution	13
2.4.2	LTE Adv: Long Term Evolution Advanced	15
2.5	Σύνοψη Κεφαλαίου	17
3	Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)	19
3.1	Τεχνική Ορολογία Ποιότητας: QoE, ESQoS, SQoS	20
3.1.1	QoE: Quality of Experience	21
3.1.2	ESQoS: End-to-end Service QoS	22
3.1.3	SQoS: System Quality of Service	22
3.2	Ποιότητα Τηλεφωνίας	24
3.2.1	Αντιληπτική Αξιολόγηση Ποιότητας Τηλεφωνίας	25
3.2.2	Ποιότητα Κλήσης Τηλεφωνίας	30
3.2.3	Ποιότητα Τηλεφωνίας Κινητού Διαδικτύου	32
3.3	Ποιότητα Κινητής Βιντεοτηλεφωνίας και Πολυμεσικής Επικοινωνίας	37
3.3.1	Τεχνολογία Βιντεοτηλεφωνίας	37
3.3.2	Τεχνολογία Πολυμεσικής Μετάδοσης Βίντεο	38
3.3.3	Ποιότητα Εικόνας και Βίντεο	40

3.3.4	Αντιληπτική Αξιολόγηση Ποιότητας Βίντεο	42
3.3.5	Ποιότητα Πολυμέσων	49
3.3.6	Ποιότητα Κλήσης Εικονοτηλεφωνίας	50
3.4	Ποιότητα Υπηρεσιών Δεδομένων Κινητού Διαδικτύου	51
3.4.1	Υποκειμενική Αξιολόγηση Ποιότητας Υπηρεσιών Κινητού Διαδικτύου	51
3.4.2	Αντικειμενική Αξιολόγηση Ποιότητας Υπηρεσιών Κινητού Διαδικτύου	54
3.5	Σύνοψη Κεφαλαίου	56
4	Ανάλυση Επίδοσης Κινητού Ευρυζωνικού Πολυμεσικού Δικτύου	57
4.1	Μοντέλο Δικτύου Ασύρματου Πρόσβασης	58
4.1.1	Περιγραφή Μοντέλου	58
4.2	Μοντέλο Δικτύου Μεταφοράς	60
4.2.1	Περιγραφή Μοντέλου	61
4.2.2	Μέση Καθυστέρηση Μεταφοράς και Χρόνος Μεταφοράς	61
4.3	Μοντέλα Κόμβου	61
4.3.1	Μοντέλο Απλού Κόμβου	62
4.3.2	Μοντέλο Σύνθετου Κόμβου	62
4.4	Μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ ESQoS και SQoS	65
4.4.1	Μη Διαθεσιμότητα Υπηρεσίας	66
4.4.2	Ρυθμός Αποτυχίας Υπηρεσίας	66
4.4.3	Χρόνος Αρχικής Εγκατάστασης	67
4.4.4	Αρχικός Χρόνος Ενταμίευσης	67
4.4.5	Συχνότητα Επανα-Ενταμίευσης (Rebuffering)	68
4.5	Ανάλυση Επίδοσης Πρωτοκόλλου TCP	69
4.6	Σύνοψη Κεφαλαίου	73
5	Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας	75
5.1	Αντικειμενικοί και Συγκρίσιμοι Δείκτες Ποιότητας Υπηρεσιών	77
5.1.1	Διαθεσιμότητα Δικτύου - Ραδιοκάλυψη	78
5.1.2	Πιθανότητα εμπλοκής κλήσης	83
5.1.3	Πιθανότητα διακοπής κλήσης	84
5.1.4	Ποιότητα φωνής	85
5.1.5	Ποιότητα βίντεο	85
5.1.6	Χρόνος αποκατάστασης κλήσης φωνής	86

5.1.7	Πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων http	86
5.1.8	Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων http	87
5.1.9	Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ftp upload	88
5.1.10	Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ftp download	89
5.2	Κριτήρια Παρεμβολών σε Δίκτυα Ασύρματης Πρόσβασης	89
5.2.1	Παρεμβολές σε δίκτυα τεχνολογίας GSM/DCS1800	89
5.2.2	Παρεμβολές σε δίκτυα τεχνολογίας UMTS	91
5.3	Εργαστηριακός Εξοπλισμός Μετρήσεων	93
5.3.1	Υλικό Εξοπλισμού (Hardware)	93
5.3.2	Λογισμικό του Εξοπλισμού (Software)	97
5.3.3	Χαρακτηριστικά Κεραιών Εξοπλισμού	97
5.3.4	Δοκιμές Κινητών Τηλεφώνων	103
5.4	Λειτουργία μετρητικού συστήματος	104
5.5	Δοκιμές - Σενάρια Μετρήσεων	106
5.5.1	Μετρήσεις Ραδιοκάλυψης	108
5.5.2	Δοκιμή τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας	108
5.5.3	Δοκιμές υπηρεσιών δεδομένων κινητού διαδικτύου - Γενικά	108
5.5.4	Δοκιμή σύνδεσης (attach) και αποσύνδεσης (detach) GPRS	109
5.5.5	Δοκιμή ενεργοποίησης (activation) και απενεργοποίησης (deactivation) PDP	109
5.5.6	Δοκιμή Μέτρησης Καθυστέρησης Δικτύου PING	110
5.5.7	Δοκιμή Μεταφοράς Αρχείων (FTP Test)	111
5.5.8	Δοκιμή Μετάδοσης Ροής Βίντεο (Video Streaming)	111
5.5.9	Δοκιμή http ή Πλοήγησης στο web	112
5.5.10	Δοκιμή αποστολής και λήψης μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου e-mail send/receive	114
5.5.11	Δοκιμή Μεταφοράς UDP	114
5.6	Άκυρες μετρήσεις	115
5.7	Σύνοψη Κεφαλαίου	116

6	Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης	129
6.1	Μέθοδοι Παλινδρόμησης	129
6.1.1	Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)	129
6.1.2	Μη γραμμική παλινδρόμηση	130
6.1.3	Μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας τηλεφωνίας	131
6.1.4	Μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας βίντεο και πολυμέσων	132
6.2	Εύρωστη Βελτιστοποίηση σε Μη Γραμμική Παλινδρομηση	138

6.3	Γραμμικός Προγραμματισμός	146
6.4	Σύνοψη Κεφαλαίου	146
7	Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού	149
7.1	Ασαφής Λογική	149
7.2	Μεθοδολογία Πρόβλεψης Ποιότητας.....	152
7.3	Αριθμητικά Αποτελέσματα.	157
7.4	Αξιολόγηση των Μοντέλων Πρόβλεψης.....	161
7.5	Σύνοψη Κεφαλαίου	165
8	Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Με-	
	τρήσεων	167
8.1	Ανακάλυψη Γνώσης ESQoS-SQoS σε Βάσεις Δεδομένων Μετρήσεων ..	167
8.2	Κατηγοριοποίηση.....	169
8.2.1	Απόδοση της Κατηγοριοποίησης	171
8.2.2	Αλγόριθμοι βασισμένοι στην Απόσταση - Μελέτη Περίπτωσης: k- Πλησιέστεροι Γείτονες	176
8.2.3	Νευρωνικά Δίκτυα	178
8.2.4	Δένδρα Αποφάσης	182
8.3	Στρατηγική Εξόρυξης Πληροφορίας ESQoS-SQoS	186
8.3.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος	186
8.3.2	Αξιολόγηση των Πειραματικών Αποτελεσμάτων	187
8.4	Σύνοψη Κεφαλαίου	188
9	Συμπεράσματα	193
9.1	Σύνοψη Συμπερασμάτων - Καινοτομίες της Διδακτορικής Διατριβής	193
9.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	194
	Βιβλιογραφία	214
	Δημοσιεύσεις του Συγγραφέα	215
	Βιογραφικό Σημείωμα	219

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Αρχιτεκτονική δικτύου (GSM).	9
2.2	Αρχιτεκτονική δικτύου (UMTS).	10
2.3	Σύγχρονες αρχιτεκτονικές εξελιγμένων ραδιοδικτύων πρόσβασης (e-RANs).	15
3.1	Η διαμόρφωση της Ποιότητας Εμπειρίας QoE συναρτήσεως των παραγόντων της Ποιότητας της Υπηρεσίας QoS, της Εμπειρίας του Χρήστη (User Experience) και του Περιεχομένου (Context) της υπηρεσίας.	20
3.2	Αντιστοίχιση των παραμέτρων QoE και ESQoS.	22
3.3	Οι παράμετροι των QoE, ESQoS, και SQoS.	24
3.4	Εξέλιξη των αλγορίθμων αξιολόγησης ποιότητας φωνής.	26
3.5	Διάγραμμα λειτουργίας του αλγόριθμου PESQ.	27
3.6	Κατανομή σφάλματος μεταξύ αντικειμενικών και υποκειμενικών μετρήσεων.	29
3.7	Η επίδοση της ποιότητας φωνής (P.862.1) για τους κωδικοποιητές EFR και AMR FR/HR για τις κατευθύνσεις μετάδοσης (α') uplink, και (β') downlink, σε δίκτυα GSM 900/1800 MHz.	31
3.8	Η επίδοση της ποιότητας φωνής (P.862.1) για τον κωδικοποιητή AMR WB για τις κατευθύνσεις μετάδοσης uplink και downlink, σε δίκτυα UMTS 2100 MHz.	32
3.9	Η διεπίπεδη (crosslayer) αλυσίδα λειτουργιών του εκπομπού και δέκτη VoIP.	35
3.10	Αντιστοίχιση της επίδοσης του πακέτου IP στο επίπεδο εφαρμογής.	36
3.11	Συνδυαστικό μοντέλο Markov και Gilbert-Elliott απωλειών πακέτων σε δίκτυα IP.	37
3.12	Επισκόπηση της υπηρεσίας εικονοτηλεφωνίας.	38
3.13	Στιγμιότυπα εικόνων της βιντεοτηλεφωνίας καταγεγραμμένες από εξοπλισμό μετρήσεων.	41

3.14	Μέθοδοι αξιολόγησης (α') πλήρους, (β') μειωμένης και (γ') άνευ αναφοράς.	43
3.15	Διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου PEVQ.	44
3.16	Μέτρηση αντιληπτικής ποιότητας βίντεο-τηλεφωνικής (σε κλίμακα MOS) κλήσης κατά μήκος μιας διαδρομής.	44
3.17	Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{video}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς τις τιμές PSNR (σε dB).	47
3.18	Σύγκριτική αξιολόγηση των δεικτών ποιότητας εικόνας MSE και SSIM.	48
3.19	Χρονομετρητές δοκιμής διαδικτύου.	52
4.1	Μοντελοποίηση δικτύου.	57
4.2	Σύστημα αναμονής για έναν απλό κόμβο.	62
4.3	Μοντέλο σύνθετου κόμβου.	63
4.4	Μοντέλο δυο καταστάσεων.	63
4.5	Μοντελοποίηση δικτύου - Παράμετροι.	65
4.6	Μοντέλο rebuffering.	68
4.7	Μηχανισμός του πρωτοκόλλου TCP για την αποφυγή συμφόρησης.	70
5.1	Διαγράμματα γεγονότων της τηλεφωνικής κλήσης UMTS όταν η κλήση (α') εκτελείται (MOC), και όταν (β') τερματίζεται (MTC) από τον κινητό σταθμό.	84
5.2	Η δομή μιας τηλεφωνικής κλήσης δοκιμής.	85
5.3	Η δομή μιας βίντεο-τηλεφωνικής κλήσης δοκιμής.	86
5.4	Διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας http.	88
5.5	Διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας ftp upload.	88
5.6	Διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας ftp download.	89
5.7	Αρχιτεκτονική συστήματος μετρήσεων για ταυτόχρονες επί τω πεδίω μετρήσεις για την αξιολόγηση επίδοσης και benchmarking όλων των παρεχόμενων υπηρεσιών από σύγχρονα εμπορικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών.	94
5.8	Εγκατάσταση του εξοπλισμού μετρήσεων στο όχημα.	98
5.9	Εγκατάσταση των κεραιών του συστήματος μετρήσεων στην οροφή του οχήματος.	98
5.10	Διάγραμμα ακτινοβολίας της πολυζωνικής κεραίας PCTEL OP078.	100
5.11	Λειτουργικό διάγραμμα μικτών για κινητά τηλέφωνα μετρήσεων τεχνολογίας λειτουργίας GSM και UMTS.	101
5.12	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους RxLev στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.	118

5.13	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους RxLev στο σύστημα DCS 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.	119
5.14	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους CPICH-RSCP στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.	120
5.15	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους RxLev στην τεχνολογία GPRS, GSM 900/1800 MHz για 3 HSPA+ Modems μετρήσεων.	121
5.16	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους CPICH RSCP στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 3 HSPA+ Modems μετρήσεων.....	122
5.17	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 τηλέφωνα μετρήσεων.	123
5.18	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα DCS 1800 MHz για 6 τηλέφωνα μετρήσεων.	124
5.19	Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 6 τηλέφωνα μετρήσεων.	125
5.20	Ιστοσελίδες αναφοράς (α') Copernicus και (β') Kepler όπως προτείνονται από την Ομάδα Εργασίας ETSI STQ Mobile για την δοκιμή http.	126
6.1	Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{GSM}$ (RxLev σε dBm) στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας.	133
6.2	Παλινδρομήσεις (regressions) της ποιότητας φωνής $ESQoS_{voice}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς την ποιότητα ραδιοκάλυψης $SQoS_{GSM}$ (RxLev σε dBm) για κάθε περίπτωση (RxQual).	134
6.3	Παλινδρομήσεις (regressions) της ποιότητας φωνής $ESQoS_{voice}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς την ποιότητα ραδιοκάλυψης $SQoS_{GSM}$ (RxLev σε dBm) για κάθε περίπτωση κωδικοποιητή φωνής (codec). ...	135
6.4	Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας.....	135
6.5	Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$, $ESQoS_{video}$ και $ESQoS_{mm}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	136
6.6	Πρόβλεψη της ποιότητας βίντεο, δείκτης PSNR, ως προς τις παραμέτρους ποιότητας ραδιοδικτύου UMTS 2100 MHz.....	137
6.7	Εκτίμηση της ποιότητας πολυμέσων με αλεξιθόρυβη βελτιστοποίηση σε ένα πραγματικό δίκτυο κινητών επικοινωνιών. Η στατηγική πρόβλεψης βασίζεται σε καμπάνια μετρήσεων E2E ποιότητας ενός πραγματικού πολυμεσικού 3G/UMTS δικτύου	140

6.8	Εύρωστο Γραμμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	143
6.9	Εύρωστο Δυναμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	143
6.10	Εύρωστο Εκθετικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	144
6.11	Εύρωστο Λογαριθμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	144
6.12	Εύρωστο Γραμμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{mm}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	144
6.13	Εύρωστο Δυναμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{mm}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	145
6.14	Εύρωστο Εκθετικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{mm}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	145
6.15	Εύρωστο Λογαριθμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{mm}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	145
7.1	Η αρχιτεκτονική πρόβλεψης της ποιότητας υπηρεσιών βασισμένη στην ασαφή λογική	153
7.2	Η δομή ενός ANFIS μοντέλου για την πρόβλεψη obj. MOS της ποιότητας φωνής και πολυμέσων στις περιπτώσεις GSM τηλεφωνίας, και UMTS τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας.	154
7.3	Μελέτη Περίπτωσης: GSM τηλεφωνία. Διαμόρφωση των FIS (α') και ANFIS (β'). Παρουσιάζονται επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραμέτρων RxLev (γ') και RxQual (δ').	155
7.4	Μελέτη Περίπτωσης: UMTS τηλεφωνία και βιντεοτηλεφωνία. Διαμόρφωση των FIS (α',β') και ANFIS (γ',δ'). Παρουσιάζονται επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραμέτρων RSCP (γ') και E_c/N_0 (σ').	156

7.5	3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για EFR κωδικοποιητή.	159
7.6	3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για AMR FR/HR κωδικοποιητών.	159
7.7	3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για AMR-WB κωδικοποιητή.	160
7.8	3D ANFIS καμπύλες των δείκτων ποιότητας φωνής obj. MOS_a και πολυμέσων obj. MOS_t UMTS βιντεοτηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη.	160
7.9	GSM τηλεφωνία - επίδραση του $RxLevSub$ στο obj. MOS_a για διάφορες τιμές του $RxQualSub$ για την περίπτωση EFR κωδικοποιητή. .	161
7.10	GSM τηλεφωνία - επίδραση του $RxLevSub$ στο obj. MOS_a για διάφορες τιμές του $RxQualSub$ για την περίπτωση AMR FR/HR κωδικοποιητών.	162
7.11	UMTS τηλεφωνία - επίδραση του $RSCP$ στο obj. MOS_a για διάφορες τιμές του E_c/I_0 για την περίπτωση AMR WB κωδικοποιητή.	162
7.12	Επίδραση του $RSCP$ στην ποιότητα φωνής και πολυμέσων (obj. MOS) για διάφορες τιμές του E_c/N_0 στην περίπτωση της UMTS βιντεοτηλεφωνίας.	163
7.13	Απεικόνιση της μετρούμενης και εκτιμώμενης τιμής της παραμέτρου obj. MOS_a στην περίπτωση της GSM τηλεφωνίας για την περίπτωση της άνω ζεύξης (UL).	164
8.1	Σύστημα βελτιστοποίησης ποιότητας βασισμένο σε ανακάλυψη της πληροφορίας ESQoS και SQoS σε βάσεις δεδομένων που προέρχονται από καμπάνιες μετρήσεων καθώς και από συστήματα παρακολούθησης επίδοσης δικτύου.	168
8.2	Μεθοδολογία βελτιστοποίησης μοντέλου πρόβλεψης ποιότητας βασισμένου στην κατηγοριοποίηση.	178
8.3	Η δομή ενός νευρώνα.	179
8.4	Η δομή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων τύπου Multi-Layer Perceptron για την πρόβλεψη ποιότητας φωνής βασισμένη στην μέθοδο της κατηγοριοποίησης για (α') GSM και (β') UMTS κινητή τηλεφωνία.	181

8.5	Η δομή του δένδρου απόφασης με εφαρμογή του αλγόριθμου J.48 (υλοποίηση του C4.5 σε Weka) για την πρόβλεψη ποιότητας φωνής στις περιπτώσεις (α) GSM και (β) UMTS τηλεφωνίας βασισμένη στην μέθοδο της κατηγοριοποίησης.	184
8.6	Η αρχιτεκτονική της στρατηγικής εξόρυξης πληροφορίας για την πρόβλεψη ποιότητας από βάσεις δεδομένων από καμπάνιες μετρήσεων. ...	187
8.7	Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας φωνής, $ESQoS_{voice}^{GSM}$, σε GSM δίκτυα επικοινωνιών χρήσει κωδικοποιητών φωνής EFR, AMR FR και AMR HR.	189
8.8	Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας φωνής, $ESQoS_{voice}^{UMTS}$, σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών χρήσει κωδικοποιητή φωνής AMR WB.	189
8.9	Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας βίντεο, $ESQoS_{video}^{UMTS}$, της υπηρεσίας βιντεοτηλεφωνίας σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών.	190
8.10	Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας πολυμέσων, $ESQoS_{mm}^{UMTS}$, της υπηρεσίας βιντεοτηλεφωνίας σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών.	190

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Στοιχεία ραδιοδικτύου (RAN) και δικτύο πρόσβασης (CN) σε ένα εξελιγμένο δίκτυο κινητών επικοινωνιών.	16
3.1	Κλίμακα υποκειμενικής αξιολόγησης ACR-DCR.	25
3.2	Σύγκριση επίδοσης PESQ και P.862.1.	29
3.3	Πιθανή αντιστοίχιση PSNR και MOS.	46
3.4	Παλινδρομήσεις του ESQoS _{video} (σε τιμές obj. MOS) ως προς τις τιμές PSNR (σε dB).	46
3.5	Βασικά στατιστικά μεγέθη ποιότητας από μετρήσεις βιντεοτηλεφωνίας. .	49
3.6	Σύνοψη των συστάσεων ITU-T και ETSI για την ποιότητα ήχου/φωνής και βίντεο	50
3.7	Ταξινόμηση συστάσεων ITU-T/R για την ποιότητα βίντεο.	50
3.8	Παράμετροι των μοντέλων αντιστοίχισης της διάρκειας συνόδου σε αντιληπτική ποιότητα της υπηρεσίας web-browsing.	53
3.9	Παράμετροι του μοντέλου χωρίς βάρη αντιστοίχισης της διάρκειας συνόδου δυο ιστοσελίδων σε αντιληπτική ποιότητα της υπηρεσίας web-browsing.	54
5.1	Οικογένεια τεχνικών προδιαγραφών ETSI TS 102 250 επί θεμάτων ποιότητας για δημοφιλείς υπηρεσίες σε GSM και UMTS δίκτυα.	77
5.2	Χαρακτηρισμός ραδιοκάλυψης σε GSM/DCS1800 και UMTS δίκτυα. ...	79
5.3	Χαρακτηριστικά κεραιών εξοπλισμού.	99
5.4	Υπολογισμός ελάχιστης εξασθένησης για μείωση του φαινομένου blocking μεταξύ των κινητών τηλεφώνων μετρήσεων που λειτουργούν σε μικρή απόσταση και για τις τεχνολογίες GSM900, DCS1800, UMTS2100.	100
5.5	Στατικές μετρήσεις (stationary tests).	107
5.6	Εν κινήσει μετρήσεις (drive/walk tests).	107
6.1	Παλινδρομήσεις του ESQoS _{voice} (σε obj. MOS) ως προς SQoS _{GSM} (RxLev σε dBm) στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας.	131

6.2	Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας.....	132
6.3	Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.....	132
6.4	Πολυμεταβλητό μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη ποιότητας σε σε κινητά δίκτυα UMTS 2100MHz.	133
6.5	Σχέσεις $ESQoS$ - $SQoS$ υπό διερεύνηση.	140
6.6	Σχέσεις $ESQoS$ - $SQoS$ υπό διερεύνηση.	141
8.1	Πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) για την πρόβλεψη ποιότητας με μεθόδους κατηγοριοποίησης. Το στοιχείο C_{ij} είναι ο αριθμός των εγγραφών της κλάσης C_i που προβλέπονται ως κλάση C_j	172
8.2	Πίνακας βαρών στην σταθμισμένη ακρίβεια.	176

Κατάλογος Συντμήσεων

AMR	:	Adaptive Multirate
ANFIS	:	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
CN	:	Core Network
CPICH	:	Common Pilot Channel
CQI	:	Channel Quality Indicator
CS	:	Circuit Switched
DCS1800	:	Digital Cellular Standard for 1800 MHz band
DL	:	Downlink
EDGE	:	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EFR	:	Enhanced Full Rate
EPC	:	Evolved Packet Core
ESQoS	:	End-to-End Service QoS
ETSI	:	European Telecom. Standards Institute
E-UTRA	:	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
GPRS	:	General Packet Radio Service
GPS	:	Global Positioning System
GSM	:	Global System for Mobile Communications
HDTV	:	High-Definition Television
HSDPA	:	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	:	High Speed Packet Access
HSUPA	:	High Speed Uplink Packet Access
KPI	:	Key Performance Indicator
L3	:	Layer 3
LTE	:	Long Term Evolution
MBMS	:	Multimedia Broadcast Multicast System
MIMO	:	Multiple Input Multiple Output
MOC	:	Mobile Originated Call
MOS	:	Mean Opinion Score
MPEG	:	Moving Picture Experts Group

MTC	:	Mobile Terminated Call
NRT	:	Non-real Time
OFDMA	:	Orthogonal Freq. Division Mult. Access
PDP	:	Packet Data Protocol
PESQ	:	Perceptual Evaluation of Speech Quality
PEVQ	:	Perceptual Evaluation of Video Quality
POLQA	:	Percept. Obj. Listening Quality Assessment
PHY	:	Physical Layer
PLMN	:	Public Land Mobile Network
PS	:	Packet Switched
PSNR	:	Peak Signal to Noise Ratio
QAM	:	Quadrature Amplitude Modulation
QoE	:	Quality of Experience
QoS	:	Quality of Service
QPSK	:	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	:	Radio Access Network
RAT	:	Radio Access Technology
RF	:	Radio Frequency
RNC	:	Radio Network Controller
RSCP	:	Received Signal Code Power
RSSI	:	Received Signal Strength Indicator
RT	:	Real Time
RTP	:	Real-time Transport Protocol
RTT	:	Round Trip Time
Rx	:	Receive
SQoS	:	System QoS
SSIM	:	Structural Similarity
Tx	:	Transmit
UE	:	User Equipment
UL	:	Uplink
UMTS	:	Universal Mobile Telecom. System
UX	:	User Experience
VoD	:	Video on Demand
VoIP	:	Voice over Internet Protocol
VT	:	Video-Telephony
WCDMA	:	Wideband Code Division Multiple Access

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Θεματολογία της διατριβής

Σκοπός της παρούσης διδακτορικής διατριβής είναι η συμβολή στην έρευνα προηγμένων τεχνικών μετρήσεων χαρακτηρισμού και μεθόδων πρόβλεψης της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών σε σύγχρονα ευρυζωνικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

Η Διδακτορική Διατριβή καλύπτει τις παρακάτω σύγχρονες ερευνητικές περιοχές:

- Ποιότητα αντιλαμβανόμενη από τον χρήστη και την απ'ακρη-σε άκρη ποιότητα υπηρεσιών σε σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών ευρείας ζώνης.
- Μοντελοποίηση δικτύων κινητών πολυμεσικών επικοινωνιών ευρείας ζώνης.
- Πειραματικός εξοπλισμός και σενάρια μετρήσεων εν λειτουργία δημόσιων δικτύων κινητών επικοινωνιών για τον χαρακτηρισμό ποιότητας.
- Προηγμένες στατιστικές και υπολογιστικές μέθοδοι πρόβλεψης ποιότητας υπηρεσιών βασισμένες σε μετρήσεις.

1.2 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής

Η δομή του κειμένου της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από δύο Μέρη. Το **Μέρος I** περιλαμβάνει την εισαγωγή στις τεχνολογίες των δικτύων ασύρματης πρόσβασης, εννοιών και δεικτών ποιότητας κινητών υπηρεσιών, τεχνολογικού εξοπλισμού και σεναρίων μετρήσεων. Το **Μέρος II** καλύπτει διεξοδικά προηγμένες στατιστικές και σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους ανάλυσης και πρόβλεψης της ποιότητας υπηρεσιών αξιοποιώντας δεδομένα μετρήσεων που έχουν συλλεχθεί χρήσει του εργαστηριακού εξοπλισμού. Συνοπτικά, το κείμενο διαρθρώνεται σύμφωνα με την παρακάτω δομή:

Μέρος I

Στο **Μέρος I** παρουσιάζουμε αναλυτικά ερευνητικά θέματα που αφορούν την ποιότητα εμπειρίας αντιλαμβανόμενη από τον κινητό χρήστη και την ποιότητα παρεχόμενων κινητών υπηρεσιών από σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με επίκεντρο τις τεχνικές μετρήσεων χαρακτηρισμού. Το **Μέρος I** συνίσταται από τα παρακάτω Κεφάλαια:

Το **Κεφάλαιο 2** αποτελεί μια εισαγωγή στα δίκτυα κινήτων επικοινωνιών δεύτερης, τρίτης, πέρας της τρίτης καθώς και τέταρτης γενιάς. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται σε θέματα επιδόσης και χωρητικότητας των δικτύων.

Το **Κεφάλαιο 3** αφιερώνεται σε θέματα προσδιορισμού εμπειρίας χρήστη, ποιότητας εμπειρίας, απ' άκρη-σε-άκρη ποιότητας υπηρεσιών και ποιότητας υπηρεσιών συστήματος/δικτύου. Παρουσιάζονται οι υπηρεσίες: κινητής τηλεφωνίας, τηλεφωνίας κινητού διαδικτύου, κινητής βιντεοτηλεφωνίας, μετάδοσης πολυμεσικής ροής καθώς και οι υπηρεσίες δεδομένων κινητού υπολογισμού. Για τις αναφερόμενες υπηρεσίες περιγράφονται οι αλγόριθμοι αξιολόγησης επίδοσης και ποιότητας.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται μια προσέγγιση μοντελοποίησης ενός ευρυζωνικού δικτύου κινήτων επικοινωνιών παροχής πολυμεσικών υπηρεσιών. Παρουσιάζονται μοντέλα του δικτύου ασύρματης πρόσβασης, του σταθερού δικτύου μεταφορά και των κόμβων. Επίσης, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του πρωτοκόλου ελέγχου μεταφοράς TCP.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του πειραματικού εξοπλισμού μετρήσεων καθώς και των σεναρίων μετρήσης ραδιοκάλυψης δημοσίων δικτύων κινήτων επικοινωνιών και της απ' άκρη-σε-άκρη ποιότητας όλων των προσφερόμενων υπηρεσιών. Επιπλέον γίνεται αναφορά σε θέματα συγκριτικής αξιολόγησης (benchmarking).

Μέρος II

Στο **Μέρος II** του κειμένου της διδακτορικής διατριβής εφαρμόζονται προηγμένες μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης με εφαρμογή θεωρίας βελτιστοποίησης καθώς και μέθοδοι υπολογιστικής νοημοσύνης ή ήπιου υπολογισμού ώστε να προταθούν και να αξιολογηθούν μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται στατιστικές μέθοδοι ανάπτυξης μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας βασισμένα στη μη γραμμική παλινδρόμηση. Η εφαρμογή μεθόδων εύρωστης βελτιστοποίησης συμβάλλει στην εξαγωγή σθεναρών μοντέλων πρόβλεψης.

Το **Κεφάλαιο 7** καλύπτει την ασαφή λογική και την εφαρμογή στο πρόβλημα της πρόβλεψης ποιότητας. Ειδικότερα, επιλέγονται τα συστήματα προσαρμοστικού νευροασαφούς συμπερασμού τα οποία αξιοποιούν διαθέσιμες μετρήσεις για την πρόταση

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

μοντέλων. Τα μοντέλα αξιολογούνται ως προς την ακρίβειά τους.

Το **Κεφάλαιο 8** καλύπτει τις ευφυείς μεθόδους εξόρυξης γνώσης/πληροφορίας από δεδομένα μετρήσεων. Η βασική μέθοδος είναι η κατηγοριοποίηση και για τον λόγο αυτό επιλέγονται, παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι πιο σημαντικές τεχνικές: (α') κ-πλησιέστεροι γείτονες, (β') νευρωνικά δίκτυα και (γ') δένδρα αποφάσεων. Προτείνεται ένα πλαίσιο στρατηγικής σχεδιασμού και βελτιστοποίησης δικτύου κινητών επικοινωνιών στηριγμένο σε μοντέλα πρόβλεψης τα οποία έχουν εξαχθεί με μεθόδους εξόρυξης πληροφορίας χρήσει ελεύθερου λογισμικού.

Η διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται με το **Κεφάλαιο 9** των συμπερασμάτων όπου παρουσιάζονται οι καινοτομίες έρευνας καθώς και οι προτάσεις μελλοντικής εργασίας.

□

ΜΕΡΟΣ Ι

Ποιότητα Εμπειρίας και Ποιότητα Υπηρεσιών σε
Σύγχρονα Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών: Μετρήσεις Χαρακτηρισμού

Κεφάλαιο 2

Σύγχρονα Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

Στον παρόν Κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στα σύγχρονα ευρυζωνικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών [1, 2]. Αναλυτικά, θα γίνει μια επισκόπηση των υφιστάμενων εν λειτουργία τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης στα 2ης (GSM-EDGE-GPRS), 3ης (3.5ης) (UMTS-R.99-HSPA) και 4ης (LTE-LTE Adv) γενιάς. Στόχος είναι να παρουσιάσουμε θέματα χωρητικότητας και επίδοσης του κάθε δικτύου.

2.1 Συστήματα Επικοινωνιών 2ης Γενιάς

GSM: Global System for Mobile Communications

Το GSM (Groupe Spécial Mobile) είναι το πιο γνωστό πρότυπο για τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Το GSM διαφέρει από προγενέστερες τεχνολογίες στο γεγονός ότι η σηματοδότηση και τα κανάλια φωνής είναι ψηφιακά, και έτσι θεωρείται ως δεύτερη γενιάς (2G) σύστημα. Επίσης, παρέχεται ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών επικοινωνιών δεδομένων. Στις επόμενες εκδόσεις του προτύπου, Release '97, προστέθηκαν δυνατότητες υπηρεσιών πακέτων δεδομένων από 56 kbit/s έως 115 kbit/s μέσω του GPRS (General Packet Radio Service), γνωστό και ως 2.5G. Στην έκδοση Release '99 αυξήθηκαν οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως 236.8 kbit/s με το EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), γνωστό και ως 2.75G [3].

Το GSM είναι ένα κυψελωτό ασύρματο δίκτυο και διακρίνονται πέντε κατηγορίες κυψελών (macro-, micro-, pico-, femto- και umbrella- cells). Για περιπτώσεις εσωτερικής κάλυψης χρησιμοποιούνται εσωτερικοί επαναλήπτες.

Τα GSM δίκτυα λειτουργούν στις περιοχές συχνοτήτων των 900 MHz ή 1800 MHz (DCS1800). Ανεξάρτητα από τη συχνότητα που επιλέγεται από ένα τηλεπικοινωνια-

κό φορέα, χωρίζεται σε χρονοσχισμές (timeslots) για χρήση από διαφορετικά κινητά τηλέφωνα. Αυτό επιτρέπει οκτώ κανάλια ομιλίας πλήρους ρυθμού (full rate) ή δεκαέξι ήμισυ ρυθμού (half rate) ανά κανάλι συχνότητας. Οι οκτώ ραδιο χρονοσχισμές ομαδοποιούνται σε ένα TDMA πλαίσιο. Τα κανάλια ήμισυ ρυθμού χρησιμοποιούν εναλλακτικά πλαίσια στην ίδια χρονοσχισμή. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για όλα τα 8 κανάλια είναι 270,833 kbit/s, και η διάρκεια του πλαισίου είναι 4,615 ms.

Το GSM χρησιμοποιεί μια ποικιλία από κωδικοποιητές φωνής (codecs) για συμπίεση ήχου 3.1 kHz, σε 6.5 και 13 kbit/s. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν δύο codecs, το Half Rate (6.5 kbit/s) και το Full Rate (13 kbit/s), που βασίζονται στη γραμμική προβλεπτική κωδικοποίηση LPC (linear predictive coding). Το GSM βελτιώθηκε περαιτέρω με τον κωδικοποιητή EFR (Enhanced Full Rate), των 12.2 kbit/s codec που χρησιμοποιεί ένα πλήρες κανάλι ρυθμό.

Το δίκτυο απαρτίζεται από τα επιμέρους τμήματα:

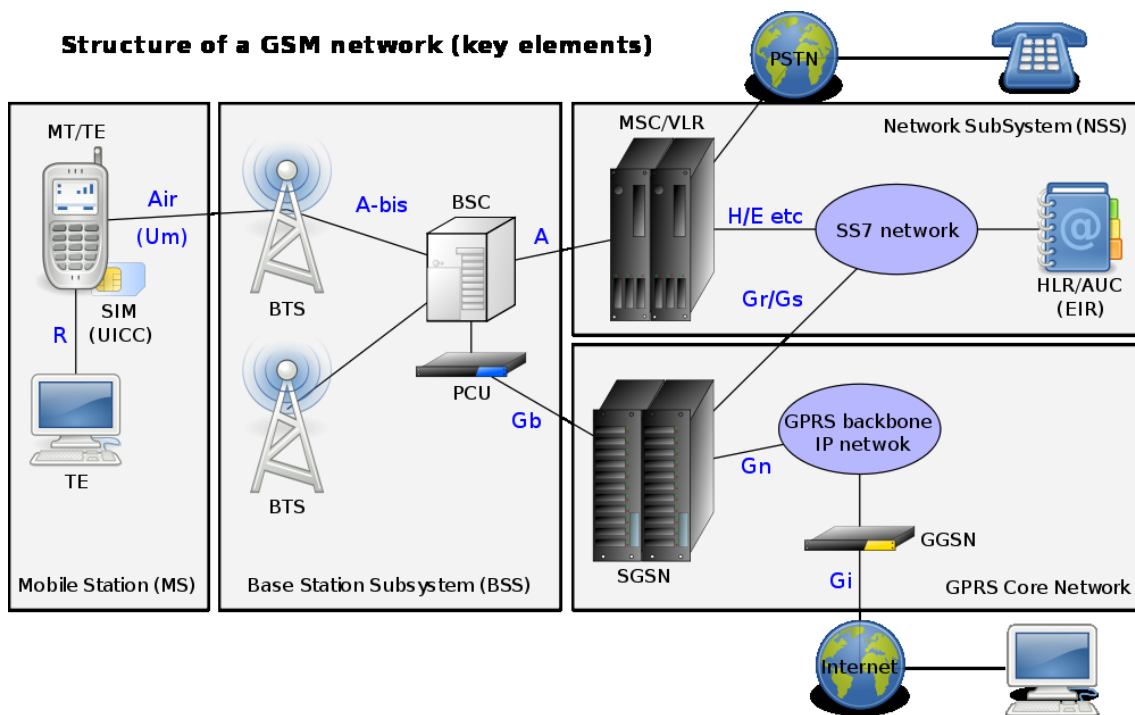
- Το υποσύστημα σταθμών βάσης (BSS, Base Station Subsystem) το οποίο αποτελείται από τους σταθμούς βάσης (BSs, Base Stations) και του ελεγκτές τους (BSC, Base Station Controlers).
- Το υποσύστημα μεταγωγής και μεταγωγής (NSS, Network and Switching Subsystem).
- Το δίκτυο κορμού GPRS (GPRS Core Network).
- Το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών (OSS, Operations Support System).

2.2 Συστήματα Επικοινωνιών 3ης Γενιάς

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

Το UMTS είναι μια τεχνολογία κινητών επικοινωνιών 3ης γενιάς (3G). Η πρώτη ανάπτυξη του UMTS βασίστηκε στην αρχιτεκτονική Release '99, R99 η οποία προδιαγράφηκε από το 3GPP και είναι τμήμα του ευρέως προτύπου ITU IMT-2000. Το UMTS χρησιμοποιεί το W-CDMA (IMT Direct Spread) ως υπόστρωμα της ασύρματης διεπαφής (air interface) [4]. Ως πλήρες σύστημα δικτύου, αποτελείται από το ραδιοδίκτυο πρόσβασης είναι το UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) και το δικτυο κορμού (CN, Core Network) το οποίο διαθέτει την εφαρμογή MAP (Mobile Application Part) [5].

Το UMTS, σύμφωνα με το 3GPP, υποστηρίζει μέγιστες θεωρητικές τιμές ρυθμού μετάδοσης έως 45 Mbit/s (HSPA+), αν και για την περίπτωση του R99 είναι έως



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική δικτύου (GSM).

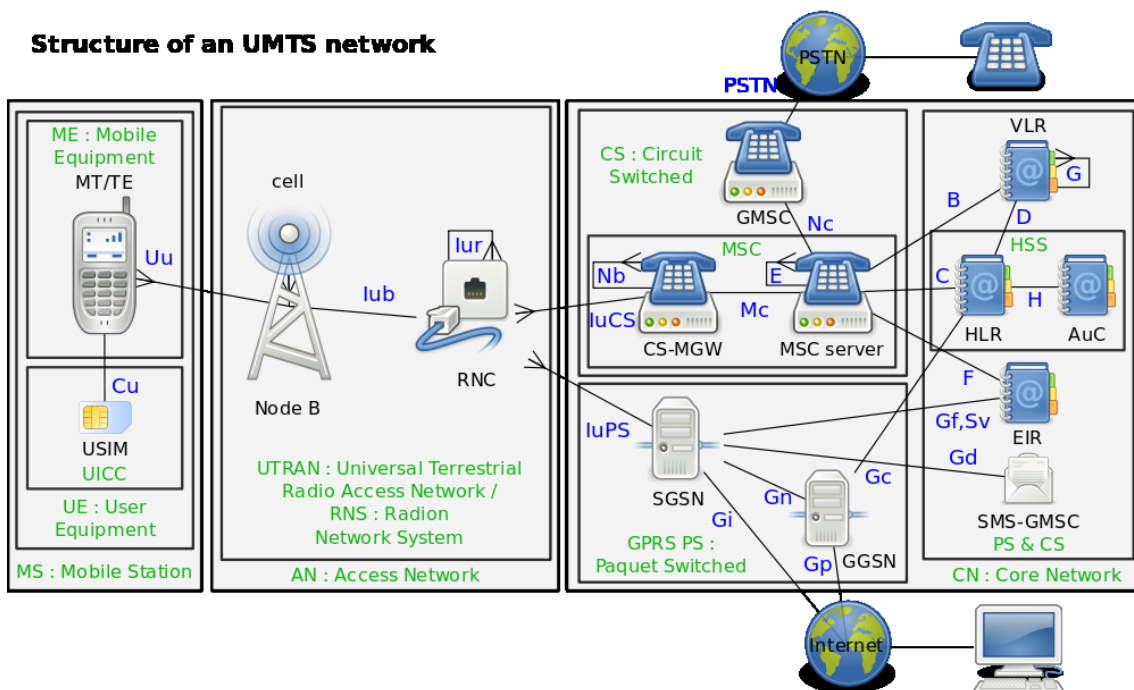
384 kbit/s. Οι πρόγονοι του 3G, τα συστήματα 2G, όπως GSM, CDMAx1 (IS-95, TIA-EIA-95, USA), PDC (Personal Digital Communications, Japan), Digital AMPS (IS-54, IS-136, USA/Canada), iDEN, PHS (ASIA). Η εξέλιξη του GSM, γνωστό ως GPRS, γνωστό και ως 2.5G, υποστηρίζει καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης (θεωρητικά έως 140.8 kbit/s, αν και οι τυπικοί ρυθμοί είναι κοντά στα 56 kbit/s και συνδέσεις μεταγωγής πακέτου (PS, Packet Switching) παρά μεταγωγής κυκλώματος (CS, Circuit Switching)).

Το UMTS χρησιμοποιεί την τεχνολογία W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ως πρότυπο ράδιο-διεπαφής με συχνοδιακριτική FDD ή χρονοδιακριτική TDD αμφιδρόμηση. Χρησιμοποιείται η μέθοδος DS-SS-CDMA (Direct-Sequence CDMA) για την πρόσβαση στο κανάλι και FDD αμφιδρόμηση για επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης και την υποστήριξη περισσότερων χρηστών σε σύγκριση με τα περισσότερα TDMA σχήματα πολλαπλής πρόσβασης. Χρησιμοποιείται ένα ζεύγος 5 MHz φερόντων και καθορίζονται για την ζεύξη κινητού - σταθμού (uplink) η ζώνη 1885-2025 MHz και για την ζεύξη σταθμού-κινητού (downlink) η ζώνη 2110-2200 MHz (γνωστή ως UMTS2100 ζώνη).

Ραδιοδίκτυο Πρόσβασης (UTRAN) Στο UMTS καθορίζεται επίσης το ραδιοδίκτυο πρόσβασης UTRAN το οποίο αποτελείται από μια συλλογή σταθμών βάσης (NodeBs) και ελεγκτές ραδιοδικτύου RNC (Radio Network Controllers). Το

UTRAN μεταφέρει διαφόρων τύπων τηλεπικοινωνιακής κίνησης είτε μεταγωγής κυκλώματος (Circuit Switched, CS) είτε μεταγωγής πακέτου (Packet Switched, PS). Σκοπός του UTRAN είναι η παροχή πρόσβασης του εξοπλισμού χρήστη UE (User Equipment) με το δίκτυο κορμού.

Ραδιοδίκτυο Πρόσβασης (GERAN) . Το GERAN είναι το ραδιοδίκτυο πρόσβασης στα συστήματα GSM και EDGE και είναι σημαντικό μέρος στα UMTS/GSM δίκτυα. Στην περίπτωση GSM/EDGE δικτύων συνδέουν τους σταθμούς βάσης BS (Base Stations) και τους αντίστοιχους ελεγκτές σταθμών βάσης BSCs (Base Station Controllers). Οι κλήσεις φωνής και δεδομένων δρομολογούνται από και προς το δημόσιο σταθερό τηλεφωνικό/ψηφιακό δίκτυο (PSTN/ISDN).



Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική δικτύου (UMTS).

2.3 Συστήματα Επικοινωνιών 3.5ης Γενιάς

2.3.1 HSPA: High Speed Packet Access

Το HSPA είναι μια συγχώνευση δύο τεχνολογιών, του HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) και HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), που επεκτείνει και να βελτιώνει τις επιδόσεις των υφιστάμενων WCDMA δικτύων. Ένα επιπλέον πρότυπο, το Evolved HSPA (επίσης γνωστή ως HSPA+), λειτούργησε στα τέλη του 2008 [6].

Το HSPA υποστηρίζει αυξημένες ταχύτητες δεδομένων έως και 14 Mbit/s στο downlink και 5,8 Mbit/s στο uplink. Μειώνει επίσης την καθυστέρηση (latency) και παρέχει έως και πέντε φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα του συστήματος στο downlink και μέχρι την διπλάσια χωρητικότητα του συστήματος στο uplink. Το HSPA αυξάνει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και την χωρητικότητα με διάφορους τρόπους [7]:

- Επιμερισμένο κανάλι μετάδοσης (Shared Channel transmission), γεγονός που οδηγεί σε αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων κώδικα και ισχύος στο WCDMA.
- Μικρότερο μεσοδιάστημα μετάδοσης (TTI), το οποίο μειώνει τον χρόνο μετ' επιστροφής (RTT, Round-Trip Time) και βελτιώνει την παρακολούθηση των γρήγορων διαλλείψεων του καναλιού.
- Προσαρμογή Ζεύξης (Link Adaptation), η οποία μεγιστοποιεί τη χρήση των καναλιών και επιτρέπει στο σταθμό βάσης να λειτουργεί σε σχεδόν μέγιστη ισχύ κυψέλης.
- Ταχύς χρονοπρογραμματισμός (Fast Scheduling), ο οποίος δίνει προτεραιότητα στους χρήστες με τους πλέον ευνοϊκούς όρους καναλιού.
- Γρήγορη αναμετάδοση (retransmissions) και soft-combining, που προσφέρουν περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας.
- 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) διαμόρφωση, η οποία προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων.

2.3.2 HSDPA: High-Speed Downlink Packet Access

Το HSDPA είναι μια εξελιγμένη τεχνολογία κινητής τηλεπικοινωνίας της οικογένειας HSPA και ονομάστηκε 3.5G, 3G+ ή turbo 3G, η οποία επιτρέπει στα UMTS δίκτυα να έχουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και αυξημένη χωρητικότητα. Οι τρέχουσες υλοποιήσεις HSDPA υποστηρίζουν ταχύτητες καθοδικής ζεύξης των 1.8, 3.6, 7.2 και 14.0 Mbits/s. Περαιτέρω αυξήσεις στην ταχύτητα είναι διαθέσιμες με το HSPA+ , το οποίο προσφέρει ταχύτητες έως και 42 Mbit/s downlink και 84 Mbit/s, με την Release 9 του 3GPP.

- Υβριδική αυτόματη αίτηση επαναμετάδοση HARQ (Hybrid Automatic Repeat-Request). Τα δεδομένα διαβιβάζονται μαζί με τα bits διόρθωσης σφαλμάτων. Ήσσονος σημασίας λάθη μπορεί έτσι να διορθωθούν χωρίς αναμετάδοση. Ο χρόνος μετ' επιστροφής (RTT) για την αναμετάδοση έχει βελτιωθεί δεδομένου

ότι οι αναμεταδόσεις γίνονται από τον σταθμό βάσης (Node B), αντί του ελεγκτή ραδιοδικτύου (RNC).

- *Ταχύς Προγραμματισμός Πακέτων.* Το HS-DSCH κανάλι μοιράζεται μεταξύ των χρηστών που χρησιμοποιούν προγραμματισμό εκπομπής εξαρτώμενο από το κανάλι για να κάνουν την καλύτερη χρήση των διαθέσιμων ραδιοπόρων. Κάθε συσκευή χρήστη μεταδίδει συνεχώς μια ένδειξη της ποιότητας του downlink σήματος 500 φορές ανά δευτερόλεπτο. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες από όλες τις συσκευές, ο σταθμός βάσης αποφασίζει σε ποιούς χρήστες θα αποσταλούν δεδομένα στο επόμενο 2 ms frame και πόσα δεδομένα θα πρέπει να αποσταλούν σε κάθε χρήστη. Μπορούν να σταλούν περισσότερα δεδομένα σε χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε έκθεση υψηλής ποιότητας downlink σήματος .
- *Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση.* Το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης μεταβάλλονται ανά χρήστη και εξαρτάται από την ποιότητα του σήματος και την χρησιμοποίηση της κυψέλης. Το αρχικό σχήμα είναι QPSK (Quadrature phase-shift keying) αλλά σε καλές συνθήκες οι διαμορφώσεις 16 QAM ανδ 64 QAM μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Με διανομή 5 κωδίκων, η QPSK προσφέρει έως 1.8 Mbit/s ενώ η 16 QAM έως 3.6 Mbit/s. Πρόσθετοι κώδικες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν (π.χ. 10, 15) για να βελτιώσουν τους ρυθμούς ή να διευρύνουν σημαντικά την χωρητικότητα του δικτύου.

Στις επόμενες 3GPP προδιαγραφές του HSPA+ αυξάνονται οι ρυθμοί δεδομένων περαιτέρω με την προσθήκη της 64QAM διαμόρφωσης. Μπορεί να επιτευχθούν ταχύτερες δεδομένων έως και 42 Mbit/s. με την εισαγωγή τεχνολογιών στοιχειο-κεραιών όπως μορφοποίηση δέσμης ακτινοβολίας (beamforming) και επικοινωνίες πολλαπλής εισόδου-εξόδου πολλαπλών MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Η μορφοποίηση δεμής εστιάζει την εκπεμπόμενη ισχύς μιας κεραίας σε μια ακτίνα προς την κατεύθυνση του χρήστη. Η MIMO τεχνολογία χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες τόσο στην πλευρά της εκπομπής όσο και της λήψης. Σε νέες εκδόσεις εισαγάγεται η λειτουργία διπλού φέροντος (Dual Carriers), δηλαδή την ταυτόχρονη χρησιμοποίηση δύο φερόντων των 5 MHz. Με το συνδυασμό αυτό και την MIMO μετάδοση, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων αγγίζουν τα 84 Mbit/s υπό ιδανικές συνθήκες σήματος.

Μελλοντικές αναθεωρήσεις του HSPA+ υποστηρίζουν έως 168 Mbit/s χρησιμοποιώντας πολλαπλά φέροντα (MC-HSPA, Multi-Carriers HSPA) και έως 672 Mbit/s στο 3GPP Release 11 χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές κεραιών.

2.3.3 HSUPA: High-Speed Uplink Packet Access

Το HSUPA είναι μια τεχνολογία της οικογένειας HSPA με ταχύτητες άνω ζεύξης έως 5.76 Mbit/s. Το όνομα HSUPA δόθηκε από την Nokia. Το 3GPP δεν υποστηρίζει το όνομα HSUPA, αντ' αυτού χρησιμοποιεί τον όρο EUL (Enhanced Uplink). Οι προδιαγραφές του HSUPA περιγράφονται στην Release 6 του UMTS προτύπου που δημοσιεύθηκε από το 3GPP.

Το HSUPA χρησιμοποιεί το κανάλι E-DCH (Enhanced-Dedicated Channel) στο οποίο εφαρμόζονται μέθοδοι προσαρμογής ζεύξης παρόμοιες με του HSDPA, όπως:

- Μικρότερα διαστήματα μετάδοσης (TTI) επιτρέποντας γρηγορότερη προσαρμογή ζεύξης.
- HARQ (Hybrid ARQ) με στοιχειώδη πλεονασμός επιτρέποντας πιο αποτελεσματικές επαναμεταδόσεις.

Όπως και το HSDPA, το HSUPA χρησιμοποιεί ένα χρονοπρογραμματιστή πακέτων, αλλά λειτουργεί επί της αρχής του αιτήματος παραχώρησης (request-grant), δηλαδή όταν τα UEs ζητήσουν άδεια για να στείλουν δεδομένα τότε ο χρονοπρογραμματιστής αποφασίζει πότε και πόσα UEs θα έχουν τη δυνατότητα να το πράξουν. Το αίτημα για τη μετάδοση περιέχει πληροφορίες σχετικές με την κατάσταση του buffer μετάδοσης και την ουρά στο UE, καθώς και το περιθώριο της διαθέσιμης ισχύος.

2.4 Συστήματα Επικοινωνιών 4ης Γενιάς

2.4.1 LTE: Long Term Evolution

Το 3GPP LTE [8] είναι το τελευταίο πρότυπο στην οικογένεια των δικτύων κινητών επικοινωνιών που παρήγαγε τις τεχνολογίες δικτύου GSM/EDGE και UMTS/HSPA [9]. Είναι ένα έργο του 3GPP υπό την συνεργασία του ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Αν και το LTE συνήθως καλείται 4G [10], η πρώτη έκδοση δεν καλύπτει τις 4G απαιτήσεις του IMT Advanced. Το προ-4G πρότυπο είναι ένα βήμα προς το LTE Advanced, ένα πρότυπο 4ης γενιάς τεχνολογιών σχεδιασμένο να αυξήσει την χωρητικότητα και τους ρυθμούς μετάδοσης των κινητών τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Το LTE Advanced είναι προς τα πίσω συμβατό με το LTE, αλλά το LTE δεν είναι προς τα πίσω συμβατό με τα 3G συστήματα.

Η προδιαγραφή LTE παρέχει ρυθμούς μετάδοσης τουλάχιστον 100 Mbit/s down-link, τουλάχιστον 50 Mbit/s uplink και χρόνους μετ' επιστροφής (RTT) στο RAN μικρότερους των 10 ms. Το LTE υποστηρίζει φέροντα κλιμακωτού εύρους ζώνης, από

1.4 Mbit/s έως 20 MHz υποστηρίζοντας FDD (Frequency Division Duplexing) και TDD (Time Division Duplexing).

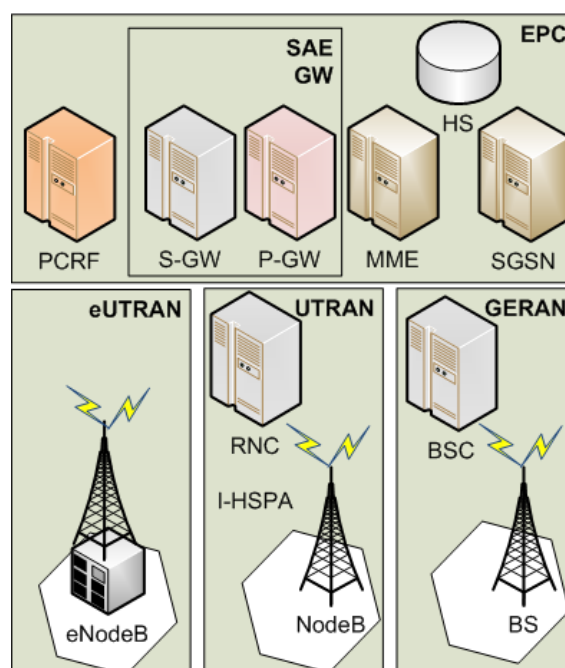
Τμήμα του LTE είναι η αρχιτεκτονική δικτύου SAE (System Architecture Evolution) η οποία είναι οριζόντια και πλήρως IP, σχεδιασμένη να αντικαταστήσει το GPRS δίκτυο κορμού καθώς επίσης και να υποστηρίξει την κινητικότητα μεταξύ συμβατών και μη συμβατών με το 3GPP συστήματα, όπως μεταξύ GPRS και WiMAX.

Τα περισσότερα στοιχεία του προτύπου οδηγούν την αναβάθμιση του 3G UMTS στην 4G τεχνολογία κινητών επικοινωνιών, η οποία είναι ένα σύστημα κινητής ευρυζωνικότητας με αναβαθμισμένες υπηρεσίες πολυμέσων.

Το πρότυπο περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία [11, 12]:

- Μέγιστο ρυθμό download 326.4 Mbit/s για 4×4 κεραιές, και 172.8 Mbit/s για 2×2 κεραιές (χρησιμοποιώντας 20 MHz ραδιοφάσμα).
- Μέγιστο ρυθμό upload 86,4 Mbit/s για κάθε 20 MHz φάσματος χρησιμοποιώντας μια απλή κεραία.
- Τουλάχιστον 200 ενεργοί χρήστες (δεδομένων) ανά κυψέλη.
- Λιγότερο από 5 ms καθυστέρηση για μικρά πακέτα IP.
- Αυξημένη ευελιξία ραδιοφάσματος, με φασματικές ζώνες από 1.4 MHz έως 20 MHz (το W-CDMA απαιτεί ζώνες των 5 MHz).
- Στη ζώνη των 900 MHz, που πρέπει να χρησιμοποιούνται στις αγροτικές περιοχές, υποστηρίζεται το βέλτιστο μέγεθος της κυψέλης, είναι 5 km, 30 km μέγεθος υπάρχει ικανοποιητική επίδοση, και μέχρι 100 km μέγεθος κυψέλης υποστηρίζονται αποδεκτές επιδόσεις. Στην πόλη και τις αστικές περιοχές, χρησιμοποιούνται ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων (π.χ. 1.8 GHz και 2.6 GHz στην ΕΕ) για την υποστήριξη υψηλής ταχύτητας ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Στην περίπτωση αυτή, τα μεγέθη των κυψελών μπορεί να είναι 1 χλμ. ή και λιγότερο.
- Καλή υποστήριξη της κινητικότητας. Υψηλές επιδόσεις στην μετάδοση δεδομένων είναι εφικτές για ταχύτητες έως 350 km/h.
- Συνύπαρξη (διαλειτουργία) με τις προηγούμενες τεχνολογίες. Ένας χρήστης μπορεί να ξεκινήσει μια κλήση / υπηρεσία σε LTE και όταν δεν παρέχεται κάλυψη, τότε να συνεχίζει την παροχή της υπηρεσίας χωρίς διακοπή είτε σε GSM/GPRS/EDGE είτε σε W-CDMA UMTS διαθέσιμα δίκτυα είτε ακόμα και σε WiMAX (IEEE 802.16e) δίκτυα [13].

- Υποστήριξη της τεχνολογίας MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network). Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες όπως η κινητή τηλεόραση (Mobile TV) χρησιμοποιώντας την υποδομή LTE. Το LTE MBSFN είναι ανταγωνιστικό του DVB-H.
- Το ραδιοδίκτυο πρόσβασης Evolved UTRAN (E-UTRAN) αποτελείται μόνο από εξελιγμένους σταθμούς βάσης (eNodeBs).
- Ραδιο-διεπαφές μεταγωγής πακέτου.



Σχήμα 2.3: Σύγχρονες αρχιτεκτονικές εξελιγμένων ραδιοδικτύων πρόσβασης (e-RANs).

2.4.2 LTE Adv: Long Term Evolution Advanced

Η τέταρτη γενιά κυψελωτών ασύρματων τηλεπικοινωνιών (4G ή IMT-Advanced όπως ορίστηκε από την ITU-R) απαιτεί μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης στην λήψη 100 Mbit/s για υψηλής κινητικότητας επικοινωνίες (τρένα, αυτοκίνητα) και 1 Gbit/s για χαμηλή κινητικότητα (όπως πεζοί και σταθεροί χρήστες). Ένα 4G σύστημα προβλέπεται να παρέχει μια ολοκληρωμένη, ασφαλή και βασισμένη σε IP κινητή ευρυζωνική πρόσβαση σε έξυπνα τηλεφωνικά (smart-phones), φορητούς υπολογιστές και άλλες φορητές συσκευές. Υπηρεσίες όπως υπερ-ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, τηλεφωνία IP, καθώς και συνεχή ροή πολυμέσων (multimedia streaming) μπορούν να παρέχονται στους χρήστες.

Οντότητα	Περιγραφή - Λειτουργία
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
GERAN	GSM/EDGE Radio Access Network
NodeB	BS in UMTS
RNC	Radio Network Controller
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
HSPA	High Speed Packet Access
eNodeB	Evolved NodeB in LTE
E-UTRAN	Evolved UTRAN
EPC	Evolved Packet Core
GGSN	Gateway GPRS Support Node
SGSN	Serving GPRS Support Node
MME	Mobility Management Entity
PCRF	Policy and Charging Resource Function
S-GW	Serving Gateway
P-GW	Packet Data Network Gateway
SAE GW	System Architecture Evolution Gateway
HSS	Home Subscriber Server

Πίνακας 2.1: Στοιχεία ραδιοδικτύου (RAN) και δικτύου πρόσβασης (CN) σε ένα εξελιγμένο δίκτυο κινητών επικοινωνιών.

Σε όλες τις προτάσεις για 4G (LTE Advanced και WirelessMAN-Advanced) υιοθετείται η τεχνολογία πρόσβασης OFDMA και άλλων σχημάτων εξισορρόπησης (equalization) στο πεδίο της συχνότητας. Τα άνω συνδυάζονται με τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών MIMO, δυναμική ανάθεση καναλιών και χρονοπρογραμματισμός εκπομπής βασισμένο στο κανάλι.

Οι βασικές προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί ένα ασύρματο κυψελωειδές σύστημα ως IMT-Advanced ή 4G είναι οι ακόλουθες:

- Βασισμένο σε ένα πλήρες IP δίκτυο μεταγωγής πακέτου.
- Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης έως 100 Mbit/s για υψηλή κινητικότητα όπως η κινητή πρόσβαση και έως περίπου 1 Gbit/s για την χαμηλή κινητικότητα, όπως ασύρματη τοπική πρόσβαση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ITU-R.
- Δυναμική διανομή και αξιοποίηση ραδιοπόρων του δικτύου για την όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα ανά κυψέλη.
- Κλιμακωτό εύρος ζώνης καναλιού, μεταξύ 5 και 20 MHz, προαιρετικά έως και 40 MHz.
- Μέγιστη φασματική απόδοση ζεύξης 15 bit/s/Hz στο downlink και 6.75 bit/s/Hz

Κεφάλαιο 2. Σύγχρονα Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

στο uplink (που σημαίνει 1 Gbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη σε λιγότερο από 67 MHz εύρος ζώνης).

- Φασματική απόδοση συστήματος έως και 3 bit/s/Hz/cell στο downlink και 2.25 bit/s/Hz/cell στο uplink.
- Ομαλές διαπομπές σε ετερογενή δίκτυα.
- Δυνατότητα υποστήριξης υψηλής ποιότητας παρεχόμενων υπηρεσιών πολυμέσων επόμενης γενιάς.

Οι τεχνολογικές προτάσεις που υποβλήθηκαν στην ITU (Working Party 5D) ως υποψήφια συστήματα 4G ήταν:

- LTE Advanced υπό προτυποποίηση από το 3GPP και υποστηρίζει τις ραδιοτεχνολογίες OFDMA / MIMO / SC-FDMA [14].
- WiMAX ή 802.16m υπό προτυποποίηση από το IEEE και υποστηρίζει τις ραδιοτεχνολογίες MIMO-SOFDMA [15].

2.5 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν εν συντομία οι σύγχρονες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας ευρείας ζώνης.

Ειδικότερα στο σύγχρονο περιβάλλον κινητών επικοινωνιών θα συνηπάρχουν προς το παρόν όλες οι τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης. Έτσι, έγινε αναφορά στα συστήματα GSM, UMTS και HSPA τα οποία έχουν αναπτυχθεί ευρέως. Παράλληλα, ήδη έχουν κάνει την εμφάνισή τους πιο ευρυζωνικά συστήματα όπως το HSPA+ και LTE τα οποία εξυψώνουν τους ρυθμούς μετάδοσης ανά χρήστη για την παροχή πλέον αναβαθμισμένων σε ποιότητα υπηρεσιών όπως γρήγορη πλοήγηση στο διαδίκτυο καθώς και μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας σε περιβάλλοντα κινητικότητας

Στο αρχικό στάδιο έρευνας, ανακοινώθηκε μία εργασία σε διεθνές επιχειρηματικό φόρουμ κινητών τηλεπικοινωνιών [16].

□

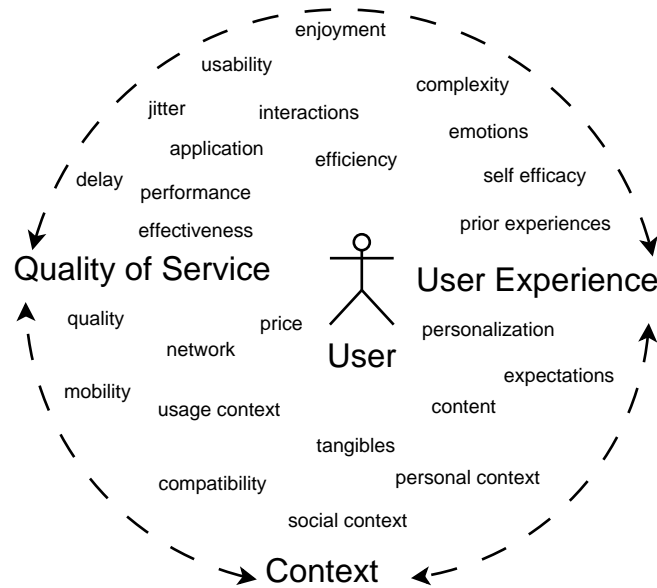
Κεφάλαιο 2. Σύγχρονα Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

Κεφάλαιο 3

Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

Η εμπειρία χρήστη (User Experience, UX) μαζί με το περιεχόμενο (context) της επικοινωνίας και της ποιότητα της υπηρεσίας (από την πλευρά του συστήματος / δικτύου) συμβάλλουν στην διαμόρφωση της ποιότητας της εμπειρίας (Quality of Experience, QoE) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Ένα σύνολο εργασιών παρουσιάζουν την σημασία του όρου QoE και τις μεθόδους αντικειμενικής και υποκειμενικής αξιολόγησης των υπηρεσιών που προσφέρονται στους χρήστες μέσω συστημάτων και δικτύων επικοινωνιών. Στην τεχνική αναφορά ETSI TR 102 643 [17] παρουσιάζονται οι ανθρώπινοι παράγοντες και ειδικότερα οι απαιτήσεις QoE για τις υπηρεσίες επικοινωνιών πραγματικού χρόνου. Η ειδική ομάδα εργασίας ETSI STF 354 [18] παρουσιάζει οδηγίες και προτάσεις για την βελτίωση της εμπειρίας χρήστη σε συστήματα επικοινωνιών. Επιπρόσθετα, στις οδηγίες ETSI EG 202 057, Part 1, 2, 3, 4 [19, 20, 21, 22] ορίζονται παράμετροι QoS σχετιζόμενες με τον χρήστη για υπηρεσίες φωνής, μηνυμάτων και διαδικτύου, παρεχόμενες από δημόσια δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Όμοια, η 3GPP στην τεχνική προδιαγραφή 3GPP TS 23.107 [23] παρουσιάζει το πλαίσιο και την αρχιτεκτονική του QoS.

Αναλυτικά, μια επισκόπηση των όρων ποιότητας, QoX δηλαδή CoS (Classes of Services), GoS (Grade of Service), QoS, QoE, και QoR (Quality of Resilience) συγκεντρώνονται στην εργασία [24]. Μια πρώτη βιβλιογραφική έρευνα επί θεμάτων QoS και QoE παρουσιάζεται στον συλλογικό τόμο [25]. Ειδικότερα, για θέματα πολυμεσική ποιότητας εμπειρίας έχουν δημοσιευτεί σημαντικός αριθμός εργασιών [26, 27, 28, 29, 30]. Κρίνεται συνεπώς επιτακτική η ανάγκη έρευνας επί θεμάτων ποιότητας εμπειρίας και ποιότητας υπηρεσιών.



Σχήμα 3.1: Η διαμόρφωση της Ποιότητας Εμπειρίας QoE συναρτῆσει των παραγόντων της Ποιότητας της Υπηρεσίας QoS, της Εμπειρίας του Χρήστη (User Experience) και του Περιεχομένου (Context) της υπηρεσίας.

3.1 Τεχνική Ορολογία Ποιότητας: QoE, ESQoS, SQoS

Η ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience, QoE), η απ' άκρη-σε-άκρη ποιότητα υπηρεσίας (End-to-end Service Quality of Service, ESQoS) και η ποιότητα του συστήματος (System Quality of Service, SQoS) είναι σημαντικοί παράγοντες όταν προσφέρονται υπηρεσίες επικοινωνιών σε πελάτες. Οι νέες εκδόσεις του 3G προσφέρουν στην αγορά πολλές νέες υπηρεσίες πολυμεσικής επικοινωνίας. Είναι αναγκαίο λοιπόν ότι ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών (QoS) θα είναι αντιληπτό από τον χρήστη για τις νέες πολυμεσικές υπηρεσίες ώστε να προβληθεί η ιδέα ενός προηγμένου συστήματος ως ένα μέσου επικοινωνίας με ευρεία διαθεσιμότητα.

Η πιθανότητα χρήσης πολυμεσικών υπηρεσιών μέσω 3G με έναν πρακτικό και αξιόπιστο τρόπο είναι πολύ σημαντικό στο άμεσο μέλλον. Για αυτές τις νέες υπηρεσίες, είναι βέβαιο ότι ένα πολύ μεγαλύτερο μέγεθος τηλεπικοινωνιακής κίνησης θα παράγεται μεταξύ των κινητών τερματικών και των εξυπηρετητών. Αυτό δίνει βαρύτητα στις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών.

Οι δείκτες της απ' άκρη-σε-άκρη επίδοσης υπηρεσίας προτείνονται να καθιστούν δυνατή στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους την αξιολόγηση της ποιότητας υπηρεσίας όπως γίνεται αντιληπτή από τους τελικούς χρήστες (end-users). Αυτό περιλαμβάνει:

- Ορισμός των χαρακτηριστικών επίδοσης που είναι οι πιο σχετικοί με τους τελικούς χρήστες (Ποιότητα Εμπειρίας ή QoE).

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

- Ορισμός της αντιστοίχισης μεταξύ QoE και των χαρακτηριστικών υπηρεσίας μετρούμενων απ' άκρη-σε-άκρη (ESQoS), η αντιστοίχιση μεταξύ ESQoS και συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της υπηρεσίας συστήματος (SQoS).

Οι παράμετροι του QoE περιγράφουν την απ' άκρη-σε-άκρη ποιότητα όπως γίνεται αντιληπτή από τους τελικούς χρήστες. Αυτοί είναι δύσκολο να μετρηθούν και να ποσοτικοποιηθούν.

Οι παράμετροι SQoS είναι δείκτες οι οποίοι είναι πιο σχετικοί με την κατάσταση του δικτύου και καθορίζονται από την πλευρά του πάροχου υπηρεσιών παρά από την πλευρά του χρήστη. Οι παράμετροι SQoS μπορούν να θεωρηθούν ως τα χαρακτηριστικά των δικτύων, τα οποία είναι σημαντικά για την εγγύηση των απαιτήσεων QoE από τους χρήστες.

Οι παράμετροι ESQoS περιγράφουν το επίπεδο QoS μιας απ' άκρη-σε-άκρη υπηρεσία. Λαμβάνονται άμεσα από τις παραμέτρους QoE με την αντιστοίχισή τους σε παραμέτρους πιο σχετικούς προς τους παρόχους δικτύων και υπηρεσιών.

3.1.1 QoE: Quality of Experience

Το QoE είναι το συνολικό επίπεδο αποδοχής μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας όπως γίνεται υποκειμενικά αντιληπτό από τον τελικό χρήστη.

Σημείωση 1 Το QoE περιλαμβάνει τις συνολικές επιδράσεις απ' άκρη-σε-άκρη του συστήματος (χρήστης, τερματικός εξοπλισμός, δίκτυο, υποδομές υπηρεσιών κτλ)

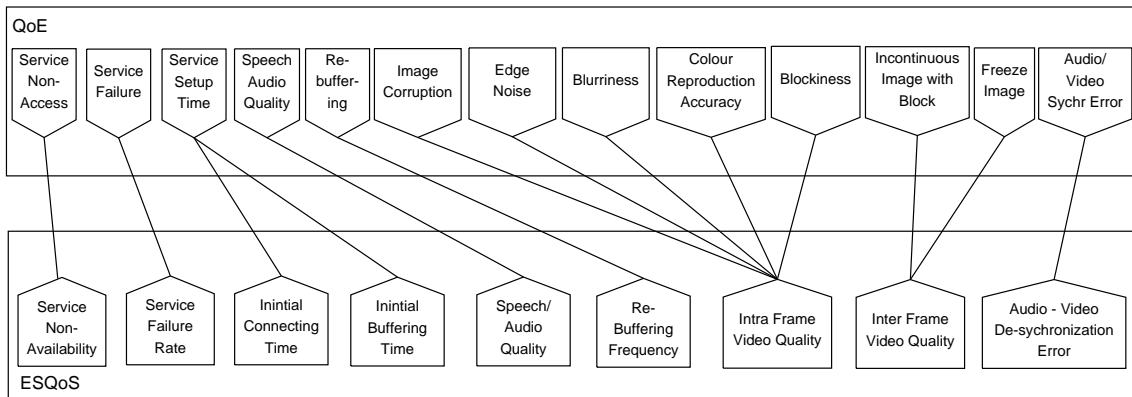
Σημείωση 2 Το συνολικό επίπεδο αποδοχής μπορεί να επηρεαστεί από τις προσδοκίες του χρήστη και το περιεχόμενο.

Το QoE υποδεικνύει μετρικές όπως εκφράζονται από την πλευρά των τελικών χρηστών υπηρεσίας. Δύναται να απαιτηθούν ή να αναφερθούν από τους κοινούς χρήστες και μπορεί να θεωρηθούν αδύνατοι μέτρησης.

QoE Παράμετροι

Από πλευράς χρήστη, το QoE δεν μπορεί να καθοριστεί μόνο από τεχνικές μετρήσεις. Θα πρέπει να καθοριστεί από διερεύνηση του χρήστη χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες μεθόδους.

1. Οι χρήστες παρέχουν μια γνώμη για το QoE που αφορούν μόνο τις αισθήσεις και τις εμπειρίες τους. Ο δείκτης μέτρησης του QoE είναι υποκειμενικός.



Σχήμα 3.2: Αντιστοίχιση των παραμέτρων QoE και ESQoS.

- Χρήσει κάποιων κλασικών δεικτών του QoE, οι χρήστες μπορούν να λάβουν απόφαση για την επιλογή κάποιων από αυτούς ως αναγκαίους δείκτες του QoE.

Η επίδοση της υπηρεσίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως ακολούθως:

Λόγω του ότι οι παράμετροι και οι δείκτες μέτρησης του QoE σχετίζονται άμεσα με τον ορισμό της υπηρεσίας, είναι πιθανή η αντιστοίχιση των στοιχείων της υπηρεσίας σε μετρήσιμες παραμέτρους ή δείκτες ESQoS και SQoS, καθώς αυτοί σχετίζονται άμεσα με την επίδοση των στοιχείων της υπηρεσίας.

Οι κοινές απαιτήσεις για διαφορετικές υπηρεσίες συλλέγονται και κατηγοριοποιούνται λοιπόν σε QoE, παραβλέποντας την μετρησιμότητα. Έτσι το QoE για την ανάλυση της υπηρεσίας ποικίλει για τους διάφορους τύπους των υπηρεσιών, τις μεθόδους διανομής και τα σημεία εποπτείας (monitoring).

3.1.2 ESQoS: End-to-end Service QoS

Το ESQoS γενικά χρησιμοποιείται για να καθορίσει λεπτομερώς την επίδοση των υπηρεσιών από τη πλευρά των τηλεπικοινωνιακών παρόχων και των παρόχων υπηρεσιών. Καθώς ο αριθμός των νέων υπηρεσιών αναπτύσσονται ραγδαία και γίνονται πιο σύνθετες, είναι σημαντικό για έναν πάροχο να μετρά με ακρίβεια το ESQoS του δικτύου και να το βελτιώνει συνεχώς ώστε να πετυχαίνει πελατειακή πίστη και να διατηρεί την ανταγωνιστική του θέση. Το ESQoS είναι μετρήσιμο και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί επακριβώς με πολλές παραμέτρους σε αντίθεση με το QoE.

3.1.3 SQoS: System Quality of Service

Ο όρος του SQoS είναι ένα υποσύνολο του τυπικού QoS, το οποίο ορίζεται από την προδιαγραφή ITU-T Rec. E.800 [31] ως το αθροιστικό αποτέλεσμα των επιδόσεων της υπηρεσίας που καθορίζει την ικανοποίηση του χρήστη της υπηρεσίας. Χαρακτηρίζεται

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

από συνδυασμένα θέματα των παραγόντων επίδοσης που εφαρμόζονται σε όλες τις υπηρεσίες όπως:

- επίδοση παροχής/υποστήριξης της υπηρεσίας (service support performance),
- επίδοση προσβασιμότητας της υπηρεσίας (service accessibility performance),
- επίδοση διατηρησιμότητας της υπηρεσίας (service retainability performance),
- επίδοση ακεραιότητας της υπηρεσίας (service integrity performance),
- επίδοση ασφάλειας της υπηρεσίας (service security performance).

Σε σύγκριση με το ESQoS, το SQoS δηλώνει το από σημείο-σε-σημείο QoS, το οποίο σχετίζεται συγκεκριμένα με μονάδες και ζεύξεις των συστημάτων του δικτύου, παρά με την συνολική υπηρεσία ή το δίκτυο. Το SQoS μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια θεώρηση του QoS από την πλευρά των παρόχων δικτύου.

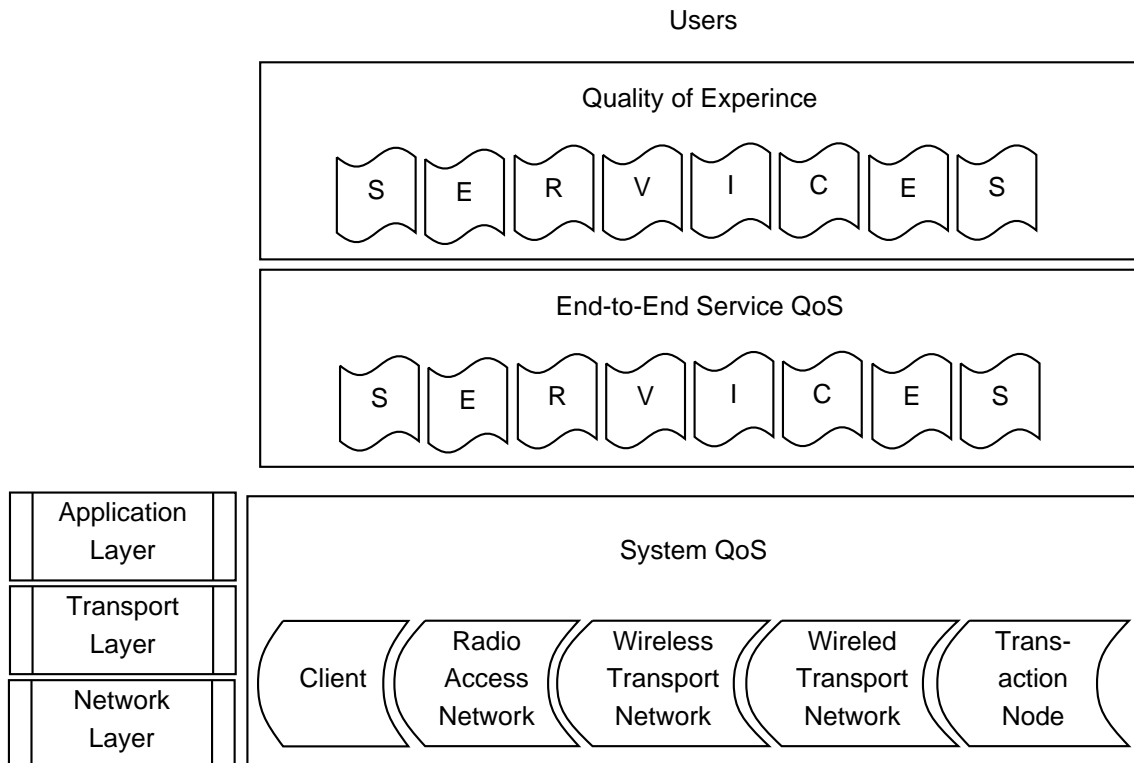
Παράμετροι SQoS

Η ποιότητα μιας υπηρεσίας όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης επηρεάζεται τόσο από το δίκτυο όσο και από τον τερματικό εξοπλισμό. Καθώς η ευφυία και η πολυπλοκότητα μιας εφαρμογής/υπηρεσίας αυξάνεται, η επίδοση της εφαρμογής γίνεται σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό της ποιότητας, αντιληπτής από τον χρήστη. Οι υπηρεσίες είναι εφαρμογές οι οποίες εκτελούνται σε κοινά στοιχεία του δικτύου. Οι παράμετροι SQoS είναι συγκεκριμένοι δείκτες μέτρησης οι οποίοι αντανακλούν την κατάσταση των στοιχείων του δικτύου και καθορίζονται από την πλευρά του παρόχου υπηρεσιών παρά από τους χρήστες των υπηρεσιών. Οι σχετικοί παράμετροι μπορούν διακριθούν σε 5 κατηγορίες:

1. Πελάτης (Client)
2. Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβαση (Radio Access Network)
3. Ασύρματο Δίκτυο Μεταφοράς (Wireless Transport Network)
4. Ενσύρματο Δίκτυο Μεταφοράς (Wired Transport Network)
5. Κόμβος Διεκπεραίωσης (Transaction Node)

Κάθε κατηγορία έχει 3 επίπεδα τα οποία αντανακλούν τα επίπεδα πρωτοκόλλων στο δίκτυο:

1. Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)



Σχήμα 3.3: Οι παράμετροι των QoE, ESQoS, και SQoS.

2. Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer)
3. Επίπεδο Δικτύου (Network Layer) - Επίπεδα Ζεύξης Δεδομένων (Data Link) και Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer).

Οι παράμετροι των QoE, ESQoS και SQoS παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 3.3.

3.2 Ποιότητα Τηλεφωνίας

Η ταχεία ανάπτυξη των ψηφιακών τεχνολογιών έχει οδηγήσει στην αυξημένη ανάγκη για αξιολόγηση των συστημάτων μετάδοσης. Η σύσταση ITU Rec. P.800 [32], περιγράφει τις μεθόδους υποκειμενικής αξιολόγησης που θεωρούνται κατάλληλες για να καθοριστεί το πόσο ικανοποιητική αναμένεται να είναι η επίδοση δεδομένων τηλεφωνικών συνδέσεων. Η υποκειμενική αξιολόγηση βασίζεται στο μέσο όρο των βαθμολογιών γνώμης (MOS), βάσει της σύσταση ITU-T Rec. P.800.1 [33], δηλαδή των τιμών σε μια προκαθορισμένη κλίμακα στην οποία οι συμμετέχοντες εκφράζουν τη γνώμη τους για την επίδοση του τηλεφωνικού συστήματος, είτε για συνομιλία είτε για ακρόαση προφορικού υλικού.

Βαθμολογία	Ποιότητα ομιλίας (ACR)	Επίπεδο υποβάθμισης (DCR)
5	Εξαιρετική	Ανεπαίσθητη
4	Καλή	Αισθητή αλλά όχι ενοχλητική
3	Μέτρια	Ελαφρώς ενοχλητική
2	Ασθενής	Ενοχλητική
1	Πολύ Κακή	Πολύ ενοχλητική

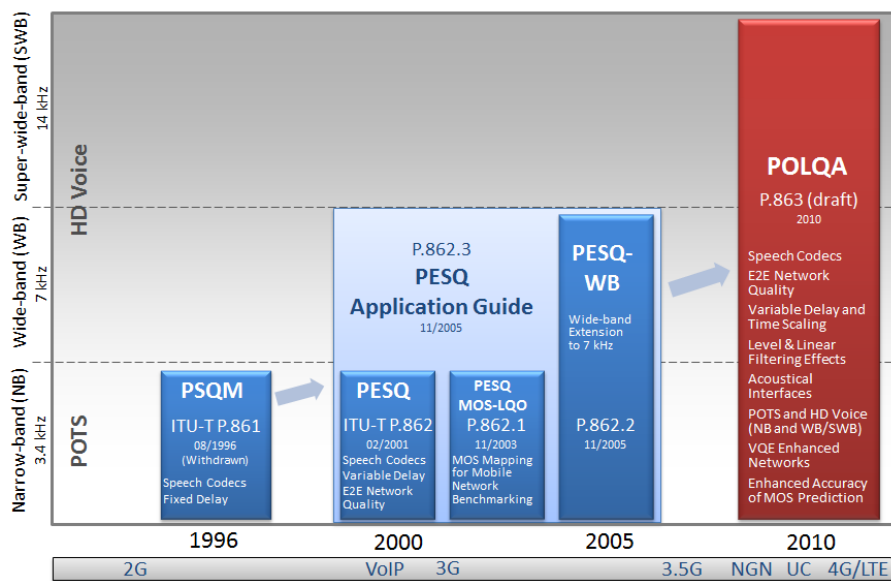
Πίνακας 3.1: Κλίμακα υποκειμενικής αξιολόγησης ACR-DCR.

Η MOS προορίζεται για γενική εφαρμογή, ανεξαρτήτως της μορφής που παρουσιάζουν οι παράγοντες υποβάθμισης όπως οι απώλειες (συχνά εξαρτημένες από τη συχνότητα), ο θόρυβος κυκλώματος, τα σφάλματα μετάδοσης (π.χ. τυχαία σφάλματα bit), ο θόρυβος περιβάλλοντος, ο πλάγιος τόνος (sidetone), η ηχώ ομιλητή, η μη γραμμική παραμόρφωση (π.χ. κωδικοποίηση χαμηλού bit rate), ο χρόνος διάδοσης, οι επιπτώσεις των συσκευών φωνής, οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από τη μεταγωγή πακέτου χρονομεταβλητές υποβαθμίσεις του διαύλου επικοινωνίας.

Η υποκειμενική αξιολόγηση διεξάγεται χρησιμοποιώντας κυρίως μεθόδους ακοής ή συνομιλίας. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για ακουστικές δοκιμές είναι η *Απόλυτη Διαβάθμιση Κατηγορίας* (ACR), η οποία κατατάσσει την ποιότητα ομιλίας στην κλίμακα “1-5” και απεικονίζεται στον Πίνακα 3.1. Εναλλακτικά, στην ίδια κλίμακα, η ACR χρησιμοποιεί τη διαβάθμιση της προσπάθειας που καταβάλλει ο ακροατής για την κατανόηση του νοήματος των φράσεων που ακούει, ή τη διαβάθμιση της προτίμησης του ακροατή ως προς την ένταση του ήχου. Η ACR έχει εφαρμοστεί στην αναλογική και ψηφιακή τηλεφωνία. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι ο *Βαθμός Κατηγορίας Υποβάθμισης* (DCR), η *Διαβάθμιση Κατηγορίας Σύγκρισης* (CCR) και η *Μέθοδος Κατωφλίου* (Threshold Method). Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η κλίμακα υποκειμενικής αξιολόγησης ACR-DCR.

3.2.1 Αντιληπτική Αξιολόγηση Ποιότητας Τηλεφωνίας

Η MOS είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης της ποιότητας ομιλίας, αλλά είναι παράλληλα πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την εκτίμηση της υποκειμενικής ποιότητας που λαμβάνεται σε ακουστικές δοκιμές, την PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) της σύστασης ITU-T Rec. P.862 [34]. Ορίστηκε το 2001 από την ITU-T αρχικά για επικοινωνία στενής ζώνης (3.1kHz), ενώ αργότερα επεκτάθηκε και σε ευρυζωνικά συστήματα (50-7000Hz). Σε αντίθεση με το προηγούμενη σύσταση, ITU-T Rec. P.861 (PSQM), η PESQ λαμβάνει υπόψη ορισμένα φαινόμενα, όπως φιλτράρισμα, μεταβλητή καθυστέρηση, παραμόρφωση κωδικοποίησης και σφάλματα καναλιού.



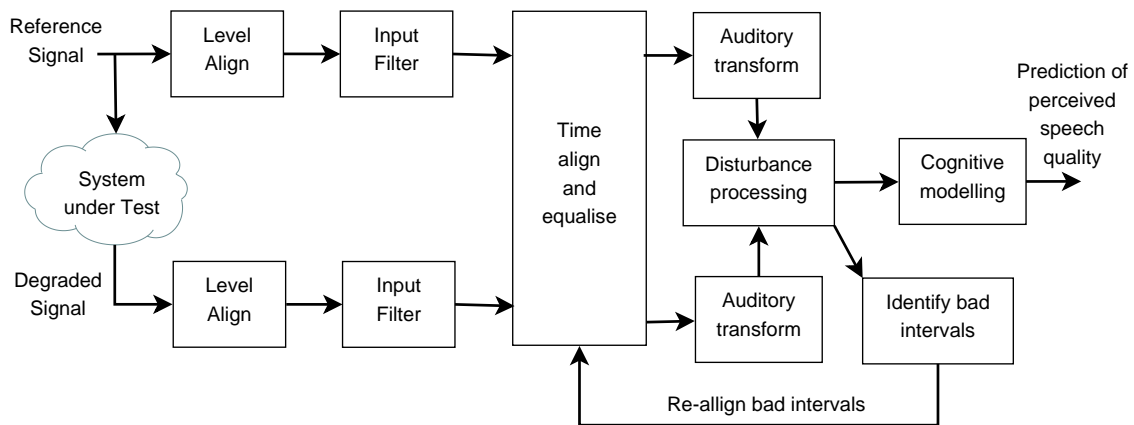
Σχήμα 3.4: Εξέλιξη των αλγορίθμων αξιολόγησης ποιότητας φωνής.

Σημαντικό πλήθος εργασιών παρουσιάζουν το ζήτημα της μέτρησης και αξιολόγησης ποιότητας τηλεφωνίας σε δημόσια δίκτυα κινητών επικοινωνιών [35, 36, 37, 38, 39]. Ειδικό ενδιαφέρον εμφανίζεται και στην συγκριτική αξιολόγηση ποιότητας φωνής στα κινητά δίκτυα [40].

Πρόκειται για μια αντικειμενική μέθοδο που εντοπίζει παραμορφώσεις του ήχου μέσω μιας διαδικασίας η οποία βασίζεται στην ανθρώπινη αντίληψη και είναι εφαρμόσιμη σε codecs φωνής, καθώς και σε μετρήσεις από άκρη-σε-άκρη. Συγκεκριμένα, η PESQ συγκρίνει το πρωτότυπο σήμα ομιλίας (σήμα αναφοράς) με ένα υποβαθμισμένο σήμα, το οποίο είναι το αποτέλεσμα του πρώτου, καθώς περνά μέσα από το υπό εξέταση δίκτυο. Προκειμένου να πραγματοποιήσει τη σύγκριση, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα αντιληπτικό (ψυχοακουστικό) και ένα γνωστικό μοντέλο. Το ψυχοακουστικό μοντέλο που εφαρμόζεται τόσο στο πρωτότυπο όσο και στο υποβαθμισμένο σήμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εσωτερικής (ή ψυχοσωματικής) αναπαράστασης των δειγμάτων ομιλίας. Συγκεκριμένα, το μοντέλο εκτελεί ένα μετασχηματισμό από το φυσικό πεδίο που αντιπροσωπεύει το σήμα ομιλίας στο ψυχοσωματικό πεδίο το οποίο εκφράζει η ανθρώπινη αντίληψη. Αυτό επιτυγχάνεται σε διάφορα στάδια: χρονική ευθυγράμμιση, ευθυγράμμιση επιπέδου, φιλτράρισμα, χρονο-συχνοτικός μετασχηματισμός, παραμόρφωση συχνότητας, αντιστάθμιση για τις μεταβολές κέρδους μεταξύ του πρωτότυπου και του υποβαθμισμένου σήματος και μετασχηματισμός ακουστότητας (μια υποβάθμιση που ακούγεται στο τέλος του δείγματος ομιλίας έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην ανθρώπινη αντίληψη απ' ό,τι στην αρχή του δείγματος).

Για τον υπολογισμό της υποβάθμιση της ποιότητας ομιλίας που αντιπροσωπεύεται από τη διαταραχή μεταξύ των ψυχοσωματικών αναπαραστάσεων του σήματος αναφοράς

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα λειτουργίας του αλγόριθμου PESQ.

και του υποβαθμισμένου σήματος, το γνωστικό μοντέλο εκτελεί σύνθετους, μη γραμμικούς υπολογισμούς. Παραδείγματα αυτών των υπολογισμών είναι η χρονο-συχνοτική επικάλυψη της ανεπαίσθητης διαταραχής, υπολογισμός ασύμμετρης διαταραχής (στάθμιση των πρόσθετων συχνοτήτων που εισάγονται γενικά από τον codec), στάθμιση των διαστημάτων σιγής, μη γραμμικός μέσος όρος της συμμετρικής και ασύμμετρης διαταραχής στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, υπολογισμός ενός διδιάστατου (εξετάζοντας τις συμμετρικές και ασύμμετρες διαταραχές) μέτρου της ποιότητας που δίνει μια τιμή και το οποίο αντιπροσωπεύει τον εκτιμητή της ποιότητας ομιλίας. Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου βρίσκεται μέσα στο εύρος -0.5 έως 4.5, όπου το -0.5 αντιπροσωπεύει τη χαμηλότερη ποιότητα.

Το πρότυπο P.862 παρέχει αποτελέσματα εντός του εύρους -0.5 έως 4.5, γεγονός που δεν επιτρέπει μια γραμμική σύγκριση με τη ΜΟΣ βαθμολογία. Το 2003, στη σύσταση ITU-T Rec. P.862.1 [41] παρέχεται μια συνάρτηση που απεικονίζει τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας PESQ στην κλίμακα MOS. Ειδικότερα, το πρότυπο P.862.1 σχεδιάστηκε με στόχο:

- να παράγει τιμές εντός του εύρους [1, 4.5]
- να δώσει αποτελέσματα που είναι κοντά στο μέσο όρο MOS για μεγάλο μέρος υποκειμενικών δοκιμών
- να εφαρμόζεται σε διάφορους τύπους δικτύου (σταθερό, κινητό, VoIP)
- να εφαρμόζεται σε διάφορες γλώσσες / χώρες

Η συνάρτηση απεικόνισης της PESQ έχει βελτιστοποιηθεί για ένα μεγάλο πλήθος υποκειμενικών δεδομένων που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές εφαρμογές και γλώσσες. Η επίδοσή της είναι καλύτερη από αυτή του προτύπου P.862, αφού μειώνει σημαντικά τα σφάλματα και παρουσιάζει μεγαλύτερη συσχέτιση με την υποκειμενική βαθμολογία.

Επιπλέον, διευκολύνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων στην υποκειμενική κλίμακα ποιότητας φωνής, χωρίς καμία ουσιαστική μείωση της ακρίβειας του μοντέλου, εξασφαλίζοντας αλλαγή κλίμακας από -0.5 έως 4.5 που ήταν στο P.862, σε 1.02 έως 4.56.

Μια διαδικασία παλινδρόμησης είναι απαραίτητη πριν γίνει άμεση σύγκριση PESQ-MOS, με στόχο να εξαλείψει τυχόν διακυμάνσεις (που οφείλονται σε ατομικές διαφορές κλπ). Η προτιμώμενη μέθοδος παλινδρόμησης για τον υπολογισμό της συσχέτισης μεταξύ της βαθμολογίας PESQ και της υποκειμενικής MOS, χρησιμοποιεί 3ης τάξης μονότονο πολυώνυμο. Τα μέτρα επίδοσης, όπως ορίζονται στο πρότυπο P.862, είναι:

- Συντελεστής συσχέτισης ο οποίος υπολογίζεται από τον τύπο του Pearson για τη συσχέτιση.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

Στον παραπάνω τύπο, είναι η MOS τιμή για τη συνθήκη, είναι ο μέσος όρος των τιμών MOS, είναι η τιμή PESQ για τη συνθήκη και είναι ο μέσος όρος των τιμών PESQ. Για να υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης, πρέπει κανονικά να έχει προηγηθεί απεικόνιση των αντικειμενικών βαθμολογιών στην κλίμακα των υποκειμενικών. Μετά από σειρά πειραμάτων της ITU, η μέση συσχέτιση υπολογίστηκε 0.935.

- Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) ή σφάλμα πρόβλεψης E_p . Η παλινδρόμηση αφαιρεί οποιοδήποτε συστηματικό offset ανάμεσα στην αντικειμενική και την υποκειμενική MOS βαθμολογία, ελαχιστοποιώντας το RMSE:

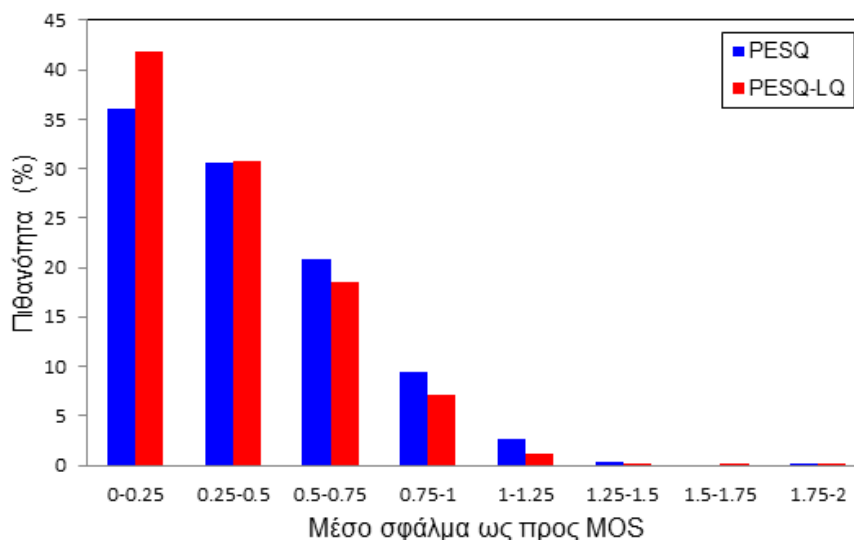
$$RMSE = E_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (3.2)$$

όπου N ο αριθμός των δειγμάτων που συμμετέχουν στην ανάλυση.

- Μέσο σφάλμα. Το ιστόγραμμα των απολύτων σφαλμάτων $|e_i| = |x_i - y_i|$ παρέχει μια γρήγορη άποψη για το πόσο συχνά συμβαίνουν σφάλματα διαφορετικών

Μέτρο επίδοσης	PESQ	P.862.1
R	0.876	0.879
E_p	0.492	0.441
E_m	-0.121	0.031

Πίνακας 3.2: Σύγκριση επίδοσης PESQ και P.862.1.



Σχήμα 3.6: Κατανομή σφάλματος μεταξύ αντικειμενικών και υποκειμενικών μετρήσεων.

μεγεθών.

$$E_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (3.3)$$

Σε μεταγενέστερη σύσταση ITU-T Rec. P.862.2 ή PESQ-WB [42] προτείνεται προηγμένη μέθοδος αξιολόγησης δειγμάτων φωνής ευρείας ζώνης μεταδιδόμενα σε τηλεφωνικά δίκτυα. Το 2011, δημιουργήθηκε η σύσταση ITU-T Rec. P.863 [43]. Ο αλγόριθμος αντικειμενικής αξιολόγησης της αντιληπτικής ποιότητας φωνής POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Assessment) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απ' άκρη-σε-άκρη αξιολόγηση της ποιότητας φωνής σε σταθερά, κινητά και IP-δίκτυα και κωδικοποιητών φωνής καλύπτοντας σήματα στενής, ευρείας και υπερ-ευρείας ζώνης.

Τα σήματα τηλεφωνίας κωδικοποιούνται με ψηφιακούς κωδικοποιητές, codecs. Στην δίκτυα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούνται προσαρμοστικοί πολυρυθμικοί κωδικοποιητές φωνής ή AMR (Adaptive Multi Rate) και είναι οι εξής:

- AMR Full Rate και Half Rate [44]

- EFR (Enhanced Full Rate) [45]
- AMR WB (Wide Band) [46]
- AMR WB+ (Extended Wide Band) [47]

3.2.2 Ποιότητα Κλήσης Τηλεφωνίας

Η αξιολόγηση της ποιότητας μιας τηλεφωνικής κλήσης γίνεται από την σύγκριση των δειγμάτων φωνής που μεταδόθηκαν από τον καλούντα, $S(t) = \{S_1(t_1), S_2(t_2), \dots, S_n(t_n)\}$, με τα αντίστοιχα υποβαθμισμένα δείγματα που ελήφθησαν, $\hat{S}(t) = \{\hat{S}_1(t_1), \hat{S}_2(t_2), \dots, \hat{S}_n(t_n)\}$, από καλούμενο, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο αντικειμενικής αξιολόγησης. Ο δείκτης αντικειμενικής αξιολόγησης ποιότητας φωνής είναι πολύ κοντά στην τιμή που θα λαμβάναμε αν τα δείγματα \hat{S} είχαν υποβληθεί στην υποκειμενική εκτίμηση από μια ομάδα χρηστών της υπηρεσίας.

$$SpeechQuality_{i \rightarrow j}[MOS_{LQO}] = \frac{\sum_{k=1}^n f_{LQ}(S_{k,i}(t_k), \hat{S}_{k,j}(t_k))}{n} \quad (3.4)$$

όπου ο δείκτης ποιότητας φωνής μπορεί να υπολογιστεί και για την πλευρά του καλούντα A και αντίστοιχα για τον καλούμενο B ή $(i, j) \in \{(A, B), (B, A)\}$, f_{LQ} η συνάρτηση που αντιστοιχεί στον αλγόριθμο υπολογισμού και MOS_{LQO} (MOS listening quality objective) η μετατροπή των αποτελεσμάτων στην κλίμακα MOS.

Επίσης, για τον καθορισμό της ποιότητας κλήσης μπορεί να ληφθούν [48]:

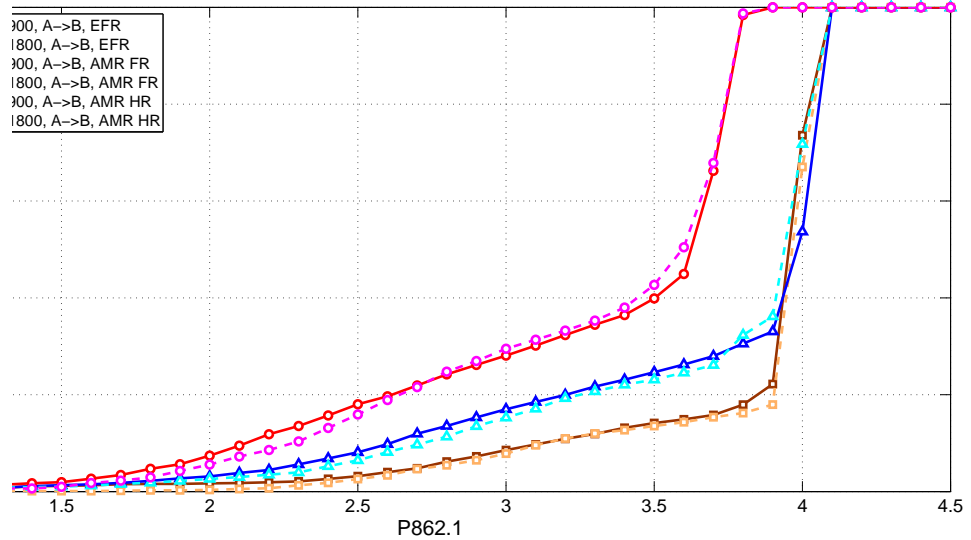
- Επίδραση δειγμάτων κακής ποιότητας προς το τέλος μιας κλήσης.
- Επίδραση ενός δείγματος πολύ κακής ποιότητας.

Επίδραση δειγμάτων κακής ποιότητας προς το τέλος μιας κλήσης.

Αν ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση της ποιότητας της κλήσης τα δείγματα φωνής κακής ποιότητας που παρουσιάζονται προς το τέλος της κλήσης, (recency effect, RE), τότε η ποιότητα της κλήσης n δειγμάτων χρήσει συντελεστών βαρών α_i υπολογίζεται από την σχέση:

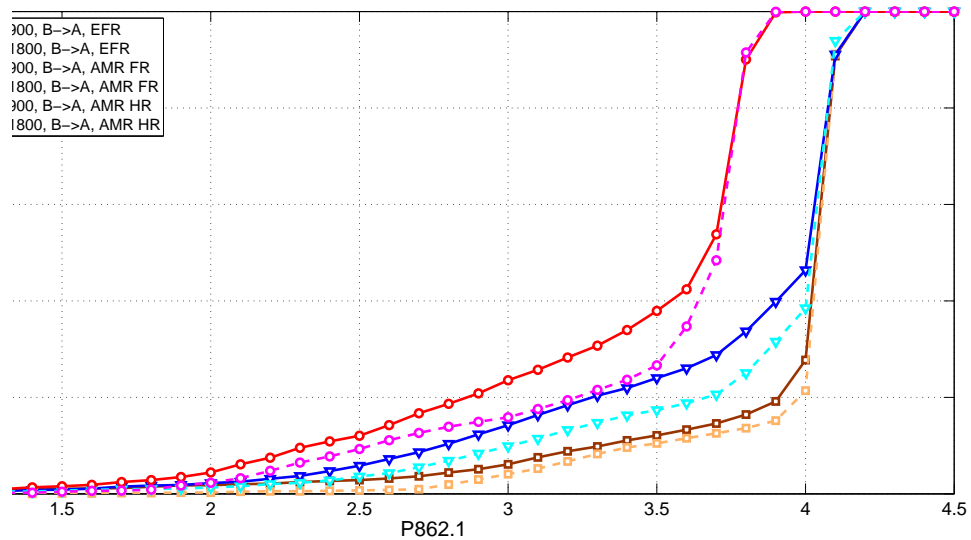
$$MOS_{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot MOS_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (3.5)$$

lots for all codecs in GSM 900/1800MHz Networks (Direction: Mobile Phone to Voice Server)



(α') Κατεύθυνση uplink

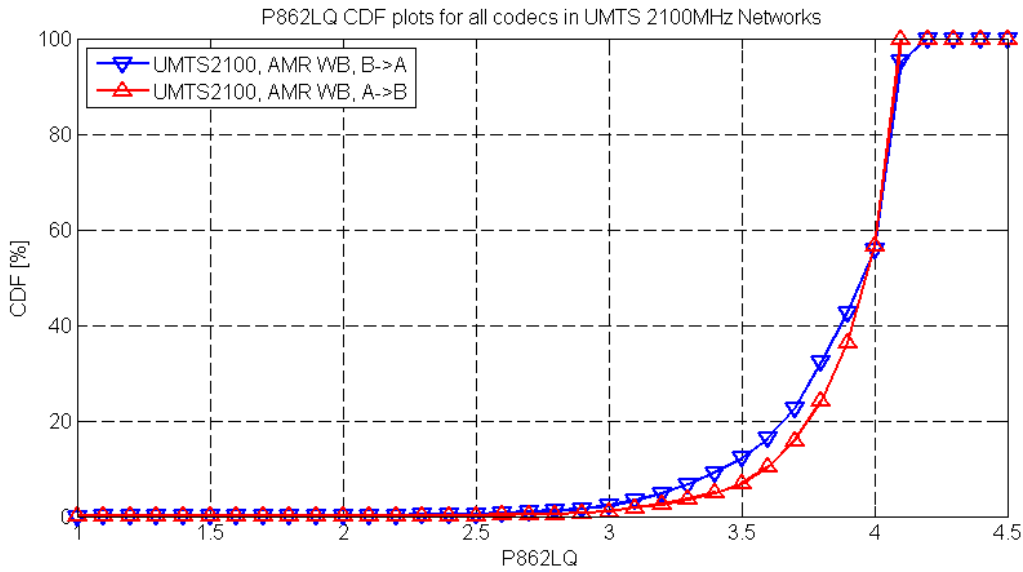
lots for all codecs in GSM 900/1800MHz Networks (Direction: Voice Server to Mobile Phone)



(β') Κατεύθυνση downlink

Σχήμα 3.7: Η επίδοση της ποιότητας φωνής ($P.862.1$) για τους κωδικοποιητές EFR και AMR FR/HR για τις κατευθύνσεις μετάδοσης (α) uplink, και (β) downlink, σε δίκτυα GSM 900/1800 MHz.

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)



Σχήμα 3.8: Η επίδοση της ποιότητας φωνής (P.862.1) για τον κωδικοποιητή AMR WB για τις κατευθύνσεις μετάδοσης *uplink* και *downlink*, σε δίκτυα UMTS 2100 MHz.

Αν ο χρόνος μεταξύ του τέλους του τελευταίου δείγματος και του μέσου του δείγματος i είναι t_i , τότε ισχύει για τα δείγματα για $t_i < 19$ την τιμή βάρους

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{19 - t_i}{19} + \frac{1}{2} \quad (3.6)$$

Για $t_i \geq 19$ ο συντελεστής βάρους είναι σταθερός και ίσος με $\alpha = 1/2$.

Επίδραση ενός δείγματος πολύ κακής ποιότητας.

Η συσχέτιση μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά λαμβάνοντας υπόψη το το δείγμα με την χειρότερη ποιότητα. Εμπειρικά αποδεικνύεται ότι ένα πολύ κακό δείγμα επηρεάζει την συνολική εντύπωση του χρήστη για την συνολική ποιότητα της κλήσης, έτσι αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί.

Έτσι το μοντέλο θα πρέπει να επεκταθεί συμπεριλαμβάνοντας και την επίπτωση του δείγματος με την χειρότερη ποιότητα:

$$MOS_{Call} = MOS_{RE} - 0.3 \cdot \left(\overline{MOS} - \min_{i \in [1, N]} MOS_i \right) \quad (3.7)$$

3.2.3 Ποιότητα Τηλεφωνίας Κινητού Διαδικτύου

Η τηλεφωνία διαδικτύου ή VoIP (Voice over IP) βρίσκει εφαρμογή τόσο σε σταθερά όσο και σε ασύρματα και κινητά δίκτυα. Τα WCDMA δίκτυα μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας σε υπηρεσίες VoIP. Στην περίπτωση ειδικά της HSPA τεχνολογίας βελτιώνεται η επίδοση απ'ακρη σε άκρη (end-to-end) και η χωρητικότη-

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

τα για υπηρεσίες VoIP. Μάλιστα, τελευταία υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες τερματικές συσκευές με δυνατότητες VoIP οι οποίες μπορούν να εκτελέσουν είτε κλασικές CS κλήσεις φωνής είτε VoIP κλήσεις σε ασύρματα τοπικά (WLAN) ή μητροπολιτικά WCDMA-OFDMA δίκτυα.

Για περαιτέρω εμβάθυνση, προτείνεται η μελέτη των συστάσεων ITU-T Rec. Y.1540 [49] για παραμέτρων επίδοσης σε IP-δίκτυα και την ITU-T Rec. Y.1541 [50] για δείκτες επίδοσης IP-υπηρεσιών. Τέλος, η ομάδα συστάσεων ITU-T Rec. G παρουσιάζει ένα πλαίσιο ορισμών για ποιότητα υπηρεσιών στις επικοινωνίες (G.1000 [51]), τις κατηγορίες multimedia QoS τελικού χρήστη (G.1010 [52]), ορίζει τους δείκτες επίδοσης για θέματα ποιότητας τηλεφωνίας και λοιπές εφαρμογές τηλεφωνίας σε IP-δίκτυα (G.1020 [53]) καθώς και εφαρμογών υπηρεσιών δεδομένων (G.1030 [54]).

Στην περίπτωση UMTS/HSPA δικτύων οι VoIP κλήσεις δρομολογούνται μέσω της περιοχής μεταγωγής πακέτου του δικτύου κορμού (Packet Core) στο IMS (IP Multimedia Subsystem) ή σε συγκεκριμένο VoIP εξυπηρετητή (Dedicated VoIP Server). Κρίσιμα στοιχεία για την παροχή VoIP υπηρεσιών σε UMTS δίκτυα είναι:

- Ύπαρξη HSPA/HSPA+ τεχνολογιών
- Συμπίεση IP κεφαλίδων, ειδικά με αλγόριθμους ROHC (Robust Header Compression). Η υπερκεφαλίδα (overhead) σε IPv4 δίκτυα ανέρχεται σε 40 Bytes και σε IPv6 στα 60 Bytes, ήτοι ποσοστό τουλάχιστον το 60% στα VoIP πακέτα
- Ενεργοποίηση της κατηγορίας ποιότητας υπηρεσίας ‘συνομιλίας’ (conversational).
- Ύπαρξη συστήματος IMS ή εξυπηρετητή VoIP.
- Εφαρμογή αποδοτικών αλγορίθμων κωδικοποίησης φωνής όπως G.729 ή SVOPC (Sinusoidal Voice Over Packet Coder).

Στην περίπτωση των προηγμένων ασύρματων δικτύων LTE, η τηλεφωνία θα είναι πλήρως VoIP.

Οι παράμετροι επίδοσης της υπηρεσίας VoIP είναι η καθυστέρηση μεταφοράς, η διακύμανση της καθυστέρησης, τα άλματα καθυστέρησης, τα εσφαλαμένα πακέτα, τα μη διατεταγμένα πακέτα, τα χαμένα πακέτα, η απώλεια ενός συνόλου (μπλόκ) πακέτων, τα πρότυπα απωλειών, ο ρυθμός πακέτων, τα διαδοχικά γεγονότα απωλειών πακέτων, τα δευτερόλεπτα υποβάθμισης και η βραχυπρόθεσμος διακύμανση καθυστέρησης / *jitter*. Υπάρχουν δυο μέθοδοι προσέγγισης του *jitter*

- Υπολογισμός βασισμένος σε βραχυπρόθεσμο εύρος: Η βραχυπρόθεσμη διακύμανση της καθυστέρησης $DV_{short-term}$ ορίζεται ως η διαφορά της μέγιστης καθυστέρησης μεφοράς DV_{max} μείων την ελάχιστη DV_{min} , αντίστοιχα, κατά την

διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος (προτείνεται 1 sec).

$$DV_{short-term} = TD_{max} - TD_{min} \quad (3.8)$$

- Υπολογισμός βασισμένος στην μέση απόλυτη διακύμανσης καθυστέρησης πακέτων: βασίζεται στην βραχυπρόθεση μέση ή ελάχιστη τιμή - που ορίζεται ως προσαρμοσμένη απόλυτη διακύμανση καθυστέρησης πακέτων

Μοντέλα Απωλειών Πακέτων

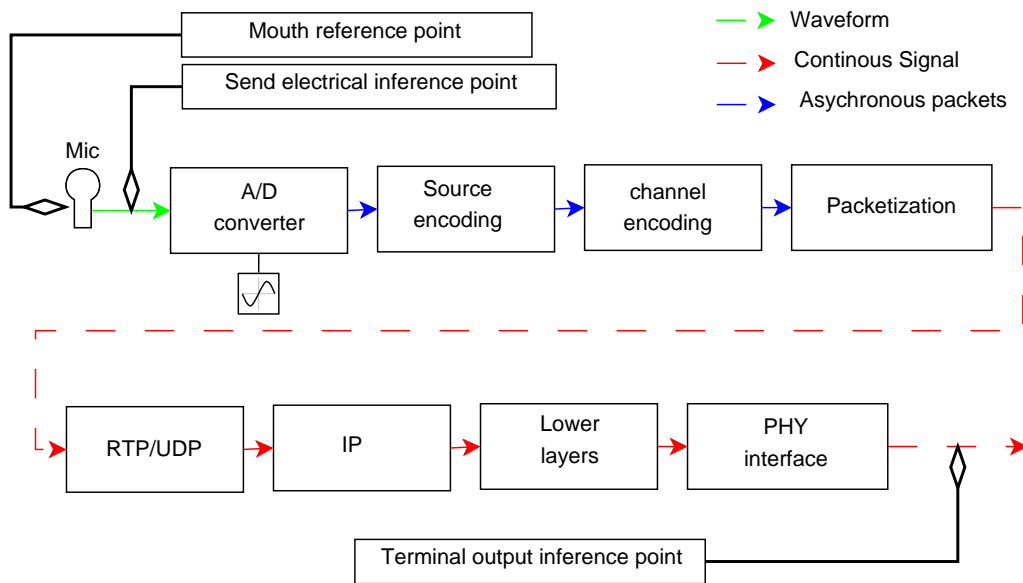
Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι απώλειες πακέτων στα IP δίκτυα είναι γενικά εκρηκτικές “bursty”. Τα μοντέλα απωλειών πακέτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι τα εξής:

Μοντέλο Bernouli . Χρησιμοποιείται ευρέως και προτείνει ένα ανεξάρτητο κανάλι απωλειών, στο οποίο ένα πακέτο έχει χαθεί (ή έχει σφάλματα σε επίπεδο bits) με πιθανότητα P_e . Για ένα μεγάλο αριθμό πακέτων N , ο προσδοκώμενος αριθμός χαμένων πακέτων είναι $N \times P_e$. Η πιθανότητα απώλειας μπορεί να εκτιμηθεί αν καταμετρηθούν τα χαμένα πακέτα και διαιρώντας το πλήθος αυτό με το συνολικό πλήθος πακέτων που μεταδόθηκαν.

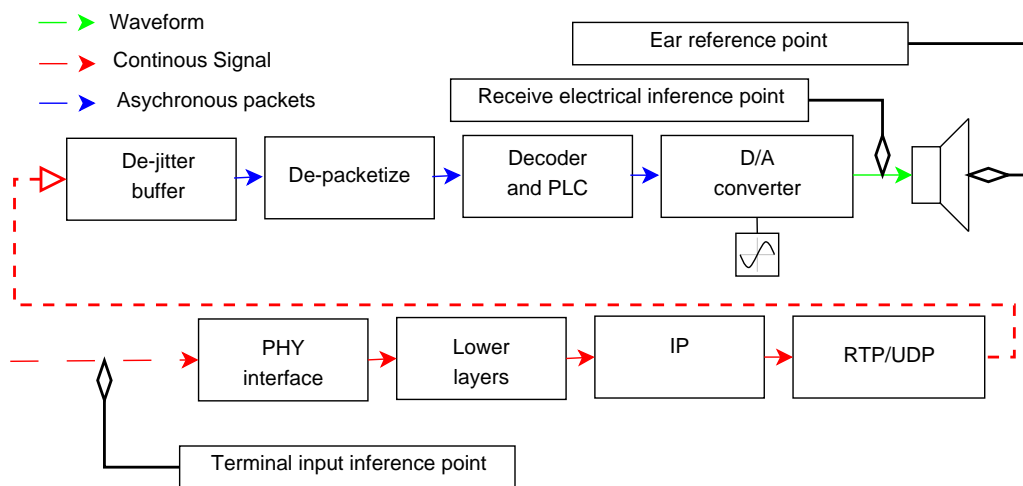
Μοντέλα Gilbert και Gilbert-Elliott . Τα μοντέλα αυτά είναι μοντέλα δυο καταστάσεων όπου η μετάβαση μεταξύ μιας κατάστασης 0, “καλής” ή κενού, και μιας κατάστασης 1, “κακής” ή έκρηξης σύμφωνα με τις πιθανότητες μετάβασης P_{01} και P_{10} :

- *Μοντέλο Gilbert:*
 - Κατάσταση 0: είναι η κατάσταση καμίας απώλειας ή λάθους.
 - Κατάσταση 1: είναι η κατάσταση απώλειας με ανεξάρτητη πιθανότητα απωλειών P_{e1} .
- *Μοντέλο Gilbert-Elliott:*
 - Κατάσταση 0: είναι η κατάσταση χαμηλών απωλειών με ανεξάρτητη πιθανότητα απωλειών P_{e0} .
 - Κατάσταση 1: είναι η κατάσταση απωλειών με ανεξάρτητη πιθανότητα απωλειών P_{e1} .

Μοντέλα Markov . Είναι συνήθως μοντέλα πολλών καταστάσεων στα οποία ένα σύστημα μεταβαίνει μεταξύ των καταστάσεων i και j με πιθανότητα μετάβασης $p(i, j)$.

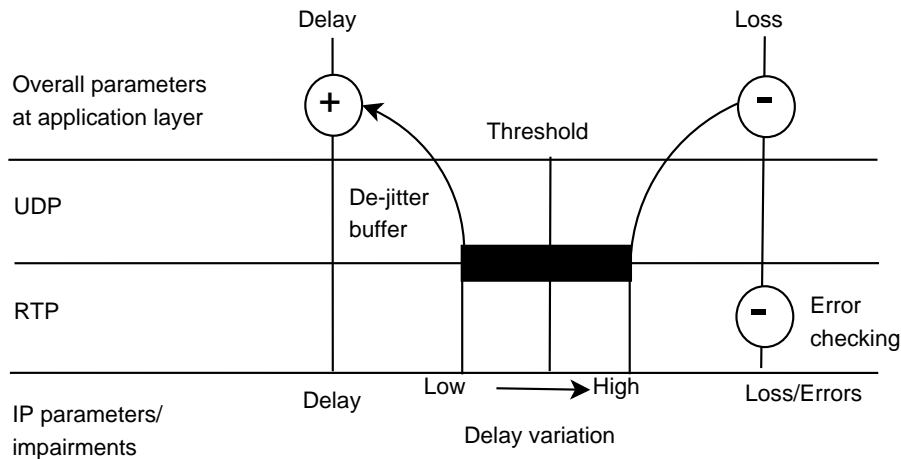


(α) Εκπομπός VoIP



(β) Δέκτης VoIP

Σχήμα 3.9: Η διεπίπεδη (crosslayer) αλυσίδα λειτουργιών του εκπομπού και δέκτη VoIP.



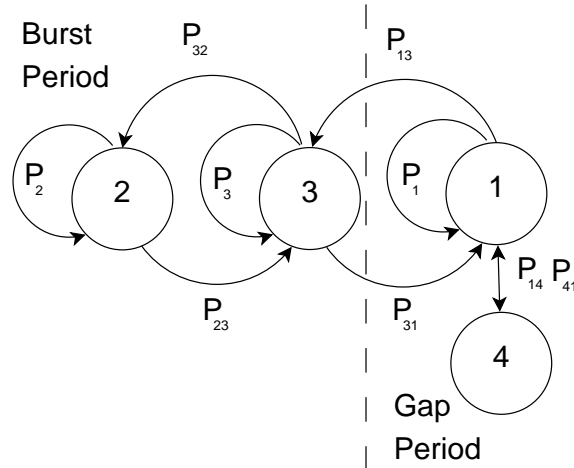
Σχήμα 3.10: Αντιστοίχιση της επίδοσης του πακέτου IP στο επίπεδο εφαρμογής.

Συνδυαστικό Μοντέλο Markov και Gilbert-Elliott . Προκύπτει από τον συνδυασμό ενός μοντέλου Markov 2-καταστάσεων με ένα μοντέλο Gilbert-Elliott για να καλύψει την σύλληψη πολύ μικρής διάρκειας διαδοχικών απωλειών και ακόμη μικρότερης πυκνότητας γεγονότων απωλειών. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι

- Παράμετρος G_{min} , [packets]: δίνει το πλήθος των συνεχόμενων λαμβανόμενων πακέτων που διακρίνει εάν η ροή χαρακτηρίζεται από μια ριπή ή εάν είναι στο κενό μεταξύ δυο ριπών.
- Ριπή [packets]: είναι η μέγιστη ακολουθία πακέτων που ξεκινά και σταματά με μια απώλεια, όπου οι ακολουθίες των συνεχόμενων λαμβανόμενων πακέτων είναι μικρότερες από το G_{min} σε μήκος.
- Κενό [packets]: είναι η μεγαλύτερη ακολουθία πακέτων ξεκινώντας και τερματίζοντας με μια απώλεια ή στην αρχή ή στο τέλος της λήψης, όπου οι ακολουθίες των λαμβανόμενων πακέτων είναι μεγαλύτερες ή ίσες με το G_{min} στο μήκος.
- Πυκνότητα ριπής: είναι ο λόγος των χαμένων ή απορριπτέων πακέτων στην διάρκεια μιας ριπής προς το σύνολο των πακέτων που στάλθηκαν.
- Πυκνότητα κενού: είναι ο λόγος των χαμένων ή απορριπτέων πακέτων στην διάρκεια ενός κενού προς το σύνολο των πακέτων που στάλθηκαν.
- Διάρκεια ριπής [ms]: είναι η μέση διάρκεια των περιόδων ριπής, οι οποίες έχουν συμβεί από την έναρξη της λήψης. Η διάρκεια της κάθε περιόδου υπολογίζεται με βάση τα πακέτα τα οποία μαρκάρονται στην έναρξη και στην λήξη της περιόδου. Στην περίπτωση περιόδου ριπών, η τιμή της διάρκειας ριπής είναι μηδέν.

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

- Διάρκεια κενού [ms]: είναι η μέση διάρκεια των περιόδων κενού, οι οποίες έχουν συμβεί από την έναρξη της λήψης. Η διάρκεια της κάθε περιόδου υπολογίζεται με βάση τα πακέτα τα οποία μαρκάρονται στην έναρξη και στην λήξη της περιόδου. Στην περίπτωση περιόδου κενών, η τιμή της διάρκειας κενού είναι μηδέν.



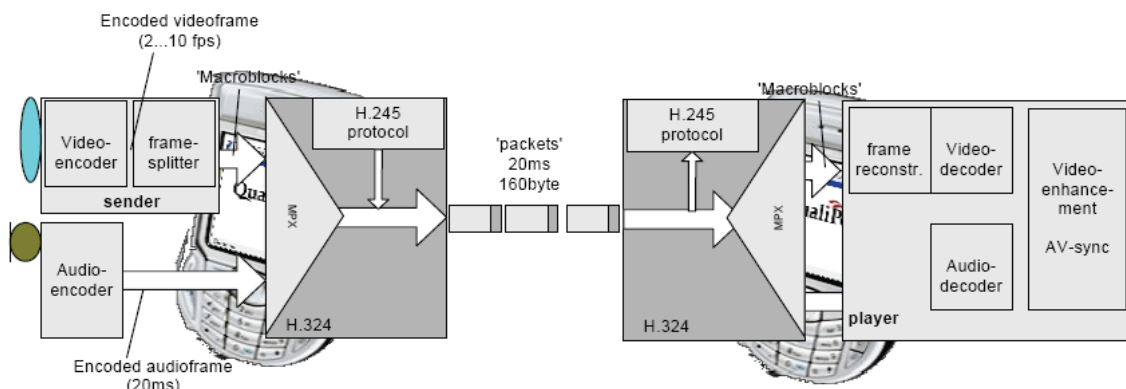
Σχήμα 3.11: Συνδυαστικό μοντέλο Markov και Gilbert-Elliott απωλειών πακέτων σε δίκτυα IP.

3.3 Ποιότητα Κινητής Βιντεοτηλεφωνίας και Πολυμεσικής Επικοινωνίας

Οι υπηρεσίες κινητής βιντεοτηλεφωνίας και πολυμεσικής επικοινωνίας όπως η ροή βίντεο παρέχονται από τα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Κρίσιμα θέματα αποτελούν θέματα ποιότητας εικόνας και βίντεο, ειδικότερα δε, οι αλγόριθμοι και οι τεχνικές αξιολόγησης. Αναλυτικά, η τεχνική αναφορά ETSI TR 102 493 [55] παρέχει οδηγίες για την χρήση των αλγορίθμων αξιολόγησης ποιότητας βίντεο για κινητές εφαρμογές. Πρόσφατα, στην τεχνική έκθεση του Video Quality Experts Group [56] επικυρώθηκαν τα αντικειμενικά μοντέλα για την αξιολόγηση της ποιότητας πολυμέσων. Τελικά, προέκυψαν οι συστάσεις της ITU-T για τους αλγόριθμους υποκειμενικής, ITU-T Rec. J.246 [57], και αντικειμενικής, ITU-T Rec. J.247 [58], αξιολόγησης καθώς και τεχνικών μετρήσεων ποιότητας.

3.3.1 Τεχνολογία Βιντεοτηλεφωνίας

Σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή ETSI TS 126 114 [59], η βιντεοτηλεφωνία είναι μια υπηρεσία η οποία χρησιμοποιεί ένα κανάλι μεταγωγής κυκλώματος 64 kbit/s το δίκτυο UMTS. Μετά την εγκατάσταση ενός φυσικού καναλιού από το τηλέφωνο, τα



Σχήμα 3.12: Επισκόπηση της υπηρεσίας εικονοτηλεφωνίας.

λογικά κανάλια μεταφέρουν το περιεχόμενο ήχου και βίντεο καθώς και τις πληροφορίες του επιπέδου ελέγχου. Γενικά, χρησιμοποιείται ο πολυπλέκτης 3GP 324 M [60] για την επεξεργασία με το πρωτόκολλο ελέγχου το οποίο βασίζεται στο H.245. Αναλυτικά, οι προδιαγραφές των κωδικοποιητών βίντεο παρουσιάζονται στο βιβλίο [61] καθώς επίσης θέματα συμπίεσης ήχου και βίντεο αναλύονται στο εγχειρίδιο [62].

Σε μια βίντεο-κλήση, το σήμα φωνής καταμερίζεται σε πλαίσια των 20 ms και κωδικοποιείται από ένα κωδικοποιητή ήχου, συνήθως AMR. Το σήμα βίντεο κωδικοποιείται ανά πλαίσιο βάσει είτε H.263 είτε MPEG 4. Ο πολυπλέκτης MUX H.324 διαιρεί την πληροφορία σε πακέτα των 160 bytes, περιέχοντας την κεφαλίδα και την πληροφορία ελέγχου, και μεταδίδει τα πακέτα συγχρονισμένα στο φυσικό κανάλι CS64K. Ένα πακέτο περιλαμβάνει ένα πλαίσιο AMR-κωδικοποιημένης φωνής, αλλά μόνο τμήμα του πλαισίου βίντεο. Συνεπώς, ένα πλήρες πλαίσιο βίντεο διαιρείται σε περισσότερα πακέτα, τα οποία κάνουν το περιεχόμενο βίντεο λιγότερο εύρωστο στα σφάλματα μετάδοσης. Η δομή της επικοινωνίας εικονοτηλεφωνίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12.

3.3.2 Τεχνολογία Πολυμεσικής Μετάδοσης Βίντεο

Σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή ETSI TS 126 233 [63], η πολυμεσική μετάδοση (Streaming Media) είναι τα πολυμέσα τα οποία λαμβάνονται και αναπαράγονται στην πλευρά του τελικού χρήστη καθώς αυτά διανέμονται από έναν πάροχο πολυμεσικών ροών. Ο ορισμός έχει να κάνει κύρια με την μέθοδο του μέσου που χρησιμοποιείται για την διανομή. Ένα παράδειγμα της υπηρεσίας πολυμεσικής ροής είναι η τηλεόραση διαδικτύου (Internet Television).

Η ζωντανή ροή (Live Streaming), συγκεκριμένα είναι η απευθείας (live) εκπομπή μέσω του διαδικτύου. Η διαδικασία περιλαμβάνει μια κάμερα για τα πολυμέσα, έναν κωδικοποιητή ψηφιοποίησης του περιεχομένου, έναν εκδότη πολυμέσων (media publisher) όπου οι ροές είναι διαθέσιμες στους δυνητικούς τελικούς χρήστες και ένα δίκτυο

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

διανομής περιεχομένου (Content Delivery Network, CDN). Παράδειγμα αυξανόμενης διείσδυσης της υπηρεσίας αυτής είναι το YouTube [64].

Μια πρόκληση που υπάρχει είναι τα θέματα ασφάλειας (security) με την νέα μέθοδο διανομής πολυμέσων. Τα συστήματα διαχείρισης ψηφιακών δικαιωμάτων (Digital Rights Management, DRM) είναι μια πρόταση διατήρησης των περιεχομένων ασφαλή.

Γενικά, το πολυμεσικό περιεχόμενο έχει μεγάλο όγκο, με συνέπεια το κόστος αποθήκευσης και μετάδοσης να διατηρείται αυστηρό. Για την βελτίωση της κατάστασης χρησιμοποιούνται τεχνικές συμπίεσης των πολυμέσων τόσο στην φάση αποθήκευσης όσο και στην φάση της μετάδοσης.

Η αυξημένη ζήτηση πολυμεσικού περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας (High Definition, HD) σε διάφορες συσκευές, μεταξύ αυτών και σε κινητά τερματικά, ώθησαν την βιομηχανία στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για ασύρματο περιβάλλον όπως το WirelessHD (Wireless Display ή WiDi). Το πρότυπο WiDi, αντίστοιχο με το πρότυπο HDMI (High Definition Multimedia Interface), έχει αναπτυχθεί στην EHF ζώνη ραδιοσυχνοτήτων των 60 GHz με εύρος ζώνης 7 GHz και επιτρέπει την ασυμπίεστη ψηφιακή μετάδοση HD βίντεο με επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης πέραν των 4 Gbit/s.

Μια ροή πολυμέσων μπορεί να μεταδοθεί είτε ζωντανά (live) είτε κατ' απαίτηση (on Demand). Οι live ροές αποκαλούνται και πραγματικές ροές (true streams) στις οποίες η πληροφορία μεταδίδεται απευθείας προς το τερματικό του χρήστη δίχως να αποθηκεύεται σε κάποιο μέσο. Η on-Demand ροή ή προοδευτική ροή (progressive stream/download) αποθηκεύεται σε σκληρό δίσκο ή μνήμη και κατόπιν αναπαράγεται από αυτή την τοποθεσία. Ενδεικτικές απαιτήσεις για μετάδοση πολυμεσικών ροών είναι από 2.5 Mbit/s έως και 10 Mbit/s για περιεχόμενο HD.

Η πολυμεσική ροή απαρτίζεται από την ροή ήχου (audio stream) και την ροή βίντεο (video stream). Η συμπίεση της ροής ήχου γίνεται χρήση των κωδικοποιητών πηγής όπως MP3, Vorbis ή AAC (Advanced Audio Coding). Η ροή βίντεο συμπιέζεται συνήθως από τον κωδικοποιητή H.264/MPEG-4 Part 10 ή AVC (Advanced Video Coding) ο οποίος χρησιμοποιείται για την καταγραφή, συμπίεση και διανομή HD βίντεο.

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη μετάδοσης πολυμεσικού περιεχομένου είναι τα εξής:

- Το πρωτόκολλο UDP (User Datagram Protocol) το οποίο αποστέλλει μια ροή πολυμέσων ως μια ακολουθία μικρών πακέτων δίχως την ύπαρξη ενός μηχανισμού εγγυημένης παράδοσης και επαναμετάδοσης. Εξαρτάται αποκλειστικά από την εφαρμογή στην πλευρά της λήψης να ανιχνεύσει απώλεια ή σφάλμα στην πληροφορία.
- Τα πρωτόκολλα πραγματικού χρόνου όπως RTSP (Real-time Streaming Protocol), RTP (Real-time Transport Protocol), RTCP (Real-time Transport Con-

trol Protocol) έχουν σχεδιαστεί συγκεκριμένα για την μετάδοση πολυμεσικών ροών σε δίκτυα επικοινωνιών. Το RTSP λειτουργεί σε πληθώρα πρωτοκόλλων μεταφοράς, ενώ το RTP και RTCP έχουν βασιστεί στο πρωτόκολλο μεταφοράς UDP.

- Το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol) εγγυάται την σωστή μετάδοση κάθε bit μιας πολυμεσικής ροής. Από την άλλη επιφορτίζουν το σύστημα με προθεσμίες (time-outs) και επαναμεταδόσεις χαμένων ή λανθασμένων πακέτων. Η επίπτωση αυτή μπορεί να μειωθεί εάν ελλਾτωθεί χρησιμοποιώντας την τεχνική της ενταμίευσης (buffering) πριν την αναπαραγωγή. Σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως τηλεδιάσκεψη (tele-conference, TELCO), η διατήρηση της πιστότητας απαιτεί καθυστέρησης ενταμίευσης κάτω των 200 ms.

3.3.3 Ποιότητα Εικόνας και Βίντεο

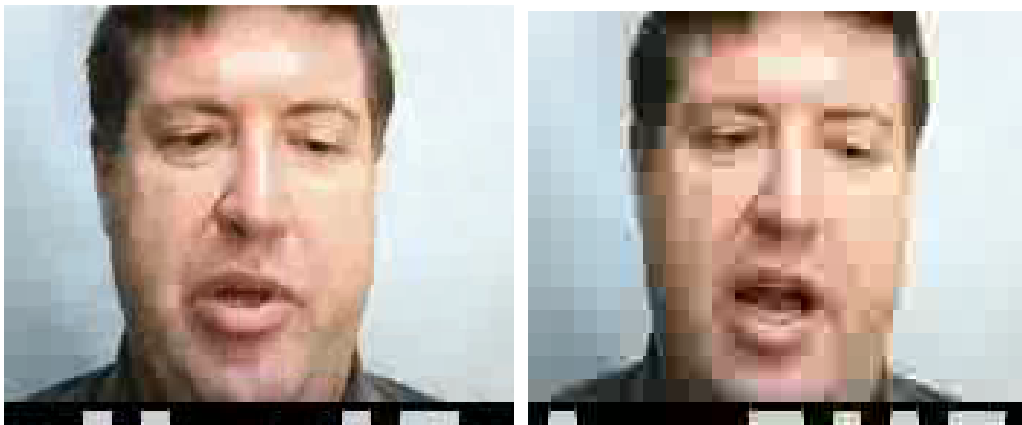
Ο υποκειμενικός χαρακτηρισμός της ποιότητας βίντεο έγγυται στην διαισθητική κατανόηση του μέσου παρατηρητή - τηλεθεατή. Ένα κατανοητό σύνολο δεικτών θα πρέπει να περιγράφει την συνολική στάθμη ποιότητας. Ειδικά, η αντικειμενική αξιολόγηση ποιότητας βίντεο βασίζεται στον χαρακτηρισμό των παραγόντων υποβάθμισης κατά την συμπίεση (compression), την ασύρματη μετάδοση και τις διαδικασίες αποσυμπίεσης / αποκωδικοποίησης.

- *Προβλήματα Κωδικοποίησης* που θα πρέπει να μετρηθούν είναι οι δείκτες: το blockiness, η θολότητα (blurring), η υποβάθμιση χρώματος (colour reduction) και η σπασμωδικότητα των πλαισίων (Jerkiness).
- *Σφάλματα Μετάδοσης* λόγω των ραδιοσυνθηκών διάδοσης - καναλιού είναι το jerkiness εξαιτίας της απώλειας ή καθυστέρησης πακέτων, και τον τεμαχισμό πακέτων (slicing).
- *Προβλήματα Αποκωδικοποίησης* είναι η επιπρόσθετη θολότητα (blurring), η αποπόλωση του χρώματος (colour interpolation) και το jerkiness από προβλήματα της πηγής (source) του βίντεο.

Υποκειμενικές Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ποιότητας Βίντεο

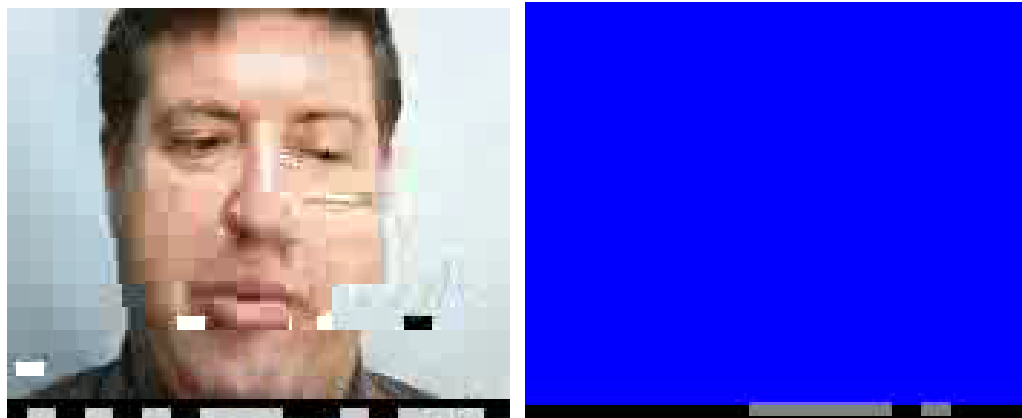
Η διαδικασία της υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας βίντεο είναι παρόμοια με τη αντίστοιχη διαδικασία της φωνής. Ένα σύνολο 15-40 ατόμων - αξιολογητών, βαθμολογεί στην κλίμακα MOS (1-5) την ποιότητα του βίντεο που παρακολούθησε (μέθοδος ACR ή μέθοδος μιας διέγερσης (single stimulus method)) ή την υποβάθμιση μεταξύ

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)



(α') Καλή ποιότητα (Quality: good)

(β') Υποβαθμισμένη ποιότητα (Quality: poor)



(γ') Κακή ποιότητα Quality: bad

(δ') Μπλέ εικόνα (Blue frame)

Σχήμα 3.13: Στιγμιότυπα εικόνων της βιντεοτηλεφωνίας καταγεγραμμένες από εξοπλισμό μετρήσεων.

του πρωτότυπου σήματος και του υποβαθμισμένου σήματος, μέθοδος DCR ή μέθοδος διπλής διέγερσης (double stimulus method). Ο χρόνος παρουσίασης κάθε βίντεο δοκιμής μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με το περιεχόμενό του. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, υπολογίζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων όλων των συμμετεχόντων για κάθε συνθήκη, δηλαδή ο δείκτης MOS.

Αντικειμενικές Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ποιότητας Βίντεο

Για την αντικειμενική χαρακτηρισμό της ποιότητα βίντεο, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μέθοδοι:

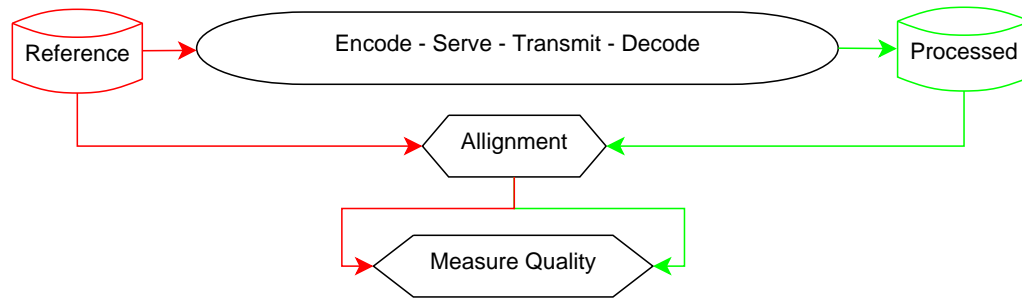
- Πλήρους Αναφοράς (Full Reference Method-FR): Το αρχικό βίντεο (αναφορά) και η παραμορφωμένη εκδοχή του συγκρίνονται για να παραχθεί μια τιμή που αντιπροσωπεύει την ποιότητα του δείγματος.
- Μειωμένης Αναφοράς (Reduced Reference Method-RR): Ορισμένα χαρακτηριστικά από το βίντεο αναφοράς και την παραμορφωμένη εκδοχή του συγκρίνονται για την παραγωγή του αποτελέσματος.
- Άνευ Αναφοράς (No Reference Method-NR): Δεν απαιτείται κανένα πλαίσιο αναφοράς και το αποτέλεσμα βασίζεται μόνο στο παραμορφωμένο σήμα.

3.3.4 Αντιληπτική Αξιολόγηση Ποιότητας Βίντεο

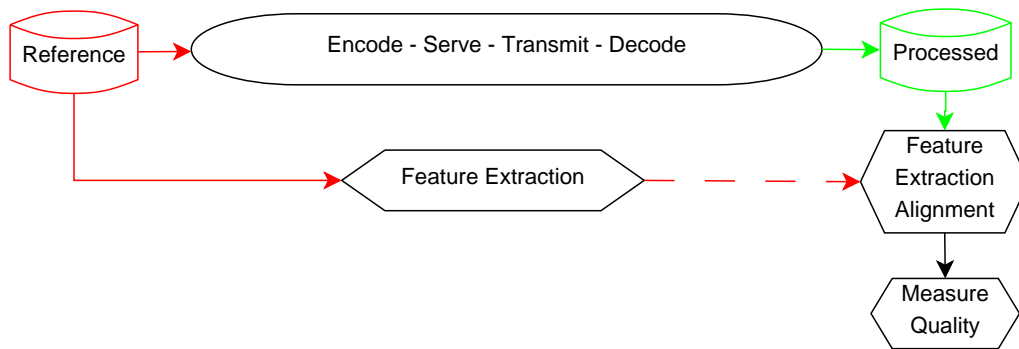
Η PEVQ (Perceptual Evaluation of Video Quality) [65] είναι ένα μοντέλο πλήρους αναφοράς (FR) που σχεδιάστηκε για να προβλέψει τις επιπτώσεις των δυσλειτουργιών μετάδοσης στην ποιότητα βίντεο, όπως τις αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος μέσω του ανθρώπινου οπτικού συστήματος (HVS, Human Visual System). Οι κύριες εφαρμογές της είναι στις κινητές επικοινωνίες (π.χ. βιντεοτηλεφωνία, streaming video) και στην IP-TV. Ο αλγόριθμος μπορεί να διαιρεθεί σε 4 τμήματα.

Το πρώτο τμήμα (στάδιο προ-επεξεργασίας) είναι υπεύθυνο για την χωρική και χρονική ευθυγράμμιση του σήματος αναφοράς και του υποβαθμισμένου σήματος. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει ότι μόνο τα αντίστοιχα πλαίσια συγκρίνονται μεταξύ τους. Λαμβάνει υπόψη ότι, λόγω της διαδικασίας κωδικοποίησης, μπορεί να έχουν προκύψει μεταβλητές καθυστερήσεις πακέτων, καθώς και ολισθήσεις των περιεχομένων των πακέτων.

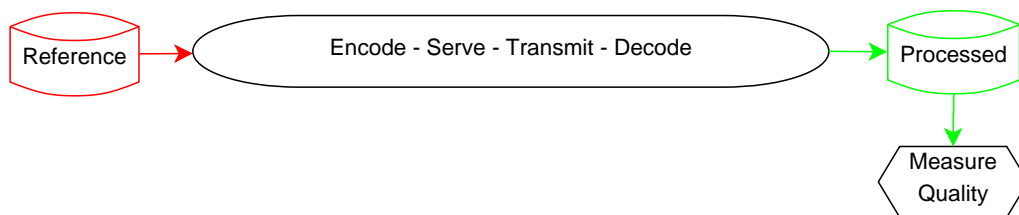
Το δεύτερο τμήμα υπολογίζει την αντιληπτική διαφορά των ευθυγραμμισμένων σημάτων. Η αντιληπτική διαφορά είναι η σταθμισμένη διαφορά πρωτότυπου και παραμορφωμένου σήματος, με έμφαση στα χαρακτηριστικά που γίνονται αντιληπτά από το



(α') Full Reference Method-FR



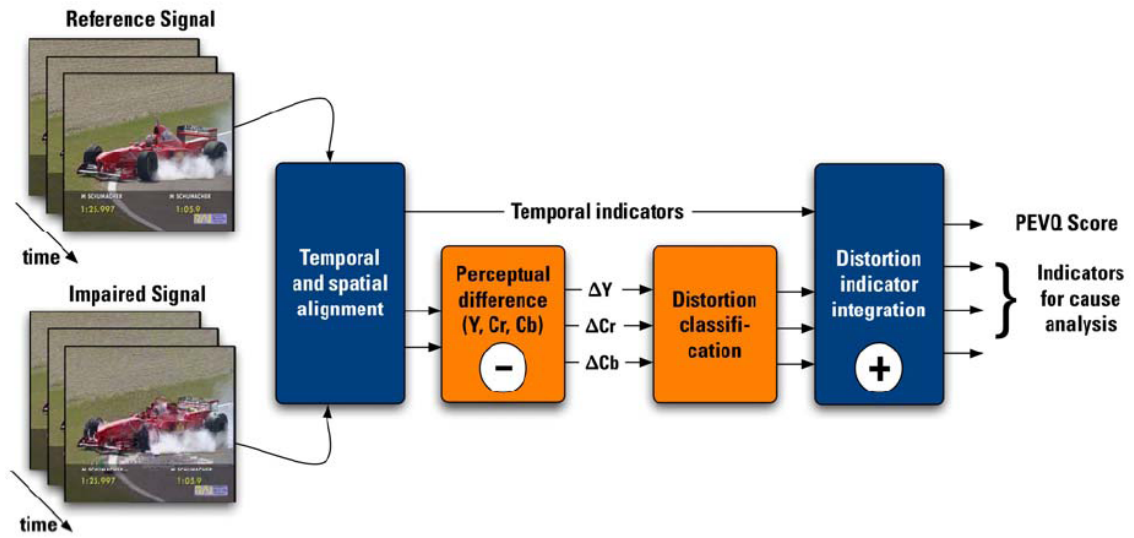
(β') Reduced Reference Method-RR



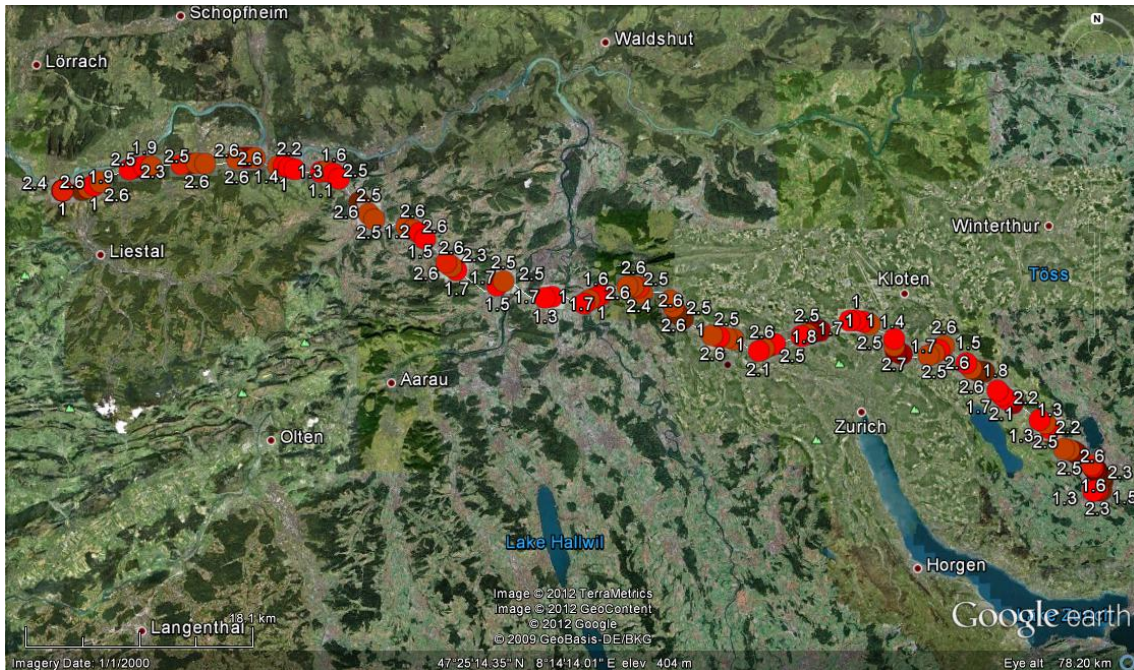
(γ') No Reference Method-NR

Σχήμα 3.14: Μέθοδοι αξιολόγησης (α') πλήρους, (β') μειωμένης και (γ') άνευ αναφοράς.

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου PEVQ.



Σχήμα 3.16: Μέτρηση αντιληπτικής ποιότητας βίντεο-τηλεφωνικής (σε κλίμακα MOS) κλήσης κατά μήκος μιας διαδρομής.

θεατή. Η βαθμίδα αυτή λαμβάνει υπόψη τις διαφορές στη φωτεινότητα και τη χρωματικότητα και από αυτές υπολογίζει δείκτες ποιότητας. Επιπλέον, η ταχύτητα της κίνησης στο σήμα αναφοράς παρέχει έναν άλλο σημαντικό δείκτη, ο οποίος λαμβάνει υπόψη ότι σε μια σειρά πακέτων με αργή κίνηση, η αντίληψη των λεπτομερειών είναι πολύ μεγαλύτερη απ'ο,τι σε μια σειρά με γρήγορη κίνηση.

Η τρίτη βαθμίδα κατηγοριοποιεί τους ήδη υπολογισμένους δείκτες και εντοπίζει ορισμένους τύπους παραμορφώσεων.

Στην τελευταία βαθμίδα, οι δείκτες συναθροίζονται κατάλληλα για να παράγουν το τελικό αποτέλεσμα της ποιότητας του βίντεο, που είναι μια τιμή στην κλίμακα 1-5.

Προηγμένα θέματα τεχνολογίας, μοντελοποίησης και αξιολόγησης ποιότητας εικόνας και βίντεο πραγματεύονται τα βιβλία [66, 67].

PSNR: Peak Signal to Noise Ratio

Ο λόγος PSNR είναι ένας αντικειμενικός δείκτης ποιότητας βίντεο μεταξύ του αρχικού βίντεο που στάλθηκε και αυτού που ελήφθη και χρησιμοποιείται ευρέως στην αξιολόγηση ποιότητας εικόνας και βίντεο [68, 69, 70]. Ένα μειονέκτημα του PSNR είναι ότι οι τιμές δεν συσχετίζονται τέλεια με την λαμβανόμενη οπτική ποιότητα λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του ανθρώπινου οπτικού συστήματος. Ο δείκτης καθορίζεται εύκολα μέσω του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE, Mean Squared Error) το οποίο για δυο $m \times n$ μονοχρωματικές εικόνες I και \hat{I} και για l πλαίσια στη σειρά, όπου η δεύτερη των εικόνων θεωρείται η θορυβώδης ή υποβαθμισμένη εκδοχή της πρώτης και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$MSE = \frac{1}{l \cdot m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l [I(i, j, k) - \hat{I}(i, j, k)]^2 \quad (3.9)$$

Ο δείκτης PSNR ορίζεται:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{L^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{L}{RMSE} \right) \quad (3.10)$$

Εδώ, η τετραγωνική ρίζα του MSE, $RMSE = \sqrt{MSE}$ και L είναι το δυναμικό εύρος των επιτρεπόμενων εντάσεων του pixel της εικόνας. Όταν τα pixels αναπαρίστανται χρήσει 8 bits/pixel, τότε λαμβάνει τιμή 255. Γενικότερα, όταν τα δείγματα αναπαρίστανται χρησιμοποιώντας γραμμική PCM με B bits ανά δείγμα, η τιμή του L είναι $2^B - 1$. Για πολύχρωμες εικόνες με τρεις RGB τιμή ανά pixel, ο ορισμός του PSNR είναι ο ίδιος εκτός από το MSE το οποίο είναι το άθροισμα όλων των τετραγώνων των διαφορών διά το μέγεθος της εικόνας και το τρία. Το PSNR έχει εύρος τιμών από 0

έως 110 dB και αποδεκτές τιμές απώλειών για την ποιότητα στην ασύρματη μετάδοση ασανδ είναι μεταξύ 20 dB και 25 dB. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται μια αντιστοίχιση της τιμής PSNR στην κλίμακα MOS [71].

PSNR (dB)	MOS
> 37	5 (Τέλεια)
31 - 37	4 (Καλή)
25 - 31	3 (Ικανοποιητική)
20 - 25	2 (Πτωχή)
< 20	1 (Κακή)

Πίνακας 3.3: Πιθανή αντιστοίχιση PSNR και MOS.

Στα πλαίσια της έρευνας, προτείνουμε την εφαρμογή της μεθόδου της παλινδρόμησης για την εξαγωγή γραμμικών και μη γραμμικών μοντέλων εκτίμησης της ποιότητας βίντεο σε τιμές obj. MOS από τις μετρούμενες τιμές του δείκτη PSNR σε dB. Στο Σχήμα 3.17 απεικονίζονται τα γραφήματα των εξισώσεων των μοντέλων που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.4.

Τύπος	Παλινδρόμηση
Γραμμικό	$\psi = 0.168x - 2.759$
Πολυώνομικό	$\psi = -5 \cdot 10^{-4}x^2 + 0.198x - 3.183$
Εκθετικό	$\psi = 0.138 \exp^{0.009x}$
Δυναμικό	$\psi = 4 \cdot 10^{-4}x^{2.566}$
Λογαριθμικό	$\psi = 4.659 \ln x - 13.577$

Πίνακας 3.4: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{video}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς τις τιμές PSNR (σε dB).

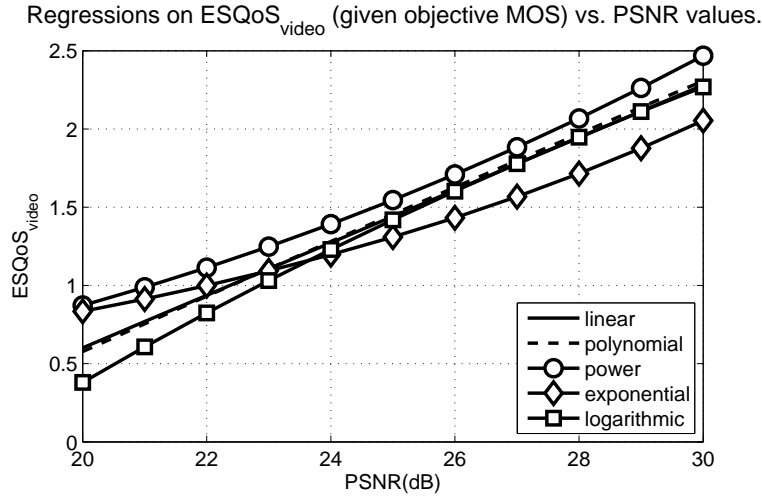
SSIM: Structural SIMilarity

Ο δείκτης δομικής ομοιότητας SSIM (Structural SIMilarity) [72] είναι μια μέθοδος μέτρησης της ομοιότητας μεταξύ δυο εικόνων. Ο δείκτης SSIM είναι ένα μέτρο πλήρους αναφοράς, δηλαδή η ποιότητα της υπό εξέταση εικόνας βασίζεται στην αρχική ασυμπιεστη ή μη παραμορφωμένη εικόνα ως αναφορά. Ο δείκτης είναι σχεδιασμένος να βελτιώσει τις παραδοσιακές μεθόδους όπως PSNR και MSE οι οποίες αποδεικνύονται ότι δεν αποτυπώνουν πλέον την ανθρώπινη αντίληψη όρασης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18.

Ο δείκτης SSIM υπολογίζεται σε μεταβλητά παράθυρα (windows) μιας εικόνας. Η μέτρηση $SSIM(x, y)$ μεταξύ δυο παραθύρων x και y ίδιου μεγέθους $N \times N$ είναι:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3.11)$$

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)



Σχήμα 3.17: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{video}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς τις τιμές PSNR (σε dB).

όπου,

μ_x, μ_y : η μέση τιμή των x και y αντίστοιχα,
 σ_x^2, σ_y^2 : η διακύμανση των x και y αντίστοιχα,
 σ_{xy} : η συνέλιξη των x και y ,

Επιπλέον, $c_1 = (k_1L)^2$ και $c_2 = (k_2L)^2$ είναι δυο μεταβλητές που σταθεροποιούν την διαίρεση με μικρό παρανομαστή, όπου και $L = 2^B - 1$, όπου B το πλήθος *bits* ανά *pixel*, $k_1 = 0.01$ και $k_2 = 0.03$.

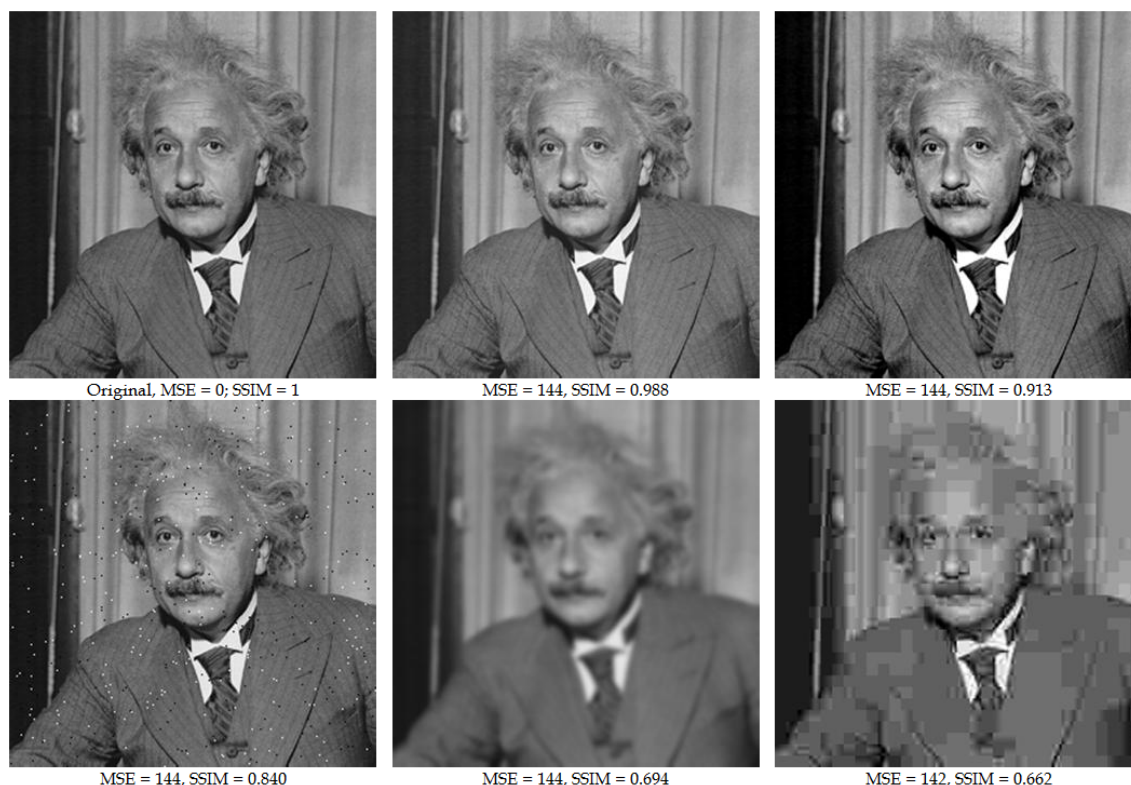
Ο δείκτης SSIM υπολογίζεται μεταξύ των τιμών -1 και 1, και παίρνει την τιμή 1 όταν οι δυο υπό εξέταση εικόνες είναι όμοιες. Συνήθως υπολογίζεται για μεγέθη παραθύρων 8×8 [73].

Η δομική ανομοιομορφία DSSIM (Structural Dissimilarity) υπολογίζεται μέσω του δείκτη SSIM ως εξής:

$$DSSIM(x, y) = \frac{1}{1 - SSIM(x, y)} \quad (3.12)$$

Λοιποί δείκτες ποιότητας βίντεο είναι οι εξής:

- Καθυστέρηση: η ελάχιστη, μέγιστη και μέση καθυστέρηση για κάθε πλαίσιο σε σχέση με το αντίστοιχο του σήματος αναφοράς.
- Φωτεινότητα του πρωτότυπου και του παραμορφωμένου σήματος.
- Αντίθεση του πρωτότυπου και του παραμορφωμένου σήματος.



Σχήμα 3.18: Σύγκριτική αξιολόγηση των δεικτών ποιότητας εικόνας MSE και SSIM.

- Δείκτες παραμόρφωσης: για πιο λεπτομερή ανάλυση, παρέχεται το αντιληπτικό επίπεδο φωτεινότητας και χρωματικότητας.
- Σπασμωδικότητα κίνησης (Jerkiness): περιγράφει μια κίνηση που ενώ στο αρχικό σήμα είναι ομαλή και συνεχής, γίνεται αντιληπτή σαν μια σειρά από ξεχωριστά στιγμιότυπα.
- Θολότητα (blurring): παραμόρφωση που χαρακτηρίζεται από μειωμένη χωρική λεπτομέρεια.
- Blockiness: είναι συχνά το αποτέλεσμα της κωδικοποίησης χαμηλού ρυθμού bit που χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο αντιστοίχισης των μπλοκ (σύνολα από pixels) για την εκτίμηση της κίνησης και την κβαντοποίηση των μπλοκ.
- Παραλείψεις και “πάγωμα” πλαισίων: προκύπτουν κατά τη μετάδοση π.χ. λόγω υπερφορτωμένων δικτύων.
- Ρυθμός πλαισίων: ο δείκτης αυτός είναι χρήσιμος διότι υποδεικνύει απώλειες πλαισίων που οδηγούν στην υποβάθμιση του σήματος.
- Κίνηση και χωρική πολυπλοκότητα: περιγράφουν το μέγεθος της κίνησης και της χωρικής λεπτομέρειας του βίντεο.

Κατεύθυνση KPI		<i>uplink</i>		<i>downlink</i>	
		\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x
Ποιότητα Ραδιοκάλυψης	RSCP	-86,67	6,78	-87,08	7,16
	E_c/I_0	-5,79	1,14	-5,86	1,21
	RSSI	-80,88	6,87	-81,22	7,27
Ποιότητα Φωνής	P862	3.58	0.47	3.65	0.3
	P862.1	3.64	0.60	3.73	0.46
Ποιότητα Βίντεο	Freezing	2.35	5.75	3.08	5.99
	Jerkiness	22.37	3.77	22.53	4.24
	Matched Frames	80.25	14.12	83.41	12.56
	Frame Jitter	5.86	21.56	4.82	20.20
	Blurring	23.87	8.95	22.44	10.33
	Blockiness	60.58	3.89	60.24	4.29
	PSNR	28.75	2.04	29.16	1.95

Πίνακας 3.5: Βασικά στατιστικά μεγέθη ποιότητας από μετρήσεις βιντεοτηλεφωνίας.

3.3.5 Ποιότητα Πολυμέσων

Η συνολική ποιότητα πολυμέσων (*multimedia quality* ή *audiovisual quality*) μπορεί να υπολογιστεί και να εκτιμηθεί από την ποιότητα φωνής/ήχου και από την ποιότητα βίντεο για τα δείγματα δοκιμής. Ο σύνθετος δείκτης ποιότητας, MOS_m , μιας τηλεφωνικής κλήσης μπορεί να καθορίζεται από την δείκτης ποιότητας φωνής, MOS_s , και βίντεο, MOS_v , όπως έχει διερευνηθεί [74] και περιγράφεται στην Εξίσωση. (3.13). Επιπλέον ο συγχρονισμός φωνής και βίντεο (*lip-sync*) ή καθυστέρηση (d), MOS_d η οποία εκφράζεται στην Εξίσωση (3.14), είναι σημαντική στην συνολική αποτίμηση της ποιότητας πολυμέσων MOS_t η οποία δεν απεικονίζεται στην προηγούμενη σχέση. Η NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) πρότεινε [75] μια συνάρτηση ολοκλήρωσης της ποιότητας πολυμέσων όπως περιγράφεται στην Εξίσωση (3.15).

$$MOS_m = (c_1 + c_2MOS_s)(c_3 + c_4MOS_v) \quad (3.13)$$

$$MOS_d = c_5 + c_6 \cdot \exp(-d/c_7) \quad (3.14)$$

$$MOS_t = (\alpha + \beta MOS_m) \cdot (\gamma + \delta MOS_d) \quad (3.15)$$

όπου οι παράμετροι $c_i, i \in \{1, 2, \dots, 7\}$ καθώς και οι α, β, γ , και δ είναι σταθερές.

Για τον σκοπό της έρευνας, έγινε χρήση της σύστασης ITU-T P.911 [76] για τον υπολογισμό της σύνθετης ποιότητας MOS_{sv} όπως απεικονίζεται στην Εξίσωση (3.16).

$$MOS_{sv} = a \cdot MOS_s \cdot MOS_v + b \quad (3.16)$$

Πίνακας 3.6: Σύνοψη των συστάσεων ITU-T και ETSI για την ποιότητα ήχου/φωνής και βίντεο

Σύσταση	Περιγραφή
ETSI ETR 250 (1996-07)	Speech communication quality from mouth to ear for 3.1 kHz handset telephony across networks.
ITU-T P.800 (1996-08)	Methods for subjective determination of transmission quality.
ITU-T P.861 (1998-02)	Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs.
ITU-T P.862 (2001-02)	Perceptual evaluation of speech quality (PESQ).
ITU-T P.863 (2011-01)	Perceptual objective listening quality assessment (POLQA).
ETSI TS 101 329-5 (2000-11)	Quality of Service (QoS) measurement methodologies.
ITU-T P.561 (2002-07)	In-service non-intrusive measurement device - Voice service measurements.
ITU-T P.562 (2004-05)	Analysis and interpretation of INMD voice-service measurements.
ITU-T P.563 (2004-05)	Single-ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephony applications.
ITU-T P.564 (2007-11)	Conformance testing for voice over IP transmission quality assessment models.
ITU-T P.CQO	Objective Conversational Voice Quality Assessment Model.
ITU-T G.107 (2005-03)	The E-model, a computational model for use in transmission planning.
ITU-T SG 12 G.WBEM	Wideband E-model.

Πίνακας 3.7: Ταξινόμηση συστάσεων ITU-T/R για την ποιότητα βίντεο.

Ανάλυση Εικόνας	Υποκειμενική Εκτίμηση	Πλήρη Αναφορά	Μειωμένη Αναφορά
SDTV	ITU-R BT.500	ITU-T J.144	ITU-T J.147
HDTV	ITU-T J.140 ITU-T J.245	ITU-R BT.1683	ITU-T J.249
CIF	ITU-T P.910	ITU-T J.247	ITU-T J.246
VGA	ITU-T P.911		
QCIF			

όπου οι παράμετροι λαμβάνουν τις τιμές $a = 0.765$ και $b = 0.1925$.

3.3.6 Ποιότητα Κλήσης Εικονοτηλεφωνίας

Η αξιολόγηση της ποιότητας της εικονοτηλεφωνίας γίνεται από την σύγκριση των δειγμάτων βίντεο που μεταδόθηκαν από τον καλούντα, $V(t) = \{V_1(t_1), V_2(t_2), \dots, V_n(t_n)\}$, με τα αντίστοιχα υποβαθμισμένα δείγματα που ελήφθησαν, $\hat{V}(t) = \{\hat{V}_1(t_1), \hat{V}_2(t_2), \dots, \hat{V}_n(t_n)\}$, από καλούμενο, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο αντικειμενικής αξιολόγησης. Ο δείκτης αντικειμενικής αξιολόγησης ποιότητας βίντεο είναι πολύ κοντά στην τιμή που θα λαμβάναμε αν τα δείγματα \hat{V} είχαν υποβληθεί στην υποκειμενική εκτίμηση από μια ομάδα χρηστών της υπηρεσίας.

$$VideoQuality_{i \rightarrow j}[MOS_{VQO}] = \frac{\sum_{k=1}^n f_{VQ}(V_{k,i}(t_k), \hat{V}_{k,j}(t_k))}{n} \quad (3.17)$$

όπου ο δείκτης ποιότητας βίντεο μπορεί να υπολογιστεί και για την πλευρά του καλούντα A και αντίστοιχα για τον καλούμενο B ή $(i, j) \in \{(A, B), (B, A)\}$, f_{VQ} η συνάρτηση που αντιστοιχεί στον αλγόριθμο υπολογισμού και MOS_{VQO} (MOS video

quality objective) η μετατροπή των αποτελεσμάτων στην κλίμακα MOS.

3.4 Ποιότητα Υπηρεσιών Δεδομένων Κινητού Διαδικτύου

Τα κινητά δίκτυα ευρείας ζώνης πλέον υποστηρίζουν δημοφιλείς στους χρήστες υπηρεσίες δεδομένων όπως πλοήγηση στο διαδίκτυο (web-browsing) χρήσι του πρωτοκόλλου HTTP, μεταφορά αρχείων χρήσι πρωτοκόλλου FTP, αποστολή και λήψη μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου χρήσι πρωτοκόλλων POP3/SMTP/IMAP. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μεθόδους υποκειμενικής και αντικειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας τέτοιων υπηρεσιών με επιλογή για την ανάλυση της υπηρεσίας web-browsing.

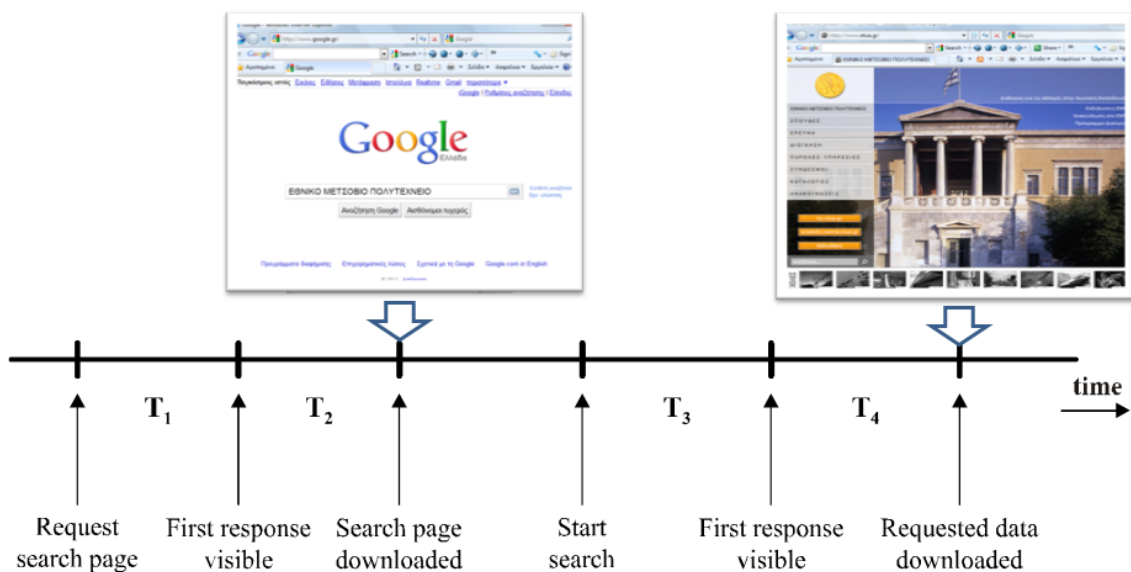
3.4.1 Υποκειμενική Αξιολόγηση Ποιότητας Υπηρεσιών Κινητού Διαδικτύου

Σκοπός της παρούσης ενότητας είναι η αντιστοίχιση των χρόνων απόκρισης (response) και ανάκτησης (download) όπως μετρώνται από το δίκτυο ή υπολογίζονται από χρόνο συνόδου (transaction) HTTP στην αντιληπτική ποιότητα της συνόδου πλοήγησης (web-browse session) στο διαδίκτυο. Ο σκοπός του μοντέλου προς το παρόν περιορίζεται σε συνόδους οι οποίες αποτελούνται από δυο βήματα, το πρώτο βήμα είναι ένα αίτημα αναζήτησης (search request) και το δεύτερο βήμα είναι η σελίδα η οποία εμφανίζεται.

Μια σημαντική παρατήρηση στην μοντελοποίηση της αντιληπτικής ποιότητας στο web-browsing είναι το γεγονός ότι ο προσδοκώμενος μέγιστος χρόνος συνόδου θα επικρατεί στην αντιληπτική ποιότητα. Για παράδειγμα, εάν ένας χρήστης προσδοκά χρόνο συνόδου 100 sec, η αντιληπτική ποιότητα για σύνοδο 10 sec θα είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι εάν κάποιος προσδοκούσε μια σύνοδο διάρκειας 1 sec. Το μοντέλο που προτείνεται είναι βασισμένο στο περιεχόμενο χρησιμοποιώντας 3 κλίμακες χρόνου, 6, 15, και 60 sec, αντίστοιχα για γρήγορα, μεσαία και αργά περιεχόμενα δικτύου, αντίστοιχα.

Γενικά, η αντίληψη της ποιότητας σχετικά με τον χρόνο απόκρισης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τις παρακάτω τρεις περιοχές αντίληψης:

1. Στιγμαϊά εμπειρία: 0.1 sec είναι το όριο για να έχει κάποιος την αίσθηση ότι το σύστημα αντιδρά στιγμαϊά, ένα σημαντικό όριο στις υπηρεσίες συνομιλίας (conversational services).
2. Αδιάλλειπτη εμπειρία: 1.0 sec είναι περίπου το όριο για μια ροή χρήστη για να



Σχήμα 3.19: Χρονομετρητές δοκιμής διαδικτύου.

θεωρηθεί αδιάλλειπτη, ακόμη και τότε ο χρήστης έχει την αίσθηση ότι η υπηρεσία λειτουργεί άμεσα, ένα σημαντικό όριο για αλληλοδραστικές υπηρεσίες.

3. Απώλεια προσοχής: 10 sec είναι περίπου το όριο για να διατηρήσει την προσοχή του χρήστη επικεντρωμένη στον διάλογο. Για μεγαλύτερες καθυστερήσεις, οι χρήστες θέλουν να εκτελούν άλλες εργασίες ενώ περιμένουν την τερματική/κινητή συσκευή να ολοκληρώσει, έτσι θα πρέπει να τους δοθεί μια ανάδραση σημειώνοντας ότι η σύννοδος ολοκληρώθηκε. Η ανάδραση είναι σημαντική εάν ο χρόνος απόκρισης είναι ιδιαίτερα μεταβλητός και οι χρήστες δεν γνωρίζουν τι να προσδοκούν.

Το μοντέλο που προτείνεται περιγράφει την σχέση μεταξύ διαφορετικών χρόνων απόκρισης και ανάκτησης σε συνόδους (web-browsing) και την αντιληπτική ποιότητα για ένα δοσμένο μέγιστο χρόνο συνόδου εντός ενός δικτύου. Έχουν καθοριστεί τρεις κλίμακες χρόνων των 6, 15 και 60 sec αναπαριστώντας γρήγορα, μεσαία και αργά περιεχόμενα.

Σε κάθε σύνοδο, ο χρήστης πρώτα ανοίγει μια ιστοσελίδα αναζήτησης και μετά επιστρέφεται μια σελίδα αποτελεσμάτων. Τα δύο πρώτα διαστήματα, T_1 και T_2 , αναπαριστούν τους χρόνους απόκρισης και ανάκτησης της σελίδας αναζήτησης. Τα επόμενα δυο διαστήματα, T_3 και T_4 , αναπαριστούν τους χρόνους απόκρισης και ανάκτησης της σελίδας αποτελεσμάτων. Το άθροισμα $T_1 + T_2 + T_3 + T_4$ αποτελεί την διάρκεια συνόδου.

Το μοντέλο αξιολόγησης που προτείνεται είναι στην πενταβάθμια κλίμακα MOS. Η υποκειμενική ποιότητα της υπηρεσίας βασίζεται στον χρόνο συνόδου και βασίζεται στην εξίσωση:

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

<i>WebSession</i>	w_1	w_2	w_3	w_4	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>6sec</i>	0.47	0.60	0.71	2.22	0.62	13.50
<i>15sec</i>	0.54	0.72	0.98	1.76	0.81	39.00
<i>60sec</i>	0.73	0.90	1.16	1.22	2.22	151.00
$\geq 60sec$	1.00	1.00	1.00	1.00	2.16	155.00

Πίνακας 3.8: Παράμετροι των μοντέλων αντιστοίχισης της διάρκειας συνόδου σε αντιληπτική ποιότητα της υπηρεσίας *web-browsing*.

$$MOS_{Web} = \frac{4}{\ln(Min/Max)} (\ln(SessionTime) - \ln(Min)) + 5 \quad (3.18)$$

όπου,

Min, η ελάχιστη διάρκεια συνόδου

Max, η μέγιστη διάρκεια συνόδου

SessionTime, η διάρκεια συνόδου

Έτσι, για τις περιπτώσεις $SessionTime = Min$ και $SessionTime = Max$, τότε $MOS = 5$ και $MOS = 1$, αντίστοιχα.

Δύναται επίσης για πολύ σύντομα περιεχόμενα (6 και 15 sec), ο χρόνος T_4 έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στην αντίληψη της ποιότητας. Έτσι, χρησιμοποιούνται βάρη για τον υπολογισμό της διάρκειας συνόδου (*WeightedST*):

$$WeightedST = w_1T_1 + w_2T_2 + w_3T_3 + w_4T_4 \quad (3.19)$$

και η εξίσωση αντιστοίχισης στην τιμή $MOS_{weighted}$ χρησιμοποιώντας την ίδια λογαριθμική εξίσωση μεταξύ την ελάχιστη και μέγιστη διάρκεια της συνόδου:

$$MOS_{Web,weighted} = \frac{4}{\ln(Min/Max)} (\ln(WeightedST) - \ln(Min)) + 5 \quad (3.20)$$

Από τον πίνακα προκύπτουν οι εξισώσεις MOS ($MOS_{web,6-sec}$, $MOS_{web,15-sec}$, $MOS_{web,\geq 60-sec}$ για μικρής, μεσαίας και μεγάλης διάρκειας συνόδου, αντίστοιχα):

$$MOS_{web,6-sec} = 4.38 - 1.30 \times \ln(WeightedST) \quad (3.21)$$

$$MOS_{web,15-sec} = 4.79 - 1.03 \times \ln(WeightedST) \quad (3.22)$$

$$MOS_{web,\geq 60-sec} = 5.76 - 0.95 \times \ln(WeightedST) \quad (3.23)$$

Στην περίπτωση που γίνεται πλοήγηση σε δυο ιστοσελίδες, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα εμπλουτισμένο μοντέλο βασισμένο στην συνολική διάρκεια της συνό-

<i>WebSession</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
6sec	0.67	12.00
15sec	0.79	38.00
$\geq 60sec$	2.16	1.00

Πίνακας 3.9: Παράμετροι του μοντέλου χωρίς βάρη αντιστοίχισης της διάρκειας συνόδου δυο ιστοσελίδων σε αντιληπτική ποιότητα της υπηρεσίας *web-browsing*.

δου. Σε αυτό το μοντέλο, $MOS_{web,2\ pages}$, έχει ληφθεί υπόψη η υπόθεση ότι $Min = 0.011Max + 0.47$.

$$MOS_{web,2\ pages} = \frac{4}{\ln\left(\frac{0.011Max+0.47}{Max}\right)} (\ln(SessionTime) - \ln(0.011Max + 0.47)) + 5 \quad (3.24)$$

3.4.2 Αντικειμενική Αξιολόγηση Ποιότητας Υπηρεσιών Κινητού Διαδικτύου

Bits που μεταφέρθηκαν σε επίπεδο IP καθορίζονται ως το σύνολο octets επί 8 των IP πακέτων που κατλήγουν στο τερματικό σημείο μέτρησης.

Χωρητικότητα Ζεύξης $C(t, \Delta t)$, δίνεται από την σχέση

$$C(t, \Delta t) = \frac{n_0(t, \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.25)$$

όπου n_0 είναι ο μέγιστος αριθμός bits σε επίπεδο IP που μπορούν να μεταδοθούν μεταξύ των δυο σημείων μέτρησης κατά την διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος $[t, t + \Delta t]$.

Χωρητικότητα Διαδρομής (path) $C_p(t, \Delta t)$, για την διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος $[t, t + \Delta t]$ που ορίζεται ως η ελάχιστη χωρητικότητα ζεύξης $C_i(t, \Delta t)$ κατά μήκος της διαδρομής δεδομένων (path) και δίνεται από την σχέση

$$C_p(t, \Delta t) = \min_{i=1,n} C_i(t, \Delta t) \quad (3.26)$$

Χωρητικότητα ζεύξης που χρησιμοποιήθηκε $U(t, \Delta t)$, δίνεται από την σχέση

$$U(t, \Delta t) = \frac{n(t, \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.27)$$

Κεφάλαιο 3. Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

όπου n είναι ο πραγματικός αριθμός bits που μεταδόθηκαν μεταξύ δυο σημείων μέτρησης μια ζεύξης κατά την διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος $[t, t + \Delta t]$.

Χρησιμοποίηση ζεύξης $V(t, \Delta t)$, ορίζεται ως ο λόγος της χωρητικότητας που χρησιμοποιήθηκε $U(t, \Delta t)$ προς την χωρητικότητα της ζεύξης $C(t, \Delta t)$

$$V(t, \Delta t) = \frac{U(t, \Delta t)}{C(t, \Delta t)} \quad (3.28)$$

Διαθέσιμη χωρητικότητα ζεύξης $A(t, \Delta t)$, είναι το αχρησιμοποίητο μέρος της χωρητικότητας της ζεύξης στο χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$

$$A(t, \Delta t) = C(t, \Delta t) - U(t, \Delta t) = C(t, \Delta t)(1 - V(t, \Delta t)) \quad (3.29)$$

Διαθέσιμη χωρητικότητα διαδρομής $A_p(t, \Delta t)$, είναι ελάχιστο το αχρησιμοποίητο μέρος της χωρητικότητας της κάθε ζεύξης $A_i(t, \Delta t)$, της διαδρομής των πακέτων στο χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$

$$A_p(t, \Delta t) = \min_{i=1,n} A_i(t, \Delta t) \quad (3.30)$$

Χωρητικότητα Στενής ζεύξης C_{TL} , κατά μήκους μιας διαδρομής, είναι η χωρητικότητα τις στενής ζεύξης (tight link)

$$C_{TL} = C_{TL}(t, \Delta t) \quad (3.31)$$

Ελάχιστη, μέγιστη και διακύμανση της χωρητικότητας (m, M, S) . Κάθε χρονικό διάστημα μπορεί να διαιρεθεί σε n υποδιαστήματα $[t_1, t_1 + \Delta t], [t_2, t_2 + \Delta t], \dots, [t_n, t_n + \Delta t]$, όπου το καθένα έχει διάρκεια $\Delta t/n$. Σημειώνεται ότι ισχύει $t_i + \Delta t/n = t_{i+1}$. Αυτά τα υποδιαστήματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών ελάχιστης, μέγιστης και διακύμανσης της παραμέτρου P .

Η συνάρτηση ελαχίστου $m(t, \Delta t, n)$ ορίζεται ως

$$m(t, \Delta t, n) = \min_{i=1,n} P(t_i, \Delta t/n) \quad (3.32)$$

Η συνάρτηση μεγίστου $M(t, \Delta t, n)$ ορίζεται ως

$$M(t, \Delta t, n) = \max_{i=1,n} P(t_i, \Delta t/n) \quad (3.33)$$

Η συνάρτηση μεταβλητότητας $S(t, \Delta t, n)$ ορίζεται ως

$$S(t, \Delta t, n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P(t_i, \Delta t) - P(t, \Delta t))^2 \quad (3.34)$$

Οι άνω στατιστικές τιμές υπολογίζονται για τις ακόλουθες παραμέτρους $\{C, C_p, U, V, A, A_p, C_{TL}\}$.

3.5 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν διεξοδικά θέματα ποιότητας όλων των προσφερόμενων υπηρεσιών από σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών ευρείας ζώνης.

Αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν όροι όπως: Εμπειρία Χρήστη UX, Ποιότητας Εμπειρίας QoE, Ποιότητας Υπηρεσίας QoSκ.α.. Ειδικότερα δε, έγινε εκτενής ανάλυση στους τεχνικούς όρους ESQoS και SQoS. Σπουδαίας σημασίας ήταν η εκτενής παρουσίαση προηγμένων θεμάτων αξιολόγησης ποιότητας τηλεφωνίας, βίντεο και πολυμέσων καθώς υπηρεσιών κινητού διαδικτύου.

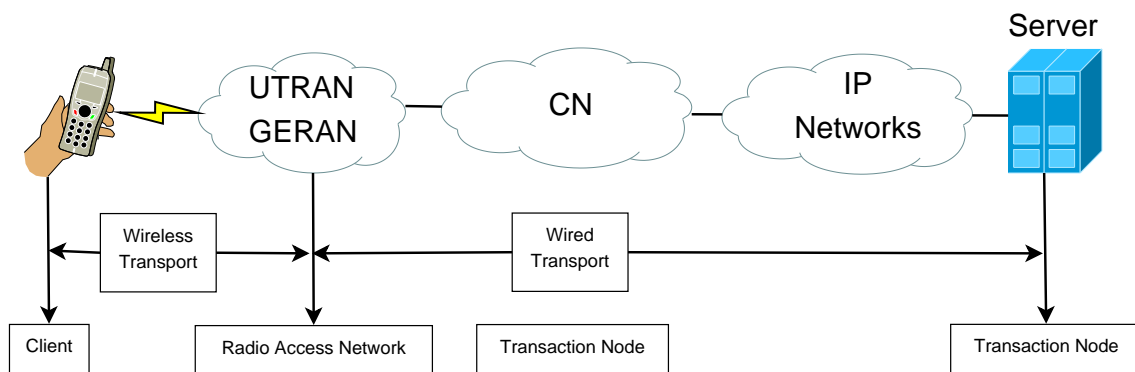
Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο τονίζεται ο ρόλος των διεθνών τηλεπικοινωνιακών οργανισμών τυποποίησης ETSI και ITU ειδικά σε θέματα ποιότητας παρεχόμενων υπηρεσιών σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών και κινητού διαδικτύου εν γένει.

□

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Επίδοσης Κινητού Ευρυζωνικού Πολυμεσικού Δικτύου

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται 3 κατηγορίες γενικών μοντέλων συμπεριλαμβανόμενων μοντελοποίηση δικτύου ασύρματης πρόσβασης, μοντελοποίηση δικτύου μεταφοράς, και μοντελοποίηση κόμβου. Επίσης, υπάρχουν δυο τύποι μοντέλων κόμβου: το απλό μοντέλο κόμβου και το σύνθετο μοντέλο κόμβου. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μελέτη των δεικτών επίδοσης για διάφορες υπηρεσίες πολυμέσων και συνθήκες δικτύου. Για τον σκοπό αυτό, παρουσιάζουμε τα μοντέλα αναμονής για να λάβουμε, όπως καθυστέρηση, ρυθμός αποτυχίας και ρυθμός απώλειας πακέτων [77].



Σχήμα 4.1: Μοντελοποίηση δικτύου.

4.1 Μοντέλο Δικτύου Ασύρματου Πρόσβασης

4.1.1 Περιγραφή Μοντέλου

Οι νέες κλήσεις και οι κλήσεις διαπομπής μοιράζονται έναν συγκεκριμένο αριθμό καναλιών σε μια κυψέλη, και τα υπόλοιπα κανάλια είναι δεσμευμένα. Μια καινούργια κλήση μπορεί να συνδεθεί εάν ένα ανενεργό κανάλι είναι διαθέσιμο μεταξύ των μοιραζόμενων καναλιών, ειδάλλως η κλήση απορρίπτεται. Μία κλήση διαπομπής μπορεί να συνδεθεί εάν ένα ανενεργό κανάλι είναι διαθέσιμο στην κυψέλη, διαφορετικά η κλήση αποτυγχάνει.

Για απλοποίηση, θεωρούμε ότι η αφικνούμενη ροή νέων κλήσεων, η ροή των αφίξεων διαπομπής, ο χρόνος διατήρησης του καναλιού για τις νέες κλήσεις και τις κλήσεις διαπομπής είναι όλες εκθετικές κατανομές. Επίσης, το μοντέλο λαμβάνει επίσης τη να αποτυχία της πλατφόρμας και την αποτυχία του επαναλήπτη βάσης. Όλες οι αποτυχίες θεωρούνται ανεξάρτητες. Όλοι οι χρόνοι θεωρούνται εκθετικές κατανομές.

Ακολουθούν οι ορισμοί των παραμέτρων:

λ_n : ο ρυθμός ροής των νέων κλήσεων

λ_h : ο ρυθμός ροής των αφίξεων διαπομπών

μ_c : ο χρόνος δέσμευσης του καναλιού για τις νέες κλήσεις

μ_n : ο χρόνος δέσμευσης του καναλιού για τις κλήσεις διαπομπής

N_b : ο αριθμός των επαναληπτών βάσης στην κυψέλη

M : ο αριθμός καναλιών σε κάθε επαναλήπτη βάσης

g : οι δεσμευμένοι πόροι

$\frac{1}{\lambda_s}$: ο μέσος χρόνος αποτυχίας της πλατφόρμας

$\frac{1}{\mu_s}$: ο μέσος χρόνος αποκατάστασης της πλατφόρμας

$\frac{1}{\lambda_b}$: ο μέσος χρόνος αποτυχίας του επαναλήπτη βάσης

$\frac{1}{\mu_b}$: ο μέσος χρόνος αποκατάστασης του επαναλήπτη βάσης

Το σύστημα μπορεί βασικά να μοντελοποιηθεί σαν μια ουρά, η οποία μπορεί να παρουσιαστεί ως μια αλυσίδα Markov [78]. Επιλύοντας το μοντέλο, ο αριθμός απόρριψης των νέων κλήσεων και ο αριθμός αποτυχίας των κλήσεων διαπομπής μπορούν να ανακτηθούν εύκολα.

Στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη ή όχι σχήματος αυτόματης προστασίας μεταγωγής (Automated Protection Switching, APS) που προτάθηκε στην εργασία [79].

Έστω

$$\lambda = \lambda_n + \lambda_h \quad (4.1)$$

$$\mu = \mu_n + \mu_h \quad (4.2)$$

$$A = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.3)$$

$$A = \frac{\lambda_h}{\mu_c + \mu_h} \quad (4.4)$$

Επιλύοντας την αλυσίδα Μαρκοβ, μπορούν να εξαχθούν:

$$P_d(N, g) = \frac{\frac{A^{N-g} A_1^g}{N!}}{\sum_{n=0}^{N-g-1} \frac{A^n}{n!} + \sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} P_b(N, g) &= \frac{\sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{N!} A_1^{n-(N-g)}}{\sum_{n=0}^{N-g-1} \frac{A^n}{n!} + \sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}} \\ &= A^{N-g} \frac{\sum_{k=0}^g \frac{A_1^k}{N!} A_1^{n-(N-g)}}{\sum_{n=0}^{N-g-1} \frac{A^n}{n!} + \sum_{n=N-g}^N \frac{A^{N-g}}{n!} A_1^{n-(N-g)}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$P(s, k; N_b) = \begin{cases} \frac{\lambda_s}{\lambda_s + \mu_s} \frac{1}{k!} \left(\frac{\mu_b}{\lambda_b} \right)^k \left[1 + \sum_{j=1}^{N_b} \frac{1}{j!} \left(\frac{\mu_b}{\lambda_b} \right)^j \right]^{-1}, & \text{εάν } s = 0, \\ \frac{\mu_s}{\lambda_s + \mu_s} \frac{1}{k!} \left(\frac{\mu_b}{\lambda_b} \right)^k \left[1 + \sum_{j=1}^{N_b} \frac{1}{j!} \left(\frac{\mu_b}{\lambda_b} \right)^j \right]^{-1}, & \text{εάν } s = 1. \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\bar{A}(N_b) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N_b} P(0, k; N_b) + \sum_{k=0}^{N_b} P(1, k; N_b) \frac{N_b - k}{N_b}, & \text{χωρίς APS,} \\ \sum_{k=0}^{N_b} P(0, k; N_b) + P(1, 0; N_b), & \text{με APS.} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$P_b^o(N_b, M, g) = \bar{A}(N_b) + \begin{cases} l(G > 0) \sum_{k=1}^G P(1, k; N_b) \left(\frac{k}{N_b}\right) & \text{χωρίς APS,} \\ + \sum_{k=G+1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_b(kM - 1, g) \left(\frac{k}{N_b}\right) & \\ \\ l(G > 0) \sum_{k=1}^G P(1, k; N_b) & \text{με APS.} \\ + \sum_{k=G+1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_b(kM - 1, g), & \end{cases} \quad (4.9)$$

$$P_d^o(N_b, M, g) = \bar{A}(N_b) + \begin{cases} \sum_{k=1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_d(kM - 1, g) \frac{k}{N_b}, & \text{χωρίς APS,} \\ \\ \sum_{k=1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_d(kM - 1, g), & \text{με APS.} \end{cases} \quad (4.10)$$

Όπου $l(e)$ είναι η δεικτική συνάρτηση: $l(e) = 1$ εάν η έκφραση e είναι αληθής· διαφορετικά $l(e) = 0$:

$$G = \lfloor (g + 1)/M \rfloor \quad (4.11)$$

όπου

$P_b^o(N_b, M, g)$: ο ρυθμός απόρριψης των νέων κλήσεων
 $P_d^o(N_b, M, g)$: ο ρυθμός αποτυχίας των κλήσεων διαπομπής.

4.2 Μοντέλο Δικτύου Μεταφοράς

Υπάρχουν δυο τύποι δικτύου: το ασύρματο δίκτυο και το ενσύρματο δίκτυο. Πρώτα αναλύεται η μέση καθυστέρηση μεταφοράς ενός πακέτου στο ενσύρματο δίκτυο. Στο μοντέλο καθυστέρησης μεταφοράς, ο χρόνος μεταφοράς αψηφείται. Κατόπιν μελετάται ο χρόνος μεταφοράς για ένα μέγεθος δεδομένων σε ένα ακέραιο δίκτυο μεταφοράς.

Το δίκτυο μεταφοράς είναι πολύ σύνθετο και δεν είναι απλός ο υπολογισμός της καθυστέρησης μεταφοράς ενός πακέτου. Για απλοποίηση, το δίκτυο μεταφοράς με ένα δίκτυο Jackson και αναλύεται η καθυστέρηση μεταφοράς ενός πακέτου.

4.2.1 Περιγραφή Μοντέλου

Θεωρούμε το δίκτυο μεταγωγής πακέτων ως ένα δίκτυο Jackson για την ανάλυση της μέσης καθυστέρησης ενός πακέτου σε ένα δίκτυο.

- γ : το συνολικό φορτίο του δικτύου απ' έξω
- λ_i : το φορτίο της i ζεύξης
- L : το πλήθος των ζεύξεων στο δίκτυο
- M : το μέσο μήκος ενός πακέτου
- R_i : ο ρυθμός μετάδοσης της i ζεύξης

Η ανάλυση του χρόνου μεταφοράς είναι αρκετά απλή. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- D : το μέγεθος των δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν
- $d_{wireless}$: το μέσο εύρος ζώνης στο ασύρματο δίκτυο
- d_{wired} : το μέσο εύρος ζώνης στο ενσύρματο δίκτυο

4.2.2 Μέση Καθυστέρηση Μεταφοράς και Χρόνος Μεταφοράς

Επιλύοντας το μοντέλο καθυστέρησης μεταφοράς, μπορεί να εξαχθεί:

$$T_{tran_delay} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^L \frac{M}{R_i - M\lambda_i} \quad (4.12)$$

T_{tran_delay} είναι η μέση καθυστέρηση ενός πακέτου στο δίκτυο.

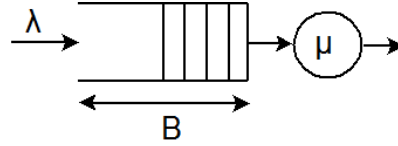
Έτσι, εύκολα ο χρόνος μεταφοράς προκύπτει:

$$T_{tran_time} = \frac{D}{d_{wireless}} + \frac{D}{d_{wired}} \quad (4.13)$$

T_{tran_time} είναι ο χρόνος μεταφοράς των δεδομένων D στο ασύρματο και ενσύρματο δίκτυο μεταφοράς.

4.3 Μοντέλα Κόμβου

Η έννοια “κόμβος” περιέχει όλες τις οντότητες που χειρίζονται δεδομένα στο δίκτυο (όπως gateway, router και server). Υπάρχουν 4 κατηγορίες κίνησης στο δίκτυο σύμφωνα με την 3GPP. Σύμφωνα με την κατηγορία της ροής δεδομένων που διαχειρίζεται



Σχήμα 4.2: Σύστημα αναμονής για έναν απλό κόμβο.

έναν κόμβο, οι κόμβοι κατηγοριοποιούνται σε δυο τύπους: τους απλούς και σύνθετους κόμβους. Ένας απλός κόμβος διαχειρίζεται μόνο μια κατηγορία κίνησης ή κάποια αιτήματα πληροφορίας και ο σύνθετος κόμβος διαχειρίζεται και τις 4 κατηγορίες κίνησης.

4.3.1 Μοντέλο Απλού Κόμβου

Σε όλους τους κόμβους που σχετίζονται με τις υπηρεσίες ροής (streaming service), ο εξυπηρετητής διαδικτύου (web server), ο εξυπηρετητής πολυμέσων (media server), ο HLR, VLR και ο AuC θεωρούνται ως απλοί κόμβοι. Για τον λόγο ότι αυτοί οι κόμβοι διαχειρίζονται μια κατηγορία κίνησης ή κάποια αιτήματα πληροφορίας, ο απλός κόμβος μοντελοποιείται ως ένα σύστημα αναμονής. Επιλύοντας τον κόμβο, μπορούν να εξαχθούν η καθυστέρηση διεκπαιρώσεως και ο ρυθμός απωλειών δεδομένων στον κόμβο.

Θεωρούμε ότι η άφιξη των πακέτων δεδομένων στον κόμβο είναι μια κατανομή Poisson, και ο χρόνος διεκπαιρώσεως ενός πακέτου κατανέμεται εκθετικά. Το μέγεθος του ενταμιευτή είναι B πακέτα. Τα πακέτα χρονοδρομολογούνται χρήσει του FIFO αλγορίθμου. Οι παράμετροι ορίζονται ως εξής:

λ : ο ρυθμός άφιξης των πακέτων

$\frac{1}{\mu}$: ο μέσος χρόνος διεκπαιρώσεως ενός πακέτου στον κόμβο

B : το μέγεθος του ενταμιευτή του κόμβου

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος διεκπαιρώσεως, T_w , και ο ρυθμός απώλειας πακέτων, P_B .

$$T_w = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (4.14)$$

$$p_B = (1 - \rho)\rho^B = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^B \quad (4.15)$$

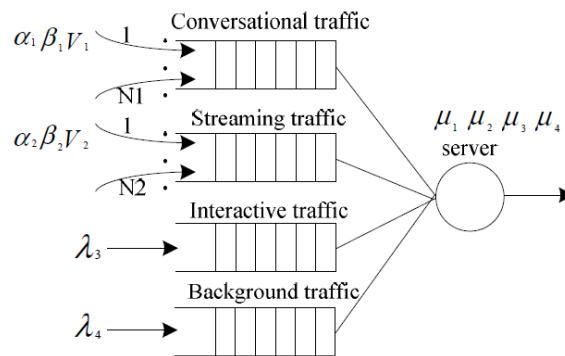
4.3.2 Μοντέλο Σύνθετου Κόμβου

Σε όλους τους κόμβους που σχετίζονται με την υπηρεσία ροής, ο BS, ο SGSN και ο GGSN θεωρούνται ως σύνθετοι κόμβοι. Αυτοί οι κόμβοι διαχειρίζονται 4 κατηγορίες

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση Επίδοσης Κινητού Ευρυζωνικού Πολυμεσικού Δικτύου

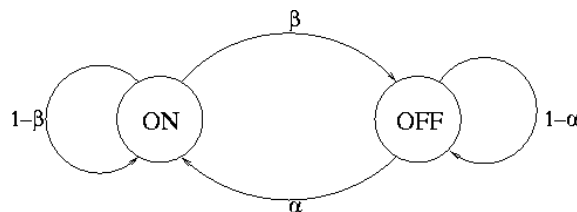
ροών δεδομένων: conversational, interactive και background. Οι απαιτήσεις καθυστέρησης γίνονται πιο αυστηρές και η προτεραιότητα μεταφοράς σε έναν κόμβο είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις καθυστέρησης. Έτσι ο σύνθετος κόμβος μοντελοποιείται ως ένα σύστημα αναμονής με 4 ουρές και έναν εξυπηρετητή. Επιλύοντας το σύστημα, μπορούν να εξαχθούν η καθυστέρηση μεταφοράς και ο ρυθμός απωλειών δεδομένων στον κόμβο.

Στην κατηγορία conversational αναλύεται η κίνηση φωνής και στην κατηγορία streaming η κίνηση ροής βίντεο.



Σχήμα 4.3: Μοντέλο σύνθετου κόμβου.

Μοντέλο Κίνησης Φωνής Υιοθετείται το μοντέλο MMPP (Markov-Modulated Poisson Process). Το μοντέλο είναι ένα σύστημα αναμονής και η πηγή δεδομένων συνδυάζεται με πολλές πηγές φωνής. Κάθε πηγή φωνής έχει δυο καταστάσεις: ON/OFF. Όταν η πηγή είναι στην κατάσταση on, τότε παράγει δεδομένα φωνής με αφίξεις Poisson ειδιάλλως είναι ανενεργή. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι εξής:



Σχήμα 4.4: Μοντέλο δυο καταστάσεων.

- N : ο αριθμός των πηγών φωνής στο μοντέλο φωνής
- α : ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση off σε on
- β : ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση on σε off
- V : ο μέσος ρυθμός εκπομπής δεδομένων όταν η πηγή φωνής είναι on

Μοντέλο Κίνησης Φωνής Ομοίως υιοθετείται ένα ισοδύναμο μοντέλο MMPP (Markov-Modulated Poisson Process) με M πανομοιότυπες mini-πηγές δυο καταστάσεων για την κίνηση βίντεο των N . Το μοντέλο είναι ένα σύστημα αναμονής και η πηγή δεδομένων συνδυάζεται με M πηγές βίντεο. Κάθε πηγή φωνής έχει δυο καταστάσεις: ON/OFF. Όταν η πηγή είναι στην κατάσταση on, τότε παράγει δεδομένα φωνής με αφίξεις Poisson ειδικά είναι ανενεργή. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι εξής:

- α_1 : ο ρυθμός μετάβασης της conversational κίνησης από την κατάσταση off σε on
- α_2 : ο ρυθμός μετάβασης της streaming κίνησης από την κατάσταση off σε on
- β_1 : ο ρυθμός μετάβασης της conversational κίνησης από την κατάσταση on σε off
- β_2 : ο ρυθμός μετάβασης της streaming κίνησης από την κατάσταση on σε off
- V_1 : ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων όταν η πηγή φωνής είναι στην κατάσταση on
- V_2 : ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων όταν η πηγή βίντεο είναι στην κατάσταση on
- λ_1 : ο ρυθμός άφιξης πακέτων interactive κίνησης
- λ_2 : ο ρυθμός άφιξης πακέτων background κίνησης
- μ_1 : ο χρόνος διεκπεραίωσης conversational κίνησης του κόμβου
- μ_2 : ο χρόνος διεκπεραίωσης streaming κίνησης του κόμβου
- μ_3 : ο χρόνος διεκπεραίωσης interactive κίνησης του κόμβου
- μ_4 : ο χρόνος διεκπεραίωσης background κίνησης του κόμβου

Καθυστέρηση Διεκπεραίωσης Η καθυστέρηση διεκπεραίωσης υπολογίζεται για κάθε κατηγορία κίνησης στον σύνθετο κόμβο.

- T_{w1} : η καθυστέρηση διεκπεραίωσης της conversational κίνησης στον κόμβο
- T_{w2} : η καθυστέρηση διεκπεραίωσης της streaming κίνησης στον κόμβο
- T_{w3} : η καθυστέρηση διεκπεραίωσης της conversational κίνησης στον κόμβο
- T_{w4} : η καθυστέρηση διεκπεραίωσης της streaming κίνησης στον κόμβο

$$T_w = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \rho_i T_{si} \quad (4.16)$$

$$T_{w1} = \frac{T_w}{1 - \rho_1} \quad (4.17)$$

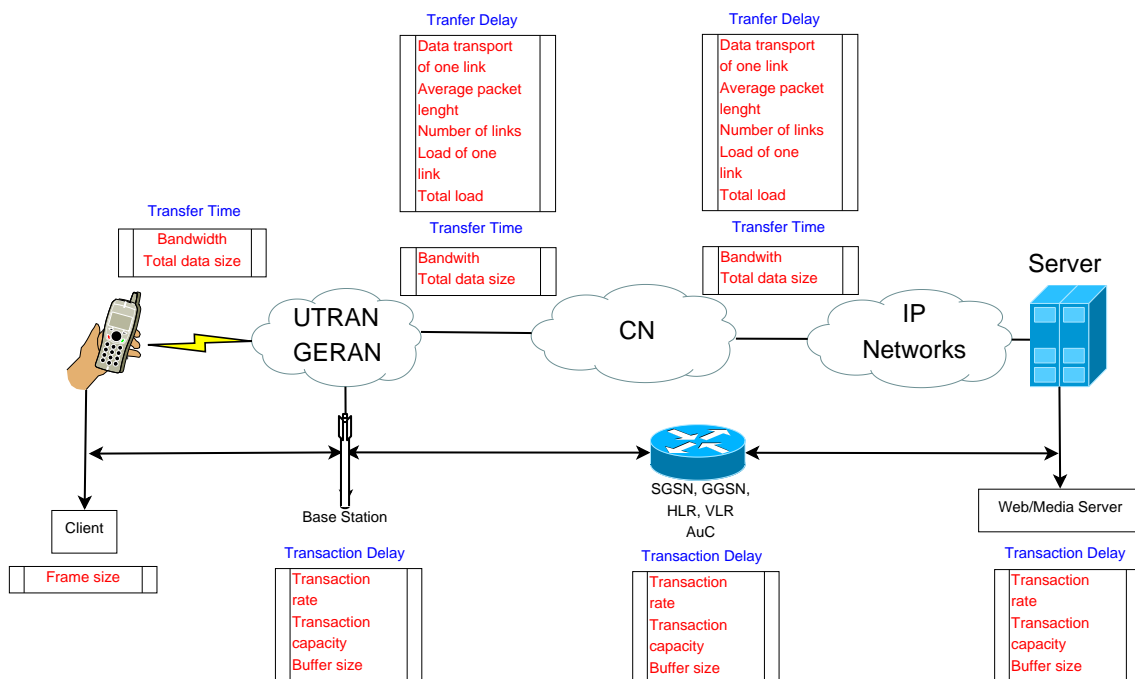
$$T_{w2} = \frac{T_w + \rho_1 T_{w1}}{1 - \rho_2 - \rho_1} \quad (4.18)$$

$$T_{w3} = \frac{T_w + \rho_2 T_{w2} + \rho_1 T_{w1}}{1 - \rho_3 - \rho_2 - \rho_1} \quad (4.19)$$

$$T_{w4} = \frac{T_w + \rho_3 T_{w3} + \rho_2 T_{w2} + \rho_1 T_{w1}}{1 - \rho_3 - \rho_2 - \rho_1} \quad (4.20)$$

4.4 Μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ ESQoS και SQoS

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιάσουμε την μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ ESQoS και SQoS παραμέτρων.



Σχήμα 4.5: Μοντελοποίηση δικτύου - Παράμετροι.

4.4.1 Μη Διαθεσιμότητα Υπηρεσίας

Αγνοώντας την αποτυχία του ασύρματου και ενσύρματου δικτύου, ο ρυθμός αποτυχίας ενός πακέτου μεταφερόμενου πακέτου στο δίκτυο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_{fail} = P_{access_fail} + P_{web_fail} \quad (4.21)$$

$$P_{access_fail} = \bar{A}(N_b) + \begin{cases} l(G > 0) \sum_{k=1}^G P(1, k; N_b) \left(\frac{k}{N_b}\right) & \text{χωρίς APS,} \\ + \sum_{k=G+1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_b(kM - 1, g) \left(\frac{k}{N_b}\right) & \\ \\ l(G > 0) \sum_{k=1}^G P(1, k; N_b) & \text{με APS.} \\ + \sum_{k=G+1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_b(kM - 1, g), & \end{cases} \quad (4.22)$$

$$P_{web_fail} = (1 - \rho)\rho^B = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^B \quad (4.23)$$

4.4.2 Ρυθμός Αποτυχίας Υπηρεσίας

Αγνοώντας την αποτυχία του ασύρματου και ενσύρματου δικτύου, ο ρυθμός αποτυχίας ενός πακέτου μεταφερόμενου πακέτου στο δίκτυο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_{fail} = P_{HO_fail} + P_{media_fail} \quad (4.24)$$

$$P_{HO_fail} = \bar{A}(N_b) + \begin{cases} \sum_{k=1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_d(kM - 1, g) \frac{k}{N_b}, & \text{χωρίς APS,} \\ \\ \sum_{k=1}^{N_b} P(1, k; N_b) P_d(kM - 1, g), & \text{με APS.} \end{cases} \quad (4.25)$$

$$P_{media_fail} = (1 - \rho)\rho^B = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^B \quad (4.26)$$

4.4.3 Χρόνος Αρχικής Εγκατάστασης

Ο αρχικός χρόνος εγκατάστασης, T_{con} μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνάρτηση της καθυστέρησης μεταφοράς και του χρόνου μεταφοράς σε ένα δίκτυο καθώς και της καθυστέρησης διεκπεραίωσης σε όλους του σχετικούς κόμβους διεκπεραίωσης. Μπορεί λοιπόν να εξαχθεί η σχέση:

$$T_{con} = F(T_{tran.d}, T_{tran.t}, T_{BS}, T_{SGSN}, T_{GGSN}, T_{HLR}, T_{VLR}, T_{AuC}, T_{web}, T_{media}) \quad (4.27)$$

όπου το T_{con} μεταβάλλεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως όλοι οι παράμετροι

$$T_{tran.d} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^L \frac{M}{R_i - M\lambda_i} \quad (4.28)$$

$$T_{tran.t} = \frac{D}{d_{wireless}} + \frac{D}{d_{wired}} \quad (4.29)$$

Οι καθυστερήσεις $T_{BS}, T_{SGSN}, T_{GGSN}$ μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση

$$T_{server.1} = \frac{T_w + \rho_3 T_{w3} + \rho_2 T_{w2} + \rho_1 T_{w1}}{1 - \rho_3 - \rho_2 - \rho_1} \quad (4.30)$$

Οι καθυστερήσεις $T_{HLR}, T_{VLR}, T_{AuC}, T_{web}, T_{media}$ μπορούν να εξαχθούν από την σχέση

$$T_{server.2} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (4.31)$$

4.4.4 Αρχικός Χρόνος Ενταμίευσης

Ο αρχικός χρόνος ενταμίευσης, $T_{buffering}$ μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνάρτηση της καθυστέρησης μεταφοράς και του χρόνου μεταφοράς σε ένα δίκτυο καθώς και της καθυστέρησης διεκπεραίωσης σε όλους του σχετικούς κόμβους διεκπεραίωσης. Μπορεί λοιπόν να εξαχθεί η σχέση:

$$T_{con} = F(T_{tran.d}, T_{tran.t}, T_{BS}, T_{SGSN}, T_{GGSN}, T_{media}) \quad (4.32)$$

όπου το $T_{buffering}$ μεταβάλλεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως όλοι οι παράμετροι

$$T_{tran.d} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^L \frac{M}{R_i - M\lambda_i} \quad (4.33)$$

$$T_{tran.t} = \frac{D}{d_{wireless}} + \frac{D}{d_{wired}} \quad (4.34)$$

Οι καθυστερήσεις $T_{BS}, T_{SGSN}, T_{GGSN}$ μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση

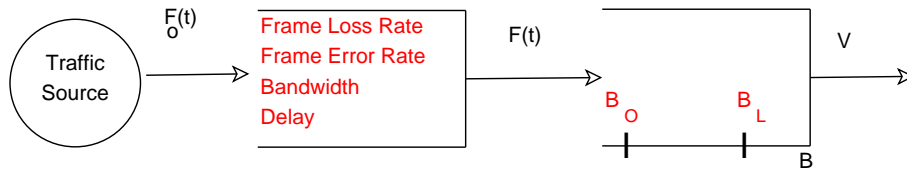
$$T_{server.1} = \frac{T_w + \rho_3 T_{w3} + \rho_2 T_{w2} + \rho_1 T_{w1}}{1 - \rho_3 - \rho_2 - \rho_1} \quad (4.35)$$

Οι καθυστερήσεις T_{media} μπορεί να εξαχθούν από την σχέση

$$T_{server.2} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (4.36)$$

4.4.5 Συχνότητα Επανα-Ενταμίευσης (Rebuffering)

Το rebuffering είναι ένας σημαντικός δείκτης που αντανακλά την κατάσταση του δικτύου. Θεωρούμε ότι τα δεδομένα που αποστέλλονται έχουν αρχικά μια κατανομή $F_0(t)$. Μετά την μεταφορά, υπό την επήρεια του ρυθμού απώλειας πλαισίων, του ρυθμού εσφαλμένων πλαισίων, το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση, τα δεδομένα έχουν κατανομή $F(t)$ στο τέλος. Εδώ η καθυστέρηση νοείται ως καθυστέρηση μεταφοράς και καθυστέρηση διεκπεραίωσης.



Σχήμα 4.6: Μοντέλο rebuffering.

Η επίδραση του ρυθμού απώλειας πλαισίων και του ρυθμού εσφαλμένων πλαισίων στα απεσταλμένα δεδομένα είναι η ίδια. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα δεδομένα γίνονται $F_1(t)$ έπειτα από την επίδραση του ρυθμού απώλειας πλαισίων και του ρυθμού εσφαλμένων πλαισίων. Κατόπιν, γίνεται $F_2(t)$ υπό την επίδραση της αλλαγής του εύρους ζώνης, και τελικά $F(t)$ εξαιτίας της καθυστέρησης.

Το αρχικό μέγεθος των δεδομένων στον ενταμιευτή είναι B . Όταν τα δεδομένα στον ενταμιευτή υπερβούν σε B_0 , η αναπαραγωγή (media/video player) ξεκινά, ενώ όταν τα δεδομένα είναι λιγότερα από B_L , τότε ξεκινά το rebuffering. Ο ρυθμός πλαισίων κατά την αναπαραγωγή είναι V .

Δηλαδή, όταν $B + (F(t) - v \cdot t) < B_L$, το σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση rebuffering. Ενώ όταν $B_0 - (B + (F(t) - v \cdot t)) \leq F(t') - F(t)$, όπου t' είναι η χρονική στιγμή που σταματά το rebuffering.

$$F^{-1}(B_0 - (B - v \cdot t)) \leq t' \quad (4.37)$$

Άρα η συχνότητα rebuffering είναι

$$\frac{\sum I(B + (F(t) - v \cdot t) < B_L)}{T_{test}} \quad (4.38)$$

όπου T_{test} είναι η συνολική διάρκεια της δοκιμής.

4.5 Ανάλυση Επίδοσης Πρωτοκόλλου TCP

Η πλειοψηφία των εφαρμογών IP χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol) για την αξιόπιστη μεταφορά ροών bytes [80]. Η λειτουργία του TCP εξαρτάται από τέσσερις μηχανισμούς: η αργή εκκίνηση (slow start), η αποφυγή συμφόρησης (congestion avoidance), η γρήγορη επαναμετάδοση (fast retransmission) και η γρήγορη ανάκαμψη (fast recovery). Ειδική αναφορά για το πρωτόκολλο TCP σε ασύρματα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς περιγράφονται στο IETF RFC 3481 [81]. Ένα μοντέλο συμπεριφοράς του ελέγχου ροής του πρωτοκόλλου TCP περιγράφεται από την εξίσωση [82, 83]:

$$BW < \frac{MSS}{RTT} \frac{C}{\sqrt{p}} \quad (4.39)$$

όπου

BW : τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά μονάδα χρόνου (διάρκεια κύκλου) και αποκαλείται ρυθμοαπόδοση (throughput)

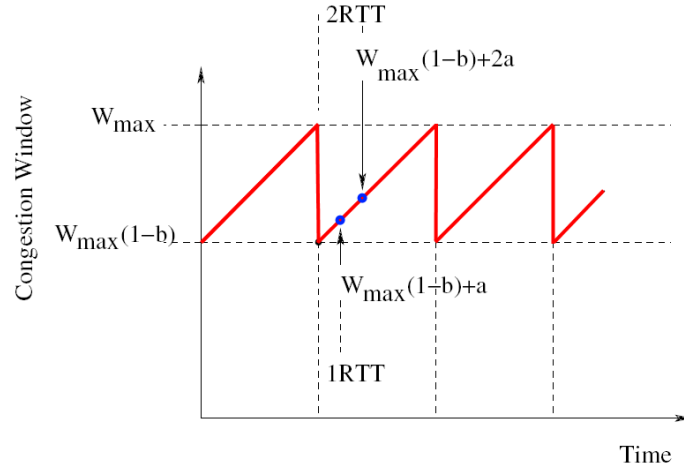
MSS : το μέγιστο μέγεθος του TCP τεμαχίου (segment)

RTT : ο μέσος χρόνος μετ' επιστροφής

C : σταθερά (εξαρτάται από τις επιπτώσεις των τυχαίων η περιοδικών απωλειών) και την τεχνική ACK

p : η πιθανότητα ένα πακέτο να χαθεί σε χρόνο RTT .

Η άνω εξίσωση θα πρέπει να θεωρείται ως ένα άνω όριο της ροής πληροφορίας, ακόμα και σε βελτιωμένες εκδόσεις του TCP, όπως TCP με SACK και TCP Reno. Θεωρείται ότι μια μακράς διάρκειας TCP σύνδεση μπορεί να φθάσει σε ισορροπία στην



Σχήμα 4.7: Μηχανισμός του πρωτοκόλλου TCP για την αποφυγή συμφόρησης.

κατάσταση αποφυγής συμφόρησης (congestion). Όταν τα συνολικά bytes στην μεταφορά δεδομένων είναι λίγα, ο έλεγχος ροής του TCP μπορεί να μην φθάσει σε ισορροπία, και η συμπεριφορά του μηχανισμού αργής εκκίνησης (slow start) καθορίζει τον υπολογισμό. Μια πιο ευέλικτη σχέση στην χωρητικότητα του TCP Reno περιλαμβάνει τις περιοριστικές επιπτώσεις του μέγιστου μεγέθους παραθύρου (window size).

$$BW \approx \min \left(\frac{W_{max}}{RTT}, \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bp}{3}} + T_0 \min \left(1, 3\sqrt{\frac{2bp}{3}} \right) p(1 + 32p^2)} \right) \quad (4.40)$$

όπου

$B(p)$: η εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης του TCP [packets/sec]

W_{max} : το μέγιστο μέγεθος του παραθύρου του ενταμιευτή (buffer) στον δέκτη

RTT : ο μέσος χρόνος μετ' επιστροφής

b : ο αριθμός των πακέτων που έχουν απιβεβαιωθεί από τον δέκτη

p : η πιθανότητα ένα πακέτο να χαθεί σε χρόνο RTT .

T_0 : η προθεσμία για την επαναμετάδοση ενός μη επιβεβαιωμένου (χαμένου) πακέτου

Ο έλεγχος ροής του TCP προσπαθεί να αυξήσει τον ρυθμό απόστολης (window size) έως να παρατηρηθεί συμφόρηση (ή το φαινόμενο bottleneck στη ζεύξη) και αυτό εξαρτάται από την απώλεια πακέτων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7. Έτσι, ένα τμήμα της απώλειας πακέτων οφείλεται στην παρακολούθηση (probing) του bottleneck. Ο έλεγχος ροής με τον μηχανισμό αποφυγής συμφόρησης οδηγεί σε μια νέα εξίσωση

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση Επίδοσης Κινητού Ευρυζωνικού Πολυμεσικού Δικτύου

για την πιθανότητα απώλειας παρουσία bottleneck probing:

$$\sqrt{p_{\text{Probing}}} \approx \frac{MSS}{RTT} \frac{C}{0.75 \times BW_{\text{bottleneck}}} \quad (4.41)$$

Ο εκτιμώμενος ρυθμός απωλειών του δικτύου μπορεί να συνδυαστεί με τον ρυθμό των απωλειών probing:

$$p_{\text{total}} = 1 - [(1 - p_{\text{network}}) \times (1 - p_{\text{probing}})] \quad (4.42)$$

Εάν το μέγιστο μεγέθους του παραθύρου δεν είναι ικανοποιητικό να καλύψει τον χρόνο RTT, τότε η ρυθμοαπόδοση θα περιοριστεί στην τιμή $window \times MSS/RTT$.

Αν θεωρηθεί ότι N το πλήθος ενεργές TCP συνδέσεις σε μια κυψέλη, τότε σε ένα περιβάλλον ασύρματης και ενσύρματης μετάδοσης, ο χρόνος RTT για κάθε σύνδεση είναι το άθροισμα των δυο παραγόντων, RTT_{wireless} και RTT_{wired} δηλαδή:

$$RTT = RTT_{\text{wireless}} + RTT_{\text{wired}} \quad (4.43)$$

όπου κάθε TCP τεμάχιο μεταδίδεται σε ένα πλήθος χρονικών διαστημάτων μετάδοσης TTI , διάρκειας 2 ms το καθένα. Έτσι, η καθυστέρηση που οφείλεται στο H-ARQ εξαρτάται από το πλήθος των επαναμεταδόσεων και επίσης από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού στον σταθμό βάσης.

Η πιθανότητα ένα TTI να δεσμευθεί για έναν χρήστη i είναι $n_s(i)/N_t$ και ο χρόνος RTT γράφεται ως:

$$RTT_{\text{wireless}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} N_{TTI}(i)}{n_s} T_j \quad (4.44)$$

όπου T_j είναι ο χρόνος μετάδοσης ενός TCP τεμαχίου στην ασύρματη διεπαφή με έναν δοσμένο ρυθμό μετάδοσης, n_s είναι ο αριθμός των TTIs όταν δεν απαιτείται επαναμετάδοση και $N_{TTI}(i)$ είναι το πλήθος των TTIs που απαιτούνται για την μετάδοση των δεδομένων σε ένα ασύρματο κανάλι στο οποίο απαιτούνται επαναμεταδόσεις H-ARQ.

Ένας drop-tail δρομολογητής με δεδομένο μέγεθος ενταμίευσης πακέτων (buffer) μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα κλασικό σύστημα αναμονής M/M/1/K. Τότε, ο χρόνος RTT_{wired} δίνεται από την σχέση:

$$RTT_{\text{wired},dt} = 2 \cdot d_p + \frac{MSS}{C} \cdot \left(\frac{1}{1-\rho} - \frac{\rho^K}{1-\rho^K} \cdot K \right) \quad (4.45)$$

όπου d_p είναι η καθυστέρηση διάδοσης της ενσύρματης ζεύξης, C είναι η χωρητικότητα της ζεύξης, ρ είναι το φορτίο, και K το μέγεθος του buffer στον δρομολογητή. Η

πιθανότητα απώλειας πακέτου δίνεται από την σχέση:

$$p = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K+1}} \rho^K \quad (4.46)$$

Στην περίπτωση χρήσης RED (Random Early Detection) δρομολογητή, η σχέση για το RTT γίνεται:

$$RTT_{wired,RED} = 2 \cdot d_p + \frac{MSS}{C} \sum_{n=1}^K n\pi(n) \quad (4.47)$$

όπου $\pi(n)$ δηλώνει την στάσιμη κατανομή του πλήθους των πακέτων στον buffer του δρομολογητή.

Η ρυθμοαπόδοση ενός συστήματος TCP-HSPA μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση:

$$BW(e, RTT, T_0, W_{max}) = \begin{cases} \frac{\frac{1-e}{e} + \frac{W(e)}{e} + Q'(e, W(e))}{RTT[\frac{b}{2}W(e)+1] + \frac{Q'(e, W(e))G(e)T_0}{1-e}}, & \text{για } W(e) < W_{max} \\ \frac{\frac{1-e}{e} + \frac{W_{max}}{2} + Q'(e, W_{max})}{RTT(\frac{b}{8}W_{max} + \frac{1-e}{eW_{max}} + 2)}, & \text{για } W(e) \geq W_{max} \end{cases} \quad (4.48)$$

όπου e είναι η πιθανότητα της επαναμετάδοσης πακέτου, q η πιθανότητα της προθεσμίας επαναμετάδοσης λόγω της ασύρματης διεπαφής, p η πιθανότητα απώλειας πακέτου λόγω συμφόρησης. Επιπλέον, τα μεγέθη W_e , $G(e)$, $F(p, w)$ και q δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$W_e = \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{8(1-e)}{3be} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2} \quad (4.49)$$

$$G(e) = 1 + e + 2e^2 + 4e^3 + 8e^4 + 16e^5 + 32e^6 \quad (4.50)$$

$$F(p, w) = \min \left[1, \frac{1 + (1-p)^3 [1 - (1-p)^{w-3}]}{[1 - (1-p)^w] / [1 - (1-p)^3]} \right] \quad (4.51)$$

$$q = \frac{T_0 - RTT_{wired} - \frac{1+p_e - p_e p_s}{1-p_e p_s} T_j}{\sqrt{\frac{p_e(1-p_e + p_e p_s)}{1-p_e p_s} T_j}} \cdot F \quad (4.52)$$

όπου T_0 είναι η μέση διάρκεια της προθεσμίας (timeout), p_e η πιθανότητα λαθών μετά την κωδικοποίηση του μπλόκ πληροφορίας μέσω FEC και p_s η πιθανότητα λάθους μετά τον ήπιο συνδυασμό δυο διαδοχικών μεταδόσεων του ίδιου μπλόκ πληροφορίας μέσω H-ARQ.

Τότε, τα μεγέθη e και $Q'(e, w)$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$e = p + q - pq \quad (4.53)$$

$$Q'(e, w) = \frac{p_{cong} \cdot F(p, w) + p_{wireless} - p_{cong} \cdot p_{wireless} \cdot F(p, w)}{1 - (1 - e)^d} \quad (4.54)$$

όπου p_{cong} η πιθανότητα απώλειας λόγω συμφόρησης και $p_{wireless}$ είναι η πιθανότητα απώλειας λόγω ραδιο-διεπαφής, μεγέθη τα οποία υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$p_{cong} = 1 - (1 - p)^d \quad (4.55)$$

$$p_{wireless} = 1 - (1 - q)^d \quad (4.56)$$

4.6 Σύνοψη Κεφαλαίου

Το παρόν Κεφάλαιο αφιερώθηκε στην ανάλυση ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων για την υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων και διαδικτύου εν γένει. Κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν θεωρητικά μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης, μοντέλα κόμβου και ανάλυση επίδοσης του πρωτοκόλλου ελέγχου μεταφοράς. Σημειώνεται ότι έγινε μια προσέγγιση στην μοντελοποίηση σχέσεων μεταξύ των δεικτών μέτρησης ESQoS και SQoS.

Εμπεριστατωμένη προσομοίωση προηγμένων πολυμεσικών δικτύων παρουσιάστηκαν στις δημοσιεύσεις [84, 85].

□

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση Επίδοσης Κινητού Ευρυζωνικού Πολυμεσικού Δικτύου

Κεφάλαιο 5

Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου είναι ο ορισμός αντικειμενικών και συγκρίσιμων δεικτών επίδοσης (Key Performance Indicators, KPIs) [86] παρεχόμενων προς τους χρήστες υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών ώστε οι τελικοί χρήστες να διευκολύνονται στη σύγκριση της ποιότητας υπηρεσιών που παρέχονται από διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών καθώς και στην πιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσιών που ήδη τους παρέχονται.

Τέλος, καθορίζεται ένα σαφές πλαίσιο των τηλεπικοινωνιακών ρυθμιστικών αρχών σχετικά με τους δείκτες ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες, το οποίο εγγυάται αντικειμενική, διαφανή και αμερόληπτη ενημέρωση και άμεση, εύκολη και γρήγορη πρόσβαση των τελικών χρηστών στις πληροφορίες που αφορούν την ποιότητα των παρεχόμενων σε αυτούς υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών.

Έτσι, καθορίζονται μεταξύ άλλων:

- οι δείκτες ποιότητας προς μέτρηση
- η μεθοδολογία μέτρησης συμπεριλαμβανομένων του μετρητικού εξοπλισμού και των δοκιμών/σεναρίων μέτρησης (καμπάνια μετρήσεων)

Ως *Δείκτης Ποιότητας – Quality Indicator* ορίζεται το μέτρο ενός συνόλου μεγεθών μέσω του οποίου αποτιμάται μέρος/στοιχεία της ποιότητας μίας παρεχόμενης υπηρεσίας κινητών επικοινωνιών.

Ως *Καμπάνια Μετρήσεων – Measurement campaign* ορίζεται το σύνολο των ενεργειών που απαιτούνται για τη διεξαγωγή των μετρήσεων και την παρουσίαση των

αποτελεσμάτων των δεικτών ποιότητας υπηρεσιών συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Κατά την διάρκεια μιας καμπάνιας μέτρησης συλλέγονται ένα μεγάλος όγκος δεδομένων όπως: ένταση του σήματος (signal intensity), ποιότητα του σήματος, παρεμβολές, γεγονότα κλήσεων (dropped/blocked calls) και τα στατιστικά στοιχεία αυτών (call statistics), πληροφορίες ποιότητας υπηρεσιών (QoS statistics) και γενικότερες πληροφορίες του δικτύου ασύρματης πρόσβασης όπως διαπομπές (handovers) και λοιπές παράμετροι (neighbor cells).

Η μετρητική καμπάνια λαμβάνει χώρα σε διάφορα περιβάλλοντα. Τα περιβάλλοντα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Στατικές μετρήσεις (static/hot-spots) για εξωτερικούς (outdoor) και εσωτερικούς (indoor) χώρους: πλατείες πόλεων / σημεία τουριστικού ενδιαφέροντος / αεροδρόμια / σταθμοί τρένων και μετρό / εμπορικά κέντρα, συγκροτήματα γραφείων και χώροι εκθέσεων.
- Μετρήσεις εν κινήσει με όχημα (drive-testing): αστικές περιοχές (πόλεις μεσαίου μεγέθους) / μητροπολιτικά κέντρα / μεγάλες πόλεις / εθνικές οδοί / επαρχία (επαρχιακοί δρόμοι).

Ειδικά για την περίπτωση των μετρήσεων τύπου drive-testing μπορεί να γίνει η εξής κατηγοριοποίηση όσον αφορά τον σκοπό:

1. Συγκριτική Αξιολόγηση των Κινητών Δικτύων (Mobile Network Benchmarking): Είναι από τον πιο σύνθετο τύπο μετρήσεων και ο σκοπός είναι η μέτρηση πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης (RATs) και τύπων υπηρεσιών ταυτόχρονα και με υψηλή ακρίβεια. Αποτέλεσμα μιας τέτοιου είδους καμπάνιας μέτρησης είναι η παροχή επαρκών πληροφοριών που αφορούν τα συγκριτικά πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα/περιορισμοί, αδυναμίες και ευκαιρίες, δηλαδή μια εμπειρική ανάλυση SWOT/SLOT (Strengths, Weaknesses/Limitations, Opportunities, Threats) [87] καθώς και για μια εμπορική καμπάνια marketing.
2. Βελτιστοποίηση, Επιθεώρηση και Επίλυση Προβλημάτων Δικτύου (Network Optimization, Audit and Troubleshooting): Σε αυτή την περίπτωση εκτελούνται μετρήσεις για την διερεύνηση συγκεκριμένων προβλημάτων κατά τις φάσεις ανάπτυξης (roll-out) νέων ή υφιστάμενων δικτύων ή την παρατήρηση συγκεκριμένων προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά την φάση λειτουργίας στον κύκλο ζωής του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Έτσι, εντοπίζονται και διορθώνονται προβλήματα κάλυψης, ελλιπούς παραμετροποίησης (missing neighbor cell assignments) ή χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων [88].

Μέρος	Περιγραφή
ETSI TS 102 250-1 [89]	Καθορισμός των κριτηρίων QoS
ETSI TS 102 250-2 [90]	Καθορισμός και υπολογισμός των παραμέτρων QoS
ETSI TS 102 250-3 [91]	Τυπικές διαδικασίες για εξοπλισμό μέτρησης QoS
ETSI TS 102 250-4 [92]	Απαιτήσεις εξοπλισμού μέτρησης QoS
ETSI TS 102 250-5 [93]	Καθορισμός σεναρίων μετρήσης
ETSI TS 102 250-6 [94]	Μέθοδοι μετεπεξεργασίας και στατιστικής ανάλυσης
ETSI TS 102 250-7 [95]	Μετρήσεις QoS βασισμένες στο δίκτυο

Πίνακας 5.1: Οικογένεια τεχνικών προδιαγραφών ETSI TS 102 250 επί θεμάτων ποιότητας για δημοφιλείς υπηρεσίες σε GSM και UMTS δίκτυα.

3. Παρακολούθηση Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS Monitoring): Οι μετρήσεις αυτές διεξάγονται για την καταγραφή της ποιότητας υπηρεσιών από ειδικό εξοπλισμό ο οποίος συνήθως διαθέτει απομακρυσμένο έλεγχο, έχει κατανημημένη αρχιτεκτονική και εγκαθίσταται σε οχήματα (π.χ. λεωφορεία, ταξί κλπ) για την συνεχή ή περιοδική καταγραφή της ποιότητας υπηρεσιών όπως γίνεται αντιληπτή από τον τελικό χρήστη.

Ο ευρωπαϊκός οργανισμός ETSI έχει προτυποποιήσει τις διαδικασίες για την μέτρηση και αξιολόγηση της ποιότητας υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών με την ομάδα τεχνικών προδιαγραφών ETSI TS 102 250; Parts 1-7 όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

5.1 Αντικειμενικοί και Συγκρίσιμοι Δείκτες Ποιότητας Υπηρεσιών

Οι σημαντικοί δείκτες ποιότητας που μετρώνται και παρουσιάζονται για τις υπηρεσίες δικτύων κινητών επικοινωνιών είναι οι ακόλουθοι:

- Δείκτες ανεξάρτητοι της υπηρεσίας
 1. Διαθεσιμότητα δικτύου - ραδιοκάλυψη.
- Δείκτες υπηρεσίας τηλεφωνίας
 1. Πιθανότητα εμπλοκής κλήσης τηλεφωνίας.
 2. Πιθανότητα διακοπής κλήσης τηλεφωνίας.
 3. Ποιότητα τηλεφωνίας.
 4. Χρόνος αποκατάστασης κλήσης φωνής.

- Δείκτες υπηρεσίας βιντεοτηλεφωνίας
 1. Πιθανότητα εμπλοκής κλήσης βιντεοτηλεφωνίας.
 2. Πιθανότητα διακοπής κλήσης βιντεοτηλεφωνίας.
 3. Ποιότητα φωνής βιντεοτηλεφωνίας.
 4. Ποιότητα βίντεο βιντεοτηλεφωνίας.
 5. Χρόνος αποκατάστασης κλήσης βιντεοτηλεφωνίας.

- Δείκτες ευρυζωνικών υπηρεσιών δεδομένων
 1. Πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων *http*.
 2. Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων *http*.
 3. Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων *ftp upload*.
 4. Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων *ftp download*.

5.1.1 Διαθεσιμότητα Δικτύου - Ραδιοκάλυψη

Ραδιοκάλυψη μιας γεωγραφικής περιοχής από ένα δίκτυο έχουμε όταν το επίπεδο της έντασης του πεδίου στην εν λόγω περιοχή είναι ίσο ή μεγαλύτερο από μία συγκεκριμένη τιμή (κατώφλι), η οποία εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ κινητού τελικού χρήστη και του δικτύου. Η συγκεκριμένη τιμή (κατώφλι) εξαρτάται από τον τύπο του δικτύου κινητών υπηρεσιών.

Ο δείκτης ποιότητας *Διαθεσιμότητα Δικτύου* ή *Ραδιοκάλυψη* – *Network availability / Radio coverage* δηλώνει τη γεωγραφική κάλυψη για την παροχή οποιασδήποτε υπηρεσίας μέσω ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών σε πανελλαδική κλίμακα. Εκφράζεται με ποσοστό με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων και ορίζεται ως το πηλίκο του πλήθους των σημείων μέτρησης στα οποία υπάρχει ραδιοκάλυψη προς το συνολικό αριθμό των σημείων μέτρησης. Επίσης, εκφράζεται με έναν από τους ακόλουθους όρους κατηγοριών ποιότητας ραδιοκάλυψης: *καλή*, *αποδεκτή*, *κακή* και *δεν υπάρχει*, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2. Τα όρια ραδιοκάλυψης (κατώφλι) ανά δίκτυο κινητών είναι τα εξής:

- Σύστημα GSM/DCS1800: $R_x Lev \geq -100dBm$,
- Σύστημα UMTS: $CPICH - RSCP \geq -115dBm$.

Ο υπολογισμός του γίνεται μέσω μετρήσεων στο πεδίο με σαρωτή (scanner). Οι διαδρομές που ακολουθούνται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων καθορίζονται

Χαρακτηρισμός Ραδιοκάλυψης	Σύστημα GSM/DCS1800 $R_xLev(dBm)$	Σύστημα UMTS $CPICH - RSCP(dBm)$
Καλή	$-85 \leq R_xLev$	$-95 \leq CPICH - RSCP$
Αποδεκτή	$-95 \leq R_xLev < -85$	$-105 \leq CPICH - RSCP < -95$
Κακή	$-110 \leq R_xLev < -95$	$-115 \leq CPICH - RSCP < -105$
Δεν υπάρχει	$R_xLev < -110$	$CPICH - RSCP < -115$

Πίνακας 5.2: Χαρακτηρισμός ραδιοκάλυψης σε GSM/DCS1800 και UMTS δίκτυα.

ώστε να καλύπτουν αντιπροσωπευτικά όλες τις κατηγορίες περιβάλλοντος. Οι εξωτερικές παρεμβολές, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τη ραδιοκάλυψη, πρέπει να εξεταζοούν και να επιβεβαιώνονται από την ρυθμιστική αρχή. Οι μετρήσεις στις περιοχές όπου εμφανίζονται φαινόμενα παρεμβολών είτε εξαιρούνται από το δείγμα είτε πραγματοποιούνται μετά τη λύση του προβλήματος. Η κάλυψη των επίγειων κινητών υπηρεσιών μετράται σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές που αντιμετωπίζει ο τελικός χρήστης. Η ένταση πεδίου καταγράφεται κατά τη διαδρομή που διανύει το όχημα μέτρησης με επαρκή ανάλυση, ώστε να πραγματοποιούνται αποδεκτές μετρήσεις για τη συμπεριφορά της. Λαμβάνεται μεγάλος αριθμός δειγμάτων κατά την μέτρηση στη μονάδα του χρόνου, ώστε να μπορούν να προκύψουν οι μέγιστες και οι μέσες τιμές της έντασης πεδίου, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα και συστάσεις καθώς και τη διεθνή πρακτική. Για την καλύτερη αποτύπωση της ραδιοκάλυψης, οι διαδρομές μέτρησης επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εμπεριέχονται οι αλλαγές στην ένταση του πεδίου καθώς και φαινόμενα πολυδιαδρομικής (multipath) μετάδοσης. Η μέτρηση αφορά μόνο στην καθοδική ζεύξη (down link) των δικτύων. Για λόγους αμεροληψίας και αντικειμενικότητας οι μετρήσεις της ραδιοκάλυψης γίνονται ταυτόχρονα για δίκτυα της ίδιας κατηγορίας.

Βασικό τμήμα της διάταξης μέτρησης του εξοπλισμού είναι ο γρήγορος σαρωτής συχροτήτων (fast frequency scanner). Η συσκευή αυτή που είναι συγχρονισμένη με τον δέκτη GPS, καταγράφει τους σημαντικούς δείκτες λήψης σήματος και ποιότητας σήματος για όλα τα διαθέσιμα εμπορικά δίκτυα. Οι δείκτες αυτοί παρουσιάζονται στις παρακάτω υποενότητες.

Χαρακτηρισμός κάλυψης GSM ραδιοδικτύων

Οι πιο σημαντικοί παράμετροι ραδιοκάλυψης του GSM είναι η λαμβανόμενη στάθμη σήματος RxLev (Received Level) βασισμένη στην ένταση του πεδίου της κυψέλης και η ποιότητα λήψης RxQual (Received Quality), βασισμένη στον ρυθμό λαθών BER (Bit Error Rate). Αν και οι παράμετροι RxLev και RxQual είναι γενικοί όροι, οι παράμετροι RxLevFull και RxLevSub καθώς και οι RxQualFull και RxQualSub μπορούν να μετρηθούν.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Οι μετρήσεις μπορούν να εκτελεστούν σε κάθε SACCH (Slow Associated Control Channel) πολυπλαίσιο, το οποίο είναι 104 TDMA πλαίσια (480 ms) για κάθε κανάλι TCH (Traffic Channel) και 102 TDMA πλαίσια (470.8 ms) για ένα κανάλι SDCCH (Stand-alone Dedicated Control Channel). Το RxLevFull και RxQualFull μετρώνται για ένα πλήρες σύνολο TDMA πλαισίων το οποίο αποτελείται είτε από 100 (π.χ. 104 - 4 idle) πλαίσια για ένα full-rate TCH ή από 52 πλαίσια για ένα half-rate TCH.

Οι παράμετροι RxLevSub και RxQualSub μετρώνται για ένα υποσύνολο των 4 SACCH πλαισίων και για τα SID (System Identification) TDMA πλαίσια /L2 πληρωμένα πλαίσια (fill frames).

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι RxLevSub και RxQualSub είναι οι πιο κατάλληλη για την αξιολόγηση της κάλυψης. Μια λεπτομερής μεθοδολογία μετρήσεων ραδιοκάλυψης GSM ραδιοδικτύων παρουσιάζεται στην έκθεση ECC Report 118 [96].

Χαρακτηρισμός κάλυψης UMTS ραδιοδικτύων

Η ραδιοκάλυψη μιας UMTS κυψέλης καθορίζεται ικανοποιητικά από το κανάλι CPICH (Common Pilot Channel). Το σήμα του καναλιού CPICH χρησιμοποιείται από το UE για την εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού, την επιλογή και την επανέπιλογή κυψέλης (cell selection/re-selection) καθώς και για την αξιολόγηση των διαπομπών (HOs, Hand-Overs). Οι πιο σημαντικοί και χρήσιμοι δείκτες CPICH ραδιοκάλυψης είναι από την πλευρά του UE το CPICH RSCP (Received Signal Code Power) και το CPICH E_c/I_0 .

Το RSCP (dBm) είναι η μετρούμενη ένταση του πεδίου και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των HOs, έλεγχος ισχύος ανοιχτού βρόχου στο downlink (DL) και uplink (UL), καθώς και για την εκτίμηση των απωλειών διάδοσης. Το E_c/I_0 (dB) είναι ο λόγος της λαμβανόμενης ενέργειας ανά chip για το CPICH προς την συνολική φασματική πυκνότητα της λαμβανόμενης ισχύος (I_0) στον σύνδεσμο της κεραίας του δέκτη και συνήθως αναφέρεται ως CIR (Carrier-to-Interference Ratio). Το E_c/I_0 είναι σημαντική μέτρηση και χρησιμοποιείται ευρέως στην επιλογή και επανεπιλογή κυψέλης καθώς και την αξιολόγηση διαπομπής. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει παρουσία παρεμβολής, η στάθμη παρεμβολής είναι ίση με το επίπεδο θορύβου (N_0). Η παρουσία υψηλών επιπέδων παρεμβολής προερχόμενης από γειτονικούς σταθμούς βάσης καλείται pilot pollution.

Τελικά, το RSSI (Received Signal Strength Indicator) είναι η παράμετρος που λαμβάνει υπόψη μαζί RSCP και E_c/I_0 . Οι παράμετροι RSCP, E_c/I_0 και RSSI, μπορούν να μετρηθούν μόνο στην περιοχή του κώδικα (code).

$$RSSI[dBm] = RSCP[dBm] - E_c/I_0[dB] \quad (5.1)$$

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Η τεχνική έκθεση ECC Report 103 [97] παρουσιάζει λεπτομερώς την μεθοδολογία μετρήσεων της ραδιοκάλυψης UMTS.

Χαρακτηρισμός κάλυψης LTE ραδιοδικτύων

Υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ LTE και UMTS στον χαρακτηρισμό ραδιοκάλυψης παρ'ότι το γεγονός ότι οι τιμές μετρώνται με τελείως διαφορετικό τρόπο εξαιτίας της διαφορετικής τεχνολογίας (OFDMA έναντι WCDMA). Στα προηγμένα ραδιοδίκτυα LTE καθορίζονται δυο βασικοί παράμετροι αξιολόγησης της ραδιοκάλυψης: το RSRP (Reference Signal Received Power) και το RSRQ (Reference Signal Received Quality).

Η παράμετρος RSRP για μια κυψέλη ορίζεται ως ο γραμμικός μέσος των συνεισφορών ισχύος (σε [W]) από τα στοιχεία πηγής τα οποία φέρουν σήματα αναφοράς μιας συγκεκριμένης κυψέλης εντός ενός εύρους ζώνης συχνοτήτων μέτρησης. Για τον καθορισμό του RSRP λαμβάνονται υπόψη τα σήματα αναφοράς της συγκεκριμένης κυψέλης R_0 και αν είναι διαθέσιμα τα R_1 σύμφωνα με το πρότυπο ETSI TS 136 213 [98] τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αν χρησιμοποιηθεί διαφορεική λήψη από το UE, οι τιμές μέτρησης μπορεί να είναι ισοδύναμες με τον γραμμικό μέσο των τιμών ισχύος όλων των διαφορεικών κλάδων.

Ο δείκτης E-UTRA Carrier RSSI (Received Signal Strength Indicator), περιέχει την συνολική λαμβανόμενη ευρυζωνική ισχύ όλων των πόρων που μετρώνται από το UE, συμπεριλαμβάνοντας κυψέλες που συνυπηρετούν και μη, παρεμβολή γειτονικού καναλιού, θερμικό θόρυβο κτλ.

Ο δείκτης RSRQ (Reference Signal Received Quality) ορίζεται ως ο λόγος:

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{E - UTRA Carrier RSSI} \quad (5.2)$$

όπου N είναι το πλήθος των RBs (Radio Blocks) του μετρούμενου εύρους ζώνης του E-UTRA carrier RSSI. Οι μετρήσεις στον αριθμητή και παρονομαστή θα πρέπει να γίνονται επί του ίδιου συνόλου RB's.

Δείκτες θεωρητικής ραδιοκάλυψης

Δείκτης θεωρητικής κάλυψης περιοχής $i_{th,ter}$, ορίζεται από την σύγκριση της θεωρητικής, $D_{cov,ter}$, και της αντικειμενικής, $obj_{cov,ter}$, κάλυψης μιας περιοχής (territory):

$$i_{th,ter} = \frac{D_{cov,ter}}{obj_{cov,ter}} \quad (5.3)$$

Δείκτης θεωρητικής πληθυσμιακής κάλυψης $i_{th,pop}$, ορίζεται από την σύγκριση της θεωρητικής, $D_{cov,pop}$, και της αντικειμενικής, $obj_{cov,pop}$, κάλυψης πληθυσμού (population):

$$i_{th,pop} = \frac{D_{cov,pop}}{obj_{cov,pop}} \quad (5.4)$$

Δείκτης θεωρητικής πληθυσμιακής αυτοκινητόδρομων $i_{th,hw}$, ορίζεται από την σύγκριση της θεωρητικής, $D_{cov,hw}$, και της αντικειμενικής, $obj_{cov,hw}$, κάλυψης αυτοκινητόδρομων (highways):

$$i_{th,hw} = \frac{D_{cov,hw}}{obj_{cov,hw}} \quad (5.5)$$

Αξιολόγηση των μετρήσεων κατά μήκος μιας διαδρομής

Αν $P_{mes,ter,dt}$ είναι το ποσοστό κάλυψης μιας περιοχής κατά μήκος μιας διαδρομής (dt, drive-test) σύμφωνα με τις μετρήσεις, και $P_{th,ter,dt}$ το ποσοστό θεωρητικής κάλυψης αντίστοιχα, τότε ο δείκτης κάλυψης δίδεται από την σχέση:

$$i_{mes,ter,dt} = \frac{P_{mes,ter,dt}}{0.95 \times P_{th,ter,dt}} \quad (5.6)$$

όπου ο συντελεστής 0.95 εισάγεται για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες των μετρήσεων.

Ο δείκτης κάλυψης για όλες τις διαδρομές μετρήσεων μιας περιοχής (territory) υπολογίζεται από όλους τους δείκτες των επιμέρους διαδρομων λαμβάνοντας υπόψη έναν παράγοντα βάρους αναλογικά με το μήκος l_{dt} των διαδρομών:

$$i_{mes,ter} = \sum_{drive-tests} \frac{l_{dt}}{\sum_{drive-tests} l_{dt}} \times i_{mes,ter,dt} \quad (5.7)$$

Ομοίως, για την περίπτωση των αυτοκινητόδρομων υπολογίζονται ο δείκτης κάλυψης για μια διαδρομή μέτρησης, $i_{mes,hw,dt}$, και ολόκληρου του αυτοκινητόδρομου, $i_{mes,hw}$:

$$i_{mes,hw,dt} = \frac{P_{mes,hw,dt}}{0.95 \times P_{th,hw,dt}} \quad (5.8)$$

$$i_{mes,hw} = \sum_{drive-tests} \frac{l_{dt}}{\sum_{drive-tests} l_{dt}} \times i_{mes,hw,dt} \quad (5.9)$$

5.1.2 Πιθανότητα εμπλοκής κλήσης

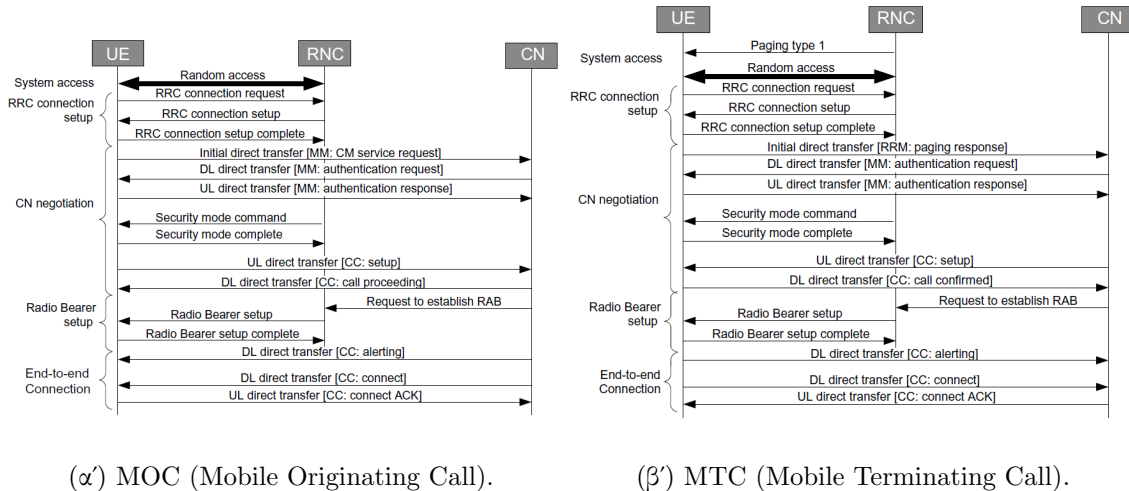
Ο δείκτης ποιότητας *Πιθανότητα εμπλοκής κλήσης – Access Failure Rate (AFR)* αφορά στην εμπλοκή κλήσεων τηλεφωνίας (αντίστοιχα βιντεοτηλεφωνίας) σε ένα δίκτυο κινητών επικοινωνιών και χαρακτηρίζει την προσβασιμότητα (accessibility) στην υπηρεσία τηλεφωνίας (αντίστοιχα βιντεοτηλεφωνίας) του δικτύου. Εκφράζεται με ποσοστό με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων και ορίζεται ως το πηλίκο του πλήθους των κλήσεων φωνής στις οποίες παρουσιάστηκε εμπλοκή προς το συνολικό αριθμό των κλήσεων φωνής που πραγματοποιήθηκαν.

Για τον υπολογισμό του δείκτη λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Ο υπολογισμός του γίνεται μέσω μετρήσεων στο πεδίο με κινητό σταθμό, οι οποίες εκτελούνται ταυτόχρονα με αυτές του δείκτη ραδιοκάλυψης
- Οι κλήσεις πραγματοποιούνται στο διάστημα 08:00 με 20:00. Οι δοκιμές δεν πραγματοποιούνται σε γεωγραφικές περιοχές όπου επικρατούν ακραίες τηλεπικοινωνιακές συνθήκες, όπως συγκεντρώσεις, φυσικές καταστροφές κ.λ.π.
- Οι κλήσεις λαμβάνονται υπόψη εφόσον υπάρχει ραδιοκάλυψη (διαθεσιμότητα δικτύου (availability)) στο σημείο που έχουν πραγματοποιηθεί.
- Το χρονικό περιθώριο στο οποίο ολοκληρώνεται μία κλήση ορίζεται για δίκτυα GSM/DCS1800 και UMTS στα πρότυπα του ETSI TS 102 250-2 και TS 102 250-5.
- Ο ελάχιστος χρόνος αναμονής μεταξύ δύο κλήσεων είναι είκοσι (20) έως τριάντα (30) δευτερόλεπτα για τα δίκτυα GSM/DCS1800 και UMTS.
- Το χρονικό περιθώριο ολοκλήρωσης μια κλήσης παραμένει σταθερό στη διάρκεια των μετρήσεων. Στην περίπτωση που μια κλήση αποτύχει ή διακοπεί βεβαιωμένα από το δίκτυο, η επόμενη προσπάθεια ξεκινά με το πέρας του σταθερού χρονικού περιθωρίου που ορίζεται παραπάνω.
- Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων τηρείται η ακόλουθη σειρά ενεργειών:
 1. Πραγματοποίηση κλήσης.
 2. Διατήρηση της κλήσης.
 3. Τερματισμός κλήσης.
 4. Αναμονή μέχρι την επόμενη κλήση.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζουν την πιθανότητα εμπλοκής κλήσης φωνής καθώς και την πιθανότητα πρόσβασης (Call Setup Success Rate, CSSR) που προκύπτει εάν από τη μονάδα αφαιρεθεί πιθανότητα εμπλοκής κλήσης. Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαγράμματα γεγονότων της τηλεφωνικής κλήσης UMTS στην περίπτωση (α') MOC (Mobile Originating Call) και (β') MTC (Mobile Terminating Call).



Σχήμα 5.1: Διαγράμματα γεγονότων της τηλεφωνικής κλήσης UMTS όταν η κλήση (α') εκτελείται (MOC), και όταν (β') τερματίζεται (MTC) από τον κινητό σταθμό.

5.1.3 Πιθανότητα διακοπής κλήσης

Η Πιθανότητα διακοπής κλήσης – *Call Drop Rate (CDR)* αφορά στην πιθανότητα τερματισμού μιας επιτυχημένης προσπάθειας κλήσης φωνής για οποιοδήποτε λόγο εκτός από τον σκόπιμο τερματισμό του καλούντος ή του καλούμενου.

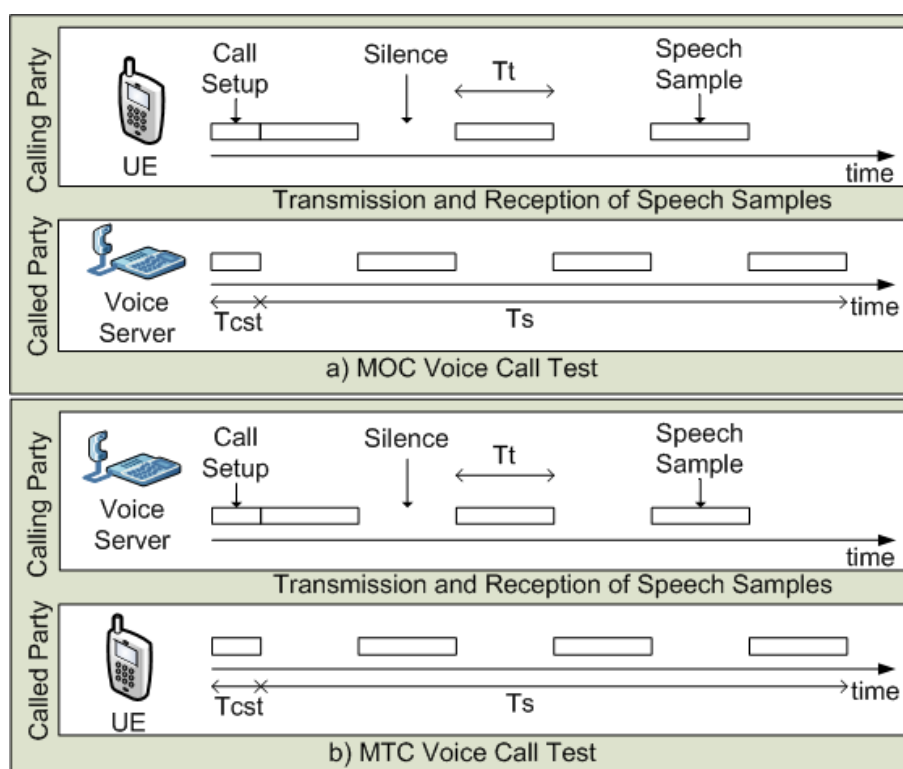
Ο δείκτης εκφράζεται με ποσοστό με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων και ορίζεται ως το πηλίκο του πλήθους των επιτυχημένων κλήσεων φωνής που τερματίστηκαν για οποιοδήποτε λόγο εκτός από τον σκόπιμο τερματισμό του καλούντος ή του καλούμενου, προς το συνολικό πλήθος των κλήσεων που εγκαταστάθηκαν επιτυχώς. Οι κλήσεις λαμβάνονται υπόψη εφόσον υπάρχει ραδιοκάλυψη (διαθεσιμότητα δικτύου) στο σημείο που έχουν πραγματοποιηθεί.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζουν την πιθανότητα διακοπής κλήσης φωνής καθώς και την πιθανότητα διατήρησης (*retainability*) της κλήσης φωνής που προκύπτει εάν από τη μονάδα αφαιρεθεί η πιθανότητα διακοπής κλήσης.

5.1.4 Ποιότητα φωνής

Η Ποιότητα φωνής – *Speech/Listening Quality (SQ/LQ)* αποτελεί τον δείκτη ποιότητας μετάδοσης από άκρο σε άκρο της φωνής της υπηρεσίας κινητής τηλεφωνίας (καθώς και της βιντεοτηλεφωνίας). Ο υπολογισμός του δείκτη πραγματοποιείται με βάση αλγορίθμους και παραμέτρους που προδιαγράφονται σε σχετικές συστάσεις της ITU-T καθώς και τεχνιών προδιαγραφών του ETSI και βασίζεται σε ολοκληρωμένες κλήσεις, δηλαδή κλήσεις στις οποίες ο τερματισμός τους έγινε από την διάταξη τερματισμού. Η μέτρηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη διακοπής κλήσης προσθέτοντας την ανάλογη λειτουργική μονάδα καταγραφής στην αρχιτεκτονική της μετρητικής διάταξης.

Είναι δυνατόν να υπολογίζεται γενικά δείκτης για όλες τις κλήσεις, καθώς επίσης και μερικά, δηλαδή ανά κατεύθυνση (downlink/uplink). Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η δομή μιας τηλεφωνικής κλήσης δοκιμής.



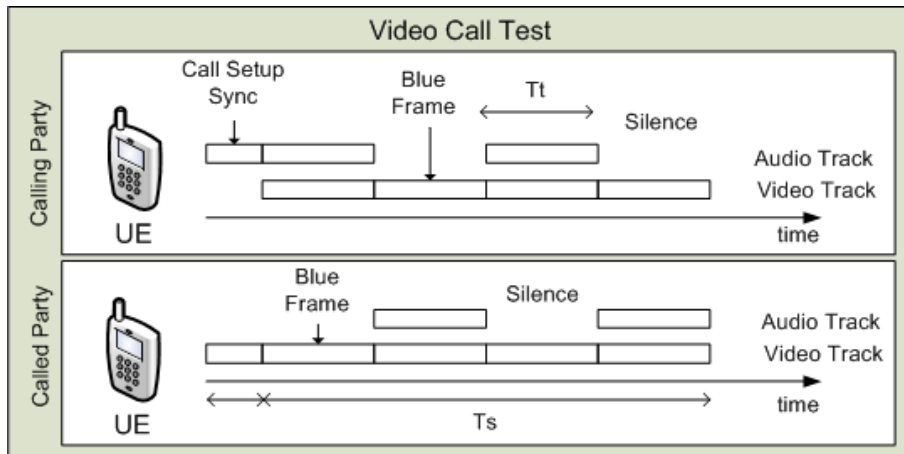
Σχήμα 5.2: Η δομή μιας τηλεφωνικής κλήσης δοκιμής.

5.1.5 Ποιότητα βίντεο

Η Ποιότητα βίντεο – *Video Quality (VQ)* αποτελεί τον δείκτη ποιότητας μετάδοσης από άκρο σε άκρο του βίντεο της υπηρεσίας κινητής βιντεοτηλεφωνίας. Ο υπολογισμός του δείκτη πραγματοποιείται με βάση αλγορίθμους και παραμέτρους που προδιαγράφονται

σε σχετικές συστάσεις της ITU-T καθώς και τεχνιών προδιαγραφών του ETSI και βασίζεται σε ολοκληρωμένες κλήσεις, δηλαδή κλήσεις στις οποίες ο τερματισμός τους έγινε από την διάταξη τερματισμού. Η μέτρηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη διακοπής κλήσης προσθέτοντας την ανάλογη λειτουργική μονάδα καταγραφής στην αρχιτεκτονική της μετρητικής διάταξης.

Είναι δυνατόν να υπολογίζεται γενικά δείκτης για όλες τις κλήσεις, καθώς επίσης και μερικά, δηλαδή ανά κατεύθυνση (downlink/uplink). Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η δομή μιας βιντεο-τηλεφωνικής κλήσης δοκιμής.



Σχήμα 5.3: Η δομή μιας βιντεο-τηλεφωνικής κλήσης δοκιμής.

5.1.6 Χρόνος αποκατάστασης κλήσης φωνής

Ο δείκτης Χρόνος αποκατάστασης κλήσης – *Call Setup Time* εκφράζει το χρόνο στον οποίο αποκαθίσταται η κλήση φωνής από τη στιγμή που ο τελικός χρήστης συμπληρώνει τον αριθμό του καλούμενου συνδρομητή. Ο δείκτης εκφράζεται σε δευτερόλεπτα με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων και ορίζεται ως ο χρόνος από τη συμπλήρωση από τον καλούντα της πληροφορίας διεύθυνσης, δηλαδή του αριθμού τηλεφώνου του καλούμενου, μέχρι τη λήψη ειδοποίησης εγκατάστασης κλήσης φωνής.

Η μεθοδολογία, η υλοποίηση και οι μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για το δείκτη εμπλοκής κλήσης. Κατά τον υπολογισμό του δείκτη εξαιρούνται οι κλήσεις για τις οποίες υπάρχει εμπλοκή κλήσης.

5.1.7 Πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων http

Ο δείκτης Πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων *http* εκφράζει την πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα Δt_a με βάση

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

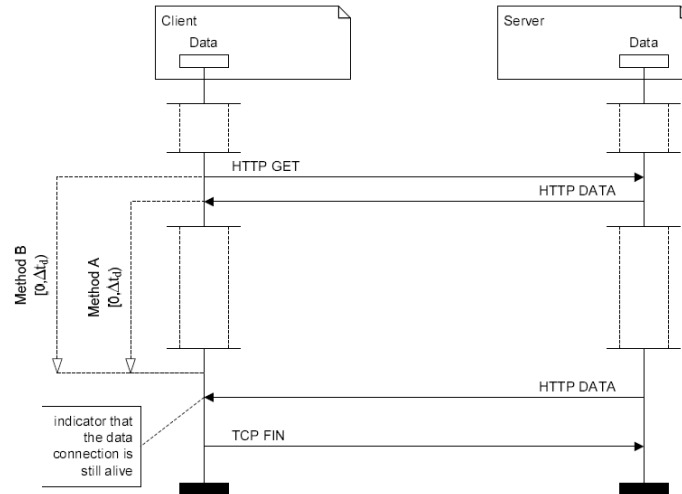
το πρωτόκολλο http. Ο δείκτης εκφράζεται με ποσοστό με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων και ορίζεται ως το πηλίκο του πλήθους των ανεπιτυχών προσπαθειών μεταφοράς δεδομένων σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα Δt_d με βάση το πρωτόκολλο http ως προς το συνολικό αριθμό επιτυχώς αρχικοποιημένων προσπαθειών.

Ο δείκτης καθορίζεται με βάση την τεχνική αναφορά ETSI TR 102 678 [99] και για τον υπολογισμό του λαμβάνονται υπόψη ιδίως τα ακόλουθα:

1. Οι μετρήσεις γίνονται ταυτόχρονα για όλα τα δίκτυα.
2. Ο εξυπηρετητής (server) είναι εγκατεστημένος στον κόμβο ουδέτερης διασύνδεσης. Θα γίνονται περιοδικοί έλεγχοι διαθεσιμότητας του server ή περιοδικοί έλεγχοι του χρόνου πρόσβασης στον server.
3. Ο πλοηγός (web browser) στο τερματικό του τελικού χρήστη που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις είναι κοινός για όλες τις μετρήσεις.
4. Ο τύπος του τερματικού του τελικού χρήστη είναι συγκεκριμένος τόσο όσον αφορά το λογισμικό (software) όσο και το υλικό (hardware) και κοινός για όλες τις μετρήσεις. Το τερματικό μπορεί να είναι είτε φορητός υπολογιστής εφοδιασμένος με κατάλληλο υλικό και λογισμικό για πρόσβαση στο δίκτυο τρίτης γενιάς, είτε τερματικό τρίτης γενιάς το οποίο να υποστηρίζει το πρωτόκολλο http.
5. Η ιστοσελίδα αναφοράς είναι κοινή για τις μετρήσεις σε όλα τα υπό εξέταση δίκτυα. Η ιστοσελίδα αναφοράς καθορίζεται με βάση το πρότυπο ETSI TR 102 505 [100]. Οι μετρήσεις αφορούν την κατεύθυνση λήψης δεδομένων (download).
6. Οι μετρήσεις γίνονται σε σταθερό σημείο εξασφαλισμένης κάλυψης ραδιοδικτύου καθώς και εν κινήσει σε συμφωνημένες διαδρομές.
7. Εξασφάλιση του ελάχιστου απαιτούμενου εύρους ζώνης σύνδεσης του εξυπηρετητή (server) με τα δίκτυα των παρόχων ανάλογα του μεγέθους των αρχείων δοκιμής.

5.1.8 Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων http

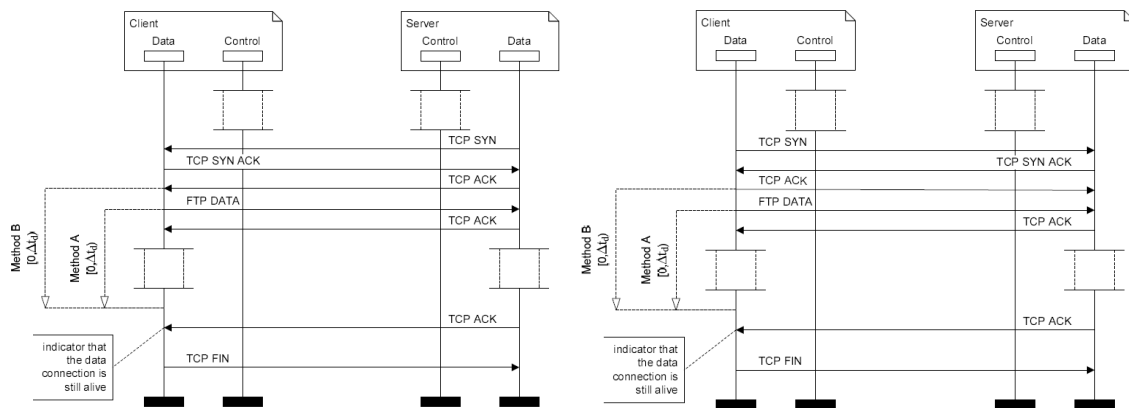
Ο δείκτης *Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων http* εκφράζει τον μέσο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα Δt_d με βάση το πρωτόκολλο http μετά την επιτυχημένη αποκατάσταση σύνδεσης δεδομένων. Ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου των δεδομένων που μεταφέρθηκαν προς το χρονικό διάστημα Δt_d και μετράται σε *Kbit/s* σε ακέραιες τιμές.



Σχήμα 5.4: Διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας http.

5.1.9 Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ftp upload

Ο δείκτης Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ftp upload εκφράζει τον μέσο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα Δt_d με βάση το πρωτόκολλο ftp, μετά την επιτυχημένη αποκατάσταση σύνδεσης δεδομένων. Ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου των δεδομένων που μεταφέρθηκαν προς το χρονικό διάστημα Δt_d και μετράται σε *Kbit/s* σε ακέραιες τιμές. Στο Σχήμα 5.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας ftp upload στην περίπτωση (α') active και (β') passive mode.



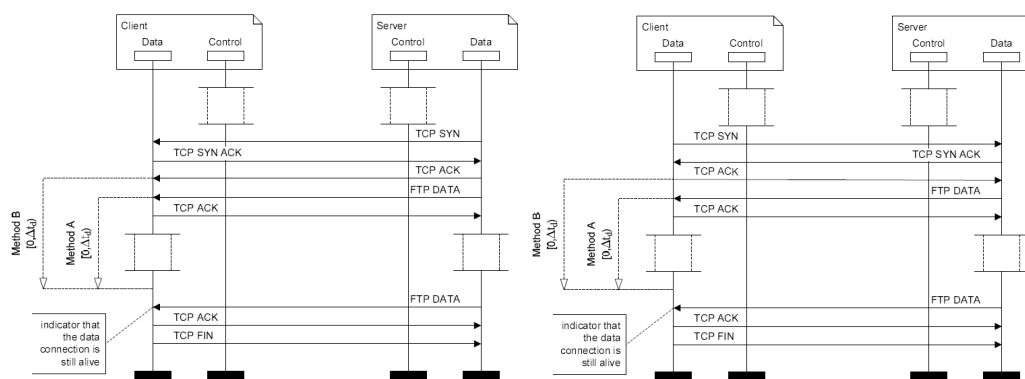
(α') Άνω ζεύξη (UL) (active mode).

(β') Άνω ζεύξη (UL) (passive model)

Σχήμα 5.5: Διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας ftp upload.

5.1.10 Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ftp download

Ο δείκτης *Μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ftp download* εκφράζει τον μέσο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα Δt_d με βάση το πρωτόκολλο ftp, μετά την επιτυχημένη αποκατάσταση σύνδεσης δεδομένων. Ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου των δεδομένων που μεταφέρθηκαν προς το χρονικό διάστημα Δt_d και μετράται σε *Kbit/s* σε ακέραιες τιμές. Στο Σχήμα 5.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας ftp download στην περίπτωση (α') active και (β') passive mode.



(α') Κάτω ζεύξη (DL) (active mode).

(β') Κάτω ζεύξη (DL) (passive mode)

Σχήμα 5.6: Διαγράμματα γεγονότων της υπηρεσίας ftp download.

5.2 Κριτήρια Παρεμβολών σε Δίκτυα Ασύρματης Πρόσβασης

5.2.1 Παρεμβολές σε δίκτυα τεχνολογίας GSM/DCS1800

Η ύπαρξη εξωτερικών παρεμβολών στην τεχνολογία GSM/DCS1800 και κατά πόσο αυτές επηρεάζουν τις προσφερόμενες υπηρεσίες, μπορεί να καθοριστεί βάσει στατιστικών δεικτών αλλά και φασματικής καταγραφής. Η Τεχνική Έκθεση που πρέπει να συντάξει ένας πάροχος υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών τεχνολογίας GSM/DCS1800, περιλαμβάνει τις κάτωθι ενότητες:

Συνθήκη Πιστοποίησης Παρεμβολών

Για την πιστοποίηση υπαρκτού προβλήματος στην προσφερόμενη υπηρεσία λόγω εξωτερικών παρεμβολών απαιτείται ταυτόχρονα με το κριτήριο των Idle Channel μετρήσεων

να ικανοποιούνται τουλάχιστον δύο εκ των υπολοίπων τεσσάρων (Traffic, Dropped Call Rate, Control Channel Drop Rate & Uplink Quality Handovers).

Αναλυτικά, οι ορισμοί και οι συνθήκες υπολογισμού των κριτηρίων είναι:

Idle Channel Measurements αφορά τις μετρήσεις έντασης ισχύος στα μη κατειλημμένα κανάλια της κυψέλης. Εάν το 20% των δειγμάτων (κατά τη διάρκεια μιας ώρας τουλάχιστον) είναι ισχυρότερο από $-104dBm$, θεωρείται ότι υπάρχουν παρεμβολές. Σε περίπτωση που αυτές προϋπήρχαν, εξετάζεται αν κατά την περίοδο ενδιαφέροντος το προαναφερθέν ποσοστό ήταν αυξημένο σε σχέση με τη μέση τιμή των τριάντα προηγούμενων ημερών κατά τουλάχιστον 50%.

Traffic αφορά την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Εάν η τιμή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης κατά την πιο απασχολημένη ώρα, μειωθεί σε σχέση με τη αντίστοιχη μέση τιμή των προηγούμενων δεκαπέντε ημερών, με την παρουσία παρεμβολών, κατά ένα ποσοστό της τάξης του 50%, θεωρείται ότι αυτές έχουν σοβαρή επίπτωση στην προ. σφερόμενη υπηρεσία. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες μείωσης αυτού του δείκτη.

Dropped Call Rate αφορά το ποσοστό κλήσεων που διεκόπησαν ακούσια. Εάν αυτό αυξηθεί σε σχέση με τη μέση τιμή των προηγούμενων τριάντα ημερών με την παρουσία παρεμβολών, θεωρείται ότι έχουν σοβαρή επίπτωση στην προσφερόμενη υπηρεσία. Ο βαθμός αύξησης θα πρέπει να σχετίζεται με την φωνητική κίνηση που εξυπηρετεί η κυψέλη ημερησίως: τουλάχιστον 100% τηλεπικοινωνιακή αύξηση μέχρι 100 Erlangs, 50% από 100 μέχρι 200 Erlangs, και 25% για κίνηση πάνω από 200 Erlangs. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες αύξησης αυτού του δείκτη.

Control Channel Drop Rate αφορά το ποσοστό διακοπής καναλιών σηματοδοσίας. Εάν η εμφάνιση παρεμβολών αυξήσει αυτό το ποσοστό τουλάχιστον κατά 50% σε σύγκριση με τη μέση τιμή των προηγούμενων τριάντα ημερών, πιστοποιούνται σοβαρές επιπτώσεις στην προσφερόμενη υπηρεσία. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες αύξησης αυτού του δείκτη.

Uplink Quality Handovers αφορά το ποσοστό handovers λόγω κακής ποιότητας στο uplink. Επηρεάζεται άμεσα και έντονα από εξωτερικές παρεμβολές. χρειάζεται αύξηση αυτού του δείκτη κατά 50% τουλάχιστον, σε σχέση με τη μέση τιμή των προηγούμενων τριάντα ημερών, για να πιστοποιηθεί αντίκτυπος στην προσφερόμενη υπηρεσία. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες αύξησης αυτού του δείκτη.

Χρονική Εμφάνιση Παρεμβολών

Ένας από τους σημαντικότερους παραμέτρους για τη σύντομη επίλυση των φαινομένων παρεμβολής είναι η καταγραφή της χρονικής διάρκειας και περιόδου εμφάνισής τους. Τα αποτελέσματα του χρονικού διαστήματος εμφάνισης της παρεμβολής αλλά και η χρονική διάρκεια αυτής θα πρέπει να αναφέρονται στην Τεχνική Έκθεση κάθε παρόχου.

Φασματική Καταγραφή Παρεμβολών

Η φασματική καταγραφή του σήματος παρεμβολής κυρίως στο IF (Intermediate Frequency) επίπεδο του συστήματος πομποδέκτη του σταθ. μού βάσης, είναι πολύ σημαντική για τη γρήγορη αναγνώριση αλλά και εντοπισμό του σημείου εκπομπής αυτού.

5.2.2 Παρεμβολές σε δίκτυα τεχνολογίας UMTS

Η ύπαρξη εξωτερικών παρεμβολών στην τεχνολογία UMTS και κατά πόσο αυτές επηρεάζουν τις προσφερόμενες υπηρεσίες, μπορεί να καθοριστεί βάσει στατιστικών δεικτών και φασματικών καταγραφών. Η Τεχνική Έκθεση που πρέπει να συντάξει ένας πάροχος υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών τεχνολογίας UMTS, περιλαμβάνει τις κάτωθι ενότητες:

Συνθήκη Πιστοποίησης Παρεμβολών

Για την πιστοποίηση υπαρκτού προβλήματος στην προσφερόμενη υπηρεσία λόγω εξωτερικών παρεμβολών απαιτείται ταυτόχρονα με το κριτήριο του RTWP (Received Total Wideband Power) να ικανοποιούνται τουλάχιστον δύο εκ των υπολοίπων τεσσάρων (Traffic, RRC Establishment Failure Rate, RRC Drop Rate & Voice Calls Drop Rate) εκ των οποίων ένα από αυτά να είναι το RSCP.

Αναλυτικά, οι ορισμοί και οι συνθήκες υπολογισμού των κριτηρίων είναι:

RTWP (Received Total Wideband Power) αφορά την μετρούμενη ισχύς στο δέκτη (φάσμα 5MHz). Για να αναγνωριστεί η ύπαρξη εξωτερικών παρεμβολών, και με δεδομένο $-105dBm$ ως στάθμη ηρεμίας, η κυψέλη πρέπει να παρουσιάζει σταθερά μέσες ωριαίες τιμές ανώτερες των $-97dBm$ κατά τις ώρες που εξυπηρετεί την ελάχιστη κίνηση (π.χ. βραδυνές ώρες).

Traffic αφορά την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Εάν η τιμή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης κατά την πιο απασχολημένη ώρα, μειωθεί σε σχέση με τη αντίστοιχη μέση τιμή των προηγούμενων δεκαπέντε ημερών, με την παρουσία παρεμβολών, κατά

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

ένα ποσοστό της τάξης του 50%, θεωρείται τότε ότι αυτές έχουν σοβαρή επίπτωση στην προσφερόμενη υπη. ρεσία. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες μείωσης αυτού του δείκτη.

RRC Establishment Failure Rate αφορά το ποσοστό αποτυχημένων καναλιών σηματοδοσίας. Εάν αυτό αυξηθεί, σε σχέση με τη μέση τιμή των προηγούμενων τριάντα ημερών, κατά τουλάχιστον 50% με την παρουσία παρεμβολών, θεωρείται τότε ότι αυτές έχουν σοβαρή επίπτωση στην ικανότητα αποκατάστασης κλήσεων της κυψέλης. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες αύξησης αυτού του δείκτη.

RRC Drop Rate αφορά ποσοστό διακοπής καναλιών σηματοδοσίας. Αφορά τις επιπτώσεις στην προσφερόμενη υπηρεσία πιστοποιούνται αν με την παρουσία παρεμβολών ο δείκτης αυτός αυξηθεί κατά τουλάχιστον 100%, συγκρινόμενος με τη μέση τιμή των προηγούμενων τριάντα ημερών. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες αύξησης αυτού του δείκτη.

Voice Calls Drop Rate αφορά το ποσοστό φωνητικών κλήσεων που διεκόπησαν ακούσια. Η εμφάνιση παρεμβολών συνοδεύεται από αύξηση αυτού του δείκτη, σε σχέση με τη μέση τιμή των τριάντα προηγούμενων ημερών, κατά τουλάχιστον 100% για κυψέλες μέσης και χαμηλής φωνητικής κίνησης (μέχρι 150 Erlangs ημερησίως), και κατά τουλάχιστον 50% για κυψέλες φέρουσες υψηλή κίνηση (πάνω από 150 Erlangs ημερησίως). Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχουν αποκλειστεί λοιποί παράγοντες αύξησης αυτού του δείκτη.

Χρονική Εμφάνιση Παρεμβολών

Ένας από τους σημαντικότερους παραμέτρους για τη σύντομη επίλυση των φαινομένων παρεμβολής είναι η καταγραφή της χρονικής διάρκειας και περιόδου εμφάνισής τους. Τα αποτελέσματα του χρονικού διαστήματος εμφάνισης της παρεμβολής αλλά και η χρονική διάρκεια αυτής θα πρέπει να αναφέρονται στην Τεχνική Έκθεση κάθε παρόχου.

Φασματική Καταγραφή Παρεμβολών

Η φασματική καταγραφή του σήματος παρεμβολής κυρίως στο IF επίπεδο του συστήματος πομποδέκτη του σταθμού βάσης, είναι πολύ σημαντική για τη γρήγορη αναγνώριση αλλά και εντοπισμό του σημείου εκπομπής αυτού.

5.3 Εργαστηριακός Εξοπλισμός Μετρήσεων

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν με τη χρήση εξοπλισμού Diversity Benchmarker, SwissQual AG [101] που διαθέτει το ΕΚΡ/ΕΜΠ¹. Ο εξοπλισμός επιτρέπει την ταυτόχρονη διεξαγωγή μετρήσεων σε περισσότερα του ενός κυψελωτά δίκτυα. Το σύστημα είναι κινητό και μπορεί είτε να τοποθετηθεί σε αυτοκινούμενο όχημα είτε να μεταφέρεται από πεζό. Η σύνδεση με το κινητό δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω κινητών τηλεφώνων που προσφέρουν πρόσβαση σε εσωτερικές παραμέτρους του δικτύου. Το σύστημα αυτό διενεργεί κλήσεις, καταγράφει παραμέτρους των κυψελωτών δικτύων, μετρά την ποιότητα φωνής χρησιμοποιώντας έναν εξυπηρετητή φωνής / αυτόματο τηλεφωνητή (voice server) όπως επίσης και την ποιότητα υπηρεσιών διαδικτύου όπως μεταφορά δεδομένων/αρχείων, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, και βίντεο χρησιμοποιώντας τον εξυπηρετητή πολυμέσων.

Η ποιότητα υπηρεσίας σε μετρήσεις φωνής και δεδομένων υπολογίζεται μέσω σχετικών αλγορίθμων. Ο εξοπλισμός καθιστά δυνατή την αποτίμηση του επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας και την βελτιστοποίηση του δικτύου. Είναι σχεδιασμένος τόσο για σταθερά όσο και για κινητά δίκτυα. Ο μετρητικός εξοπλισμός περιλαμβάνει μέσα συλλογής όλων των δεδομένων μέτρησης καθώς και όλων των λοιπών πληροφοριών που σχετίζονται με τις μετρήσεις σε ένα γεωγραφικό σημείο. Η διαδικασία πρόσβασης στις πληροφορίες μέτρησης εξασφαλίζει ότι οι πληροφορίες που έχουν καταγραφεί είναι αξιοποιήσιμες.

5.3.1 Υλικό Εξοπλισμού (Hardware)

Κινητό Σύστημα Μετρήσεων - Diversity Benchmarker

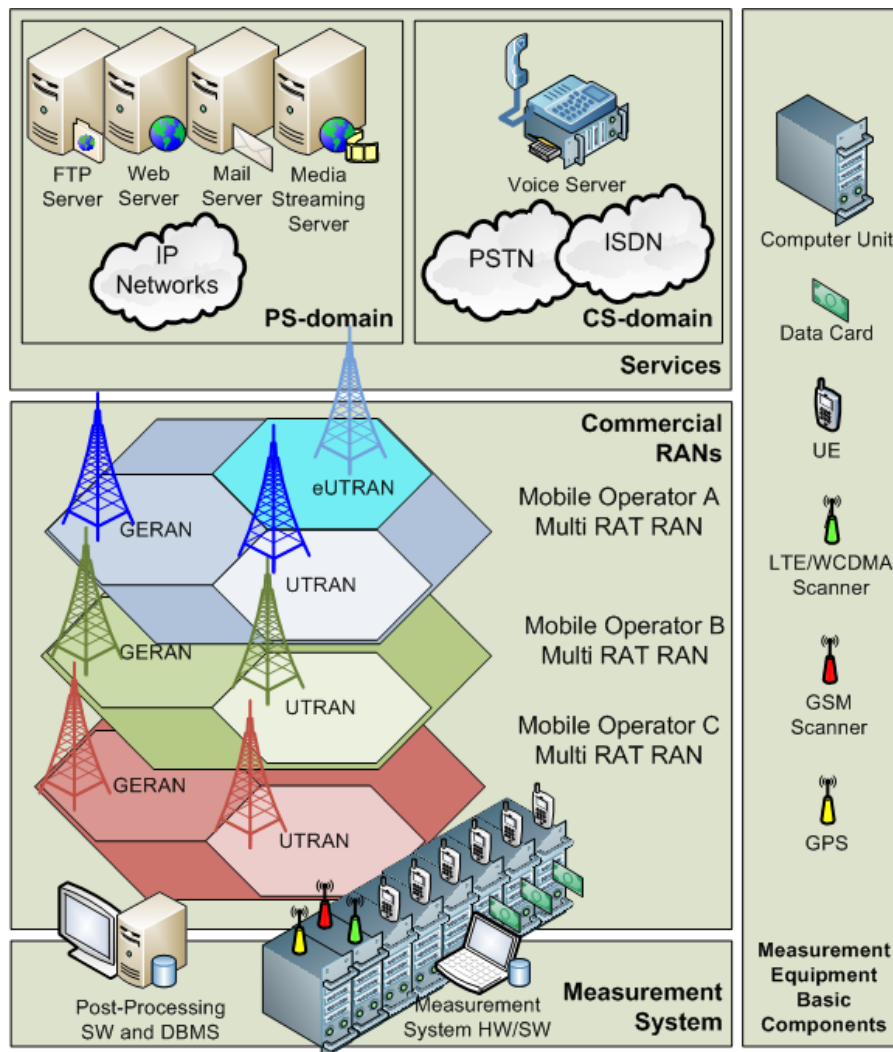
Η διάταξη της χρησιμοποιούμενης μετρητικής διάταξης ποιότητας υπηρεσιών συστημάτων κινητών επικοινωνιών είναι σύμφωνη με το πρότυπο ETSI TS 102 250-4 και περιλαμβάνει:

Σαρωτής - Fast Frequency Scanner συσκευή μέτρησης ραδιοκάλυψης των ραδιοδικτύων GSM/DCS1800/UMTS.

Κινητοί σταθμοί δοκιμής - Test Mobile Stations προσομοιώνει έναν τυπικό τελικό χρήστη. Πρόκειται για κινητά τηλέφωνα και WAN modems.

Κεραίες - Antennas εξωτερικές κεραίες λήψης ή οι κεραίες των κινητών σταθμών. Ανάλογα με τη δοκιμή, χρησιμοποιείται ή ενσωματωμένη ή εξωτερική κεραία. Σε όποια περίπτωση, η πληροφορία αυτή εμπεριέχεται στα δεδομένα αρχεία μέτρησης.

¹Ο εργαστηριακός εξοπλισμός Diversity Benchmarker, SwissQual AG, αποκτήθηκε από το Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών ΕΜΠ το έτος 2008 με χρηματοδότηση (75% συμμετοχή Ε.Ε. και 25% συμμετοχή Υπουργείου Ανάπτυξης) της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) μέσω του Προγράμματος 05ΑΚΜΩΝ95.



Σχήμα 5.7: Αρχιτεκτονική συστήματος μετρήσεων για ταυτόχρονες επί τω πεδίο μετρήσεις για την αξιολόγηση επίδοσης και benchmarking όλων των παρεχόμενων υπηρεσιών από σύγχρονα εμπορικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Η ενσωματωμένη κεραία χρησιμοποιείται για δοκιμές που πραγματοποιούνται:

1. εντός ή εκτός κτιρίου πεζά
2. στατικές μετρήσεις σε περιβάλλον γραφείου.

Οι χρησιμοποιούμενες κεραίες τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις, στις οποίες ικανοποιείται η ελάχιστη μεταξύ τους απόσταση για τη μείωση της ΡΦ επίδρασης σε αποδεκτά όρια σε αντίστοιχο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Η απώλεια ηλεκτρικής σύζευξης μεταξύ δύο κινητών σταθμών πρέπει να είναι το ελάχιστο, της τάξεως των $40.5dB$, όπως ορίζεται στο πρότυπο ETSI TS 100 910 [102]. Εξωτερικές κεραίες χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις με οχήματα (π.χ. αυτοκίνητο, τρένο κλπ). Οι προτεινόμενοι τύποι κεραίων για τυπικά προφίλ τελικών χρηστών:

1. εγκατεστημένη στην οροφή του οχήματος: εξωτερική κεραία με ή χωρίς προστιθέμενη εξασθένηση,
2. εγκατεστημένες εντός της καμπίνας του οχήματος χωρίς προστιθέμενη εξασθένηση.

Στις μετρήσεις λαμβάνονται υπόψη το κέρδος της κεραίας και οι απώλειες καλωδίων.

Μονάδα ελέγχου - Control Unit ελέγχει όλα τα ενεργά μέρη της μετρητικής διάταξης. Αποτελείται από την μονάδα ελέγχου στον κινητό σταθμό (CBM) και τον φορητό υπολογιστή που διαχειρίζεται ο χρήστης μέσω του λογισμικού διεπαφής.

Σύστημα καταγραφής επεξεργάζεται τα δεδομένα μέτρησης και αποθηκεύει τα δεδομένα μέτρησης. Το σύστημα αποτελείται από 6 μονάδες PCM στις οποίες συνδέονται οι κινητοί σταθμοί δοκιμής. Οι μονάδες δικτυώνονται και ελέγχονται με την μονάδα ελέγχου.

Σύστημα καταγραφής γεωγραφικής θέσης - GPS Για τις μετρήσεις σε εξωτερικούς χώρους, η θέση μέτρησης προσδιορίζεται με τη χρήση μιας μονάδας GPS. Η μορφή των συντεταγμένων γίνεται με βάση το WGS.84. Το κινητό σύστημα μετρήσεων συγχρονίζεται με το σύστημα προσδιορισμού των γεωγραφικών συντεταγμένων ώστε όλες οι μετρήσεις να διαθέτουν πληροφορίες χρόνου και θέσης.

Η ακρίβεια και σταθερότητα των πηγών συγχρονισμού είναι υψηλή για να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη ακρίβεια στις παραμέτρους του συστήματος. Στην περίπτωση που ένα σημείο διέγερσης (trigger point) υπολογίζεται είτε στον κινητό είτε στο σταθερό σταθμό δοκιμής, τότε οι απόλυτες τιμές της ημερομηνίας και ώρας μεταξύ των δύο διατάξεων πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια, εκτός και αν υπάρχει διαδικασία συγχρονισμού τους που μπορεί να ενεργοποιηθεί.

Τροφοδοτικό - μετατροπέας αδιάλλειπτη παροχή ισχύος από την μπαταρία του οχήματος μετρήσεων (DC/DC Converter 12/48V). Λόγω αυξημένης κατανάλωσης κρίνεται σκόπιμη η ειδική εγκατάσταση αναβαθμισμένης ηλεκτρικής γεννήτριας στο όχημα.

Σταθερό Σύστημα Εξυπηρετητών - Fixed Servers Systems

Αυτόματος τηλεφωνητής (Voice server) Ένας εξυπηρετητής ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (ISDN/PSTN) μέσω τηλεφωνικών γραμμών πλήθους ίσο με το πλήθος των ραδιοδικτύων υπό εξέταση. Έτσι, είναι εφικτή η λήψη και η εκτέλεση τηλεφωνικών κλήσεων από και προς το κινητό σύστημα μετρήσεων. Ο εξυπηρετητής διαθέτει μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των δεδομένων μετρήσεων.

Εξυπηρετητής Πολυμέσων (Media server) Απαραίτητος για την εκτέλεση μετρήσεων υπηρεσιών δεδομένων είναι ο εξυπηρετητής πολυμέσων ο οποίος εγκαθίσταται σε κέντρο υπολογιστών (Data Center) του παρόχου υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Services Provider, ISP) με υψηλή εγγυημένη χωρητικότητα σύνδεσης. Στον υπολογιστή υψηλών επιδόσεων έχουν εγκατασταθεί οι εξής εξυπηρετητές υπηρεσιών:

1. **Web server** ο οποίος παρέχει την ιστοσελίδα δοκιμής μέσω πρωτοκόλλου http.
2. **FTP server** ο οποίος παρέχει τα αρχεία μεταφοράς μέσω πρωτοκόλλου ftp.
3. **Mail server** ο οποίος υποστηρίζει υπηρεσίες αποστολής και λήψης μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μέσω πρωτοκόλλων (SMTP, POP3, IMAP).

Σημειώνεται ότι εξυπηρετητής μπορεί να υποστηρίζει και βιντεοτηλεφωνία καθώς και υπηρεσίες βίντεο (video-streaming).

5.3.2 Λογισμικό του Εξοπλισμού (Software)

Η διεξαγωγή των μετρήσεων διαμορφώνεται και ο ελέγχεται από τον Διαχειριστή Δοκιμών (Test Manager) ενώ τα δεδομένα των μετρήσεων παρακολουθούνται ζωντανά από σχετικό λογισμικό εποπτείας (NQView). Τα λογισμικά Test Manager και NQView σε φορητό υπολογιστή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Μετά το τέλος των μετρήσεων τα αποτελέσματα εισάγονται στο εργαλείο ανάλυσης NQDI (NetQual Database Interface) το οποίο είναι συνδεδεμένο με μια χωροχρονική βάση δεδομένων μετρήσεων. Το εργαλείο αυτό προσφέρει προηγμένη ανάλυση, φιλτράρισμα και αναζήτηση δεδομένων, στατιστικά για τους δείκτες KPIs, δυνατότητα άντλησης συγκεκριμένων μόνο πληροφοριών, σχεδίαση χαρτών και διαγραμμάτων και δημιουργία αναφορών.

Στα πιο πάνω σχήματα φαίνεται η δομή του συστήματος μετρήσεων και η επικοινωνία μεταξύ των μονάδων που το αποτελούν. Αναλυτικά αυτές οι μονάδες είναι οι ακόλουθες:

Test Manager (TM) το λογισμικό το οποίο δημιουργεί και διαχειρίζεται τις δοκιμές.

Βάση δεδομένων TM λογισμικό το οποίο αποθηκεύει τις ρυθμίσεις που γίνονται στο Test Manager.

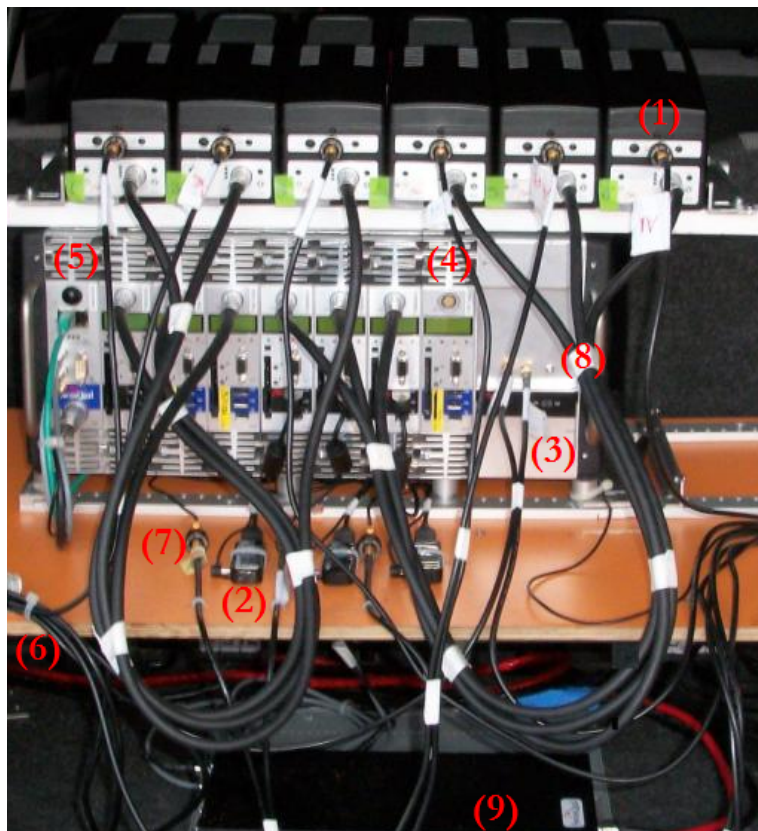
NQComm : λογισμικό το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του Test Manager και της μονάδας του Diversity. Το NQComm φορτώνει τα δεδομένα από την βάση δεδομένων, μετατρέπει τα δεδομένα στην κατάλληλη μορφή και τότε τα στέλνει στην μονάδα για περαιτέρω επεξεργασία.

NQView λογισμικό από το οποίο παρακολουθούμε ζωντανά και μπορούμε να αναπαράγουμε τα δεδομένα των μετρήσεων από του συστήματος.

5.3.3 Χαρακτηριστικά Κεραιών Εξοπλισμού

Ο τύπος των κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ομοιοκατευθυντικό μονόπολο και για τον χαρακτηρισμό των κεραιών αυτές θεωρούνται ως μονόθυρα. Ένα μικροκυματικό μονόθυρο περιγράφεται από τον σύνθετο συντελεστή ανάκλασης εισόδου, $\Gamma_{in}(j\omega)$ και αντίστοιχα ο σύνθετος συντελεστής σκέδασης $S_{11}(j\omega)$. Οι δυο αυτές παράμετροι εξαρτώνται από την συχνότητα $j\omega$. Σκοπός του χαρακτηρισμού των κεραιών είναι να υπολογιστούν τα μεγέθη όπως ο συντελεστής ανάκλασης, ο δείκτης στασίμων κυμάτων (VSWR) και η αντίσταση εισόδου της κεραίας $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$.

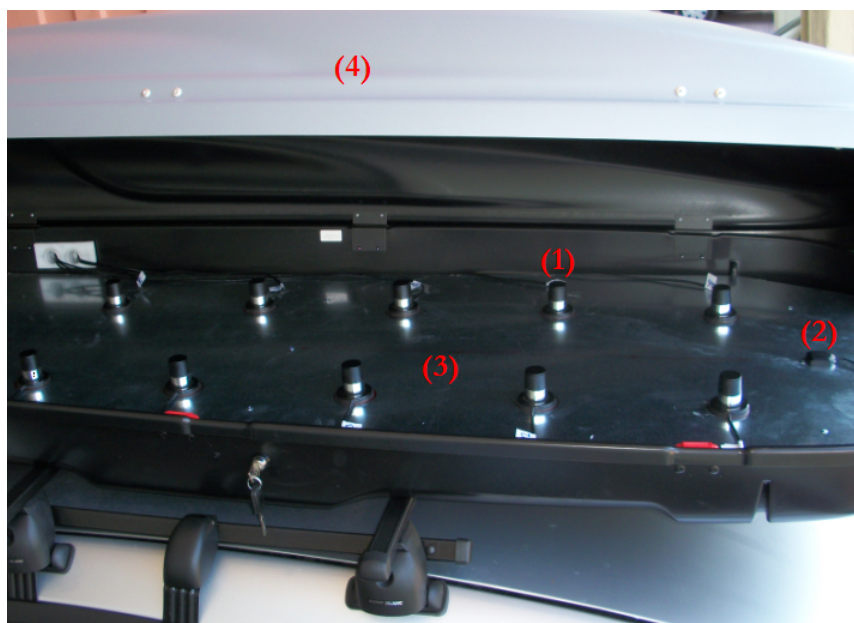
Ο συντελεστής ανάκλασης και η αντίσταση εισόδου σχετίζονται μέσω του μετασχηματισμού:



Elements

- (1) Test Mobile Phone Case
- (2) Test Datacard
- (3) Fast Frequency Scanner
- (4) Computer Unit
- (5) Control Unit and UPS
- (6) External Antenna Cable
- (7) Attenuator
- (8) Control/Data Cable
- (9) DC/DC Power Converter

Σχήμα 5.8: Εγκατάσταση του εξοπλισμού μετρήσεων στο όχημα.



Elements

- (1) External Antenna
- (2) GPS Receiver
- (3) Metallic Surface
- (4) Roof Antennas' Box

Σχήμα 5.9: Εγκατάσταση των κεραιών του συστήματος μετρήσεων στην οροφή του οχήματος.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Μέγεθος	Τιμή
Μέγιστη Ισχύς	150 Watts
Συνδετήρας	SMA RF
Κέρδος	3 dBi (806 - 960 MHz) 4 dBi (1710 - 2100 MHz)
Αντίσταση	50 Ω
Τύπος Καλωδίου Τροφοδοσίας	Pro Flex™ Plus
Μήκος Καλωδίου	12 ft
Απώλειες Καλωδίου	11.1 dB/100ft (900 MHz) 16 dB/100ft (1800 MHz) 19 dB/100ft (2500 MHz)

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά κεραιών εξοπλισμού.

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in}(j\omega) - Z_0}{Z_{in}(j\omega) + Z_0} \quad (5.10)$$

όπου $Z_0 = 50\Omega$ είναι η χαρακτηριστική αντίσταση. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός θεωρείται πιο χρήσιμος:

$$Z_{in}(j\omega) = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{in}(j\omega)}{1 - \Gamma_{in}(j\omega)} \quad (5.11)$$

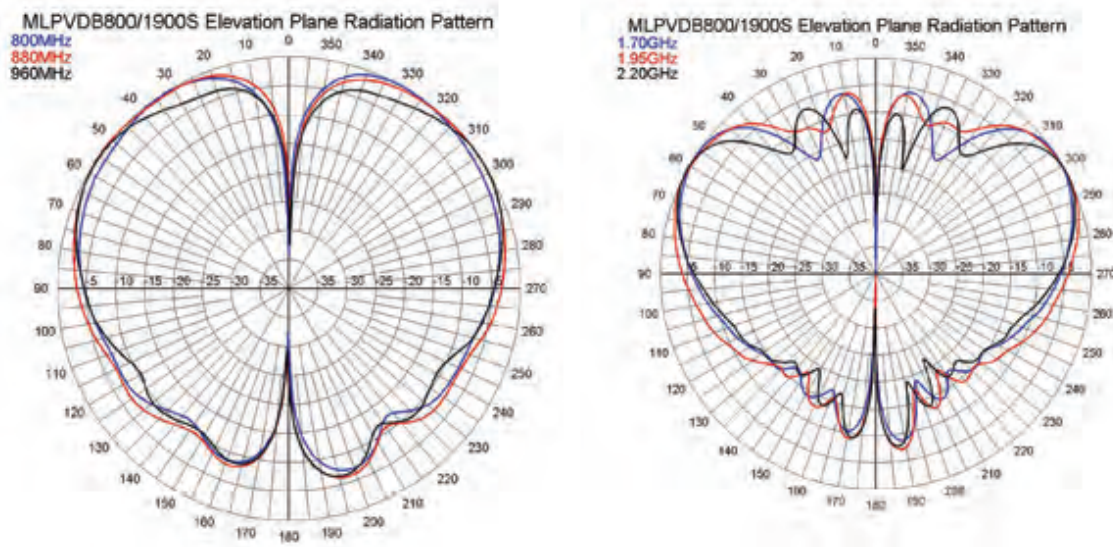
Για την καλύτερη κατανόηση των μεγεθών, δύναται να υπολογιστούν στην λογαριθμική κλίμακα (dB). Ο συντελεστής ανάκλασης περιλαμβάνει τις απώλειες του καλωδίου τροφοδοσίας (feeding cable).

Ο συντελεστής ανάκλασης θα πρέπει να είναι κάτω από 10 dB στην ζώνη συχνοτήτων ενδιαφέροντος και αντιστοιχεί σε τιμή $VSWR \leq 1.8$ συνολικά.

Για τον σκοπό των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 11 κεραιές τύπου PCTEL OP078 [103]. Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας της πολυζωνικής κεραιάς.

Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν RF μείκτες (combiners) για την μείωση του πλήθους των εξωτερικών κεραιών στο σύστημα μετρήσεων καθώς επίσης και των φαινομένων των αποστάσεων μεταξύ των κεραιών (range) και της εμπλοκής blocking. Οι τεχνικές προδιαγραφές των τερματικών συσκευών καθορίζονται από την προδιαγραφή ETSI TS 125 101 [104] όπου έχει θεωρηθεί ότι τα κινητά τηλέφωνα δεν λειτουργούν σε κοντινή απόσταση. Αντιθέτως, έχει ληφθεί υπόψη η ελάχιστη απόσταση $5m$ για εξωτερικό χώρο και $1m$ για εσωτερικό χώρο όταν προδιαγράφηκαν οι απαιτήσεις των συσκευών.

Συνεπώς όταν οι συσκευές λειτουργούν σε πολύ κοντινή απόσταση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα ενδοδιαμόρφωσης (intermodulation) του εκπομπού και τα χαρακτηριστικά της φραγής (blocking), δηλαδή πως συμπεριφέρεται ο δέκτης παρουσία



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα ακτινοβολίας της πολυζωνικής κεραίας PCTEL OP078.

R_x σήμα εισόδου	T_x παρεμβάλλον σήμα	Συνιστ. Blocking σε dBm	T_x Power dBm	Ελάχ. εξασθέν. dB
GSM900	GSM900	0	33	33
GSM900	DCS1800	-23	30	53
GSM900	UMTS2100	-23	18	41
DCS1800	GSM900	0	33	33
DCS1800	DCS1800	-10	30	40
DCS1800	UMTS2100	-10	18	28
UMTS2100	GSM900	-15	33	48
UMTS2100	DCS1800	-15	30	45
UMTS2100	UMTS2100	-15	18	33

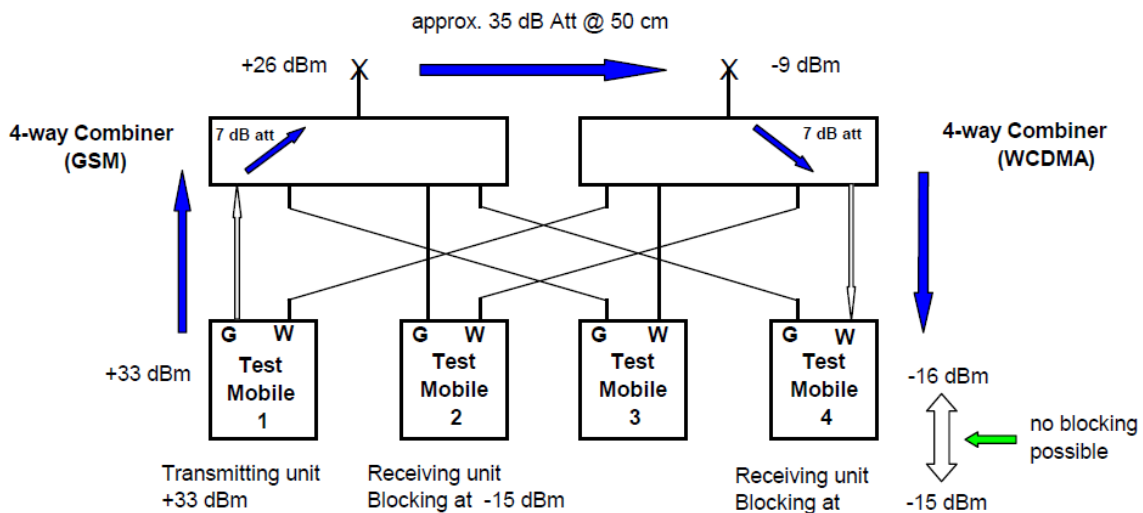
Πίνακας 5.4: Υπολογισμός ελάχιστης εξασθένησης για μείωση του φαινομένου blocking μεταξύ των κινητών τηλεφώνων μετρήσεων που λειτουργούν σε μικρή απόσταση και για τις τεχνολογίες GSM900, DCS1800, UMTS2100.

ισχυρού μη επιθυμητού σήματος και ασθενούς επιθυμητού σήματος. Σύμφωνα με την προδιαγραφή ETSI ETS 300 607-1 [105], η φραγή blocking είναι ένα μέτρο της δυνατότητας του δέκτη να λαμβάνει ένα επιθυμητό σήμα εισόδου παρουσία ενός ανεπιθύμητου σήματος, χωρίς να υπερβαίνει μια δεδομένη υποβάθμιση (degradation). Η υποβάθμιση μετριέται ως μείωση της ευαισθησίας, μέχρι την πλήρη απώλεια λήψης. Για την αποφυγή της φραγής χρησιμοποιούνται εξασθενητές attenuators όπως υπολογίζονται στον Πίνακα 5.4.

Έτσι, για την μείωση των φαινομένων στην τεχνική έκθεση [106] προτείνεται η εγκατάσταση μίκτη (combiner) όπου τα τηλέφωνα που λειτουργούν σε διαφορετικές τεχνολογίες διαχωρίζονται σε δυο κεραίες (GSM/UMTS) και σε απόσταση 0.5m όπως παρουσιάζεται Σχήμα 5.11. Έτσι, στο όχημα μετρήσεων εγκαθίστανται στην οροφή

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

μία κεραία η οποία συνδέεται στην έξοδο του μίκτη των τηλεφώνων που λειτουργούν σε τεχνολογία GSM και άλλη μια κεραία αντίστοιχα για τα τηλέφωνα σε τεχνολογία UMTS. Δεδομένου του γεγονότος ότι το σύστημα μετρήσεων απαρτίζεται από τηλέφωνα τα οποία λειτουργούν σε (α') τεχνολογία GSM900/DCS1800 (technology-locked) αποκλειστικά, και (β') σε UMTS/GSM900/DCS1800 (dual-mode) δεν είναι μπορεί να υιοθετηθεί η συγκεκριμένη πρόταση εγκατάστασης μικτών.



Σχήμα 5.11: Λειτουργικό διάγραμμα μικτών για κινητά τηλέφωνα μετρήσεων τεχνολογίας λειτουργίας GSM και UMTS.

Μεθοδολογία Δοκιμών Κεραίων στο Πεδίο των Μετρήσεων

Για τον σκοπό της αξιολόγησης των κεραιών της πειραματικής διάταξης επί τω πεδίο των μετρήσεων προτείνεται μια απλή μεθοδολογία δοκιμών για όλες τις συχνότητες λειτουργίας GSM 900 MHz, DCS 1800 MHz και UMTS 2100 MHz.

Αναλυτικά, οι συσκευές δοκιμών (τα κινητά τηλέφωνα και τα MODEMs) εκτελούν την δοκιμή IDLE κλειδωμένα κατά περίπτωση σε συγκεκριμένη τεχνολογία. Επιλέγεται μια διαδρομή στην οποία εκτιμάται ότι η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος για έναν πάροχο, για τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά SIMs, δύναται να πάρει ένα ευρύ φάσμα τιμών. Δηλαδή, το στατιστικό δείγμα μετρήσεων να προέρχεται από τμήματα διαδρομής από πολύ καλής κάλυψης έως ασθενούς κάλυψης. Η διάρκεια της δοκιμής προτείνεται τουλάχιστον 30 λεπτά.

Στην συνέχεια περιγράφονται οι δοκιμές για τις συχνότητες λειτουργίας οι οποίες προτείνονται να εκτελούνται στην ίδια διαδρομή:

1. Δοκιμές λήψης *RxLev* των κινητών τηλεφώνων στην ζώνη συχνοτήτων GSM 900MHz

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Η δοκιμή εκτελείται με τα τηλέφωνα δοκιμών σε κατάσταση IDLE και κλειδωμένα στην τεχνολογία GSM 900 MHz χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους RxLev θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά τηλέφωνο. Αν $\overline{RxLev}_{GSM,i}, i \in [1, 6]$ είναι οι μέσες τιμές της στάθμης λήψης RxLev για τα 6 τηλέφωνα, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{RxLev}_{GSM,i} - \min_i \overline{RxLev}_{GSM,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 2 < 3 \text{ dB}$.

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους RxLev στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα.

2. Δοκιμές λήψης RxLev των κινητών τηλεφώνων στην ζώνη συχνοτήτων DCS 1800MHz

Η δοκιμή εκτελείται με τα τηλέφωνα δοκιμών σε κατάσταση IDLE και κλειδωμένα στην τεχνολογία DCS 1800 MHz χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους RxLev θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά τηλέφωνο. Αν $\overline{RxLev}_{DCS,i}, i \in [1, 6]$ είναι οι μέσες τιμές της στάθμης λήψης RxLev για τα 6 τηλέφωνα, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{RxLev}_{DCS,i} - \min_i \overline{RxLev}_{DCS,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 2 < 3 \text{ dB}$.

Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους RxLev στο σύστημα DCS 1800 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα.

3. Δοκιμές Λήψης CPICH RSCP των κινητών τηλεφώνων στην ζώνη συχνοτήτων UMTS 2100MHz

Η δοκιμή εκτελείται με τα τηλέφωνα δοκιμών σε κατάσταση IDLE και κλειδωμένα στην τεχνολογία UMTS 2100 MHz χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους UE Best CPICH RSCP θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά τηλέφωνο. Αν $\overline{RSCP}_{UMTS,i}, i \in [1, 6]$ είναι οι μέσες τιμές της στάθμης λήψης RSCP για τα 6 τηλέφωνα, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{RSCP}_{UMTS,i} - \min_i \overline{RSCP}_{UMTS,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 2 < 3 \text{ dB}$.

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους UE Best CPICH RSCP στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

4. Δοκιμές Λήψης RxLev των HSPA+ Modems στην τεχνολογία GPRS, GSM 900/1800 MHz

Η δοκιμή εκτελείται με τα HSPA+ Modems δοκιμών σε κατάσταση IDLE χρήσει

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους RxLev θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά Modem. Αν $\overline{RxLev}_i, i \in [1, 3]$ είναι οι μέσες τιμές της στάθμης λήψης RxLev για τα 3 HSPA+ Modems, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{RxLev}_i - \min_i \overline{RxLev}_i < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 2 < 3$ dB.

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους RxLev στην τεχνολογία GPRS, GSM 900/1800 MHz για 3 HSPA+ Modems μετρήσεων.

5. Δοκιμές Λήψης CPICH RSCP των HSPA+ Modems στην ζώνη συχνοτήτων UMTS 2100MHz

Η δοκιμή εκτελείται με τα HSPA+ Modems δοκιμών σε κατάσταση IDLE χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους UE Best CPICH RSCP θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά Modem. Αν $\overline{RSCP}_{UMTS,i}, i \in [1, 3]$ είναι οι μέσες τιμές της στάθμης λήψης RSCP για τα 3 HSPA+ Modems, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{RSCP}_{UMTS,i} - \min_i \overline{RSCP}_{UMTS,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 2 < 3$ dB.

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους UE Best CPICH RSCP στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 3 HSPA+ Modems μετρήσεων.

5.3.4 Δοκιμές Κινητών Τηλεφώνων

Για την αξιολόγηση της ορθής λειτουργίας των κινητών τηλεφώνων που χρησιμοποιούνται στη διάταξη μετρήσεων, προτείνονται δοκιμές εκτέλεσης στατικών δοκιμών τηλεφωνίας σε περιοχή όπου υπάρχει ένα επικρατές κανάλι (στην περίπτωση των τεχνολογιών GSM και DCS) ή ένας επικρατών κώδικας (Scrambling Code στο σύστημα UMTS). Οι δοκιμές εκτελούνται με SIM του ίδιου παρόχου με προσδοκώμενο αποτέλεσμα η ίδια ποιότητα φωνής.

1. Δοκιμή Ποιότητας Φωνής P862.1 στην ζώνη συχνοτήτων GSM 900 MHz

Η δοκιμή τηλεφωνίας εκτελείται με όλα τα τηλέφωνα της διάταξης κλειδωμένα στην τεχνολογία GSM 900 MHz χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους PESQ-LQ ή P862.1 θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά τηλέφωνο. Αν $\overline{LQ}_{GSM,i}, i \in [1, 6]$ είναι οι μέσες τιμές της ποιότητας φωνής LQ για τα 6 τηλέφωνα, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{LQ}_{GSM,i} - \min_i \overline{LQ}_{GSM,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 0.5 < 1$.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

2. Δοκιμές Ποιότητας Φωνής P862.1 στην ζώνη συχνοτήτων DCS 1800 MHz

Η δοκιμή τηλεφωνίας εκτελείται με όλα τα τηλέφωνα της διάταξης κλειδωμένα στην τεχνολογία DCS 1800 MHz χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους PESQ-LQ ή P862.1 θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά τηλέφωνο. Αν $\overline{LQ}_{DCS,i}$, $i \in [1, 6]$ είναι οι μέσες τιμές της ποιότητας φωνής LQ για τα 6 τηλέφωνα, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{LQ}_{DCS,i} - \min_i \overline{LQ}_{DCS,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 0.5 < 1$.

Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

3. Δοκιμές Ποιότητας Φωνής P862.1 στην ζώνη συχνοτήτων UMTS 2100 MHz

Η δοκιμή τηλεφωνίας εκτελείται με όλα τα τηλέφωνα της διάταξης κλειδωμένα στην τεχνολογία UMTS 2100 MHz χρήσει καρτών SIM του ίδιου παρόχου. Από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μεγέθους PESQ-LQ ή P862.1 θα πρέπει να μην παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές ανά τηλέφωνο. Αν $\overline{LQ}_{UMTS,i}$, $i \in [1, 6]$ είναι οι μέσες τιμές της ποιότητας φωνής LQ για τα 6 τηλέφωνα, τότε θα πρέπει $\max_i \overline{LQ}_{UMTS,i} - \min_i \overline{LQ}_{UMTS,i} < \epsilon$, όπου $\epsilon \leq 0.5 < 1$.

Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών PDF και CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

5.4 Λειτουργία μετρητικού συστήματος

Για την εκάστοτε μετρητική καμπάνια, θα πρέπει να πραγματοποιούνται ένα σύνολο από βασικές ενέργειες που διασφαλίζουν κατά το δυνατόν την ορθή λειτουργία του μετρητικού συστήματος, τόσο πριν την έναρξη, όσο και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Οι βασικές ενέργειες συνοψίζονται ως εξής:

- Παροχή πιστοποιητικών διακρίβωσης για τα δοκιμαστικές τερματικές συσκευές, το σαρωτή και για το κέρδος κεραίας (UE, scanner & antenna gain measurements calibration certificates) με σαφή ένδειξη επόμενης ημερομηνίας ελέγχου (validation due date) σύμφωνα με τον κατασκευαστή αυτών. Για τις συσκευές

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

το πιστοποιητικό θα περιλαμβάνει ελέγχους/δοκιμές (pass/fail tests) σύμφωνα με τις προδιαγραφές 3GPP.

- Μετρήσεις των καλωδίων τροφοδοσίας των κεραιών (antenna line measurements) σε όλο το φάσμα 900/1800/2100 MHz για τις παραμέτρους: total Loss, Distance to Fault, Return Loss VSWR και τη δημιουργία αρχείου με τις αρχικές τιμές αυτών.
- Προστασία των καλωδίων των εξωτερικών κεραιών από χτυπήματα και φθορές. Δεν είναι αποδεκτή η όδευση των καλωδίων μέσα από ανοιχτά παράθυρα ή τις πόρτες του οχήματος κλπ.).
- Μέτρηση και πιστοποίηση ορθής λειτουργίας κάθε passive element που χρησιμοποιείται κατά μήκος του antenna line.
- Διασφάλιση ασφαλούς εγκατάστασης και στερέωσης όλων των τμημάτων του μετρητικού συστήματος στο όχημα και ιδιαίτερα των εξωτερικών. Δυνατότητα ελέγχου της εγκατάστασης και υποβολή ενστάσεων και παρατηρήσεων για πιθανές διορθώσεις εκ μέρους των παρόχων.
- Δυνατότητα δοκιμαστικών μετρήσεων σε συγκεκριμένη διαδρομή πριν την έναρξη του έργου (pretests), με ταυτόχρονη παρουσία εκπροσώπου κάθε παρόχου. Οι παράμετροι που κατ' ελάχιστο θα πρέπει να δοθούν για κάθε συσκευή ξεχωριστά είναι κατανομές RxLev, RSCP, UL PESQ, DL PESQ, max PESQ.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων:

- Λίστα ελέγχου (check list) συγκεκριμένων ενεργειών που πρέπει να γίνονται σε καθημερινή βάση από το χειριστή του μετρητικού συστήματος. Ενδεικτικά, κατ' ελάχιστο, προτεινόμενες ενέργειες είναι ο οπτικός έλεγχος του συστήματος, καλωδιώσεων, έλεγχος για χαλαρούς συνδέσμους (connectors), ενεργό στίγμα γεωγραφικού προσδιορισμού θέσης (GPS active), στάθμη σήματος (RxLev/ RSCP static tests), έλεγχος συσκευών και σαρωτή (UE vs Scanners check) κλπ.
- Έλεγχος ομαλής λειτουργίας του μετρητικού συστήματος (software και hardware) κατά τη διάρκεια της εκάστοτε διαδρομής, εστιάζοντας στην παρακολούθηση των PCMs και Scanner monitors, προς αποφυγή καταγραφής μαζικών άκυρων μετρήσεων (fake call events).
- Συχνή εναλλαγή καρτών SIM (για παράδειγμα κάθε 2 μέρες, αλλά το αργότερο σε εβδομαδιαία βάση).

- Μετρήσεις Return Loss VSWR για κάθε καλώδιο τροφοδοσίας κεραίας σε εβδομαδιαία βάση.

5.5 Δοκιμές - Σενάρια Μετρήσεων

Για την εκτέλεση συγκριτικών μετρήσεων ποιότητας (benchmarking) θα πρέπει να καθορισθούν τα σχετικά προφίλ (profiles) μετρήσεων. Οι σημαντικοί πλέον παράγοντες για τον καθορισμό ενός προφίλ είναι:

- το πλήθος των συνόδων (sessions),
- η διάρκεια των συνόδων,
- ο χρόνος μεταξύ των συνόδων,
- οι απαιτούμενες ρυθμίσεις QoS για τις υπηρεσίες δεδομένων,
- οι ρυθμίσεις πρωτοκόλλων (TCP/IP ρυθμίσεις για υπηρεσίες δεδομένων, AMR ρυθμίσεις για υπηρεσίες φωνής),
- οι παράμετροι και ρυθμίσεις των κινητών δικτύων,
- τα προφίλ χρηστών,
- πληθυσμιακή πυκνότητα χρηστών κινητών επικοινωνιών,
- η γεωγραφική περιοχή,
- ο τύπος της περιοχής (εσωτερικοί χώροι, hotspot, πόλη, αυτοκινητόδρομος, ημιαστικό / αγροτικό περιβάλλον κλπ),
- ταχύτητα μετρήσεων,
- τύπος οχήματος μετρήσεων,
- τύπος κεραίων,
- τύπος τερματικής συσκευής (κινητό τηλέφωνο, κάρτα δεδομένων),
- τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών (hardware, firmware version),
- εργαστηριακός εξοπλισμός του σταθερού δικτύου (test servers).

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Κατηγορία	Τύπος	Περιβάλλον
S_{IO}	αεροδρόμια, σταθμοί τρένων, εμπορικά κέντρα, εκθέσεις,	outdoor
S_{II}	επιχειρηματικά κέντρα, τουριστικές περιοχές κ.α.	indoor

Πίνακας 5.5: Στατικές μετρήσεις (*stationary tests*).

Κατηγορία	Τύπος
D_1	Μετρήσεις τρένων
D_2	Αστικές περιοχές (μεσαίες πόλεις)
D_3	Αυτοκινητόδρομοι
D_4	Αγροτικές περιοχές (επαρχιακοί δρόμοι)
D_5	Μεγάλες πόλεις
W_1	Πεζοπόρες διαδρομές (indoor μετρήσεις)
W_2	Πεζοπόρες διαδρομές (outdoor μετρήσεις)

Πίνακας 5.6: Εν κινήσει μετρήσεις (*drive/walk tests*).

Τα περιβάλλοντα μετρήσεων κατηγοριοποιούνται βάσει του τύπου μετρήσεων, στατικές ή εν κινήσει (*drive/walk tests*), όπως παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6.

Κατά την αξιολόγηση των KPIs που αναφέρονται ανωτέρω, θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι τα επίπεδα εμπιστοσύνης σε μια καμπάνια μετρήσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των δειγμάτων που έχουν συλλεχθεί. Το πλήθος των δειγμάτων δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικός κατά την πρώτη φάση της βελτιστοποίησης, το οποίο εστιάζει στη διερεύνηση και την επίλυση των βασικών ζητημάτων του δικτύου και όχι για τη στατιστική εγκυρότητα των μετρήσεων. Σε επόμενους γύρους μετρήσεων βελτιστοποίησης, καθώς το ραδιοδίκτυο πλησιάζει εμπορική λειτουργία, ο αριθμός των δειγμάτων είναι σημαντικό να επαληθεύει την τιμή-στόχο επίδοσης. Δηλαδή, κατά την διάρκεια και κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαδρομής μιας καμπάνιας μετρήσεων η τιμή της επίδοσης είναι μια ακριβής στατιστική αναπαράσταση του επίδοσης του συολικού δικτύου [107]. Ο καθορισμός του αριθμού των δειγμάτων που απαιτούνται για την επικύρωση των μετρήσεων περιλαμβάνεται στην θεωρία στατιστικής. Ο αριθμός των δειγμάτων που ικανοποιεί ένα απαιτούμενο επίπεδο εμπιστοσύνης μπορεί να υπολογίζεται από την κάτωθι εξίσωση.

$$N_{samples} = \max \left[\frac{p(1-p)z_{a/2}^2}{e^2}, \frac{c}{1-p} \right] \quad (5.12)$$

όπου $N_{samples}$ είναι το πλήθος των δειγμάτων που εκτιμάται από τα ακόλουθα:

$z_{a/2}^2$: η τυπική κανονική κατανομή, για 95% ισούται με 1.96 ή 2.58 για 99%,

p : η προσδοκώμενη πιθανότητα επιτυχίας,

- e : το αποδεκτό σφάλμα μέτρησης,
 c : μια σταθερά (τιμή 5).

Ο όρος $c/(1 - p)$ θεωρείται η μέγιστη τιμή που διασφαλίζει ότι έχει επιτευχθεί ένας ικανοποιητικό πλήθος μετρήσεων.

5.5.1 Μετρήσεις Ραδιοκάλυψης

Το βασικό μέγεθος για τον χαρακτηρισμό ποιότητας ενός δικτύου ραδιοπρόβασης στα συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών είναι η ραδιοκάλυψη. Η μετρήσεις ραδιοκάλυψης εκτελούνται από την συσκευή scanner για το οποίο θα πρέπει να καθορισθούν οι παράμετροι των ραδιοδικτύων προς μέτρηση όπως το όνομα του παρόχου (operator), MCC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code), GSM και UMTS κανάλια που έχουν ανατεθεί σε κάθε πάροχο. Είναι σημαντικό να καταχωρηθούν όλα τα κανάλια που είναι αδειοδοτημένα από τους παρόχους στην συσκευή μέτρησης.

5.5.2 Δοκιμή τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας

Για την δοκιμή τηλεφωνίας προτείνεται η διάρκεια κλήσης (CD, call duration) προτείνεται:

CD_1 : 10s για την δοκιμή call setup

CD_2 : 120s για τυπικές δοκιμές

CD_3 : 300s για δοκιμές ευστάθειας

Call_Window: ισούται με την διάρκεια κλήσης +30s (για τις φάσεις setup και release), +30s για την ελάχιστη διάρκεια παύσης μεταξύ δυο κλήσεων. Έτσι για μια τυπική δοκιμή έχουμε συνολικά 180s.

Ο χρόνος εκπνοής (timeout) της δοκιμής προτείνεται σε 20s και υποδηλώνει τον δείκτη μη-διαθεσιμότητας υπηρεσίας.

5.5.3 Δοκιμές υπηρεσιών δεδομένων κινητού διαδικτύου - Γενικά

Σκοπός της δοκιμών είναι ο χαρακτηρισμός επίδοσης των προσφερόμενων υπηρεσιών δεδομένων διαδικτύου όπως της μεταφοράς αρχείων (file transfer) από (download) και προς (upload) τον εξυπηρετητή, της πλοήγησης σε ιστοσελίδες διαδικτύου (web

browsing), την αποστολή (e-mail send) και λήψη (e-mail receive) μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, την μέτρηση καθυστέρησης δικτύου *ping* και την λήψη βίντεο/πολυμεσικής ροής. Φυσικά, πριν την έναρξη των παραπάνω δοκιμών θα πρέπει να έχει ενεργοποιηθεί το PDP (PDP Context Activation) και μετά το πέρας αυτό να έχει απενεργοποιηθεί PDP (PDP Context De-activation). Φυσικά, η μεταφορά δεδομένων γίνεται εφόσον έχει πραγματοποιηθεί αρχικά σύνδεση σε στο κινητό δίκτυο GPRS (GPRS Attach) και τελικά αποσύνδεση (GPRS Detach).

Οι δοκιμές εκτελούνται είτε από κινητό τηλέφωνο είτε από USB modem. Είναι σημαντικό ο τερματικός εξοπλισμός να υποστηρίζει την τελευταία τεχνολογία πρόσβασης (π.χ. HSPA+, DC-HSPA) και τον μέγιστο ρυθμός μετάδοσης.

5.5.4 Δοκιμή σύνδεσης (attach) και αποσύνδεσης (detach) GPRS.

Ο σκοπός της δοκιμής *GPRS attach* είναι η εκτέλεση μιας επιτυχημένης σύνδεσης GPRS στο κινητό δίκτυο. Η δοκιμή είναι επιτυχημένη αν επιτευχθεί η σύνδεση στο δίκτυο. Ως παράμετρος μέτρησης είναι ο χρόνος που απαιτείται για την σύνδεση της συσκευής. Σημειώνεται ότι η δοκιμή εκτελείται μόνο για συσκευές κινητών επικοινωνιών.

Αρχικά, η συσκευή ελέγχει αν έχει συνδεθεί ή όχι στο δίκτυο. Αν είναι συνδεδεμένη, θα εκτελεστεί η εντολή αποσύνδεσης *GPRS detach* και κατόπιν ξεκινά η πραγματική προσπάθεια εκτέλεσης της εντολής *GPRS attach*.

Αντίστοιχα, ο σκοπός της δοκιμής είναι η εκτέλεση μιας επιτυχημένης αποσύνδεσης GPRS από το κινητό δίκτυο. Η δοκιμή είναι επιτυχημένη αν επιτευχθεί η αποσύνδεση από το δίκτυο. Ως παράμετρος μέτρησης είναι ο χρόνος που απαιτείται για την αποσύνδεση της συσκευής. Σημειώνεται ότι η δοκιμή εκτελείται μόνο για συσκευή κινητών επικοινωνιών.

Αρχικά, η συσκευή ελέγχει αν έχει ήδη αποσυνδεθεί ή όχι από το δίκτυο. Αν είναι αποσυνδεδεμένη ή σε περίπτωση που δεν δύναται να καθοριστεί η κατάσταση, θα εκτελεστεί η εντολή αποσύνδεσης *GPRS detach*. Αν ήδη έχει αποσυνδεθεί, η δοκιμή θα ολοκληρωθεί επιτυχώς χωρίς να εκτελεστεί κάποια ενέργεια.

5.5.5 Δοκιμή ενεργοποίησης (activation) και απενεργοποίησης (deactivation) PDP.

Η δοκιμή *PDP Activation* ελέγχει την δοκιμή ενεργοποίησης του περιεχομένου PDP. Η δοκιμή είναι επιτυχής όταν η συσκευή συνδεθεί επιτυχώς στο κινητό δίκτυο. Η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί μόνο από συσκευές δικτύων κινητών επικοινωνιών. Η

εφαρμογή θα ξεκινήσει την προσπάθεια εκκίνησης συνόδου *dialup* με το δίκτυο. Κατά την διάρκεια της συνόδου *dialup*, το κινητό θα προσπαθήσει να ενεργοποιήσει το PDP περιεχόμενο. Μια επιτυχημένη ενεργοποίηση PDP περιεχομένου θα επιστρέψει IP διεύθυνση (IP-address) στο κινητό τηλέφωνο ή USB MODEM.

Η δοκιμή *PDP Deactivation* ελέγχει την επενεργοποίηση του περιεχομένου PDP. Η δοκιμή είναι επιτυχής όταν η συσκευή αποσυνδεθεί επιτυχώς στο κινητό δίκτυο. Η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί μόνο από συσκευές δικτύου κινητών επικοινωνιών. Η εφαρμογή θα ξεκινήσει την προσπάθεια αποσύνδεσης από το δίκτυο εκτελώντας την λειτουργία της PDP απενεργοποίησης.

5.5.6 Δοκιμή Μέτρησης Καθυστερήσης Δικτύου PING

Η δοκιμή PING χρησιμοποιείται για να επικυρώσει την συνδεσιμότητα μεταξύ του κινητού υπολογιστή και του εξυπηρετητή δοκιμών σε ένα δίκτυο δεδομένων IP. Η δοκιμή μετρά τον χρόνο μετέπιστροφής (*Round Trip Time*) μεταξύ του αιτήματος (*Echo Request*) και της απάντησης (*Echo Reply*) πολλαπλών *pings* στέλνοντας ICMP μηνύματα.

Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν όλα τα *ICMP Echo Requests* επιβεβαιώνονται από τα αντίστοιχα *ICMP Echo Reply* μηνύματα. Αν κάποια από τα *pings* δεν επιβεβαιωθούν επιτυχώς εντός μιας προθεσμίας, η δοκιμή θεωρείται αποτυχημένη.

Βασική λειτουργία κατά την δοκιμή αποστέλλεται ένα *ping* (ICMP Echo Request) στον εξυπηρετητή δοκιμών με ένα καθορισμένο στο μέγεθος ICMP πακέτο και αναμένεται μια επιτυχής απόκριση εντός μιας καθορισμένης προθεσμίας (time out). Αν το μήνυμα *ICMP Echo Reply* δεν καταφθάσει στον κινητό υπολογιστή δοκιμών εντός της προθεσμίας, η απόκριση *ping* θεωρείται αποτυχημένη [108].

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως το σύνολο των καθορισμένων προσπαθειών ping έχουν αποσταλεί προς τον εξυπηρετητή δοκιμών. Μεταξύ δυο προσπαθειών εφαρμόζεται μια παύση συγκεκριμένης διάρκειας (interval time).

Τα αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης της μέτρησης παρουσιάζονται ως εξής:

- το όνομα ή η διεύθυνση IP του εξυπηρετητή δοκιμών
- η μέση τιμή των RTTs όλων των ICMP Echo request/response RTT χρόνων.
- το πλήθος των επιτυχημένων pings
- το μέγεθος του ICMP πακέτου
- ο χρόνος RTT του κάθε ping
- ο αριθμός ακολουθίας του κάθε ping

5.5.7 Δοκιμή Μεταφοράς Αρχείων (FTP Test)

Η δοκιμή FTP χρησιμοποιείται να ελέγξει την διαθεσιμότητα της υπηρεσίας μεταφοράς αρχείων και να μετρήσει την ρυθμοαπόδοση της εφαρμογής για τις περιπτώσεις μεταφοράς προς (download) από (upload) και τον κινητό υπολογιστή. Η δοκιμή είναι επιτυχής όταν παρατηρούμε επιθυμητή λειτουργία (upload/download)

Πριν ένα αρχείο μεταφερθεί μέσω FTP πρωτοκόλλου, μια σύνδεση καναλιού ελέγχου πρέπει να εγκατασταθεί προς τον FTP εξυπηρετητή. Το κανάλι ελέγχου χρησιμοποιείται στην ανταλλαγή FTP εντολών μεταξύ πελάτη και εξυπηρετητή. Εφαρμόζονται εντολές όπως σύνδεση στον λογαριασμό χρήστη (login), αλλαγή φακέλου και επιλογή λειτουργίας FTP. Στην περίπτωση της λειτουργίας FTP GET (download) ή FTP PUT (upload), το κανάλι δεδομένων εγκαθίσταται με σκοπό την μεταφορά των δεδομένων. Το κανάλι ελέγχου διατηρείται ανοικτό κατά την διάρκεια μεταφοράς αρχείου με σκοπό την ανταλλαγή άλλων εντολών. Διακρίνονται δυο καταστάσεις (modes), ενεργή και παθητική. Στην ενεργή κατάσταση (active mode), ο εξυπηρετητής συνδέεται στον πελάτη σε θύρα που παρέχεται από τον πελάτη. Στην παθητική κατάσταση (passive mode), ο πελάτης συνδέεται στον εξυπηρετητή σε θύρα που παρέχεται από τον εξυπηρετητή.

Τα βασικά στοιχεία της ανάλυσης αποτελεσμάτων είναι:

- Ο χρόνος του μηνύματος
- Η λειτουργία, είτε PUT είτε GET
- Το όνομα το αρχείου που θα μεταφερθεί ή θα παραλειφθεί
- Η ρυθμοαπόδοση, όπου στην περίπτωση που η δοκιμή είναι σε εξέλιξη, η τιμή αυτή αναπαριστά την στιγμιαία ρυθμοαπόδοση υπολογισμένη ως το πλήθος των bits που μεταφέρθηκαν στον αντίστοιχο χρόνο.
- Το όνομα ή η IR διεύθυνση του εξυπηρετητή
- Το σύνολο των bytes που μεταφέρθηκαν
- Η κατάσταση: “σε εξέλιξη”, “επιτυχής”, “μη επιτυχής”.

5.5.8 Δοκιμή Μετάδοσης Ροής Βίντεο (Video Streaming).

Η ροή (streaming) αναφέρεται στην δυνατότητα μιας εφαρμογής να αναπαράγει συγχρονισμένες πολυμεσικές ροές (media streams), όπως ήχου και βίντεο, κατά τρόπο συνεχή, ενώ αυτές οι ροές μεταδίδονται προς τον πελάτη πάνω από ένα δίκτυο δεδομένων. Ο πελάτης αναπαράγει την εισερχόμενη πολυμεσική ροή σε πραγματικό χρόνο

καθώς τα δεδομένα λαμβάνονται. Τυπικές υπηρεσίες είναι τηλεοπτικά κανάλια ζωντανής και βιντεοσκοπημένης μετάδοσης πληροφοριακού περιεχομένου. Η μετάδοση ροής βίντεο είχε ήδη εισαχθεί στα δίκτυα 2ης και 2.5ης γενιάς, τυπικά χρησιμοποιώντας υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου (packet switched services). Οι τυπικές εφαρμογές μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σε εφαρμογές μετάδοσης κατά απαίτηση (On-Demand) και ζωντανής (live) μετάδοσης.

Οι αντικειμενικές δοκιμές της υπηρεσίας απαιτούν ένα εξυπηρετητή (video streaming server), ένα πελάτη (video streaming client) καθώς και ένα αντικειμενικό αλγόριθμο για την αξιολόγηση ποιότητας βίντεο. Ο πελάτης αποστέλλει ένα αίτημα προς τον εξυπηρετητή μέσω πρωτοκόλλου RTSP ή HTTP και προσπαθεί να εγκατασταθεί μια σύνδεση ροής (streaming connection). Όταν εγκατασταθεί η σύνδεση, ξεκινά η καταγραφή (capturing) του περιεχομένου βίντεο και ο πελάτης αποθηκεύει το περιεχόμενο βίντεο σε σκληρό δίσκο ως εξερχόμενη ακολουθία βίντεο (output video sequence).

Η δοκιμή θα πρέπει να αντανακλά την αντίληψη του χρήστη όταν χρησιμοποιεί μια τέτοια υπηρεσία. Η δοκιμή streaming απαιτεί μια σύνδεση δεδομένων, θα εγκαταστήσει μια ροή και θα την διατηρήσει για έναν συγκεκριμένο χρόνο. Η ροή θα αναλυθεί με βάση την επιτυχία εγκατάστασης και ταυτόχρονα μια σειρά μετρήσεων δεικτών ποιότητας εικόνας θα διεξάγονται κατά την διάρκεια της δοκιμής. Οι δείκτες θα προσδιορίσουν ένα προφίλ ποιότητας κατά την διάρκεια της υπηρεσίας. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής χρησιμοποιείται ένα κινητό τηλέφωνο ως συσκευή dial-up. Η ροή εκτελείται με λογισμικό αναπαραγωγής βίντεο (video player) σε έναν υπολογιστή. Κατά τον καθορισμό της δοκιμής, υπάρχει πλήρη πρόσβαση στο IR επίπεδο και σε όλες τις παραμέτρους της ροής και των πολυμέσων.

5.5.9 Δοκιμή http ή Πλοήγησης στο web

Η πλοήγηση στο κινητό Διαδίκτυο είναι η πιο δημοφιλής υπηρεσία. Για τον σκοπό αυτό η σχετική δοκιμή είναι σημαντική να εκτελείται. Θεωρούμε ότι οι δοκιμές *http testing* και *web browsing* είναι ταυτόσημες. Ορίζουμε επίσης ως κανάλι μεταφοράς (transport channel) την διαδρομή από τον εξυπηρετητή web/http στο κινητό τερματικό. Ο σκοπός της δοκιμής είναι η ποσοτικοποίηση της εμπειρίας χρήστη με αντικειμενικό τρόπο.

Απαραίτητος είναι ένας φυλλομετρητής (*web-browser*) για την ανάκτηση μιας ιστοσελίδας (web browsing download). Κρίσιμο είναι να εκτελείται πάντα η λειτουργία της εκκαθάρισης των προσωρινών αρχείων (temporal files) στην μνήμη (cache) του φυλλομετρητή πριν από κάθε δοκιμή και να μην εκτελείται οποιαδήποτε άλλη μη-σχετική με την δοκιμή ενέργεια η οποία μπορεί να προθέτει κίνηση http, δηλαδή παράλληλη πλοήγηση σε μη σχετιζόμενες ιστοσελίδες. Όταν ολοκληρωθεί η ανάκτηση μιας ιστοσελίδας τότε υπολογίζονται ο συνολικός χρόνος, το μέγεθος της ιστοσελίδας και η

μέση ρυθμοαπόδοση που επιτεύχθηκε.

Η δοκιμή δύναται να εκτελεστεί είτε σε πλήρες ελεγχόμενο περιβάλλον δηλαδή με στατική ιστοσελίδα αναφοράς (*reference web page*) η οποία είναι αποθηκευμένη σε δεσμευμένο εξυπηρετητή δοκιμών (*test web server*) με εγγυημένο ρυθμό σύνδεσης [100]. Για την εν λόγω ιστοσελίδα έχουν καθορισθεί διάφορες παράμετροι όπως ο τύπος, το πλήθος και το μέγεθος του κάθε αντικειμένου της ιστοσελίδας αναφοράς (jpg, gif, html, css, X-javascript, κλπ). Για λόγους μέτρησης της εμπειρίας χρήστη (User Experience, UX) γίνονται δοκιμές και σε δημοφιλείς ιστοσελίδες (π.χ. ειδησεογραφικά portals) όπου βέβαια δεν εγγυώνται οι συνθήκες απ' άκρη σε άκρη μέτρηση.

Στις κινητές επικοινωνίες για την βέλτιστη αξιοποίηση των ραδιοπόρων είναι σύνηθης η εφαρμογή των επιταχυντών (*accelerators*) στο κανάλι μεταφοράς. Η λειτουργία των επιταχυντών βασίζεται στην μείωση του όγκου της μεταφερόμενης πληροφορίας η οποία μπορεί να επιτευχθεί με δυο βασικές μεθόδους: (α) την χωρίς απώλειες συμπίεση (*lossless compression*) των δεδομένων, και (β) με την μείωση του όγκου των δεδομένων μέσω της εξαλοική πληροφορίας (*lossy compression*). Στην πρώτη περίπτωση, η μέθοδος έχει σημαντικό όφελος ειδικά σε δεδομένα τύπου κειμένου (π.χ. html, js, css) και ανεπαίσθητο σε εικόνες όπου ήδη έχει γίνει συμπίεση. Αντίθετα, στην δεύτερη περίπτωση παρατηρείται αντιληπτή υποβάθμιση στην ποιότητα ειδικά στην περίπτωση πολυμεσικού περιεχομένου (εικόνες, βίντεο, ήχος) και αυτό διότι έχει ήδη προηγηθεί βέλτιστη συμπίεση της πληροφορίας (jpg, mp4, mp3). Συνεπώς, τίθεται σοβαρό το ερώτημα αν η ποιότητα υπηρεσίας web/http αρκεί να περιγραφεί επαρκώς από τον χρόνο προσπέλασης (*download time*) ή τον ρυθμό μετάδοσης (*download time*). Έτσι, ο σχεδιασμός μιας ιστοσελίδας αναφοράς για την οποία θα έχουν ληφθεί υπόψη τα άνω θέματα κρίνεται αναγκαίος.

Έτσι, πέραν των άλλων κλασσικών μεγεθών αποτελεί αναγκαιότητα ο ορισμός ενός μεγέθους που να λαμβάνει υπόψη τον παράγοντα επιτάχυνσης (*accelerator factor*). Αν T_{NACC} είναι ο χρόνος προσπέλασης (*download time*) σε μη επιταχυνόμενο κανάλι μεταφοράς και T_{ACC} σε επιταχυνόμενο αντίστοιχα, τότε ορίζεται ο χρονικός παράγοντας επιτάχυνσης $A(t)$ από την σχέση:

$$A(t) = \frac{T_{NACC}}{T_{ACC}} \quad (5.13)$$

Αντίστοιχα, αν S_{NACC} και S_{ACC} είναι το μέγεθος της ιστοσελίδας ανά περίπτωση, τότε ορίζεται ο παράγοντας επιτάχυνσης σχετιζόμενος με το μέγεθος $A(S)$:

$$A(S) = \frac{S_{NACC}}{S_{ACC}} \quad (5.14)$$

Οι μετρήσεις που θα πρέπει να διεξαχθούν είναι είναι οι εξής:

- Πλήθος αντικειμένων
- Συνολικό μέγεθος
- Κατανομή του μεγέθους των αντικειμένων
- Σύνθεση της ιστοσελίδας (κείμενο, εικόνες κλπ)
- Συμπίεση/βελτιστοποίηση εικόνας

5.5.10 Δοκιμή αποστολής και λήψης μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου e-mail send/receive

Η υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου είναι μια ευρέως διαδεδομένη υπηρεσία κινητού διαδικτύου. Βασίζεται στο πρωτόκολλο SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) [109] για την μεταφορά των μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) πάνω από IP δίκτυα.

Οι συνδέσεις που προστατεύονται από το SSL (Secure Sockets Layer) είναι γνωστές και από την σύντηξη SMTPS. Ενώ οι εξυπηρετητές ηλεκτρονικού ταχυδρομείου χρησιμοποιούν SMTP για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων, οι εφαρμογές επιπέδου χρήστη μόνο το SMTP για την αποστολή μηνυμάτων προς έναν εξυπηρετητή για την περαιτέρω προώθηση. Για την λήψη μηνυμάτων, οι εφαρμογές πελάτη συνήθως χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο POP3 (Post Office Protocol) [110] ή το IMAP (Internet Message Access Protocol) [111].

Για την εν λόγω δοκιμές (email send/receive) είναι δυνατόν να καθορισθούν και συνημμένα αρχεία δοκιμής. Επιπλέον, ο εξυπηρετητής μηνυμάτων (mail server) είναι στον εξυπηρετητή δοκιμών (test server) για τον οποίον έχουν καθορισθεί και ελέγχονται οι συνθήκες (συνδεσιμότητα, διαθεσιμότητα, προσβασιμότητα).

5.5.11 Δοκιμή Μεταφοράς UDP

Μια δοκιμή που χρησιμοποιείται με σκοπό τον έλεγχο της χωρητικότητας του δικτύου όπως θα γινόταν αν εκτελούταν μετάδοση ροής περιεχομένου ήχου βίντεο είναι η δοκιμή μεταφοράς UDP (UDP downlink, UDP DL) η οποία μετρά το εύρος ζώνης της κάτω ζεύξης με μια ροή καθορισμένων UDP πακέτων.

Για την εκτέλεση της δοκιμής θα πρέπει να καθοριστούν παράμετροι όπως το πλήθος των πακέτων που θα αποσταλούν από τον εξυπηρετητή, το χρονικό διάστημα (interval) t_g , το μέγεθος του πακέτου s_p και το εύρος ζώνης BW . Αρχικά, εγκαθίσταται μια σύνδεση TCP με σκοπό την ρύθμιση του εξυπηρετητή και αφού επιβεβαιωθεί τότε

λύεται. Κατόπιν, ο εξυπηρετητής ξεκινά την αποστολή n_p UDP πακέτων προς τον πελάτη με ένα υπολογισμένο χρονικό διάκενο (time gap):

$$t_g = \frac{n_p \times s_p}{BW} \quad (5.15)$$

Ο πελάτης καταγράφει κάθε πακέτο και υπολογίζει την μέση ρυθμοαπόδοση, την μεταβολή της καθυστέρησης (jitter) και την απώλεια πακέτων για κάθε εύρος ζώνης. Όπως δύναται η ύπαρξη καθυστερήσεων στο δίκτυο ή ακόμα και απώλειες πακέτων, ο πελάτης μπορεί να περιμένει πρόσθετο χρόνο αναμονής (buffer time) μετά από το τελευταίο πακέτο που θα πρέπει να φθάσει.

Τα στοιχεία για την ανάλυση είναι:

- Το όνομα ή η IR διεύθυνση του εξυπηρετητή UDP δοκιμών
- Το μέγεθος του κάθε πακέτου
- Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για την αποστολή πακέτων
- Η ρυθμοαπόδοση (throughput)

$$throughput = \frac{(p_R - 1) \times s_p}{t_{LastPkt} - t_{FirstPkt}} \quad (5.16)$$

- Το πλήθος των πακέτων που αποσταλήκαν
- Το πλήθος των πακέτων που παραλήφθηκαν εγκαίρως p_R
- Το jitter το οποίο υπολογίζεται ως το διπλάσιο της τυπικής απόκλισης του χρόνου μεταξύ των πακέτων.

5.6 Άκυρες μετρήσεις

Οι βασικές ενέργειες που απαιτούνται για την ορθή λειτουργία του μετρητικού συστήματος έχουν στόχο την ελαχιστοποίηση αυτών των άστοχων δοκιμών ή άκυρων μετρήσεων (fake events), τουλάχιστον από τη μεριά σφάλματος της μετρητικής διάταξης. Οι μετρήσεις σε μια περιοχή που θεωρούνται άκυρες, αλλά δεν επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα μετρήσεων, θα αφαιρούνται από τα αρχεία καταγραφής κατά τη στατιστική επεξεργασία των απο. τελεσμάτων. Τούτο ισχύει όταν έχουν επηρεαστεί σε ποσοστό μικρότερο ή ίσο του 5% των κλήσεων (ανά διαδρομή) του κάθε δικτύου στην υπό μέτρηση περιοχή. Στη συνέχεια δίνονται τα μηνύματα σηματοδότησης που θεωρούνται ικανά ώστε η συγκεκριμένη μέτρηση να χαρακτηριστεί άκυρη:

- Αποτυχία σταθερού τερματικού εξοπλισμού (καλούμενου αριθμού – B-party) ή βλάβη στο δίκτυο του παρόχου σταθερής τηλεφωνίας που εξυπηρετεί το καλούμενο αριθμό. Τυπική L3 σηματοδότηση που υποδηλώνει αστοχία B-party είναι κλήσεις που φτάνουν έως το “Alerting state” χωρίς πρόοδο, L3 μήνυμα “DL CC Alerting” αλλά δεν λαμβάνεται “DL CC Connect”, άρα το κινητό δεν μπορεί να επιβεβαιώσει την κλήση και αποστέλλει “UL CC Connect Acknowledge” μήνυμα.
- Κλήσεις κατά τη διάρκεια εγκατάστασης των οποίων ελήφθη σύντομο γραπτό μήνυμα (not expected signalling). Κλήσεις με λήψη SMS κατά τη διάρκεια του call setup.
- Κλήσεις με “UL Disconnect” μήνυμα πριν την ολοκλήρωση της αναμενόμενης διάρκειας κλήσης (90sec).
- Κλήσεις χωρίς “UL channel request” (GSM) ή “UL RRC connection request” (UMTS).
- Σε περιοχές αποδεκτής κάλυψης, ύπαρξη για τουλάχιστον 120 δευτερόλεπτα (επηρεάζονται 2 συνεχόμενες κλήσεις) προβλήματος (UE or s/w “stuck”, nothing decoded, nothing logged).

5.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετήθηκαν οι διατάξεις πειραματικού εξοπλισμού με σκοπό την αξιολόγηση επίδοσης επίγειων συστημάτων κινητών επικοινωνιών (GSM, UMTS, HSPA, LTE).

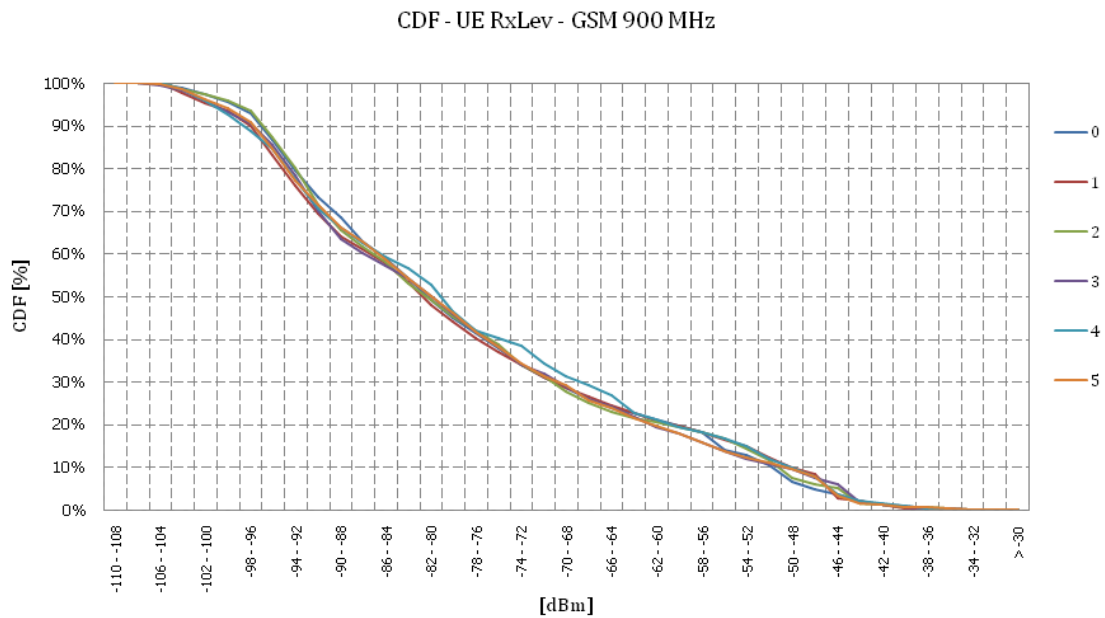
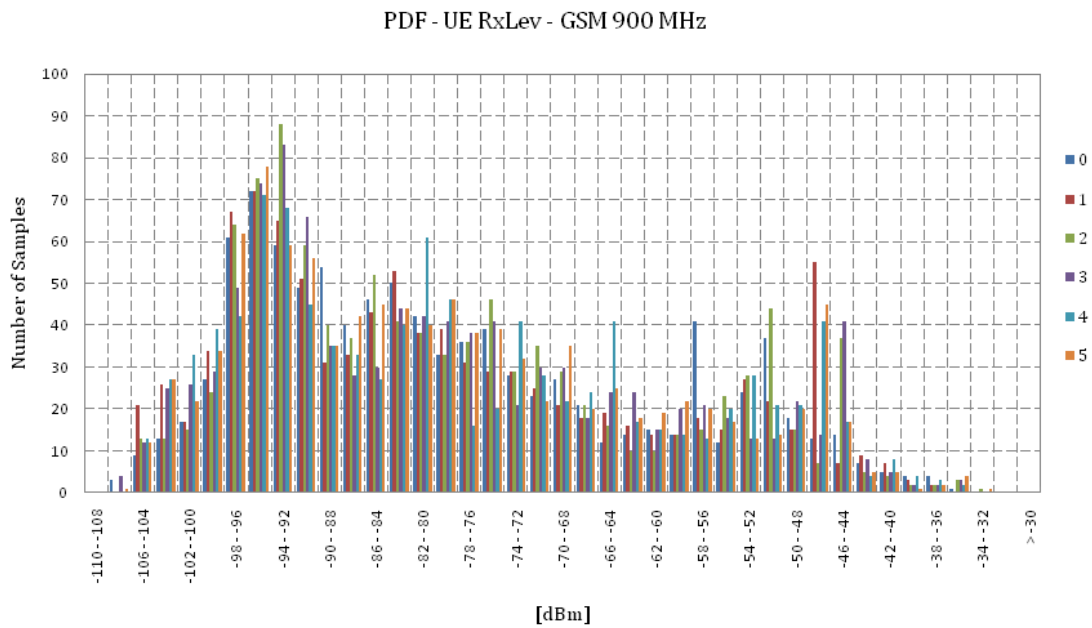
Υπάρχουν δυο σημαντικά θέματα όσο αφορά μετρητικό εξοπλισμό: α) η εύκολη, γρήγορη αλλά συνάμα αξιόπιστη βαθμονόμηση των επιμέρους μερών του εξοπλισμού, και β) ο καθορισμός μεθοδολογίας και σεναρίων μετρήσεων κατά περίπτωση.

Σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες πλέον είναι υποχρεωτική η συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών ποιότητας για τις παρεχόμενες υπηρεσίες από τα δημόσια δίκτυα κινητών επικοινωνιών και η δημοσιοποίηση των τεχνικών αναφορών των αποτελεσμάτων στο διαδίκτυο [112, 113]. Στην Ελλάδα, η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων με σχετικές αποφάσεις έχει καθορίσει τους δείκτες ποιότητας των παρεχόμενων προς το κοινό υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών και έχει προσδιορίσει το περιεχόμενο και τη μορφή των προς δημοσίευση πληροφοριών καθώς και του τρόπου και χρόνου δημοσίευσής τους από τους παρόχους υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών [114, 115].

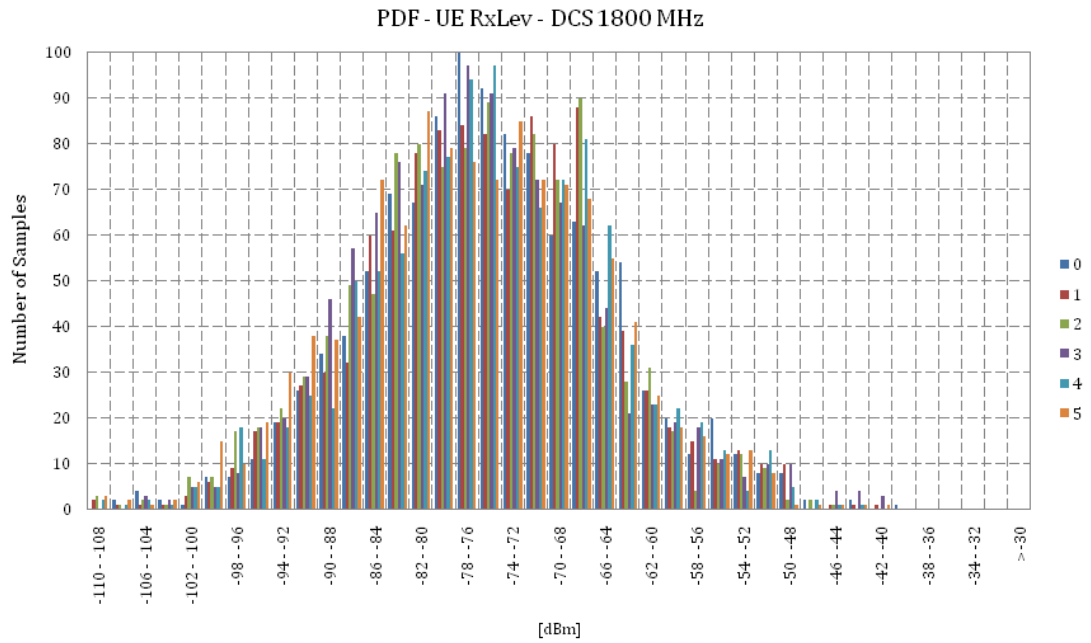
Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Στα πλαίσια της κύριας έρευνας έγιναν οι δημοσιεύσεις σε διεθνές περιοδικό [116] και συνέδρια [117]. Αναφέρονται επίσης μία δημοσίευση στη ερευνητική δράση COST 2100 [118], δυο δημοσιεύσεις σε πανελλήνια συνέδρια [119, 120] και μία ανακοίνωση σε επιστημονική ημερίδα [121].

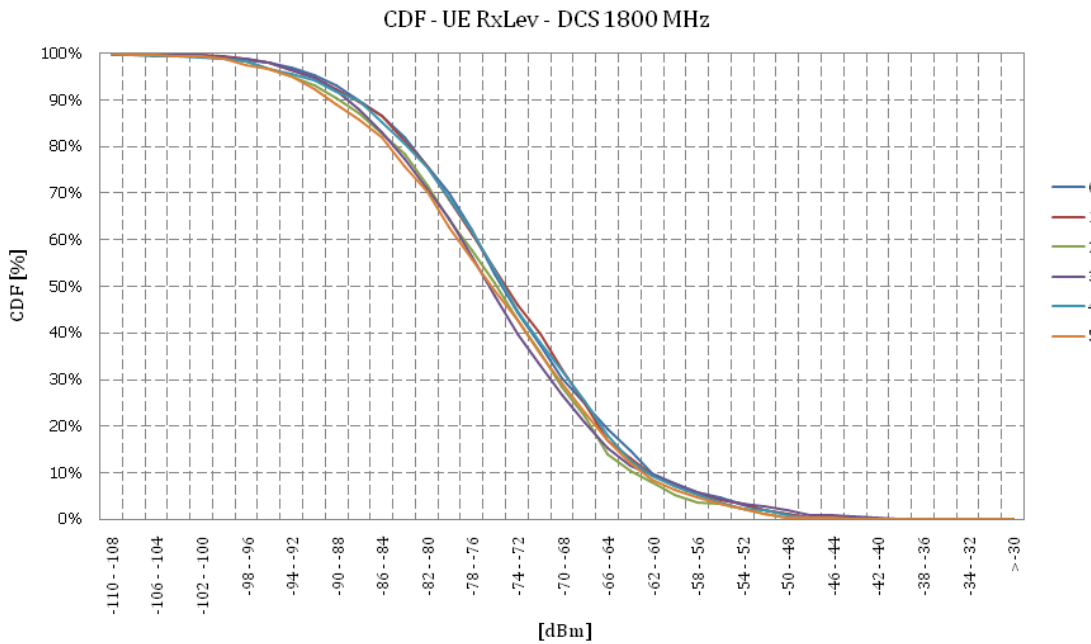
□



Σχήμα 5.12: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους RxLev στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

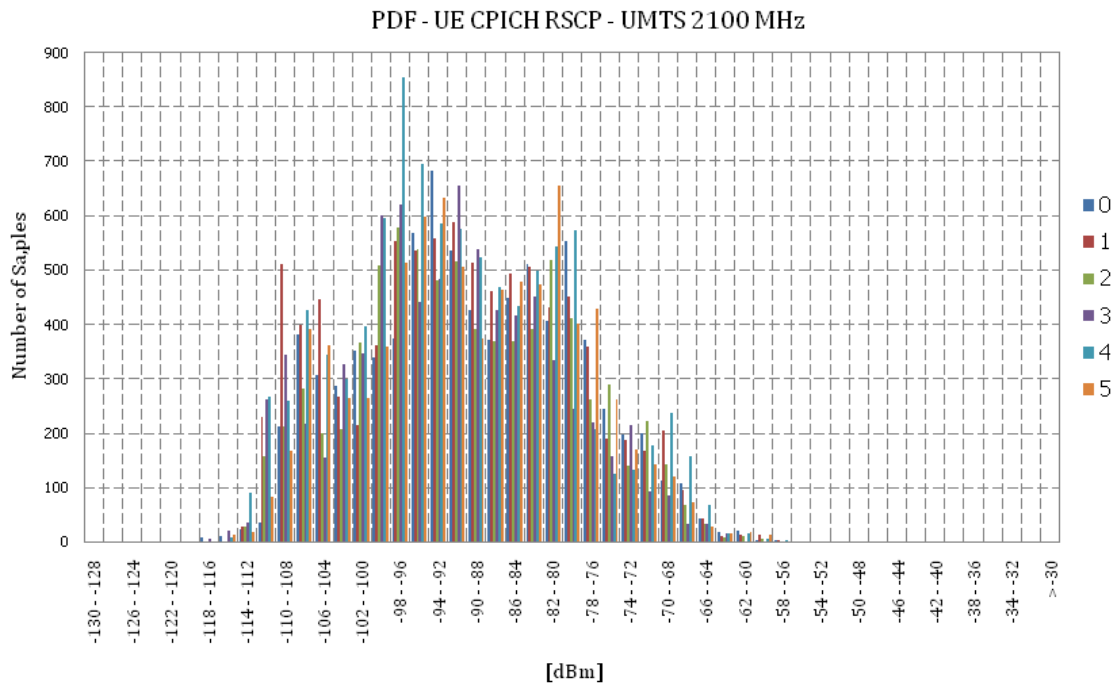


(α) Κατανομή PDF.

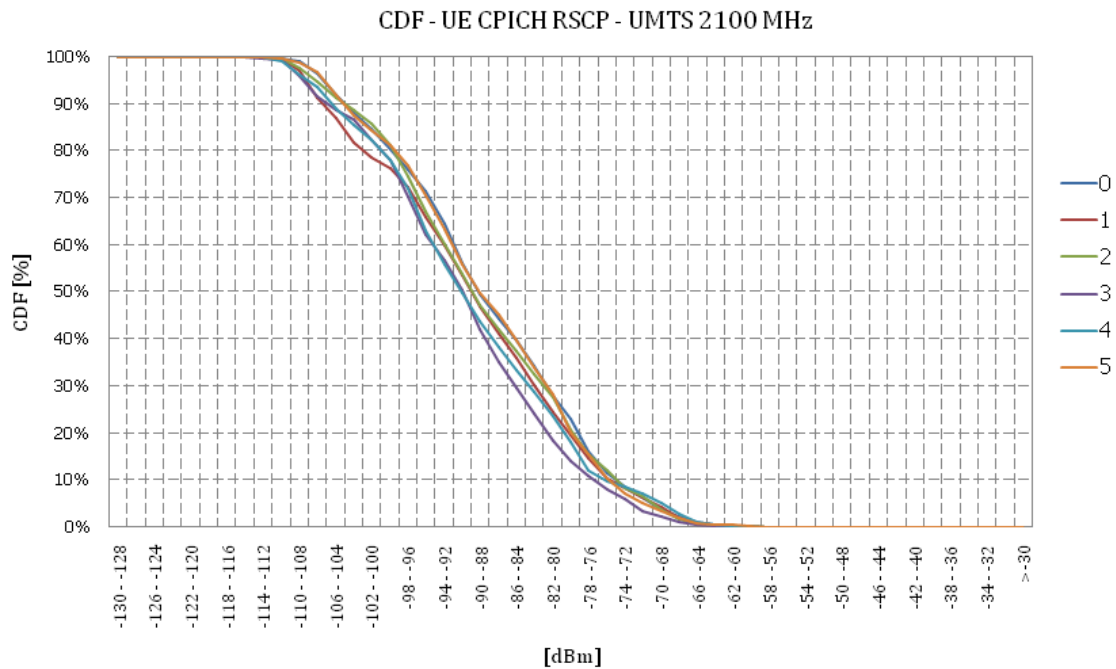


(β) Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.13: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους RxLev στο σύστημα DCS 900 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

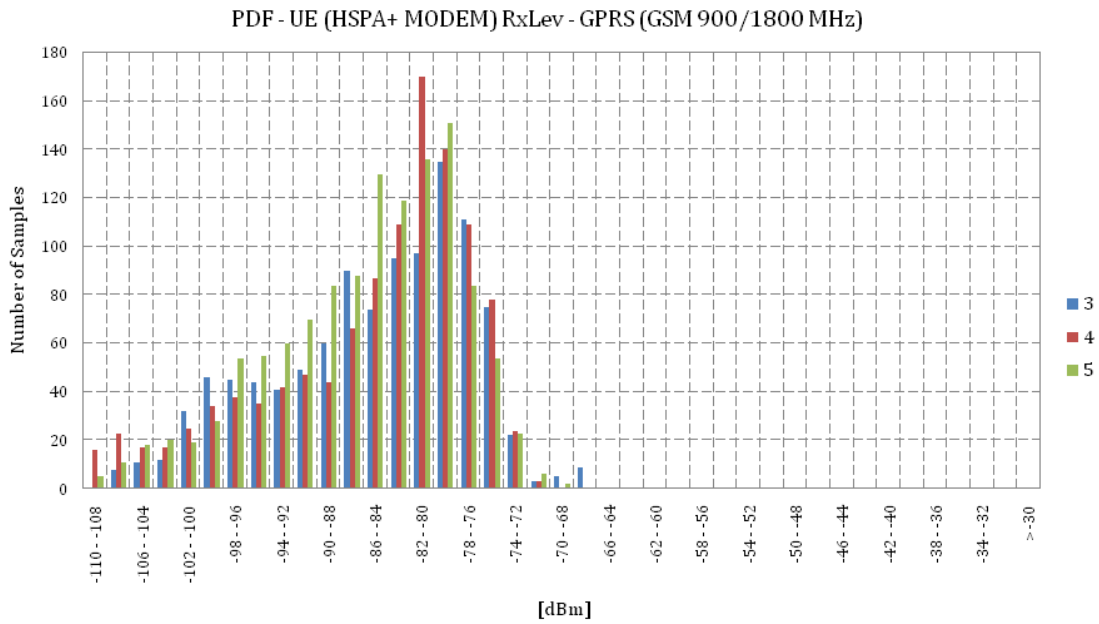


(α) Κατανομή PDF.

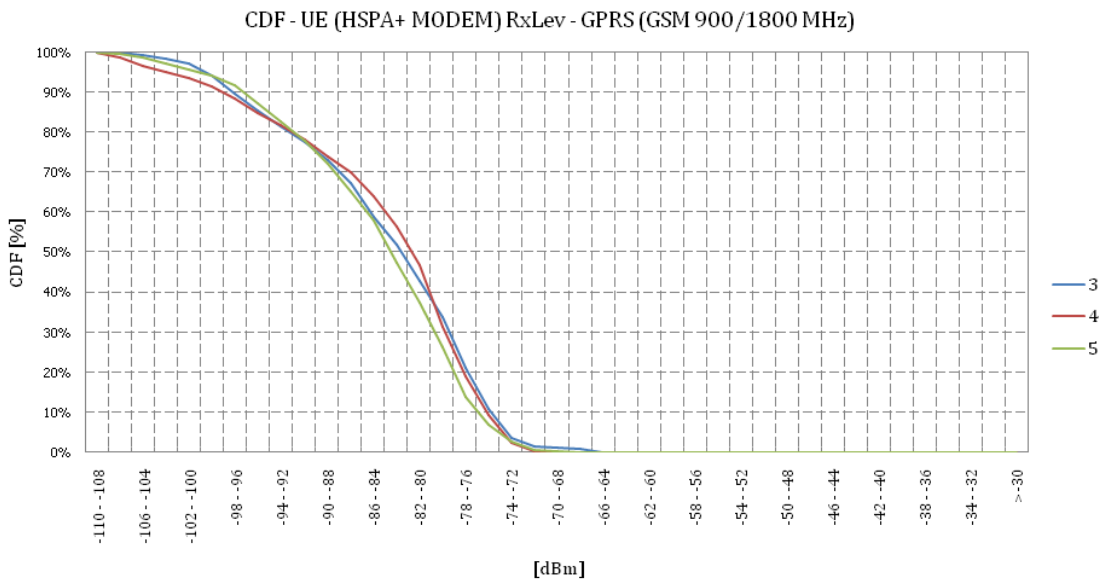


(β) Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.14: Κατανομές (α) PDF και (β) CDF του μεγέθους CPICH-RSCP στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 6 κινητά τηλέφωνα μετρήσεων.

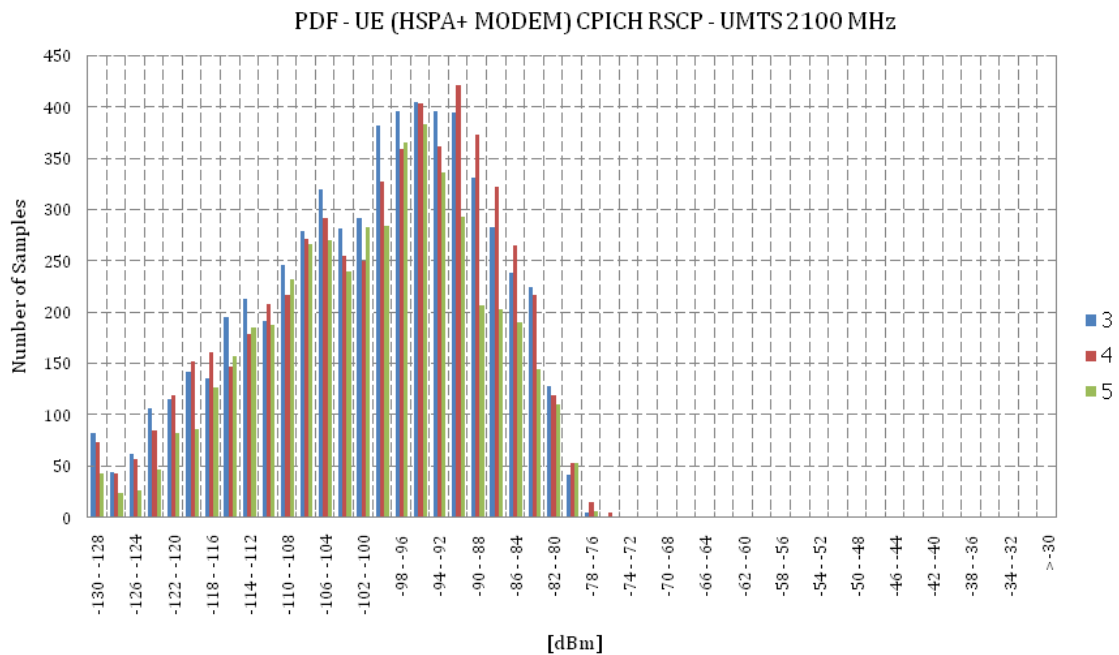


(α') Κατανομή PDF.

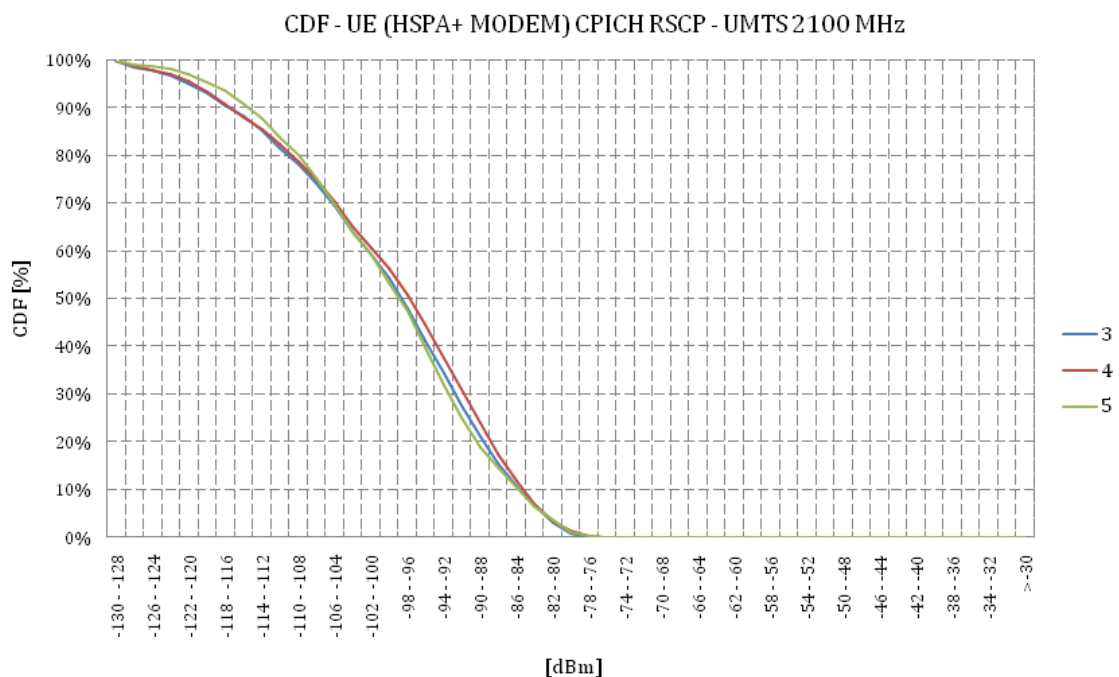


(β') Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.15: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους RxLev στην τεχνολογία GPRS, GSM 900/1800 MHz για 3 HSPA+ Modems μετρήσεων.



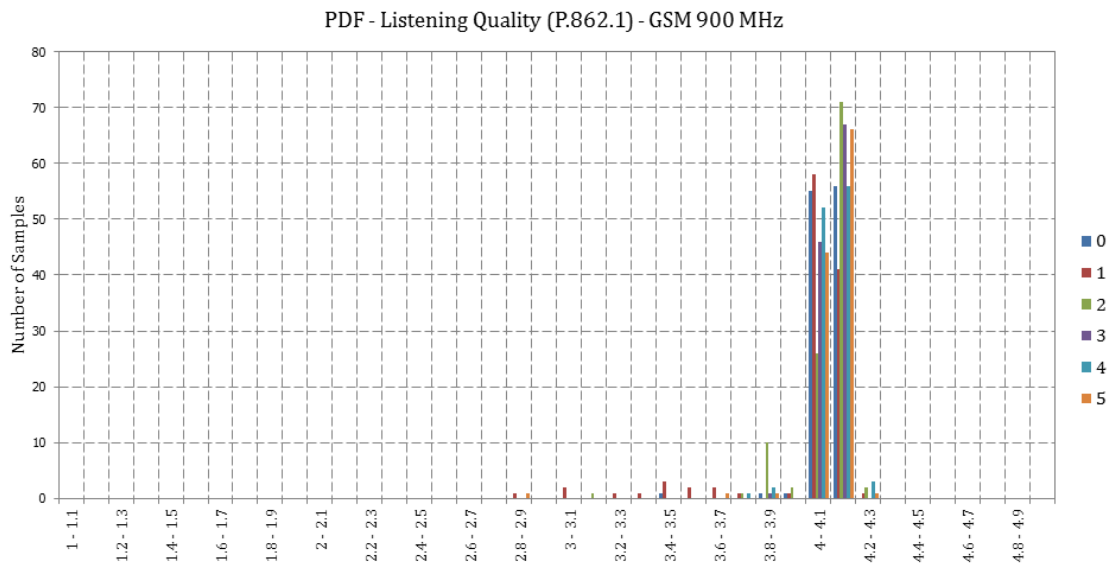
(α') Κατανομή PDF.



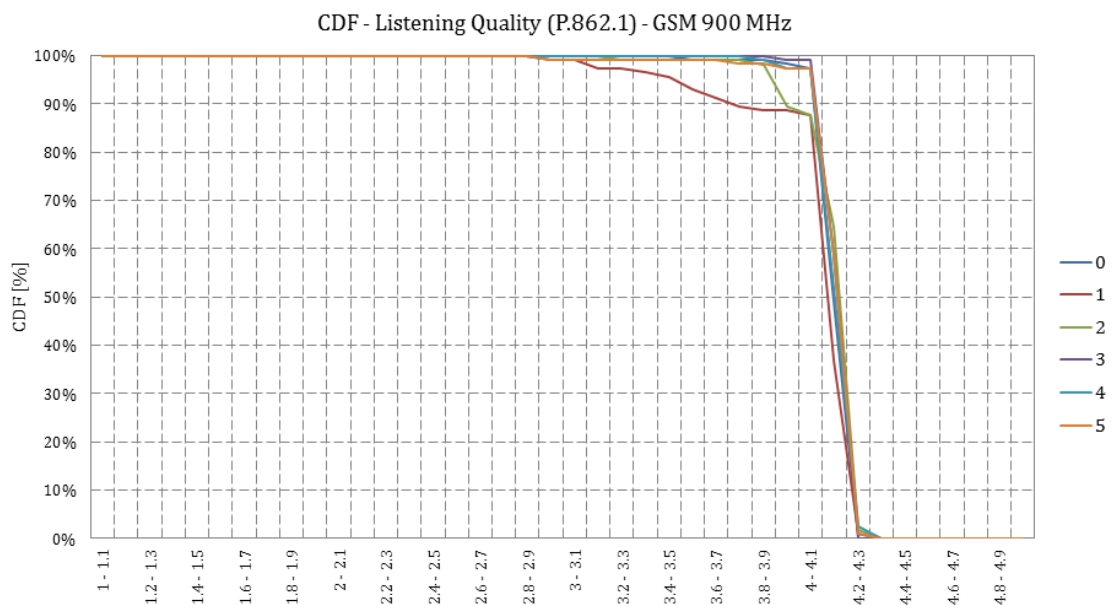
(β') Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.16: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους CPICH RSCP στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 3 HSPA+ Modems μετρήσεων.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας



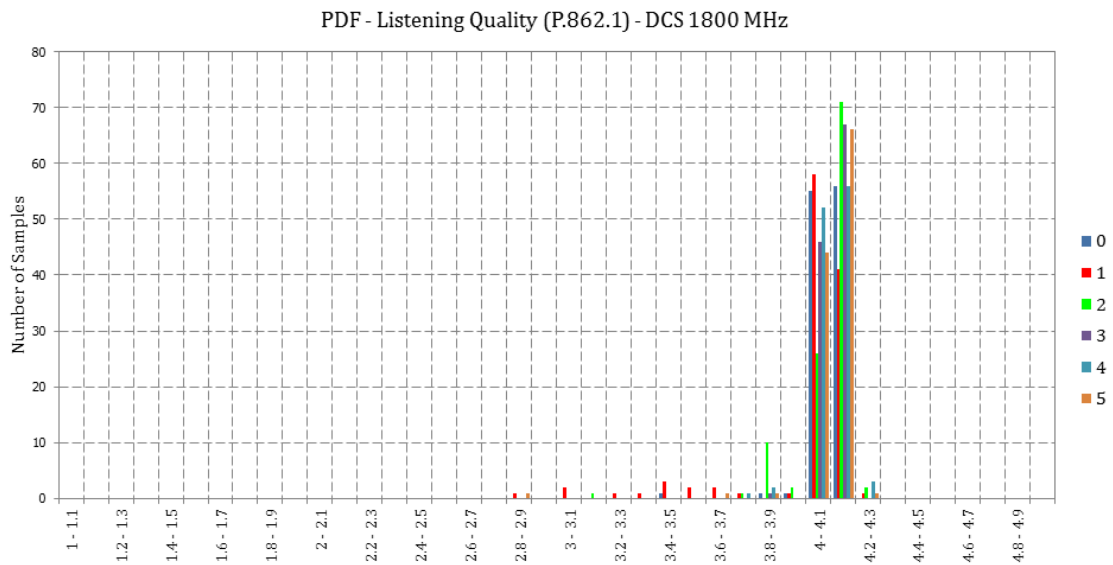
(α') Κατανομή PDF.



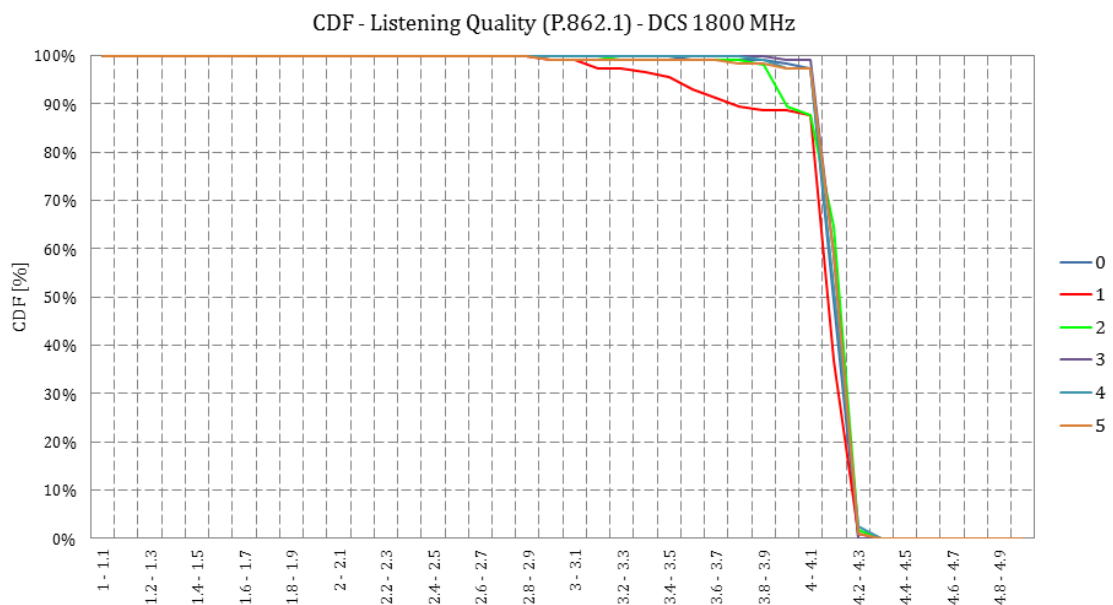
(β') Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.17: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα GSM 900 MHz για 6 τηλέφωνα μετρήσεων.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας



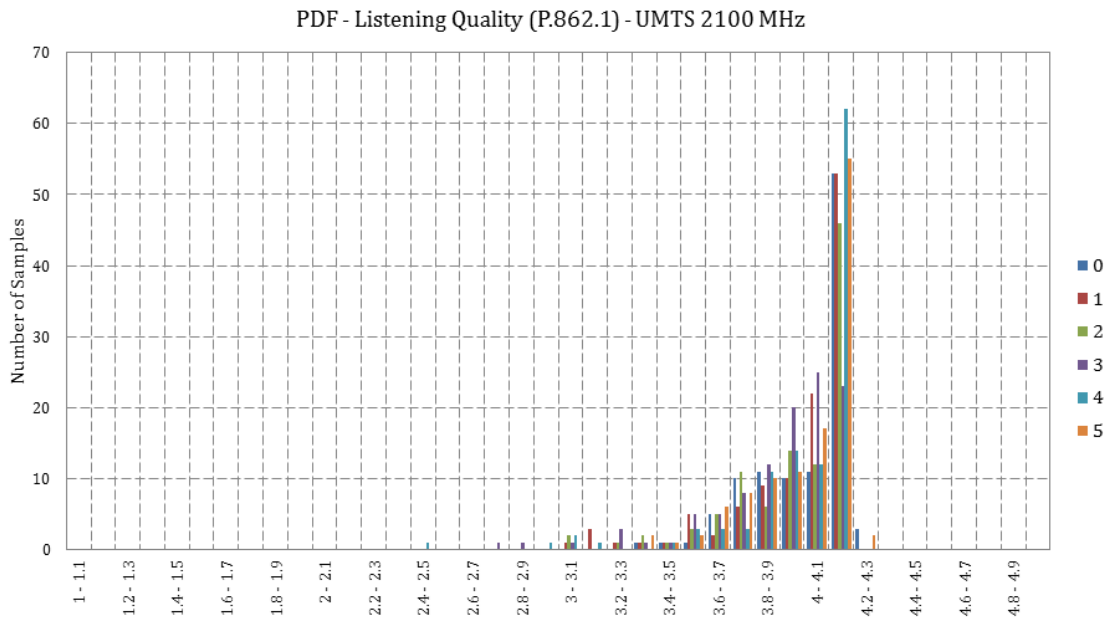
(α') Κατανομή PDF.



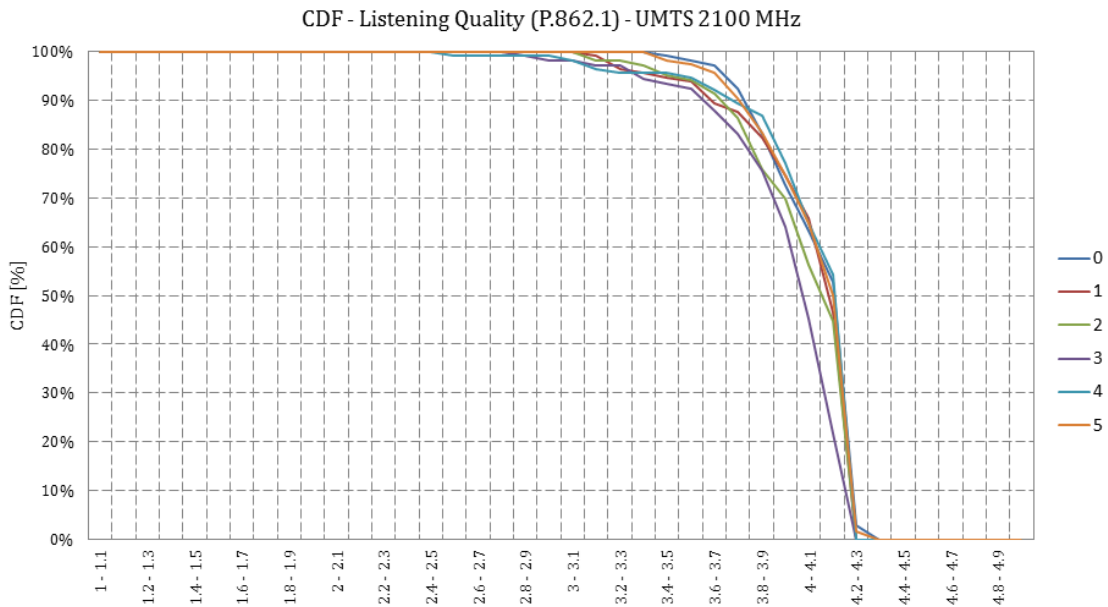
(β') Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.18: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα DCS 1800 MHz για 6 τηλέφωνα μετρήσεων.

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας



(α') Κατανομή PDF.

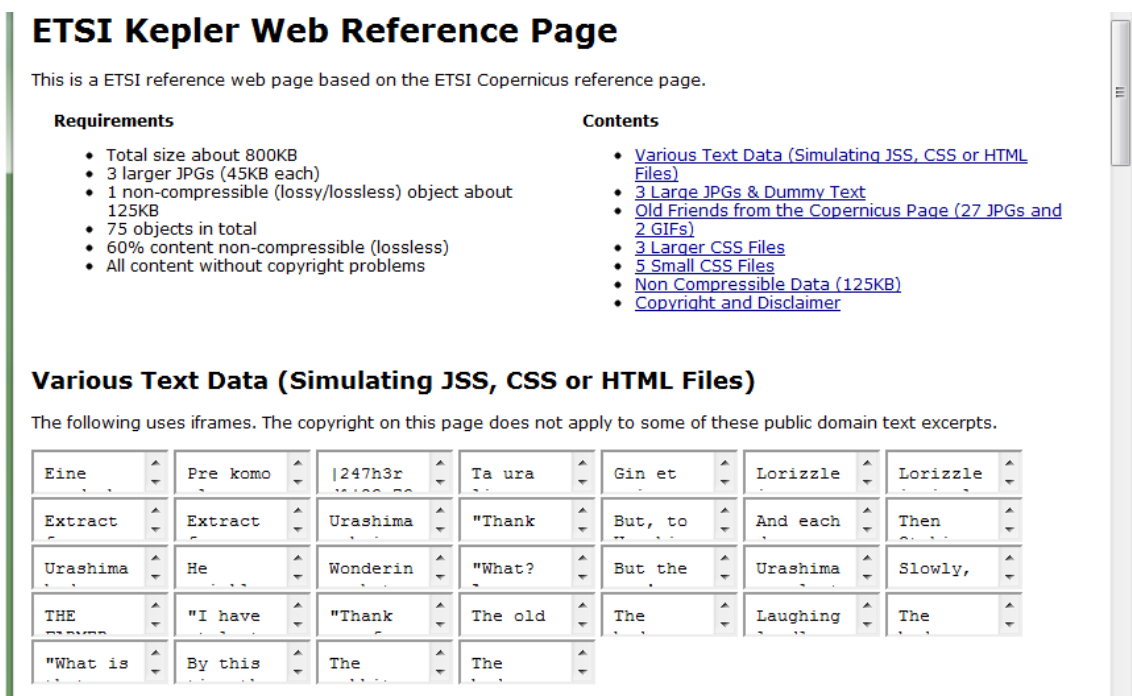


(β') Κατανομή CDF.

Σχήμα 5.19: Κατανομές (α') PDF και (β') CDF του μεγέθους PESQ-LQ στο σύστημα UMTS 2100 MHz για 6 τηλέφωνα μετρήσεων.



(α') Ιστοσελίδα αναφοράς Copernicus.



(β') Ιστοσελίδα αναφοράς Kepler.

Σχήμα 5.20: Ιστοσελίδες αναφοράς (α') Copernicus και (β') Kepler όπως προτείνονται από την Ομάδα Εργασίας ETSI STQ Mobile για την δοκιμή http.

ΜΕΡΟΣ ΙΙ

Στατιστικά και Υπολογιστικά Μοντέλα Πρόβλεψης Ποιότητας σε Σύγχρονα Ευρυζωνικά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Συγκριτικής Αξιολόγησης Ποιότητας

Κεφάλαιο 6

Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

Η εκτίμηση ή πρόβλεψη της ποιότητας εμπειρίας χρήστη QoE (ή ESQoS) από την ποιότητα υπηρεσίας δικτύου ή συστήματος QoS (ή SQoS) αποτελεί ένα από τα σύγχρονα θέματα έρευνας (state of the art) της περιοχής των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Οι εν λόγω έρευνες έχουν επικεντρωθεί κυρίως στον καθορισμό σχέσεων μεταξύ QoE-QoS ώστε να γίνεται εκτίμηση της ποιότητας φωνής, βίντεο και εν γένει υπηρεσιών διαδικτύου συνήθως με στατιστικές μεθόδους και κύρια με εφαρμογή μεθόδων παλινδρόμησης [122, 123, 124, 125, 126, 127, 128].

6.1 Μέθοδοι Παλινδρόμησης

Η παλινδρόμηση χρησιμοποιείται για να απεικονιστεί μια στοιχειώδης μέτρηση σε μια πραγματική μεταβλητή πρόβλεψης [129]. Στην πραγματικότητα, η παλινδρόμηση περιλαμβάνει την εκμάθηση της συνάρτησης που κάνει αυτή την απεικόνιση [130]. Η παλινδρόμηση προϋποθέτει ότι οι σχετικοί παράμετροι ταιριάζουν με μερικά γνωστά είδη συνάρτησης (π.χ. γραμμική, λογαριθμική κλπ.) και μετά καθορίζει την καλύτερη συνάρτηση αυτού του είδους που μοντελοποιεί τις μετρήσεις που έχουν δοθεί. Χρησιμοποιείται ένα είδος ανάλυσης σφάλματος για να καθορίσει ποια συνάρτηση είναι η καλύτερη [131, 132]. Διακρίνονται, σε γραμμικές και μη-γραμμικές τεχνικές.

6.1.1 Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)

Αν θεωρήσουμε ότι διαθέτουμε μετρήσεις για μια απλή μεταβλητή $y(k)$ και N οι μεταβλητές πρόβλεψης $x_i(k)$ $i=1,2,\dots,N$ για τα στιγμιότυπα $k=1,2,\dots,K$. Οι παράμετροι θ_i , $i=1,2,\dots,N$ του μοντέλου παλινδρόμησης

$$y(k) = \vartheta_0 + \sum_{i=1}^N \vartheta_i x_i(k) + e(k) \quad (6.1)$$

μπορούν να εκτιμηθούν ελαχιστοποιώντας το σφάλμα $e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$ μεταξύ των μετρήσεων $y(k)$ και των προβλέψεων $\hat{y}(k) = \vartheta_0 + \sum_{i=1}^N \vartheta_i x_i(k)$.

Το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης μπορεί να παρασταθεί στην φόρμα $\mathbf{Y} = \mathbf{X}\theta + \mathbf{E}$ όπου $\mathbf{Y} = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(K)]^T$, $\mathbf{E} = [e(1) \ e(2) \ \dots \ e(K)]^T$ και

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_N(1) \\ 1 & x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_N(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1(K) & x_2(K) & \cdots & x_N(K) \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Μια αμερόληπτη εκτίμηση του $\hat{\theta}$ για την διανυσματική παράμετρο $\theta = [\theta(1) \ \theta(2) \ \dots \ \theta(N)]^T$ μπορεί να εξαχθεί ελαχιστοποιώντας το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος $\mathbf{E}^T \mathbf{E}$ μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και της πρόβλεψης δεδομένου μοντέλου, οδηγεί στο

$$\hat{\theta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (6.3)$$

Η αξιολόγηση του μοντέλου γίνεται από τον κάτωθι συντελεστή Pearson

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^K [y(k) - \hat{y}(k)]^2}{\sum_{k=1}^K [y(k) - \bar{y}]^2} \quad (6.4)$$

όπου \bar{y} δηλώνει την μέση των μετρήσεων $y(k)$, $k = 1, 2, \dots, K$. Αν R^2 λαμβάνει τιμές κοντά στο 1, οι μετρήσεις δείχνουν ότι έχουν ισχυρή γραμμικότητα ενώ όταν οι τιμές του R^2 είναι πιο κοντά στο 0 τότε υπάρχει μη γραμμικότητα μεταξύ των μεταβλητών.

6.1.2 Μη γραμμική παλινδρόμηση

Στην περίπτωση κατασκευής ενός μοντέλου πρόβλεψης το οποίο είναι μη γραμμικό στις παραμέτρους του, χρησιμοποιείται ευρέως η μη γραμμική παλινδρόμηση (NLR, Non Linear Regression) [133].

Ο σκοπός είναι να βρεθεί μια εκτίμηση Θ^* του Θ η οποία να ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση $F(\Theta) = R'WR$, όπου $R' = (R_1, R_2, \dots, R_n)$, $R_i = y_i - f_i$, $f_i = f(x_i, \Theta^*)$ για $i = 1, 2, \dots, n$ και $W = \text{Diag}(W_1, W_2, \dots, W_n)$ όπου n το πλήθος των μετρήσεων. Στην μέτρηση i , y_i είναι η τιμή του μετρούμενου μεγέθους (εξαρτημένη μεταβλητή), x_i είναι το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών, W_i είναι η συνάρτηση βάρους η οποία μπορεί να είναι συνάρτηση του Θ .

Η κλίση της συνάρτησης F επί του Θ καθορίζεται ως $\nabla F = 2J'_j WR$, όπου J'_j

Τύπος	Παλινδρόμηση
Γραμμικό	DL: $\psi = 0.008x + 4.275$ UL: $\psi = 0.007x + 4.255$
Πολυωνυμικό	DL: $\psi = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 0.043x + 2.595$ UL: $\psi = -3 \cdot 10^{-4}x^2 - 0.039x + 2.742$
Δυναμικό	DL: $\psi = 7.046 x ^{-0.151}$ UL: $\psi = 6.674 x ^{-0.136}$
Εκθετικό	DL: $\psi = 4.389 \exp^{0.002x}$ UL: $\psi = 4.354 \exp^{0.002x}$
Λογαριθμικό	DL: $\psi = -0.489 \ln x + 5.810$ UL: $\psi = -0.445 \ln x + 5.649$

Πίνακας 6.1: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{GSM}$ (RxLev σε dBm) στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας.

είναι η j -ή στήλη του $n \times p$ Ιακωβιανού πίνακα J του οποίου το (i, j) στοιχείο ορίζεται ως:

$$J_{i,j} = \frac{R_i}{2W_i} \cdot \frac{\partial W_i}{\partial \Theta_j} - \frac{\partial f_i}{\partial \Theta_j} \quad (6.5)$$

Για την αριθμητική επίλυση της μη αντικειμενικής συνάρτησης F χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Levenberg-Marquardt.

6.1.3 Μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας τηλεφωνίας

Δεδομένων των μετρήσεων που συλλέχθηκαν από την καμπάνια μετρήσεων, δημιουργήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης για την εκτίμηση ποιότητας τηλεφωνίας. Οι τύποι των μοντέλων που προτείνονται είναι το γραμμικό, το πολυωνυμικό, το δυναμικό, το εκθετικό και το λογαριθμικό.

Αναλυτικά, οι εξισώσεις των μοντέλων για την περίπτωση της GSM τηλεφωνίας συγκεντρώνονται στον Πίνακα 6.1. Αντίστοιχα, για την περίπτωση μελέτης της UMTS τηλεφωνίας οι εξισώσεις των μοντέλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Τέλος, η ποιότητα φωνής στην περίπτωση της βιντεοτηλεφωνίας εκτιμάται από τις σχετικές εξισώσεις των μοντέλων του Πίνακα 6.3.

Οι παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{GSM}$ (RxLev σε dBm) στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας απεικονίζονται στο Σχήμα 6.1. Ειδική μέριμνα δόθηκε στην πρόταση μοντέλων για κάθε τιμή RxQual, ειδικά για τα εύρη τιμών $\{0, 1\}$, $\{1, 2\}$, $\{2, 3\}$, $\{3, 4\}$, $\{4, 5\}$, $\{5, 6\}$ και $\{6, 7\}$ όπως απεικονίζεται στα γραφήματα του Σχήματος 6.1.3. Λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του κωδικοποιητή, EFR, AMR FR και AMR HR, τα μοντέλα προσαρμόστηκαν αντίστοιχα και απεικονίζονται στο Σχήμα 6.1.3.

Ομοίως, για την περίπτωση της UMTS τηλεφωνίας, τα καμπύλες των παλινδρομήσε-

Τύπος	Παλινδρόμηση
Γραμμικό	DL: $\psi = 0.033x + 4.030$ UL: $\psi = 0.035x + 4.059$
Πολυωνυμικό	DL: $\psi = -5.7 \cdot 10^{-3}x^2 - 0.045x + 3.786$ UL: $\psi = -2.1 \cdot 10^{-3}x^2 + 0.008x + 3.976$
Δυναμικό	DL: $\psi = 4.172 x ^{-0.05}$ UL: $\psi = 4.364 x ^{-0.077}$
Εκθετικό	DL: $\psi = 4.046 \exp^{0.01x}$ UL: $\psi = 4.137 \exp^{0.014x}$
Λογαριθμικό	DL: $\psi = -0.173 \ln x + 4.138$ UL: $\psi = -0,202 \ln x + 4.201$

Πίνακας 6.2: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας.

Τύπος	Παλινδρόμηση
Γραμμικό	DL: $\psi = 0.103x + 4.350$ UL: $\psi = 0.038x + 3.897$
Πολυωνυμικό	DL: $\psi = 1.5 \cdot 10^{-3}x^2 + 0,123x + 4.412$ UL: $\psi = 3.5 \cdot 10^{-3}x^2 + 0.008x + 3.976$
Δυναμικό	DL: $\psi = 5.112 x ^{-0.181}$ UL: $\psi = 4.119 x ^{-0.072}$
Εκθετικό	DL: $\psi = 4.407 \exp^{0.029x}$ UL: $\psi = 3.882 \exp^{0.011x}$
Λογαριθμικό	DL: $\psi = -0.648 \ln x + 4.8812$ UL: $\psi = -0,235 \ln x + 4.085$

Πίνακας 6.3: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

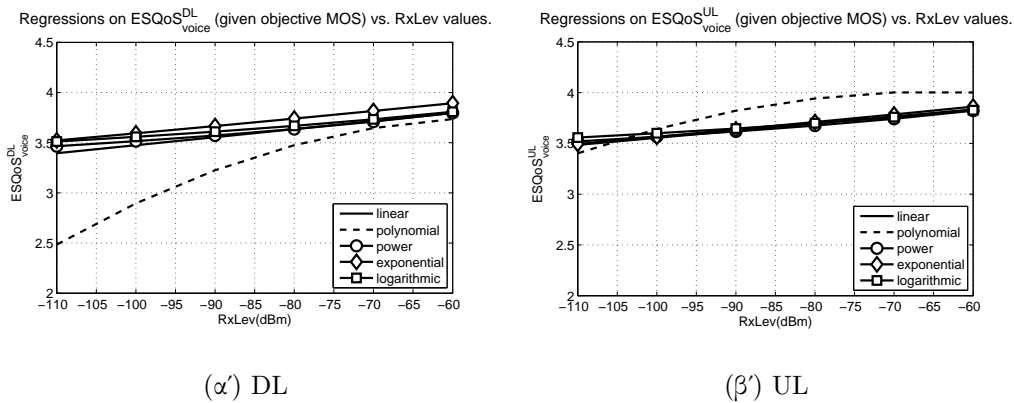
ωνς του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) απεικονίζονται στο Σχήμα 6.4 τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη.

6.1.4 Μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας βίντεο και πολυμέσων

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος μελέτη αποτέλεσε η εξαγωγή μοντέλων παλινδρόμησης για την περίπτωση της UMTS βιντεοτηλεφωνίας. Στο Σχήμα 6.5 συγκεντρώνονται οι καμπύλες των παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$, $ESQoS_{video}$ και $ESQoS_{mm}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB).

Η μέθοδος της παλινδρόμησης μπορεί να εφαρμοστεί και για δυο ανεξάρτητες μεταβλητές $RSCP$ και E_c/I_0 , με την συνάρτηση που περιγράφεται στην Εξίσωση (6.6). Έτσι για την εξαρτημένη μεταβλητή $PSNR$ που περιγράφει ποιότητα βίντεο και υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4. Στο Σχήμα 6.6 απεικονίζεται η επιφάνεια του μοντέλου πρόβλεψης $PSNR$ ως προς τις ραδιοπαραμέτρους δικτύου $RSCP$ και E_c/I_0 .

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

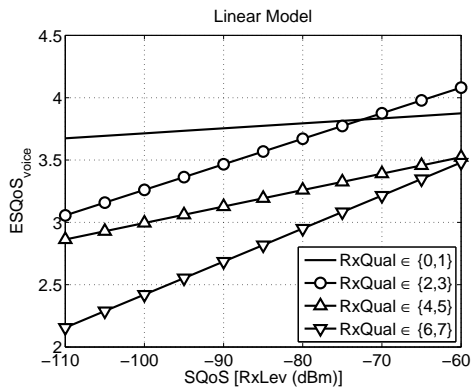


Σχήμα 6.1: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{GSM}$ ($RxLev$ σε dBm) στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας.

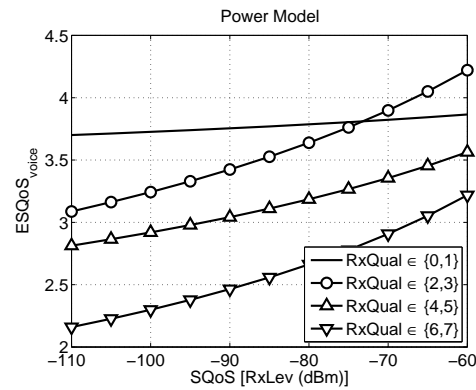
$$PSNR_{prediction}(RSCP, E_c/I_0) = \omega_1 \cdot e^{\omega_2 \cdot |RSCP|} + \omega_3 \cdot e^{\omega_4 \cdot |E_c/I_0|} \quad (6.6)$$

Πίνακας 6.4: Πολυμεταβλητό μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη ποιότητας σε σε κινητά δίκτυα UMTS 2100MHz.

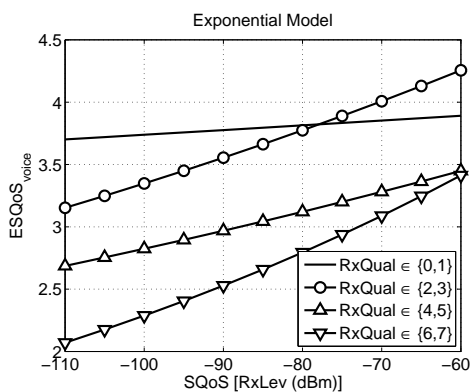
Ποιότητα βίντεο ($PSNR$)	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
Παράμετροι μοντέλου πρόβλεψης	21.078	-0.001	9.796	0.007



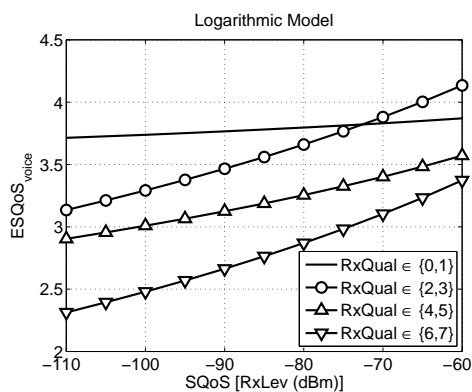
(α') Γραμμικό Μοντέλο



(β') Δυναμικό Μοντέλο



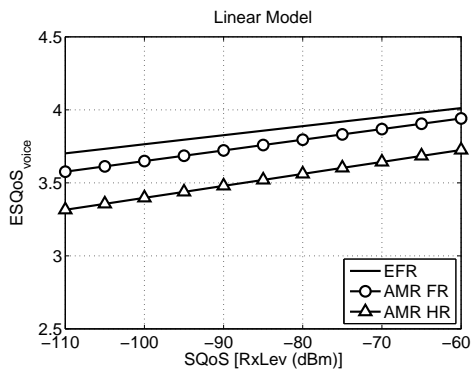
(γ') Εκθετικό Μοντέλο



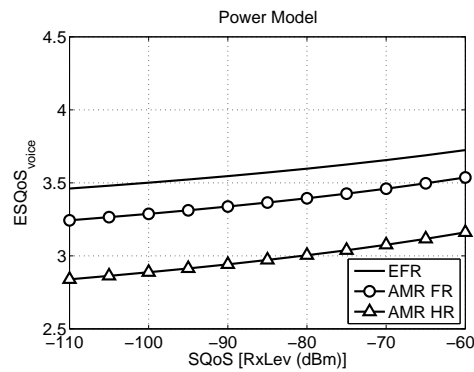
(δ') Λογαριθμικό Μοντέλο

Σχήμα 6.2: Παλινδρομήσεις (regressions) της ποιότητας φωνής $ESQoS_{voice}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς την ποιότητα ραδιοκάλυψης $SQoS_{GSM}$ ($RxLev$ σε dBm) για κάθε περίπτωση ($RxQual$).

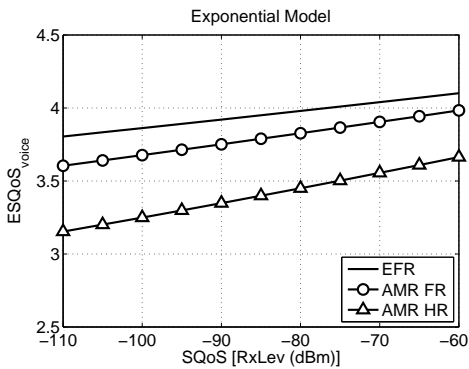
Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης



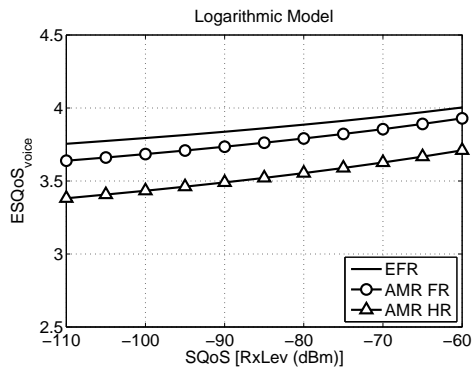
(α') Γραμμικό Μοντέλο



(β') Δυναμικό Μοντέλο

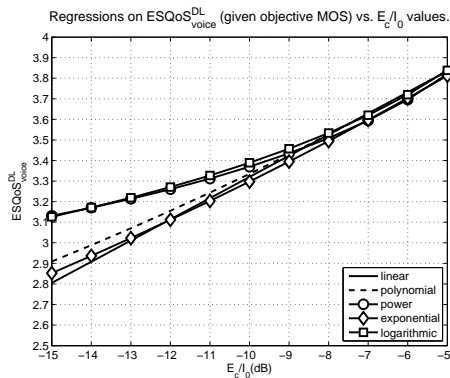


(γ') Εκθετικό Μοντέλο

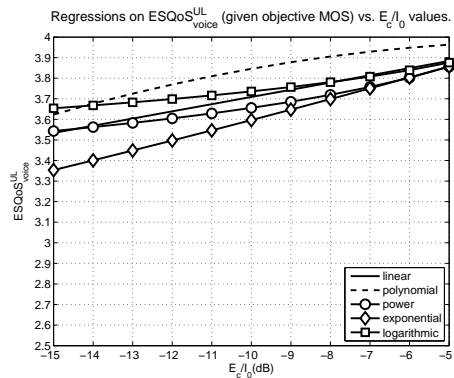


(δ') Λογαριθμικό Μοντέλο

Σχήμα 6.3: Παλινδρομήσεις (regressions) της ποιότητας φωνής $ESQoS_{voice}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς την ποιότητα ραδιοκάλυψης $SQoS_{GSM}$ ($RxLev$ σε dBm) για κάθε περίπτωση κωδικοποιητή φωνής (codec).



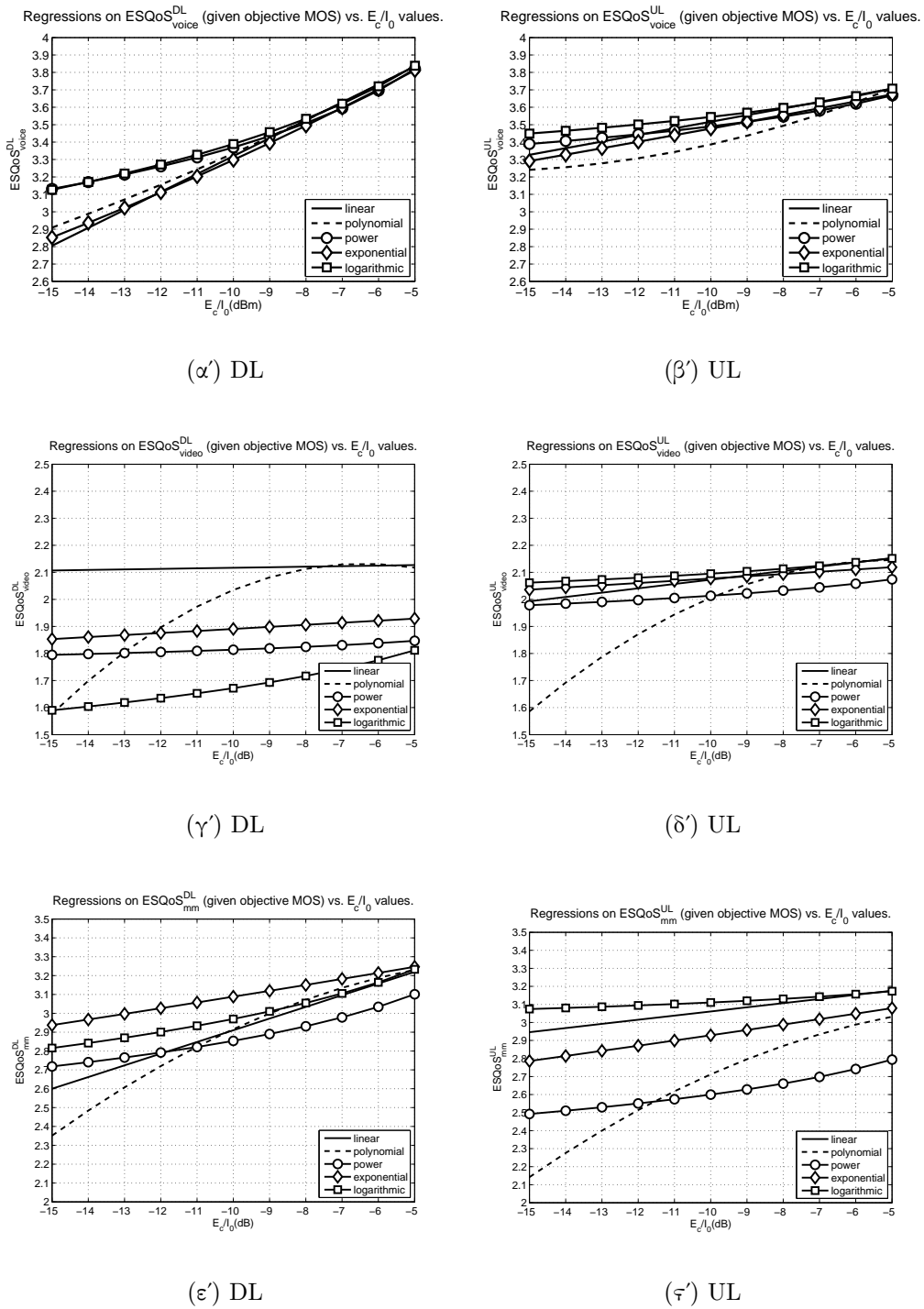
(α') DL



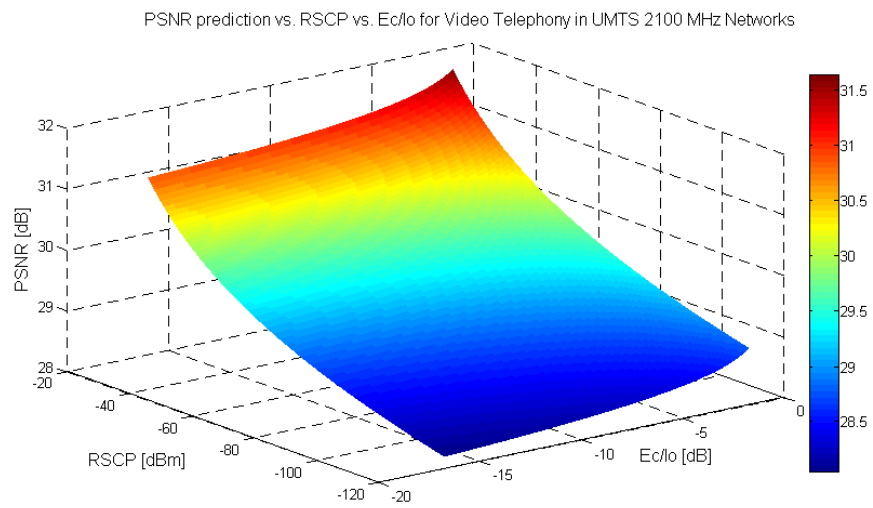
(β') UL

Σχήμα 6.4: Παλινδρομήσεις του $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας.

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης



Σχήμα 6.5: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$, $ESQoS_{video}$ και $ESQoS_{mm}$ (σε τιμές obj. MOS) ως προς $ESQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.



Σχήμα 6.6: Πρόβλεψη της ποιότητας βίντεο, δείκτης $PSNR$, ως προς τις παραμέτρους ποιότητας ραδιοδικτύου $UMTS$ 2100 MHz.

6.2 Εύρωστη Βελτιστοποίηση σε Μη Γραμμική Παλινδρομηση

Είναι γνωστό ότι τα δεδομένα μετρήσεων διαθέτουν αβεβαιότητα - δηλαδή δεν είναι γνωστά με ακρίβεια. Τα λάθη εκτίμησης / μετρήσεων προέρχονται από την αδυναμία να μετρηθούν / εκτιμηθούν με ακρίβεια οι δείκτες που αναπαραστούν χαρακτηριστικά όπως η ποιότητα δικτύου. Έτσι αν $SQoS^*$ είναι η ακριβής τιμή μιας παραμέτρου, τότε η μετρούμενη τιμή του μεγέθους είναι $SQoS^* \mapsto (1 + \varepsilon)SQoS^*$. Σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν μπορεί να παραληφθεί η πιθανότητα ότι ακόμα και μικρή αβεβαιότητα στα δεδομένα του προβλήματος, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απόκλιση του μοντέλου πρόβλεψης από πρακτικής πλευράς. Συνεπώς, υπάρχει μια πραγματική ανάγκη για μια μεθοδολογία ικανή να ανιχνεύσει τις περιπτώσεις εκείνες που η αβεβαιότητα των δεδομένων μπορεί να δημιουργεί σημαντικές επιπτώσεις στην εύρεση μιας εύρωστης λύσης, η οποία θα είναι σθεναρή στην αβεβαιότητα των δεδομένων / μετρήσεων.

Η σθεναρή ή αλεξιθόρυβη¹ βελτιστοποίηση (robust optimization) [134, 135] χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στη μαθηματική βελτιστοποίηση ως ένας αποτελεσματικός τρόπος για να εμβολιάσει λύσεις με τα στοιχεία αβεβαιότητας (uncertainty). Αν η πραγματική τιμή των δεδομένων ενός προβλήματος δεν ισούται με την ονομαστική του τιμή, η βέλτιστη λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας η ονομαστική τιμή η οποία μπορεί να μην είναι η βέλτιστη ή ακόμη και εφικτή για την πραγματική τιμή. Η αλεξιθόρυβη βελτιστοποίηση θεωρεί σύνολα αβεβαιότητας για τα δεδομένα ενός προβλήματος και καθορίζει λύσεις που έχουν ανοσία σε αβεβαιότητα. Σε προβλήματα γραμμικής βελτιστοποίησης, έχουν ληφθεί υπόψη διάφοροι τύποι σύνολων αβεβαιότητας, όπως box-type [136] και ελλειψοειδείς. Σε προβλήματα γραμμικής καθώς και μικτής ακέραιας βελτιστοποίησης (mixed integer optimization), εύρωστα αντίστοιχα με τα σύνολα προϋπολογισμένης αβεβαιότητας τα οποία συνδέουν τις αβεβαιότητες που αναπτύχθηκαν από τους συντελεστές των περιορισμών έχουν επιλυθεί αποτελεσματικά [137]. Το παράδειγμα της εύρωστης βελτιστοποίησης έχει εφαρμοστεί επιτυχημένα σε προβλήματα παλινδρόμησης και κατηγοριοποίησης για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας σε στατιστικά δεδομένα και έχει συνδεθεί με κανονικοποιημένα μοντέλα παλινδρόμησης.

Η εύρωστη βελτιστοποίηση έχει βαθιές ρίζες στην ιστορία των επιστημών και προτάθηκαν πολλές προσεγγίσεις με διαφορετικές ιδέες. Η ευρωστία ή σθεναρότητα έχουν αναφερθεί στις εξής περιπτώσεις:

Robust Control Ο εύρωστος ή σθεναρός έλεγχος προτάθηκε την δεκαετία του '90

¹Το πρόθεμα αλεξι- ή αλεξ- χρησιμοποιείται σε λόγιες εκφράσεις ως πρώτο συνθετικό και σημαίνει απώθηση/απομάκρυνση αυτού που δηλώνεται με το δεύτερο συνθετικό. Έτσι αλεξιθόρυβος σημαίνει αυτός που προστατεύει από τον θόρυβο. Η απόδοση του όρου "Robust Optimization" σε "Αλεξιθόρυβη Βελτιστοποίηση" προτείνεται από τον Δρ. Α.Γ. Φέρτη.

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

από σχεδιαστές συστημάτων ελέγχου για να εγγυηθούν την ευστάθεια (stability) ενός υπό έλεγχο συστήματος. Το θέμα της ευρωστίας μπορεί ιστορικά να ανιχνευθεί στις αρχές του '30 από τον Bode για το περιεχόμενο των ενισχυτών ανάδρασης. Ερωτήματα όπως *περιθώριο ευστάθειας* το οποίο είναι το μέγεθος του κέρδους ανάδρασης το οποίο απαιτείται για την αποσταθεροποίηση ενός υπό έλεγχο συστήματος, οδήγησε στην μελέτη από πλευράς *χειρίστησ-περίπτωσης*. Η πιο γνωστή μέθοδος είναι η τεχνική H_∞ όπου ελαχιστοποιεί την ευαισθησία ενός συστήματος στο πεδίο της συχνότητας, και αυτό εγγυάται ότι το σύστημα δεν θα αποκλίνει σημαντικά από τις εκτιμώμενες καμπύλες όταν στο σύστημα θα εισέλθου ανωμαλίες.

Robust Statistics Στην Στατιστική, η ευρωστία συνήθως αναφέρεται στη μη ευαισθησία στις απομακρυσμένες τιμές. Εδώ προτείνεται ένας τρόπος χειρισμού των απομακρυσμένων τιμών με μια προσαρμογή των συναρτήσεων απωλειών. Η ακριβής σύνδεση της εύρωστης βελτιστοποίησης είναι ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο.

Machine Learning Στην μηχανική μάθηση, ένα νέο πεδίο έρευνας είναι οι Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines, SVM). Τα SVMs είναι αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης οι οποίοι μπορούν να ερμηνευτούν μεγιστοποιημένη ευρωστία για ένα συγκεκριμένο είδος αβεβαιότητας [138].

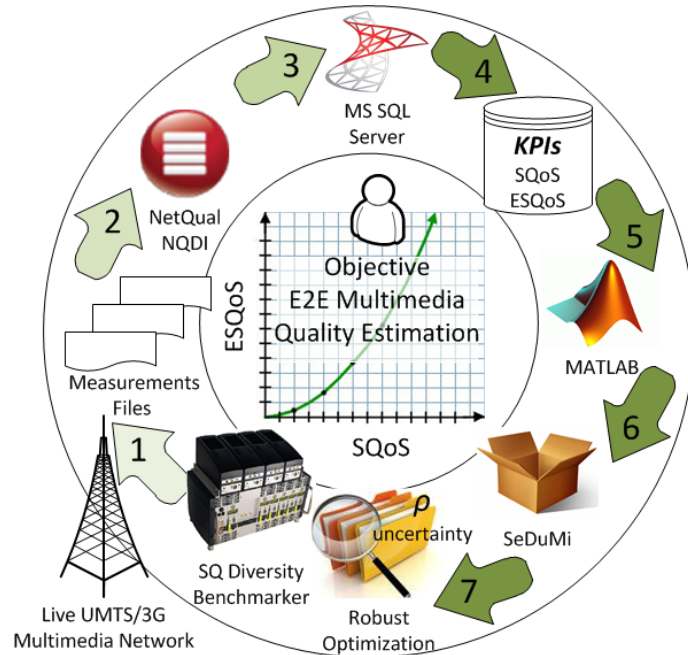
Robust Linear and Convex Optimization Η εύρωστη γραμμική και κυρτή βελτιστοποίηση είναι ένα νέο πεδίο έρευνας.

Το παράδειγμα της εύρωστης βελτιστοποίησης έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα παλινδρόμησης και ταξινόμησης για να ασχοληθεί με την αβεβαιότητα των στατιστικών δεδομένων και έχει συνδεθεί με κανονικοποιημένα μοντέλα παλινδρόμησης [139].

Προτείνουμε μια στρατηγική πρόβλεψης ποιότητας πολυμεσικών υπηρεσιών με αλεξιθόρυβη βελτιστοποίηση η οποία βασίζεται σε καμπάνια μετρήσεων E2E ποιότητας με όχημα (drive-test) σε πραγματικά εμπορικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών UMTS/3G με τον εξοπλισμό *SwissQual Diversity Benchmark* [101] και απεικονίζεται στο Σχήμα 6.7.

Για την στατιστική εκτίμηση της παραμέτρου $ESQoS$ από την παράμετρο $SQoS$, ισοδύναμα $ESQoS(SQoS)$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της μη γραμμικής παλινδρόμησης υπό την γενική μορφή:

$$f(ESQoS) = \beta g(SQoS) + \varepsilon,$$



Σχήμα 6.7: Εκτίμηση της ποιότητας πολυμέσων με αλεξιθόρυβη βελτιστοποίηση σε ένα πραγματικό δίκτυο κινητών επικοινωνιών. Η στατηγική πρόβλεψης βασίζεται σε καμπάνια μετρήσεων E2E ποιότητας ενός πραγματικού πολυμεσικού 3G/UMTS δικτύου

για τις συναρτήσεις $f, g: (0, +\infty) \mapsto \mathbb{R}$ οι οποίες είναι αυστηρά αύξουσες. Καθορίζοντας τις συναρτήσεις f και g , παρουσιάζουμε τέσσερις τύπους παλινδρόμησης όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5. Συγκεκριμένα, για $f(ESQoS) = ESQoS$, και $g(SQoS) = SQoS$, λαμβάνουμε το γραμμικό μοντέλο. Για $f(ESQoS) = ESQoS$, και $g(SQoS) = \ln(SQoS)$, λαμβάνουμε το λογαριθμικό μοντέλο. Για $f(ESQoS) = \ln(ESQoS)$, και $g(SQoS) = SQoS$, λαμβάνουμε το εκθετικό μοντέλο. Τελικά, για $f(ESQoS) = \ln(ESQoS)$, και $g(SQoS) = \ln(SQoS)$, λαμβάνουμε το δυναμικό μοντέλο. Όλα τα μοντέλα των υπό διερεύνηση ESQoS-SQoS συνοψίζονται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5: Σχέσεις ESQoS-SQoS υπό διερεύνηση.

Τύπος μοντέλου	Συναρτήσεις f	Συναρτήσεις g
Γραμμικό	$f(ESQoS) = ESQoS$	$g(SQoS) = SQoS$
Δυναμικό	$f(ESQoS) = \ln(ESQoS)$	$g(SQoS) = \ln(SQoS)$
Εκθετικό	$f(ESQoS) = \ln(ESQoS)$	$g(SQoS) = SQoS$
Λογαριθμικό	$f(ESQoS) = ESQoS$	$g(SQoS) = \log(SQoS)$

Ένα σημαντικό μέγεθος μελέτης είναι τα διαφορικά $\partial ESQoS$, για την υποβάθμιση της ποιότητας εμπειρίας, και $\partial SQoS$, για την υποβάθμιση της ποιότητας συστήματος/δικτύου. Η κλίση $\partial ESQoS / \partial SQoS$ αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis) [140, 141]. Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις της κλίσης ή του ρυθμού μεταβολής $ESQoS$ ως προς το $SQoS$

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

απεικονίζοντας την εξάρτηση μεταξύ των σημαντικών παραμέτρων επίδοσης (KPIs) υπηρεσίας/εμπειρίας κινητού χρήστη (service / mUX) και δικτύου/συστήματος.

Πίνακας 6.6: Σχέσεις $ESQoS$ - $SQoS$ υπό διερεύνηση.

Τύπος μοντέλου	$ESQoS$ - $SQoS$ Σχέσεις	Μερικές διαφορικές εξισώσεις
Γραμμικό	$ESQoS \propto SQoS$	$\frac{\partial ESQoS}{\partial SQoS} \propto \beta$
Δυναμικό	$\ln(ESQoS) \propto \ln(SQoS)$	$\frac{\partial ESQoS}{\partial SQoS} \propto \frac{ESQoS}{SQoS}$
Εκθετικό	$\ln(ESQoS) \propto SQoS$	$\frac{\partial ESQoS}{\partial SQoS} \propto ESQoS$
Λογαριθμικό	$ESQoS \propto \log(SQoS)$	$\frac{\partial ESQoS}{\partial SQoS} \propto \frac{1}{SQoS}$

Οι εκτιμήτριες των β και ε μπορούν να υπολογιστούν απευθείας από μη-γραμμική παλινδρόμηση δίνοντας σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Δεδομένου ενός συνόλου μετρήσεων $\{ESQoS_i, SQoS_i\}_{i=1}^n$ οι εκτιμήτριες είναι η βέλτιστη λύση στο κάτωθι πρόβλημα ελαχιστοποίησης

$$\min_{\beta, \varepsilon} \sum_{i=1}^n [f(ESQoS_i) - (\beta \cdot g(SQoS_i) + \varepsilon)]^2. \quad (6.7)$$

Λόγω του γεγονότος ότι τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται έχουν περιορισμένη ακρίβεια, προτείνουμε να εφαρμόσουμε την προσέγγιση της αλεξιθόρυβης βελτιστοποίησης. Θεωρούμε ότι τα δεδομένα $SQoS_i$ περιέχουν λάθη και ότι οι πραγματικές τιμές διακυμαίνονται σε ένα διάστημα ρ -μεγέθους με κέντρο το $SQoS_i$, $\rho \geq 0$. Οι εύρωστες εκτιμήτριες είναι η βέλτιστη λύση στο $min - max$ πρόβλημα [142] της Εξίσωσης (6.8).

$$\min_{\beta, \varepsilon} \max_{\forall i: |x_i - SQoS_i| \leq \rho} \sum_{i=1}^n [f(ESQoS_i) - (\beta \cdot g(x_i) + \varepsilon)]^2. \quad (6.8)$$

Δεδομένου ότι η συνάρτηση g είναι απόλυτα αύξουσα, ο περιορισμός

$$\begin{aligned} \forall i: |x_i - SQoS_i| &\leq \rho \\ \Leftrightarrow SQoS_i - \rho &\leq x_i \leq SQoS_i + \rho \end{aligned}$$

είναι ισοδύναμος με

$$\forall i: g(SQoS_i - \rho) \leq g(x_i) \leq g(SQoS_i + \rho).$$

Ορίζουμε:

$$\tilde{\rho} := \max_i \max(g(SQoS_i + \rho) - g(SQoS_i), g(SQoS_i) - g(SQoS_i - \rho)),$$

και θεωρούμε τον πιο συντηρητικό περιορισμό:

$$\begin{aligned} \forall i : g(SQoS_i) - \tilde{\rho} &\leq g(x_i) \leq g(SQoS_i) + \tilde{\rho} \\ \Leftrightarrow \forall i : |g(x_i) - g(SQoS_i)| &\leq \tilde{\rho}. \end{aligned}$$

Προσεγγίζουμε το Πρόβλημα (6.8) χρησιμοποιώντας έναν πιο συντηρητικό περιορισμό, δηλαδή επιλύουμε

$$\min_{\beta, \varepsilon} \max_{\forall i: |g(x_i) - g(SQoS_i)| \leq \tilde{\rho}} \sum_{i=1}^n [f(ESQoS_i) - (\beta \cdot g(x_i) + \varepsilon)]^2.$$

Οι περιορισμοί του εσωτερικού προβλήματος μεγιστοποίησης μπορούν να εκφραστούν ως $\|z - z_0\|_\infty \leq \rho$, όπου $\|\cdot\|_\infty$ η νόρμα του απείρου και z, z_0 είναι τα διανύσματα που περιέχουν τα $g(x_i), g(SQoS_i)$, αντίστοιχα. Έτσι, το πρόβλημα

$$\min_{\beta, \varepsilon} \max_{\forall i: \|z - z_0\|_\infty \leq \tilde{\rho}} \sum_{i=1}^n [f(ESQoS_i) - (\beta \cdot z_i + \varepsilon)]^2$$

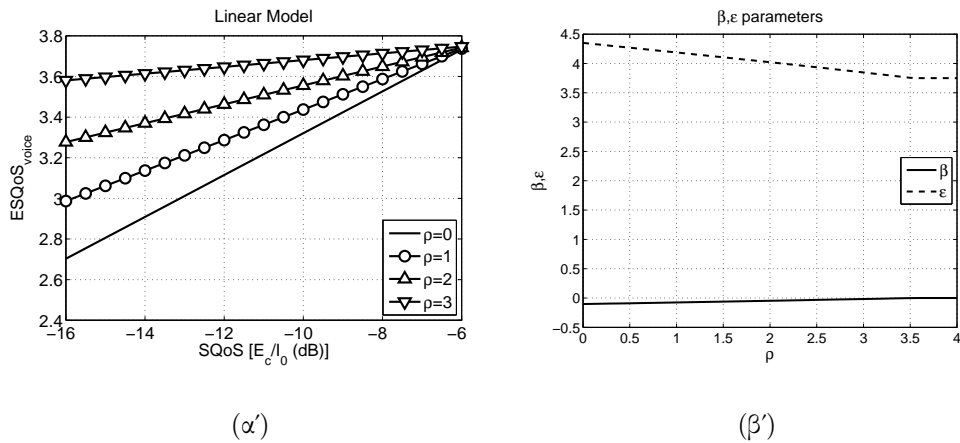
είναι ισοδύναμο [143] με το

$$\min_{\beta, \varepsilon} \sum_{i=1}^n [f(ESQoS_i) - (\beta \cdot g(SQoS_i) + \varepsilon)]^2 + \rho|\beta|, \quad (6.9)$$

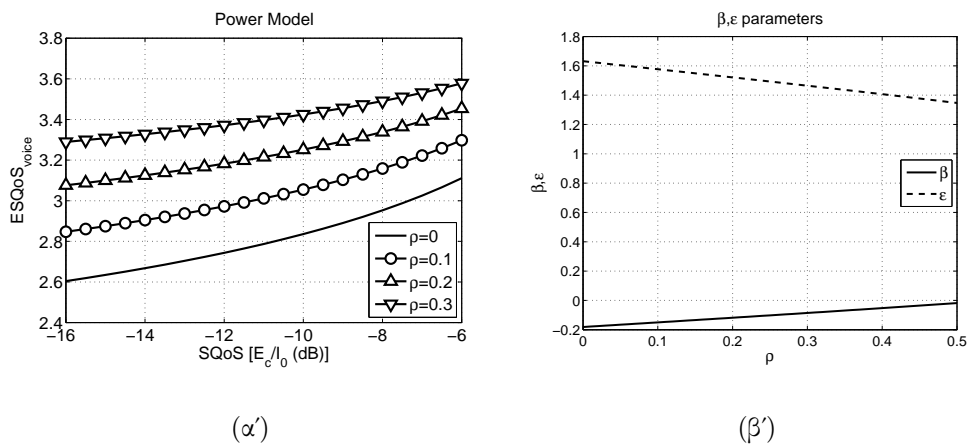
το οποίο είναι το Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (Lasso) [144, 143]. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο SeDuMi, υπολογίσαμε τις αλεξιθόρυβες εκτιμήτριες των β και ε για τις διάφορες τιμές του μεγέθους ρ του συνόλου της αβεβαιότητας. Το SeDuMi, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Sturm [145], υλοποιεί την μέθοδο *Self-Dual Embedding Technique for Optimization over Self-Dual Homogeneous Cones* και επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης με γραμμικούς, τετράγωνους και ημιορισμένους περιορισμούς. Μια πρόσφατη παρουσίαση μπορεί του πακέτου SeDuMi μπορεί να διαβάσει κανείς εδώ [146].

Στις συλλογές γραφημάτων που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι παλινδρομήσεις των $ESQoS_{\text{voice}}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{\text{UMTS}}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας. Αναλυτικά, απεικονίζονται στο Σχήμα 6.8 τα

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης



Σχήμα 6.8: Εύρωστο Γραμμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

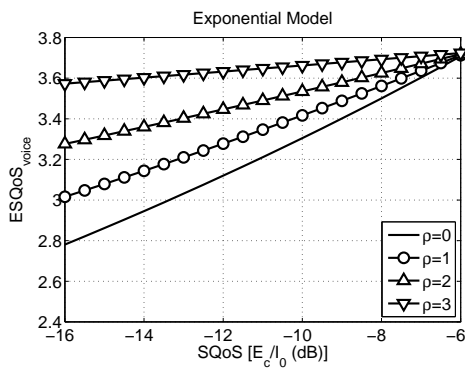


Σχήμα 6.9: Εύρωστο Δυναμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

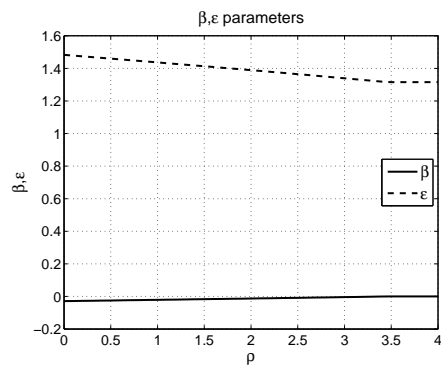
γραμμικά μοντέλα, στο Σχήμα 6.9 τα δυναμικά μοντέλα, στο Σχήμα 6.10 τα εκθετικά μοντέλα, και τέλος τα λογαριθμικά μοντέλα στο Σχήμα 6.11.

Όμοια ανάλυση εκτελέστηκε και στην περίπτωση πρότασης μοντέλων για την πρόβλεψη της ποιότητας πολυμέσων. Στις συλλογές γραφημάτων που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι παλινδρομήσεις των $ESQoS_{mm}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας. Έτσι, παρουσιάζουμε στο Σχήμα 6.12 τα γραμμικά μοντέλα, στο Σχήμα 6.13 τα δυναμικά μοντέλα, στο Σχήμα 6.14 τα εκθετικά μοντέλα, και τελικά στο Σχήμα 6.15 τα λογαριθμικά μοντέλα.

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

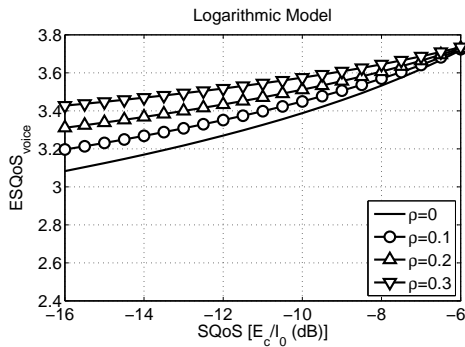


(α')

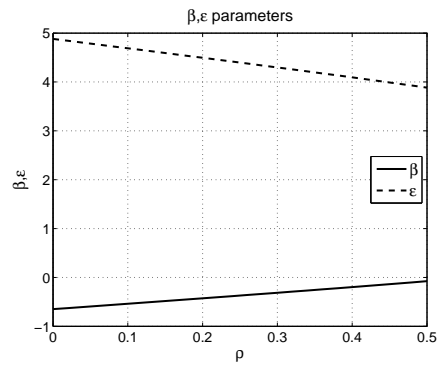


(β')

Σχήμα 6.10: Εύρωστο Εκθετικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

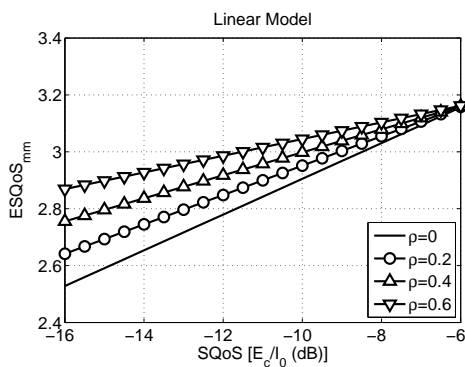


(α')

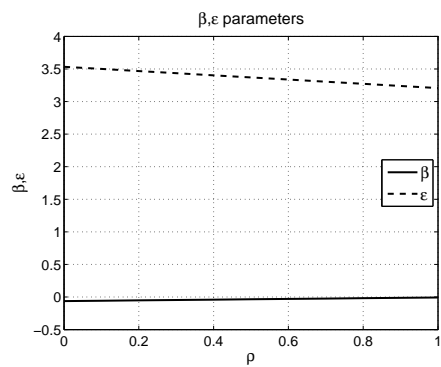


(β')

Σχήμα 6.11: Εύρωστο Λογαριθμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{voice}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.



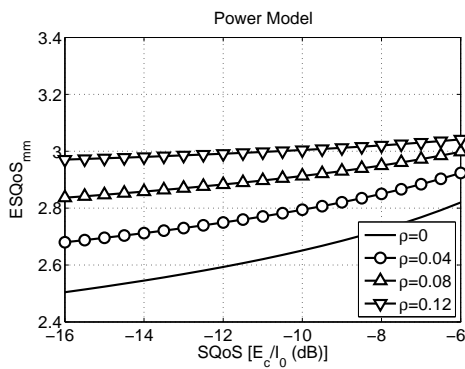
(α')



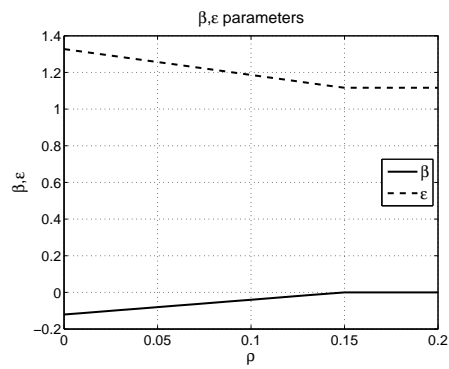
(β')

Σχήμα 6.12: Εύρωστο Γραμμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{mm}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

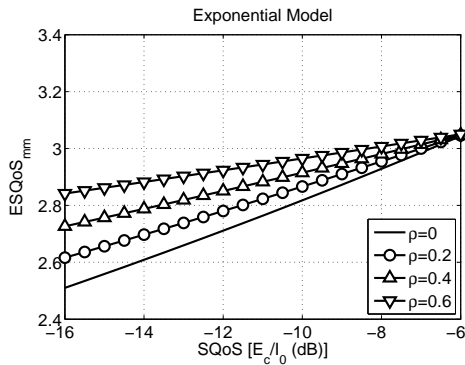


(α')

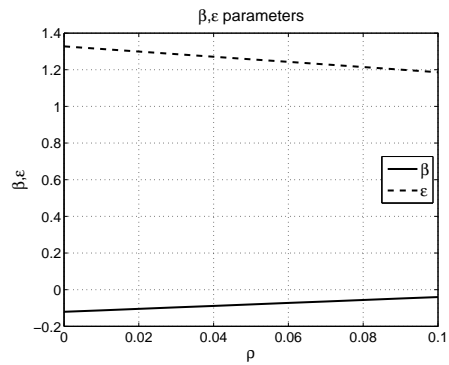


(β')

Σχήμα 6.13: Εύρωστο Δυναμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{min}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

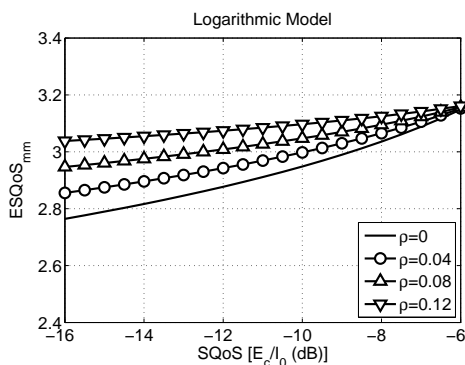


(α')

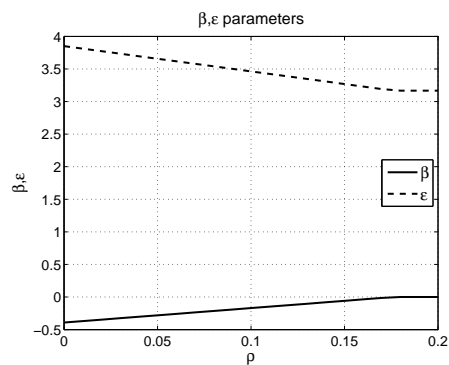


(β')

Σχήμα 6.14: Εύρωστο Εκθετικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{min}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.



(α')



(β')

Σχήμα 6.15: Εύρωστο Λογαριθμικό Μοντέλο: Παλινδρομήσεις των $ESQoS_{min}$ (σε obj. MOS) ως προς τις τιμές $SQoS_{UMTS}$ (E_c/I_0 σε dB) στην περίπτωση UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

6.3 Γραμμικός Προγραμματισμός

Σε πολλές περιπτώσεις, η εκτίμηση των μοντέλων της μορφής $U = Q\theta + E$ βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγωνικού σφάλματος $E^T E$, αλλά υπάρχουν επιπρόσθετοι περιορισμοί που μειώνουν το σύνολο των πιθανών τιμών του διανύσματος παραμέτρων θ . Το σφάλμα μέτρησης $\frac{1}{2}E^T E = \frac{1}{2}Y^T Y - Y^T X\theta + \frac{1}{2}\theta^T X^T X\theta$ μπορεί να γραφτεί και ως $\frac{1}{2}\theta^T H\theta + f^T\theta$ παραλείποντας τον σταθερό όρο που δεν εξαρτάται από το θ και θέτοντας $H = X^T X$ και $f = -X^T Y$.

Μια προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων και του περιορισμού των τιμών του διανύσματος παραμέτρων θ λέγεται Τετραγωνικός Προγραμματισμός (Quadratic Programming)

$$\min_{\theta} \left\{ \frac{1}{2}\theta^T H\theta + f^T\theta \right\} \quad (6.10)$$

με τους περιορισμούς $A\theta \leq b$, $A_{eq}\theta = b_{eq}$ και $\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}$. Ο πίνακας A και το διάνυσμα b ορίζουν ανισότητες περιορισμού του προβλήματος, ο πίνακας A_{eq} και το διάνυσμα b_{eq} ορίζουν ισότητες περιορισμού και τα διανύσματα θ_{min} και θ_{max} ορίζουν τους περιορισμούς του διανύσματος παραμέτρων θ .

Αν χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα με βάρη στο άνω πρόβλημα

$$\mathbf{E}_w = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} [Y - \hat{Y}] = WE \quad (6.11)$$

αυτό οδηγεί σε ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με $H = X^T W^T W X$ και $f = -X^T W^T W X$.

Εναλλακτικά μπορεί να οριστεί το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού υπό την μορφή:

$$\min_{\theta} \{f^T\theta\} \quad (6.12)$$

με τους περιορισμούς $A\theta \leq b$, $A_{eq}\theta = b_{eq}$ και $\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}$.

Για περισσότερη εμπέδωση στον γραμμικό και δυναμικό προγραμματισμό προτείνεται η μελέτη των βιβλίων [147, 148].

6.4 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν προηγμένες μέθοδοι στατιστικής εκτίμησης ποιότητας φωνής, βίντεο και πολυμέσων για υπηρεσίες τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας

Κεφάλαιο 6. Μοντέλα Στατιστικής Εκτίμησης με Μεθόδους Βελτιστοποίησης

σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Ειδικότερα, έγινε εφαρμογή της μη-γραμμική παλινδρόμησης και εξετάστηκαν διεξοδικά διάφορα μαθηματικά μοντέλα όπως το γραμμικό, το δυναμικό, το εκθετικό και το λογαριθμικό.

Η ανάλυση που εκπονήθηκε προσεγγίστηκε και με μεθόδους βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εξαιτίας της φύσης του προβλήματος και δεδομένης της αβεβαιότητας των μετρήσεων, προτάθηκε η εφαρμογή της εύρωστης ή αλεξιθόρυβης βελτιστοποίησης.

Έτσι παρουσιάστηκαν τα μοντέλα εκτίμησης *ESQoS* φωνής και πολυμέσων όπου εδώ έχει εφαρμοστεί αλεξιθόρυβη βελτιστοποίηση σε μη-γραμμική παλινδρόμηση για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\rho \geq 0$. Στην περίπτωση όπου $\rho = 0$, τότε έχουν γραμμική παλινδρόμηση. Διαπιστώθηκε ότι καθώς το μέγεθος της αβεβαιότητας ρ αυξάνεται, η παράμετρος β φθίνει, δηλαδή οι αλεξιθόρυβες εκτιμήτριες προτείνουν μια ασθενή εξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων *ESQoS* και *SQoS*. Η ασθενή εξάρτηση καθορίζεται από τον σταθερό όρο ε . Έτσι, παρουσία σφαλμάτων, κάποιος μπορεί να είναι πιο ασφαλής στην πρόβλεψη του *ESQoS* για δεδομένο *SQoS*. Ο ρυθμός μεταβολής *ESQoS* σε συνάρτηση με το *SQoS* εκτιμώμενος από γραμμική ή μη-γραμμική παλινδρόμηση είναι αρκετά αισιόδοξος παρουσία σφαλμάτων. Η κανονικοποιημένη εκτιμήτρια της Εξίσωσης (6.9) λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο στην εκτίμηση προσθέτοντας ένα εξισοροπιστικό όρο $\rho |\beta|$.

Τα αρχικά αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάστηκαν στην εργασία [116] και στη συνέχεια στην εργασία [149] ενώ είναι στο στάδιο υποβολής και κρίσης η εργασία [150].

Για περισσότερη εμβάθυνση προτείνεται η σχετική βιβλιογραφία [129, 130, 131, 132, 151, 152, 153]. Εργαλεία λογισμικού [154] για τον σκοπό της στατιστικής ανάλυσης προτείνονται το MATLAB [155], STATISTICA [156] και IBM SPSS [157].

□

Κεφάλαιο 7

Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού

7.1 Ασαφής Λογική

Η ασαφής λογική (fuzzy logic, FL) [158] έχει δύο διαφορετικές σημασίες. Υπό την στενή έννοια, η ασαφής λογική είναι ένα λογικό σύστημα, το οποίο αποτελεί προέκταση της πλειότιμη λογικής (multivalued logic). Ωστόσο, υπό μια ευρύτερη έννοια η ασαφής λογική είναι σχεδόν συνώνυμη με την θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy sets) [159]. Η μαθηματική θεμελίωση της ασαφούς λογικής βασίζεται στην θεωρία των ασαφών συνόλων η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν μια γενίκευση της κλασικής θεωρίας συνόλων. Η ασάφεια (fuzziness) είναι μια ιδιότητα της γλώσσας και η προέλευσή της είναι η αοριστία που υπάρχει στον ορισμό και στην χρήση των συμβόλων [160, 161, 162, 163].

Μια τάση που αναπτύσσεται αφορά τη χρήση της ασαφούς λογικής σε συνδυασμό με τον νευρο-υπολογισμό (neurocomputing) και τους γενετικούς αλγορίθμους (genetic algorithms) [164]. Γενικότερα, η ασαφής λογική, τα νευρωνικά δίκτυα και οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να θεωρηθούν ως τα κύρια συστατικά του ήπιου υπολογισμού (soft computing) [165]. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό, απόλυτο υπολογισμό (hard computing), ο ήπιος υπολογισμός λαμβάνει υπόψη την ασάφεια του πραγματικού κόσμου. Η κατευθυντήρια αρχή του ήπιου υπολογισμού είναι:

“η αξιοποίηση της ανοχής (tolerance) για την ανακρίβεια (imprecision), την αβεβαιότητα (uncertainty), και την εν μέρει αλήθεια για την επίτευξη ευπειθείας (tractability), ευρωστίας (robustness), και χαμηλού κόστους λύση”.

Στο μέλλον, ο ήπιος υπολογισμός θα μπορούσε να διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στη σύλληψη και σχεδιασμό των συστημάτων των οποίων η μηχανική ευφυΐα (Machine IQ, MIQ) είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη των συστημάτων που σχεδιάστηκαν από τις συμβατικές μεθόδους. Μεταξύ των διαφόρων συνδυασμών των

μεθοδολογιών στον ήπιο υπολογισμό, η ασαφής λογική και τα νευρωνικά δίκτυα, που οδηγούν σε νευρο-ασαφή συστήματα, τυγχάνουν ιδιαίτερης αποδοχής. Μια αποτελεσματική μέθοδος που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό καλείται *συστήματα προσαρμοστικού νευρο-ασαφούς συμπερασμού* (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems, ANFIS) [166].

Η βασική δομή του ενός συστήματος ασαφούς συμπερασμού (Fuzzy Inference Systems, ANFIS) είναι ένα μοντέλο που απεικονίζει τα χαρακτηριστικά εισόδου στις συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου (input membership functions), τις συναρτήσεις αυτές με τους κανόνες (rules), τους κανόνες σε ένα σύνολο συναρτήσεων συμμετοχής εξόδου (output membership functions), και αυτές τις συναρτήσεις με μια μονότιμη έξοδο ή με μια απόφαση που συνδέεται με την έξοδο. Συνοπτικά, το σύνολο των βασικών εννοιών στο οποίο στηρίζεται η υλοποίηση ενός ασαφούς υπολογιστικού συστήματος είναι:

- ασαφή σύνολα, δηλαδή εκείνα τα σύνολα που δεν έχουν ένα ορισμένο τρόπο συμμετοχής σε μια ομάδα, αλλά επιτρέπουν στοιχεία / αντικείμενα να έχουν βαθμούς συμμετοχής, π.χ. μεταξύ 0 και 1. Ένα ασαφές σύνολο με πεδίο ορισμού U ορίζεται από την συνάρτηση συμμετοχής $\mu_F : U \rightarrow [0, 1]$ και χαρακτηρίζεται από μια λεκτική μεταβλητή F .
- Λεκτικές μεταβλητές, δηλαδή οι συνηθισμένες λεκτικές εκφράσεις που συμβολίζουν ένα συγκεκριμένο ασαφές σύνολο σε δεδομένο πρόβλημα και χαρακτηρίζονται ως “excellent”, “good”, “fair”, “poor”, “bad”.
- λογικό συμπέρασμα, δηλαδή η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος με την ακόλουθη δομή: Έστω η υπόθεση 1 είναι “Το x είναι A ” και η υπόθεση 2 είναι “Αν x είναι A , τότε το ψ είναι B ”, τότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι “Το ψ είναι B ”.
- δομή ασαφούς δικτύου, δηλαδή εκείνο το σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί την ασαφή λογική για την επίλυση ενός προβλήματος, ενώ δηλαδή του δίνεται μια μη-ασαφής είσοδος και λαμβάνεται πάλι μη-ασαφής έξοδος. Ουσιαστικά αποτελείται από τέσσερα στοιχεία:
 - τη θύρα ασάφειας, είναι μια απεικόνιση του πραγματικού μη ασαφούς χώρου κατάστασης εισόδων $U \subseteq R^n$ στα ασαφή σύνολα που ορίζονται στο U .
 - τη βάση ασαφών κανόνων, το οποίο είναι ένα σύνολο λεκτικών κανόνων της μορφής AN-TOTE (*if – then*)
 - το μηχανισμό εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων, μέσω του οποίου εξάγονται συμπεράσματα βάσει των ασαφών κανόνων της μορφής *if – then* και στους συνθετικούς κανόνες εξαγωγής συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού

- τη θύρα αποσαφήνισης, η οποία λαμβάνει τις εξόδους του μηχανισμού ασαφών συμπερασμάτων και παράγει μια σαφή έξοδο που αντιπροσωπεύει την πραγματική έξοδο του συστήματος.
- συνάρτηση συμμετοχής, δηλαδή η συνάρτηση απεικόνισης κάθε στοιχείου του χώρου ανάφοράς X στο διάστημα $[0,1]$. Υπάρχουν διάφορα είδη συναρτήσεων όπως:

- Γκαουσιανή

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^j}{\sigma_i^j} \right)^2 \right] \quad (7.1)$$

- Τριγωνική

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < \alpha_i^j, \text{ or } , x_i > \gamma_i^j \\ \frac{x_i - \alpha_i^j}{\beta_i^j - \alpha_i^j} & \alpha_i^j \leq x_i \leq \beta_i^j \\ 1 - \frac{\beta_i^j - x_i}{\gamma_i^j - \beta_i^j} & \beta_i^j \leq x_i \leq \gamma_i^j \end{cases} \quad (7.2)$$

- Τραπεζοειδής

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i < \alpha_i^j \\ \frac{x_i - \alpha_i^j}{\beta_i^j - \alpha_i^j}, & \alpha_i^j < x_i \leq \beta_i^j \\ 1, & \beta_i^j < x_i \leq \gamma_i^j \\ 1 - \frac{\gamma_i^j - x_i}{\delta_i^j - \gamma_i^j}, & \gamma_i^j < x_i < \delta_i^j \\ 0 & \delta_i^j \leq x_i \end{cases} \quad (7.3)$$

Η νευρο-προσαρμοστική μέθοδος μάθησης λειτουργεί παρόμοια με εκείνη των νευρωνικών δικτύων. Οι νευρο-προσαρμοστικές τεχνικές μάθησης παρέχουν μια μέθοδο για την ασαφή διαδικασία μοντελοποίησης για να εξαχθεί πληροφορία από ένα σύνολο δεδομένων. Χρησιμοποιώντας δεδομένο εισόδου/εξόδου, τα ANFIS κατασκευάζουν ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού (FIS) του οποίου οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι συντονισμένες (προσαρμοσμένες) είτε χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο προς τα πίσω διάδοσης (back propagation algorithm) μόνο ή σε συνδυασμό με μια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αυτή η προσαρμογή επιτρέπει στα ασαφή συστήματα να μάθουν από τα δεδομένα που μοντελοποιούν.

Η δομή ενός FIS είναι τύπου δικτύου παρόμοια με εκείνη ενός νευρωνικού δικτύου, το οποίο αντιστοιχεί μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής εισόδου και των συναφών παραμέτρων, και στη συνέχεια μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής εξόδου και των

συναφών παραμέτρων στις εξόδους. Έτσι ένα FIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία της σχέσης εισόδου/εξόδου.

Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις συναρτήσεις συμμετοχής αλλάζουν μέσω της μαθησιακής διαδικασίας (learning process). Ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών (ή αναπροσαρμογή τους) διευκολύνεται από ένα διάνυσμα κλίσης (gradient vector). Αυτό το διάνυσμα κλίσης παρέχει ένα μέτρο του πόσο καλά το σύστημα ασαφούς συμπερασμού διαμορφώνει τα δεδομένα εισόδου/εξόδου για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων. Όταν το διάνυσμα κλίσης επιτυγχάνεται, οποιαδήποτε από τις ρουτίνες βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί προκειμένου να προσαρμόσει τις παραμέτρους ώστε να μειωθεί σε κάποιο βαθμό το σφάλμα. Το μέτρο αυτό του σφάλματος συνήθως καθορίζεται από το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ των πραγματικών και των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Τα ANFIS χρησιμοποιούν είτε προς τα πίσω διάδοση είτε έναν συνδυασμό από τουλάχιστον εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων και προς τα πίσω διάδοση για την εκτίμηση των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής.

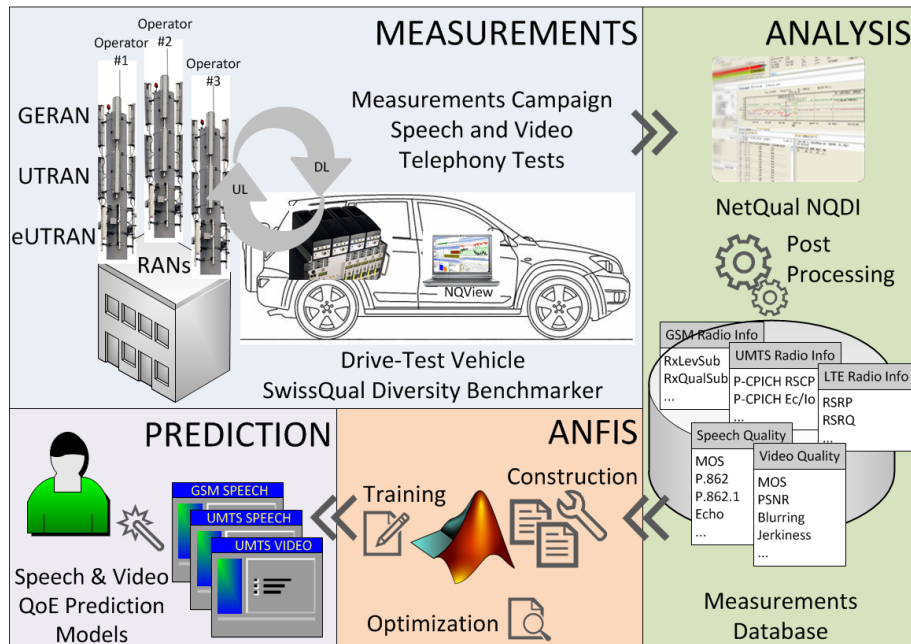
Οι βασικές διαδικασίες των ANFIS είναι η ανάκτηση, η γραφική απεικόνιση και η εκκαθάριση των δεδομένων, η δημιουργία των αρχικών δομών FIS, η εκπαίδευση των FIS και η επικύρωση/αξιολόγηση των εκπαιδευμένων FIS.

7.2 Μεθοδολογία Πρόβλεψης Ποιότητας

Η συμβολή της έρευνας είναι η παροχή ενός μοντέλου για την πρόβλεψη της ποιότητας φωνής και βίντεο όταν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις μόνο των βασικών δεικτών KPIs, ενώ οι τιμές MOS δεν μπορούν να εκτιμηθούν ή να καταγραφούν. Ο κύριος στόχος είναι η εκμετάλλευση των μετρήσεων που εκπονήθηκαν σε πραγματικά ασύρματα δίκτυα και η δημιουργία μοντέλων που θα μας επιτρέψουν ακριβείς προβλέψεις των τιμών MOS.

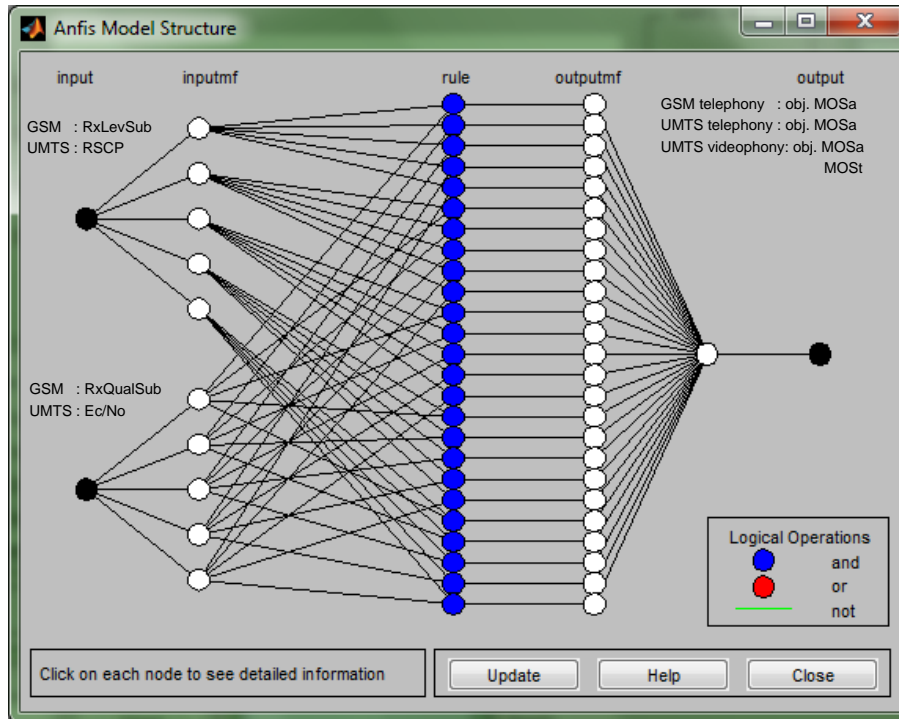
Η μεθοδολογία που προτείνεται απεικονίζεται στην Σχήμα 7.1 και αποτελείται από 4 βήματα:

1. Απόκτηση μετρήσεων (Acquisition of Measurements): Η φάση αυτή διαιρείται σε δυο βασικές διαδικασίες. Αρχικά, ο πειραματικός εξοπλισμός θα πρέπει να διαμορφωθεί λεπτομερώς με σκοπό την εκτέλεση μιας καμπάνιας μετρήσεων. Ένα σενάριο μετρήσεων θα πρέπει να περιγραφεί με σκοπό την διεξαγωγή δοκιμών κλήσεων τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας από τα κινητά τηλέφωνα δοκιμών προς τα δημόσια-εμπορικά κινητά δίκτυα PLMN (Public Land Mobile Networks), πρακτικά προς έναν αυτόματο τηλεφωνητή ή/και εξυπηρετητή βίντεο. Επιπλέον, η σηματοδότηση (layers signaling) καθώς και τα ανταλλασώμενα δείγματα φωνής/βίντεο όλων των κλήσεων καταγράφονται από τον εξοπλισμό και αξιολογούνται αναφορικά με την ποιότητα φωνής και βίντεο.



Σχήμα 7.1: Η αρχιτεκτονική πρόβλεψης της ποιότητας υπηρεσιών βασισμένη στην ασαφή λογική

2. Ανάλυση μετρήσεων (Analysis of the Datasheets): Όταν η καμπάνια μετρήσεων έχει ολοκληρωθεί, τα αρχεία μετρήσεων εισάγονται σε μια σχεσιακή χωροχρονική βάση δεδομένων/μετρήσεων. Η βάση δεδομένων είναι δομημένη σε ένα σύνολο πινάκων οι οποίοι συσχετίζονται και συμπληρώνονται από τιμές των δεικτών ποιότητας δικτύου και υπηρεσιών. Ένα εργαλείο μετεπεξεργασίας (post-processing analysis) για την διαχείριση της βάσης δεδομένων, την αναφορά στατιστικών των δεικτών επίδοσης ή την δημιουργία χαρτών απεικόνισης των χρήσιμων KPIs.
3. Δημιουργία FIS: Σε αυτό το βήμα δημιουργούνται ασαφή συστήματα συμπερασμού και εκπαιδεύονται μέσω νευροασαφών συστημάτων ANFIS (Adaptive Fuzzy Inference Systems) χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις (datasheets) που είναι διαθέσιμες. Κατόπιν, το σύστημα βελτιστοποιείται μέσω επιπρόσθετων μετρήσεων αξιολόγησης (testing datasheets). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία συστημάτων πρόβλεψης ποιότητας σε κλίμακα MOS βασισμένη σε δεδομένες εισόδους. Οι εισόδους είναι: i) στην περίπτωση GSM είναι οι παράμετροι RxLevSub RxQualSub, και ii) στην περίπτωση UMTS οι παράμετροι RSCP και E_c/N_0 . Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του λογισμικού MATLAB Fuzzy Toolbox [167].
4. Πρόβλεψη ποιότητας (Quality Prediction): Για όλα τα σενάρια που θεωρήθηκαν, δημιουργήθηκαν αντίστοιχα FIS υπό την μορφή εκτελέσιμων αρχείων. Κατά περίπτωση, το κατάλληλο FIS ενεργοποιείται και πρόβλεψη υπολογίζεται με βάση



Σχήμα 7.2: Η δομή ενός ANFIS μοντέλου για την πρόβλεψη obj. MOS της ποιότητας φωνής και πολυμέσων στις περιπτώσεις GSM τηλεφωνίας, και UMTS τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας.

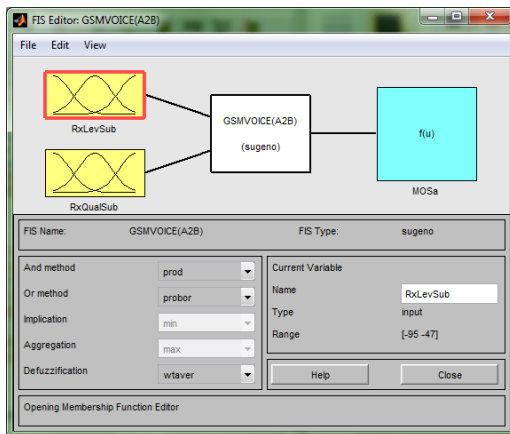
τις μετρήσεις που είναι διαθέσιμες. Αυτό το γνώρισμα είναι ζωτικό για την επίδοση του συστήματος αφού ένα ελάχιστο υπολογιστικό κόστος απαιτείται για την πρόβλεψη. Αντιθέτως, η εκπαίδευση ενός μοντέλου πρόβλεψης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και μπορεί να πραγματοποιείται εκτός λειτουργίας (off-line).

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της έρευνας εξετάστηκαν ξεχωριστά οι μεταδόσεις που έγιναν είτε από τα κινητά τηλέφωνα δοκιμών (Mobile Terminal - MT) του εξοπλισμού μετρήσεων ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο όχημα μετρήσεων (drive-test vehicle) είτε από τον σταθμό βάσης (Base Station - BS), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Οι κατευθύνσεις αυτές σημειώνονται ως άνω ζεύξη (uplink - UL) και κάτω ζεύξη (downlink - DL).

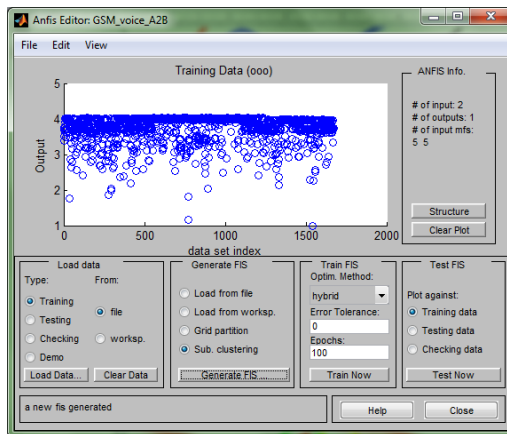
Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η δομή ενός ANFIS μοντέλου για την πρόβλεψη obj. MOS της ποιότητας φωνής και πολυμέσων στις περιπτώσεις i) GSM τηλεφωνίας, και ii) UMTS τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας.

Αναλυτικά, στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται για η διαμόρφωση των των FIS (α') και ANFIS (β') για την περίπτωση της GSM τηλεφωνίας. Παρουσιάζονται επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραμέτρων RxLev (γ') και RxQual (δ'). Φυσικά, έγινε μελέτη τόσο για την περίπτωση της άνω ζεύξης όσο και για την κάτω ζεύξης.

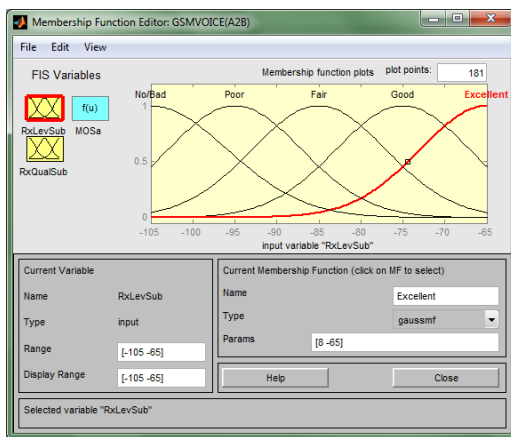
Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού



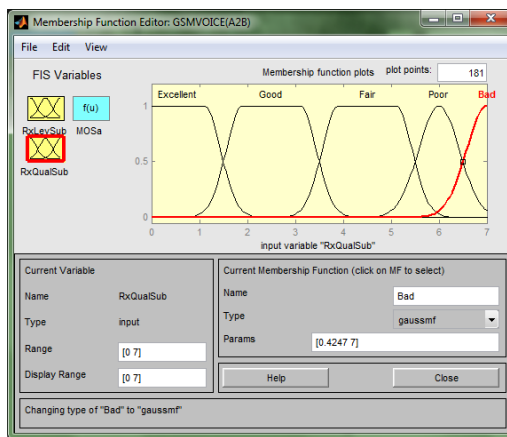
(α') GSM FIS



(β') GSM ANFIS



(γ') Membership functions: RxLev



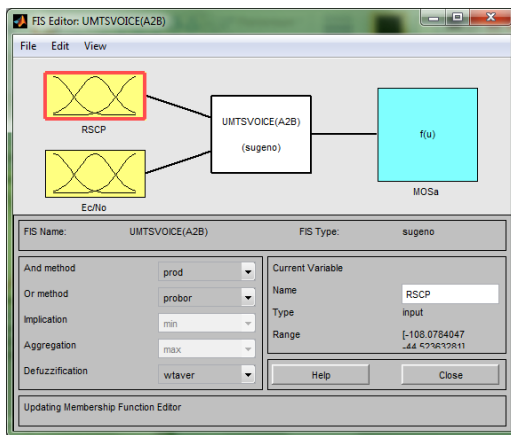
(δ') Membership functions: RxQual

Σχήμα 7.3: Μελέτη Περίπτωσης: GSM τηλεφωνία. Διαμόρφωση των FIS (α') και ANFIS (β'). Παρουσιάζονται επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραμέτρων RxLev (γ') και RxQual (δ').

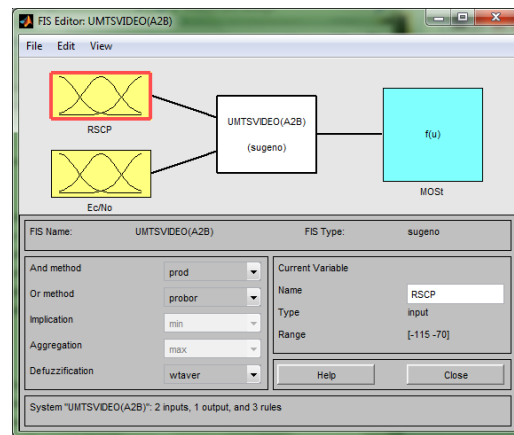
Παρόμοια, στο Σχήμα 7.4 μελετώνται οι περιπτώσεις των υπηρεσιών UMTS τηλεφωνίας και βιντεοτηλεφωνίας. Αντίστοιχα, διαμορφώνονται τα FIS (α',β') και ANFIS (γ',δ'). Παρουσιάζονται επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραμέτρων RSCP (γ') και E_c/N_0 (στ'). Αναφέρεται ότι έγινε μελέτη τόσο για την περίπτωση της άνω ζεύξης όσο και για την κάτω ζεύξης.

Πρακτικά, η μεθοδολογία πρόβλεψης που προτείνεται μπορεί να υλοποιηθεί σε λογισμικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον QoS-κεντρικό σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση ραδιοδικτύου. Οι διαθέσιμες συλλογές μετρήσεων ανά περιοχή, όπως αυτοκινητόδρομος, πόλη, αγροτικό περιβάλλον, μπορούν να αξιοποιηθούν στην ανάπτυξη των ραδιοδικτύων και τη βέλτιστη ρύθμιση εάν τα μοντέλα μάθησης μπορούν να εμπλουτιστούν με δεδομένα-μετρήσεις από συστήματα παρακολούθησης επίδοσης

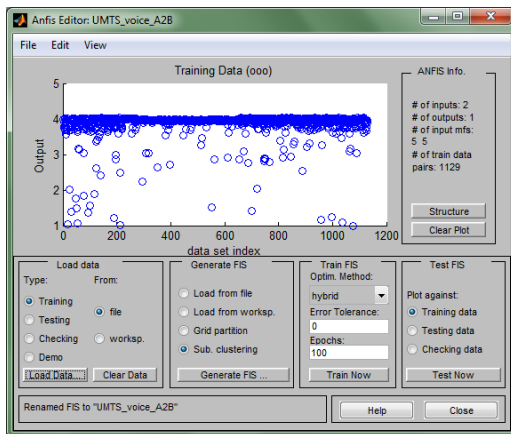
Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού



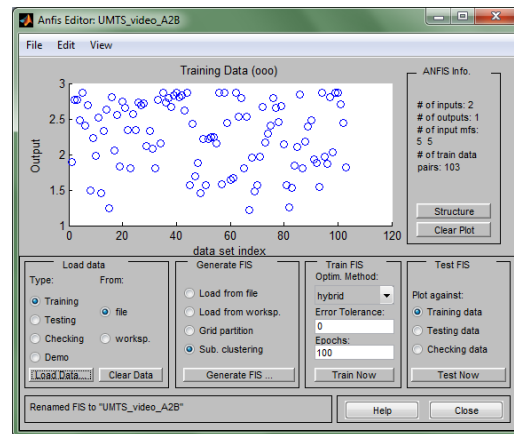
(α) UMTS Telephony FIS



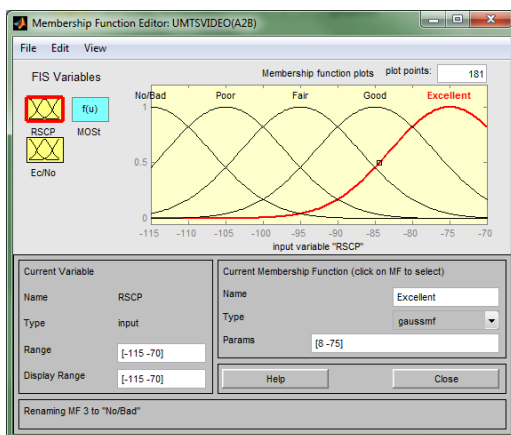
(β) UMTS Video-Telephony FIS



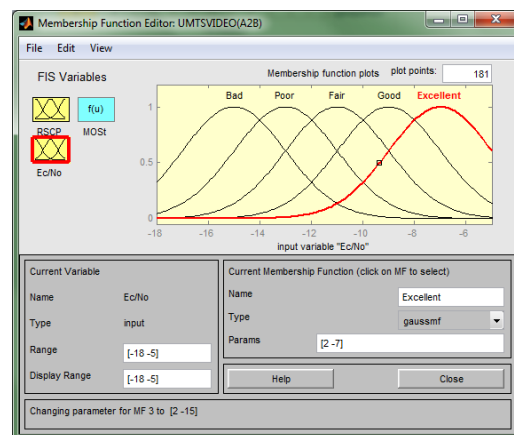
(γ) UMTS Telephony ANFIS



(δ) UMTS Video Telephony ANFIS



(ε) Membership functions: RSCP



(ς) Membership functions: E_c/N_0

Σχήμα 7.4: Μελέτη Περίπτωσης: UMTS τηλεφωνία και βιντεοτηλεφωνία. Διαμόρφωση των FIS (α',β') και ANFIS (γ',δ'). Παρουσιάζονται επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραμέτρων RSCP (γ) και E_c/N_0 (στ').

δικτύου (network monitoring) όπως η ένταση τηλεπικοινωνιακής κίνησης (π.χ. πλήθος ενεργών χρηστών ανά κυψέλη, πλήθος διαπομπών κλπ). Ως μελλοντική εργασία, η αρχιτεκτονική μπορεί επεκταθεί εύκολα και για προηγμένα ασύρματα δίκτυα LTE. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο εισοδοί θα είναι οι παράμετροι ραδιοδικτύου RSRP και RSRQ.

7.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τρισδιάστατες (3D) καμπύλες των συστημάτων πρόβλεψης FIS . Κάθε καμπύλη παρουσιάζει πως η έξοδος, η ποιότητα σε κλίμακα MOS, επηρεάζεται από τις μεταβλητές εισόδου. Η προσέγγιση πρόβλεψης ποιότητας θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ένα προβλέψιμο σύστημα μέτρησης επίδοσης για την αντικειμενική εκτίμηση ποιότητας χρησιμοποιώντας τις επιφάνειες ασαφούς λογικής.

Αναλυτικά για την GSM τηλεφωνία, στο Σχήμα 7.5 απεικονίζονται 3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για EFR κωδικοποιητή. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες καμπύλες για τις περιπτώσεις των κωδικοποιητών AMR FR και AMR HR.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 7.7 συγκεντρώνονται οι 3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για AMR-WB κωδικοποιητή. Κατέπεκταση στην περίπτωση της UMTS βιντεοτηλεφωνίας, στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζονται οι σχετικές καμπύλες.

Βασισμένοι σε αυτά τα γραφήματα, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Στη περίπτωση της GSM τηλεφωνίας, η βέλτιστη ποιότητα φωνής άνω του 3.5 σε κλίμακα MOS επιτυγχάνεται για $RxLevSub > -60dBm$. Στην περίπτωση της κάτω ζεύξης, η ποιότητα μειώνεται καθώς η τιμή του $RxQualSub$ αυξάνεται, ενώ για την άνω ζεύξη αυτό συμβαίνει μόνο για μικρότερες τιμές του $RxLevSub$ ($< -70dBm$). Για $RxLevSub > -70dBm$ αυτό δεν είναι απόλυτα αληθές, εξαιτίας της δεδομένης μεταβλητότητας στο σύνολο μετρήσεων. Επίσης, η χειρότερη δυνατή ποιότητα για την περίπτωση της άνω ζεύξης είναι 2.9, ενώ για την κάτω ζεύξη είναι ίση με 2.
- Για την μετάδοση φωνής σε UMTS δίκτυο, η βέλτιστη ποιότητα επιτυγχάνεται για $E_c/N_0 > -5dB$. Στην περίπτωση της κάτω ζεύξης και για μέτριες τιμές του E_c/N_0 ο δείκτης MOS μειώνεται καθώς το $RSCP$ μειώνεται. Ενώ, για την περίπτωση της άνω ζεύξης, δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ MOS και

RSCP, γεγονός που οφείλεται στην μεταβλητότητα των δεδομένων μέτρησης. Η ελάχιστη εκτιμώμενη τιμή ΜΟΣ είναι 3.3 και 3.1 για το UL και DL αντίστοιχα, δείχνοντας ότι και για τα δύο σενάρια συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο. Ομοίως, η μέγιστη τιμή πρόβλεψης είναι 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

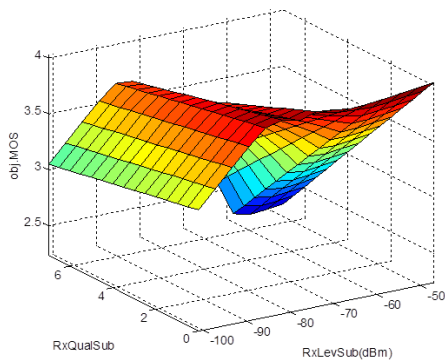
- Για την μετάδοση βίντεο σε UMTS τα αποτελέσματα είναι λίγο αμφιλεγόμενα, δείχνοντας απροσδόκητες εκτιμήσεις για μέτριες τιμές των μεταβλητών εισόδου. Για το UL και DL οι μέγιστες προβλεπόμενες τιμές είναι 2.5 και 3.1, ενώ οι κατώτερες είναι 1.2 και 2.05 αντίστοιχα. Η τραχύτητα των επιφανειών είναι αποτέλεσμα της υψηλής αβεβαιότητας της προβλεπόμενης εξόδου λόγω του γεγονότος ότι η επίδοση της βιντεοτηλεφωνίας δεν είναι συνήθως επαρκής σε κινητά περιβάλλοντα όπως αυτοκινητόδρομοι, όπου η ραδιοκάλυψη δεν είναι εύρωστη.

Γενικά, η ποιότητα κινητού βίντεο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες χαμηλές τιμές από αυτές της φωνής. Η ποιότητα εικόνας και βίντεο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τον τύπο του κωδικοποιητή βίντεο που χρησιμοποιείται (3G 324M/MPEG4) και ευαίσθητη στον ρυθμό εσφαλμένων πλαισίων FER (Frame Error Ratio) καθώς και από τον τύπο του πλαισίου - I, P ή B - σε μία ομάδα εικόνων GOP (Group of Pictures). Επίσης, η μετάδοση βίντεο μπορεί να επηρεαστεί από μια ποικιλία παραγόντων, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας βίντεο. Τα προβλήματα κωδικοποίησης και μετάδοσης μπορούν να ταξινομηθούν σε χωρικά ευρήματα (π.χ. blurring, edge noise, reduced color space) και χρονικά ευρήματα (π.χ. freezing, delay, jitter). Ως αποτέλεσμα, είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια η ποιότητα μετάδοσης βίντεο σε σύγκριση με την φωνή. Πίσω από τους υπολογισμούς των καμπύλων, καταδεικνύεται οι προβλεπόμενες τιμές ποιότητας για τις μεταβλητές εισόδου για όλα τα σενάρια έρευνας.

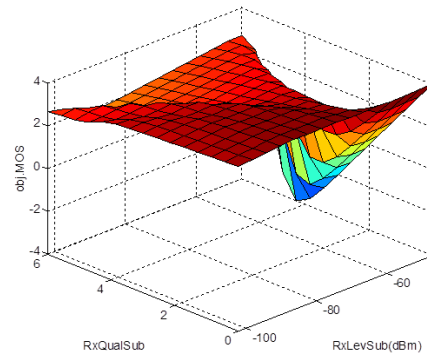
Στις επόμενες εικόνες παριστάνονται τα αποτελέσματα, οι οποίες μπορεί να φανούν χρήσιμες για μηχανικούς που επικεντρώνονται στον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση χωρίς να διαθέτουν δεδομένα για την εκτίμηση του *ESQoS*. Αυτά τα γραφήματα επιτρέπουν την ανάκτηση προβλεπόμενων τιμών με αποδεκτή ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε τα ακόλουθα σενάρια:

- Μετάδοση φωνής σε GSM για $RxQualSub \in \{0, \dots, 7\}$: Τα γραφήματα στα Σχήματα 7.9 (χρήση κωδικοποιητή EFR) και 7.10 (χρήση κωδικοποιητών AMR FR, HR) δείχνουν ότι για τιμές $RxLevSub$ μικρότερες από $-80dB$ ή μεγαλύτερες από $-65dB$ υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ MOS και $RxLevSub$. Σε όλο το εύρος του $RxLevSub$, η εξάρτηση μπορεί να θεωρηθεί κατά τμήματα γραμμική.
- Μετάδοση φωνής σε UMTS για $E_c/N_0 \in \{-8, -5, -3\}dB$: Σε αυτή την περι-

Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού

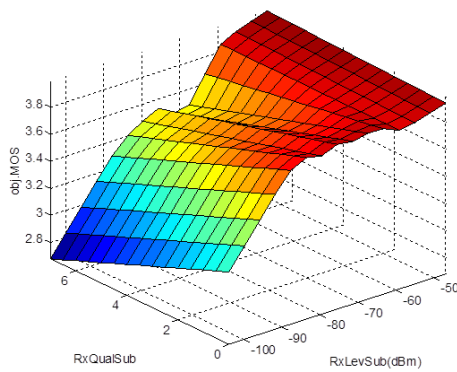


(α') Άνω ζεύξη (UL)

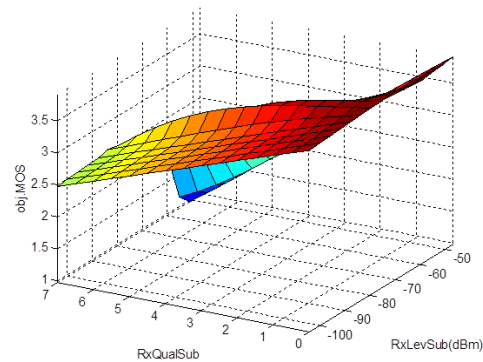


(β') Κάτω ζεύξη (DL)

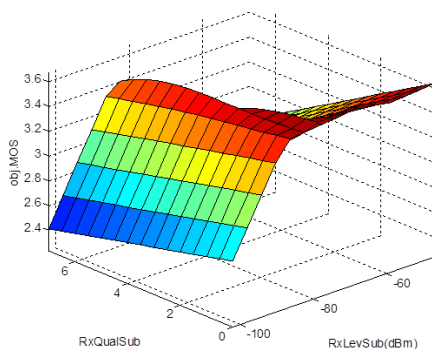
Σχήμα 7.5: 3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για EFR κωδικοποιητή.



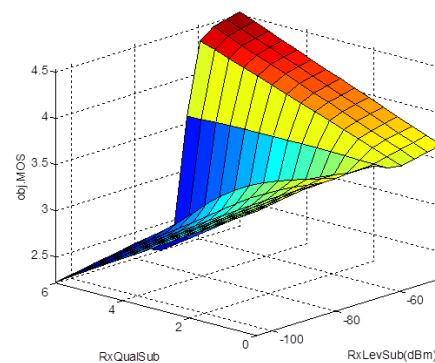
(α') Άνω ζεύξη (UL)



(β') Κάτω ζεύξη (DL)



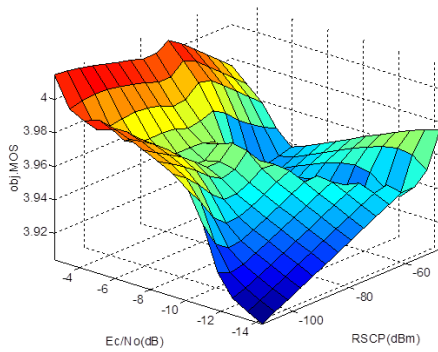
(γ') Άνω ζεύξη (UL)



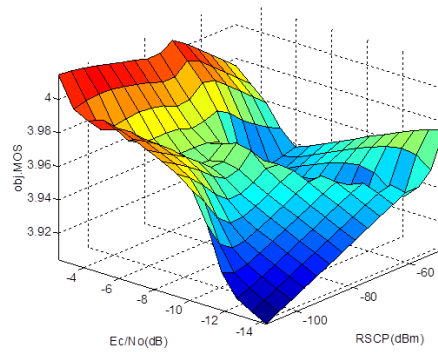
(δ') Κάτω ζεύξη (DL)

Σχήμα 7.6: 3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση GSM τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για AMR FR/HR κωδικοποιητών.

Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού

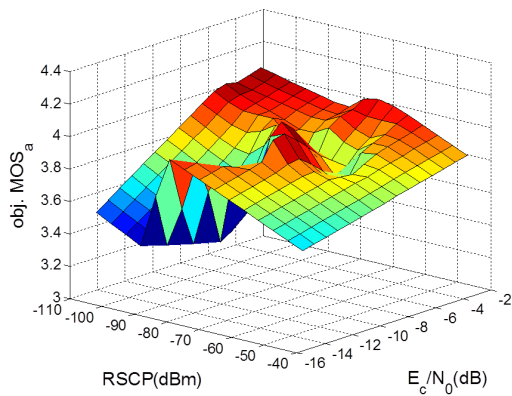


(α') Άνω ζεύξη (UL)

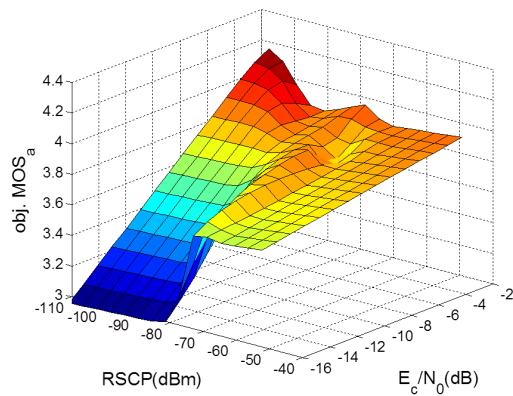


(β') Κάτω ζεύξη (DL)

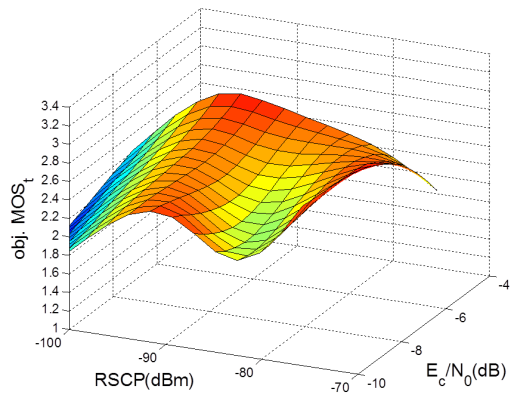
Σχήμα 7.7: 3D ANFIS καμπύλες της ποιότητας φωνής obj. MOS στην περίπτωση UMTS τηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη και για AMR-WB κωδικοποιητή.



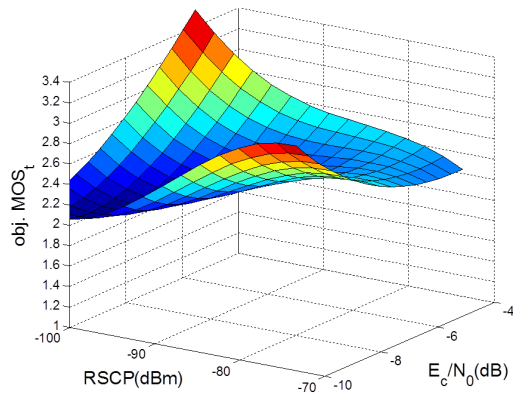
(α') Άνω ζεύξη (UL)



(β') Κάτω ζεύξη (DL)

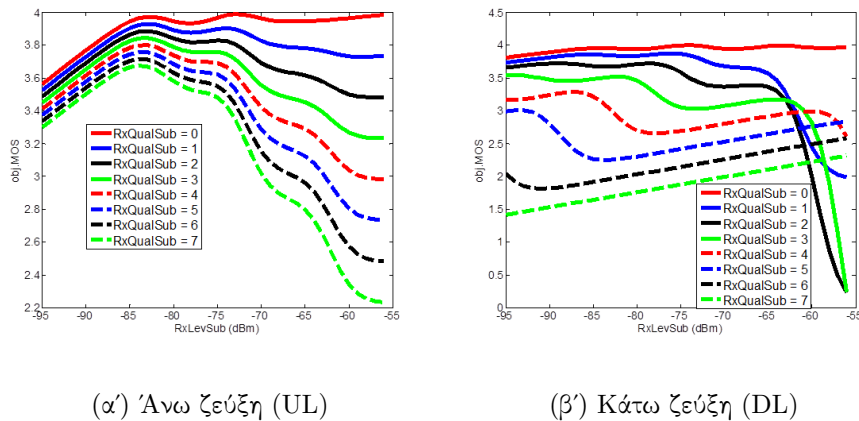


(γ') Άνω ζεύξη (UL)



(δ') Κάτω ζεύξη (DL)

Σχήμα 7.8: 3D ANFIS καμπύλες των δεικτών ποιότητας φωνής obj. MOS_a και πολυμέσων obj. MOS_t UMTS βιντεοτηλεφωνίας για την άνω (UL) και κάτω (DL) ζεύξη.



Σχήμα 7.9: GSM τηλεφωνία - επίδραση του $RxLevSub$ στο obj. MOS_a για διάφορες τιμές του $RxQualSub$ για την περίπτωση EFR κωδικοποιητή.

πτωση η οποία μπορεί να παρατηρηθεί στα γραφήματα στο Σχήμα 7.11, η προβλεπόμενη ποιότητα είναι αρκετά αυξημένη όταν το RSCP είναι άνω των $-80dB$.

- Μετάδοση βίντεο σε UMTS για $E_c/N_0 \in \{-9, -7, -5\}dB$: Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει καμία γραμμικότητα όπως φαίνεται στα γραφήματα του Σχήματος 7.12.

7.4 Αξιολόγηση των Μοντέλων Πρόβλεψης

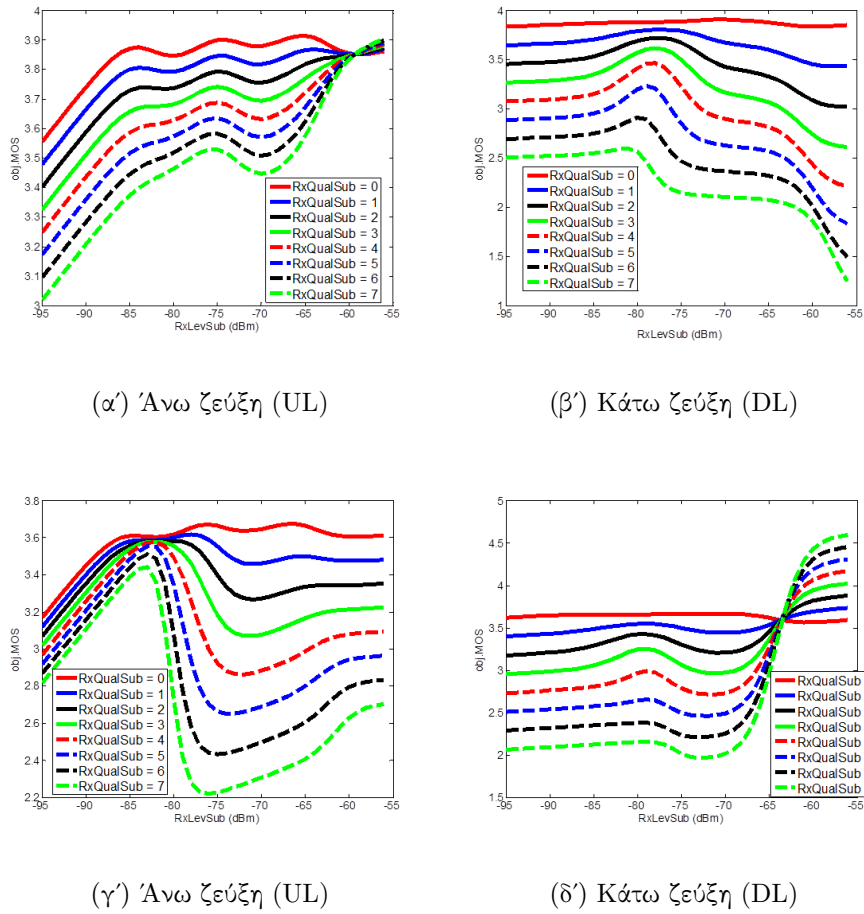
Η επίδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης αξιολογείται με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Αρχικά, πρόσθετα σύνολα μετρήσεων εισάγονται ως δεδομένα ελέγχου στο περιβάλλον διαμόρφωσης του ANFIS. Το ANFIS τότε απεικονίζει τις τιμές μέτρησης και πρόβλεψης και υπολογίζεται το ποσοστιαίο σφάλμα.
2. Δευτερευόντως, για πρόσθετα σύνολα μετρήσεων εφαρμόζεται χειροκίνητα το μοντέλο πρόβλεψης και υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Root-Mean-Square Error) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών. Το RMSE σφάλμα έχει τις ίδιες μονάδες με την ποσότητα που εκτιμάται.

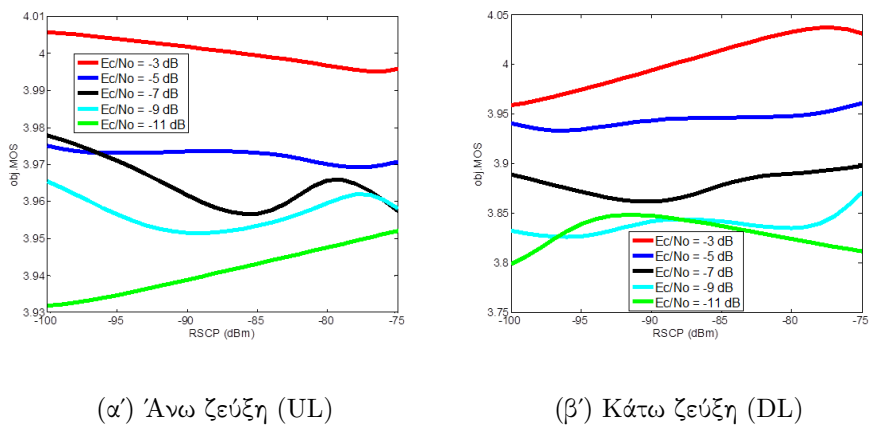
Η αξιολόγηση του μοντέλου πρόβλεψης είναι μια συνεχής διαδικασία και εκτελείται κάθε φορά μετά από την ενημέρωση του συστήματος από νέα σύνολα εκπαίδευσης. Το σφάλμα υπολογίζεται από το ANFIS έχει σχεδόν ίδιες τιμές με το RMSE.

Σκοπός της έρευνας ήταν ο πειραματισμός με ένα ευρύ φάσμα διαμορφώσεων (configurations) με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού RMSE. Με την προτεινόμενη διαμόρφωση, επιτεύχθηκε συνολικό RMSE μεταξύ 0.206 και 0.265. Αν και οι τιμές

Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού

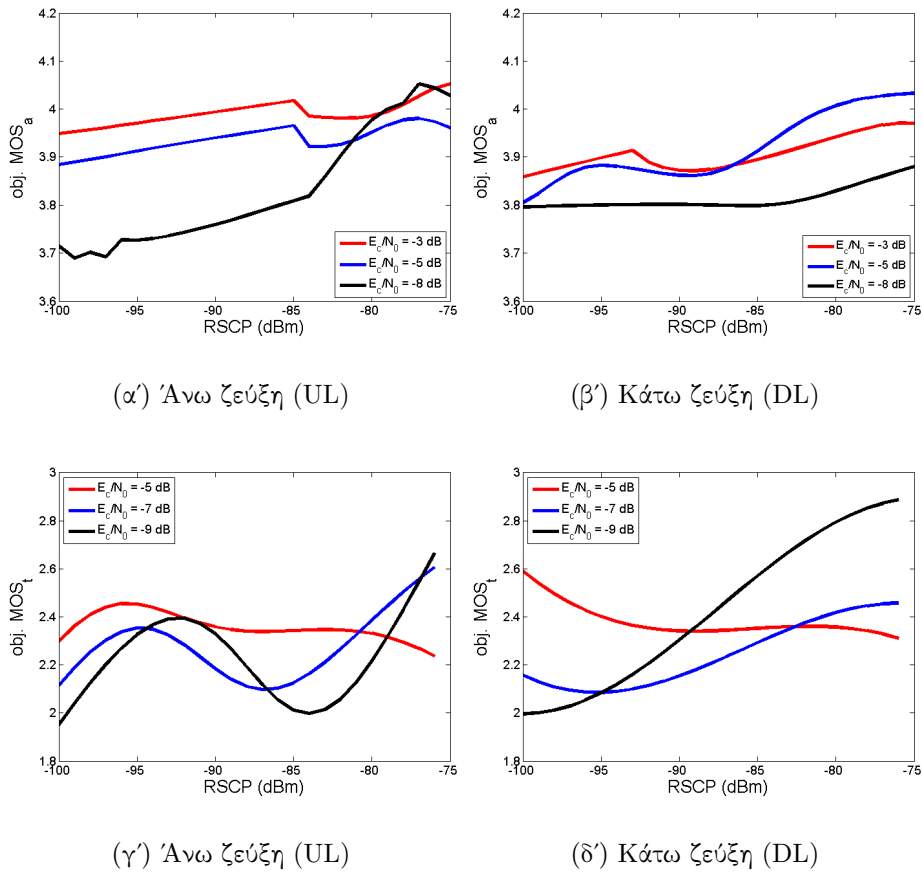


Σχήμα 7.10: GSM τηλεφωνία - επίδραση του $RxLevSub$ στο $obj. MOS_a$ για διάφορες τιμές του $RxQualSub$ για την περίπτωση AMR FR/HR κωδικοποιητών.



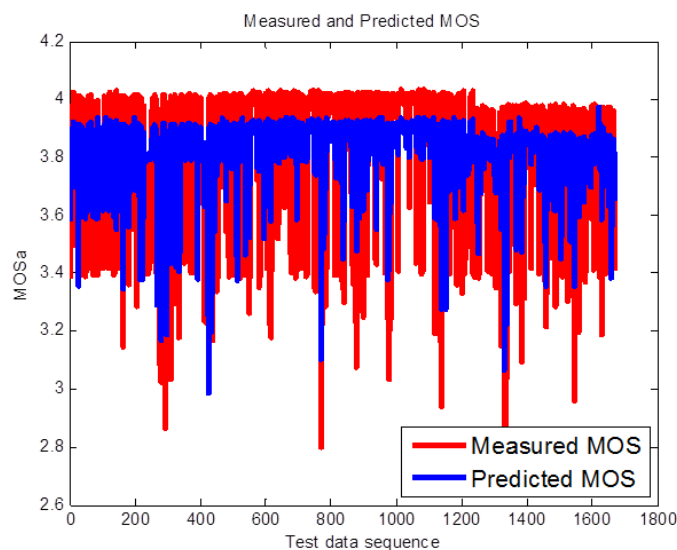
Σχήμα 7.11: UMTS τηλεφωνία - επίδραση του $RSCP$ στο $obj. MOS_a$ για διάφορες τιμές του E_c/I_0 για την περίπτωση AMR WB κωδικοποιητή.

Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού



Σχήμα 7.12: Επίδραση του RSCP στην ποιότητα φωνής και πολυμέσων (obj. MOS) για διάφορες τιμές του E_c/N_0 στην περίπτωση της UMTS βιντεοτηλεφωνίας.

αυτές δεν είναι οι βέλτιστες, ωστόσο θεωρούνται ικανοποιητικές δεδομένης της μεταβλητότητας των δεδομένων μετρήσεων. Η ακρίβεια διαφοροποιείται κατά περίπτωση αφού εξαρτάται από τον συνδυασμό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των μετρήσεων και της διαμόρφωσης του ANFIS. Σε περιπτώσεις που αρκετές μετρήσεις απαντώνται με συγκεκριμένες τιμές, η ακρίβεια μπορεί να αυξηθεί με προσαρμογή της ευαισθησίας του ANFIS αναλόγως, προκειμένου να μην παραβλέπει αυτές τις αιχμές. Υψηλή ευαισθησία οδηγεί φυσικά σε περισσότερες συναρτήσεις συμμετοχής και έτσι σε περισσότερους κανόνες. Έτσι, σε αυτό το σενάριο, ο σχεδιαστής θα πρέπει να προσαρμόσει το ANFIS ώστε να παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις.



Σχήμα 7.13: Απεικόνιση της μετρούμενης και εκτιμούμενης τιμής της παραμέτρου MOS_a στην περίπτωση της GSM τηλεφωνίας για την περίπτωση της άνω ζεύξης (UL).

Ως γενική παρατήρηση, το μοντέλο πρόβλεψης είναι αυστηρό συγκρινόμενο με τις πραγματικές μετρήσεις, στις περισσότερες των περιπτώσεων οι προβλεπόμενες τιμές είναι ελαφρώς κατώτερες από τις μετρούμενες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε κάποιες περιπτώσεις μια σημαντική υποβάθμιση του $SQoS$ σημειώθηκε, πιθανώς λόγω εξωτερικών παραγόντων ή εσφαλμένων μετρήσεων. Αυτό δεν καταγράφεται από την πρόβλεψη του ANFIS. Με αυτό τον τρόπο, το μοντέλο πρόβλεψης δεν επηρεάζεται δραματικά από μη έγκυρα δεδομένα και επιτυγχάνει στην παροχή μιας σταθερής κατάστασης του κινητού δικτύου, το οποίο σημαίνει ότι η μεταβλητότητα των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων είναι μικρότερη της μεταβλητότητας των δεδομένων μέτρησης.

Στο διάγραμμα 7.13 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της πρόβλεψης και των πραγματικών μετρήσεων στην περίπτωση της μετάδοσης φωνής σε GSM (UL) για 1670 περίπου δείγματα.

7.5 Σύνοψη Κεφαλαίου

Συνοψίζοντας, επιλέχθηκε η ασαφής λογική στην εξαγωγή μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας γιατί είναι εννοιολογικά πολύ κατανοητή. Οι μαθηματικές έννοιες υπό την ασαφή συλλογιστική γίνονται απλές. Επίσης είναι ευέλικτη και ανεκτική στην ανακρίβεια των δεδομένων. Επιπλέον, με την ασαφή λογική μοντελοποιούνται μη-γραμμικές συναρτήσεις με αυθαίρετη πολυπλοκότητα (arbitrary complexity).

Προτάθηκε μια στρατηγική πρόβλεψης ποιότητας εμπειρίας υπηρεσιών φωνής και βίντεο αξιοποιώντας μετρήσεις από δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα ασύρματα δίκτυα π.χ. ασύρματα τοπικά δίκτυα, δίκτυα 4ης γενιάς (LTE), καθώς και για υπηρεσίες τηλεφωνίας διαδικτύου (VoIP) και εν γένει υπηρεσίες δεδομένων και πολυμέσων.

Από την έρευνα που διεξήχθη προέκυψαν 2 δημοσιεύσεις [168, 169]. Βέβαια, υπάρχει ενεργό ενδιαφέρον στην χρήση μεθοδολογιών ANFIS για την πρόταση μαθησιακών μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας ήχου, βίντεο και πολυμέσων από διάφορες ερευνητικές κοινότητες [170, 171, 172] σε επίπεδο όμως μόνο προσομοίωσης έως τώρα.

□

Κεφάλαιο 7. Μοντέλα Προσαρμοστικού Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού

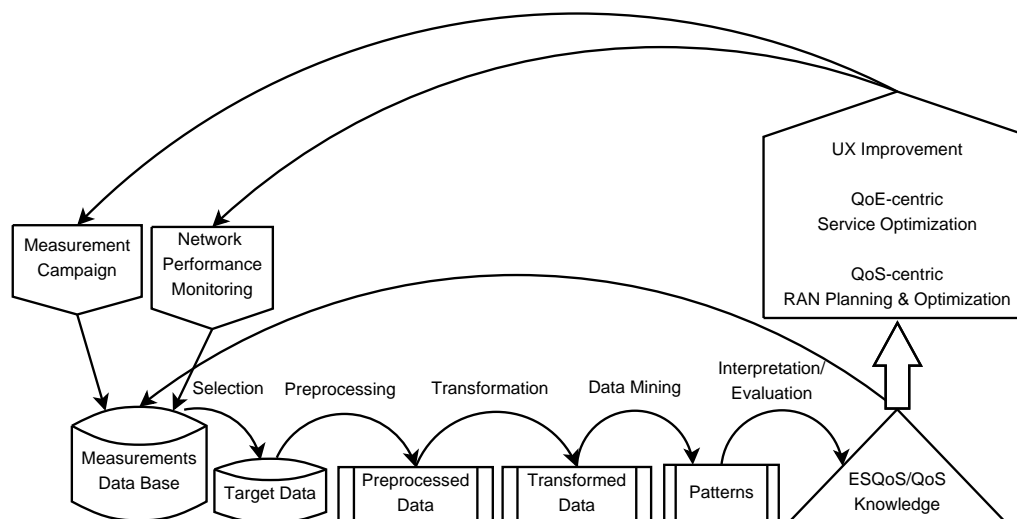
Κεφάλαιο 8

Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων

Στο παρόν Κεφάλαιο ολοκληρώνεται η προσέγγιση της εξαγωγής μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας με μεθόδους υπολογιστικής νοημοσύνης. Αναλυτικά, προτείνουμε την εφαρμογή προηγμένων μεθόδων εξόρυξης πληροφορίας ποιότητας υπηρεσιών από δεδομένα, ή συνοπτικά με τεχνικές “*Data Mining*”. Ως δεδομένα θεωρούμε τις μετρήσεις που συλλέγονται και αφορούν της επίδοση ενός δημοσίου δικτύου κινητών επικοινωνιών εν λειτουργία. Οι μετρήσεις δύναται να έχουν συλλεχθεί είτε από συστήματα παρακαλού-θησης επίδοσης είτε μέσω μιας καμπάνιας μετρήσεων επί τω πεδίο. Τα τελευταία χρόνια έχει διεξαχθεί ιδιαίτερη έρευνα σε αυτές τις μεθόδους με στόχο την υλοποίηση ευφυών εργαλείων ανάλυσης και πρόβλεψης δεικτών ποιότητας καθώς και αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης δικτύου [173, 174].

8.1 Ανακάλυψη Γνώσης ESQoS-SQoS σε Βάσεις Δεδομένων Μετρήσεων

Όταν αναφερόμαστε σε εξόρυξη δεδομένων εννοούμε την εξαγωγή ή “εξόρυξη” γνώσης ή πληροφορίας από μεγάλο όγκο δεδομένων. Η εξόρυξη δεδομένων χρησιμοποιείται συνήθως και σαν ένα συνώνυμο ενός άλλου δημοφιλή όρου, της ανακάλυψης γνώσης από βάσεις δεδομένων ή KDD (Knowledge Discovery in Databases) [175, 176]. Το KDD είναι μία μη τετριμμένη διαδικασία εύρεσης έγκυρων, νέων, χρήσιμων και πλήρως κατανοητών προτύπων από τα δεδομένα και μπορεί να περιλαμβάνει επανάληψη μεταξύ οποιονδήποτε βημάτων.



Σχήμα 8.1: Σύστημα βελτιστοποίησης ποιότητας βασισμένο σε ανακάλυψη της πληροφορίας ESQoS και SQoS σε βάσεις δεδομένων που προέρχονται από καμπάνιες μετρήσεων καθώς και από συστήματα παρακολούθησης επίδοσης δικτύου.

Υιοθετώντας τις γενικές αρχές του KDD, προτείνουμε στο Σχήμα 8.1 τις διαδικασίες ενός συστήματος βελτιστοποίησης ποιότητας βασισμένο σε ανακάλυψη της πληροφορίας ESQoS και SQoS σε βάσεις δεδομένων που προέρχονται από καμπάνιες μετρήσεων καθώς και από συστήματα παρακολούθησης επίδοσης δικτύου. Αναφέρονται ότι τα βήματα για την ανακάλυψη της πληροφορίας είναι τα εξής:

1. Προεπεξεργασία (Preprocessing): Σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να διεξαχθούν οι διαδικασίες καθαρισμού (data cleaning), ενοποίησης (data integration) και μετασχηματισμού (data transformation) των δεδομένων μετρήσεων που είναι πιθανόν να είναι ελλιπή (incomplete), θορυβώδη (noisy) και ασυνεπή (inconsistent). Κατόπιν, γίνεται η επιλογή (selection) δεδομένων και γνωρισμάτων με εφαρμογή των κατάλληλων μετασχηματισμών όπως της συνάθροισης (aggregation), της δειγματοληψίας (sampling) ενός αντιπροσωπευτικού υποσυνόλου δεδομένων, της μείωσης των διαστάσεων των δεδομένων (dimensionality reduction), της διακριτοποίησης (discretization/binarization) και της κανονικοποίησης (value transformation).
2. Εξόρυξη Πληροφορίας (Data mining): Αφορά κυρίως τις διαδικασίες και τα μέσα με τα οποία θα εξάγονται τα πρότυπα (patterns) και οι κανόνες συσχέτισης (association rules) από τα μετασχηματισμένα σύνολα των δεδομένων με αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), μηχανικής μάθησης (machine learning), στατιστικής και διαχείρισης βάσεων δεδομένων (data base management). Οι βασικές διαδικασίες της εξόρυξης πληροφορίας είναι:

- Παλινδρόμηση (Regression)

- Κατηγοριοποίηση (Classification)
- Ομαδοποίηση ή Συσταδοποίηση (Clustering)
- Εξαγωγή κανόνων συσχέτισης (Association rules)
- Ανάλυση Χρονοσειρών (Time Series)
- Περιληπτική παρουσίαση της πληροφορίας ή παρουσίαση συνόψεων (Summarization)

Το μοντέλα που δημιουργούνται από τη διαδικασία εξόρυξης μπορεί να είναι είτε προβλεπτικό είτε περιγραφικό. Το προβλεπτικό μοντέλο κάνει μία πρόβλεψη για τις τιμές των παραμέτρων ποιότητας (KPIs), χρησιμοποιώντας γνωστά αποτελέσματα που έχει βρει από μετρήσεις. Το περιγραφικό μοντέλο αναγνωρίζει πρότυπα ή συσχετίσεις στα δεδομένα, ενώ επίσης λειτουργεί σαν ένα μέσο που διερευνά τις ιδιότητες των παραμέτρων ποιότητας οι οποίοι εξετάζονται, χωρίς να προβλέπει νέες ιδιότητες.

3. Διαδικασία ευφυούς και αυτόματης βελτιστοποίησης και σχεδιασμού δικτύου χρήσει των μοντέλων πρόβλεψης / περιγραφής ESQoS/SQoS με στόχο την βελτίωση της εμπειρίας χρήστη (User Experience, UX).

Εδώ, προτείνεται η συνεχής επανάληψη του κύκλου βελτιστοποίησης με την συχνή ενημέρωση των βάσεων δεδομένων με στρατηγικό στόχο την διαρκή βελτίωση ή *Kaizen* [177].

8.2 Κατηγοριοποίηση

Η κατηγοριοποίηση (classification) είναι η πιο γνωστή και η πιο δημοφιλής τεχνική εξόρυξης πληροφορίας από δεδομένα (data mining).

Όλες οι προσεγγίσεις στην εκτέλεση της κατηγοριοποίησης προϋποθέτουν γνώση των δεδομένων. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα σύνολο μάθησης ή εκπαίδευσης για να καθορίσει τις συγκεκριμένες παραμέτρους που απαιτούνται από την τεχνική. Τα δεδομένα εκπαίδευσης (training data) αποτελούνται από ένα δείγμα δεδομένων εισόδου καθώς επίσης και από την κατηγοριοποίηση που έχει δοθεί σε αυτά τα δεδομένα.

Η κατηγοριοποίηση μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία η οποία απεικονίζει ένα σύνολο δεδομένων σε προκαθορισμένες ομάδες. Τις ομάδες αυτές συχνά τις καλούμε κατηγορίες ή κλάσεις.

Αρχικά θα πρέπει να ορίσουμε την έννοια της μέτρησης ή παρατήρησης. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η Κατηγοριοποίηση Δεδομένων εφαρμόζεται σε μια βάση δεδομένων,

ως παρατήρηση ή μέτρηση μπορεί να οριστεί μια εγγραφή ή πλειάδα (tuple), t_x σε μια βάση δεδομένων μετρήσεων.

Έτσι, ορίζουμε ως μέτρηση ή παρατήρηση ή διάνυσμα χαρακτηριστικών ή σημείο ένα στοιχείο της βάσης δεδομένων της οποίας τα στοιχεία θέλουμε να κατηγοριοποιήσουμε και συμβολίζεται με t_x .

Έστω μια βάση δεδομένων $\mathcal{D} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ πλειάδων (στοιχείων, εγγραφών) και ένα σύνολο από κατηγορίες $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$. Το πρόβλημα της κατηγοριοποίησης είναι ο ορισμός μιας απεικόνισης $f : \mathcal{D} \mapsto \mathcal{C}$ όπου κάθε t_x τοποθετείται σε μια κατηγορία. Μια κατηγορία ή κλάση C_i , περιέχει ακριβώς αυτές τις πλειάδες όπου έχουν απεικονιστεί σε αυτή, δηλαδή $C_i = \{t_x | f(t_x) = C_i, 1 \leq x \leq n, \forall t_x \in \mathcal{D}\}$.

Η επίλυση των προβλημάτων κατηγοριοποίησης περιλαμβάνει δύο βασικά βήματα:

1. Βήμα 1: Εξαγωγή ενός μοντέλου από την αξιολόγηση και την ανάλυση των δεδομένων εκπαίδευσης. Ως είσοδο χρησιμοποιούνται τα δεδομένα εκπαίδευσης και ως έξοδο μια κατηγορία. Το μοντέλο που δημιουργείται είναι σε θέση να κατηγοριοποιεί τα δεδομένα εκπαίδευσης με σημαντική ακρίβεια. Αν οι κατηγορίες του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης είναι ήδη γνωστές, δηλαδή το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης περιλαμβάνει ένα χαρακτηριστικό το οποίο δείχνει την κλάση στην οποία κατηγοριοποιείται η κάθε πλειάδα, τότε το βήμα αυτό λέγεται εποπτευμένη μάθηση (supervised learning). Αντιθέτα, αν οι κατηγορίες του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης δεν είναι γνωστές, τότε το βήμα αυτό λέγεται μη εποπτευμένη μάθηση (unsupervised learning - clustering).
2. Βήμα 2: Εφαρμογή του μοντέλου, του βήματος 1, για την κατηγοριοποίηση πλειάδων της υπό εξέταση βάσης δεδομένων. Εάν και το δεύτερο βήμα στην πραγματικότητα εκτελεί την κατηγοριοποίηση, το μοντέλο έχει υλοποιηθεί επαρκώς.

Για να λυθεί το πρόβλημα της κατηγοριοποίησης υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται:

1. Καθορισμός των ορίων: Η κατηγοριοποίηση εκτελείται με διαίρεση του χώρου της εισόδου των εν δυνάμει πλειάδων της βάσης δεδομένων σε σύνολα ή διαστήματα όπου κάθε σύνολο ή διάστημα συνδέεται με μια κατηγορία.
2. Χρήση κατανομών πιθανότητας (probability distribution function, PDF): Για κάθε κατηγορία C_i , δίνεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(t_x|C_i)$ για την κατηγορία υπολογισμένη σε ένα σημείο, t_x . Αν η πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατηγορίας $P(C_i)$, τότε $P(C_i) P(t_x|C_i)$ είναι η εκτίμηση της πιθανότητας η t_x να ανήκει στην κατηγορία C_i .

3. Χρήση εκ των υστέρων πιθανοτήτων (posterior probability): Δεδομένης μιας τιμής δεδομένων t_x , καθορίζεται η πιθανότητα η t_x να ανήκει στην κατηγορία C_j . Αυτό υποδηλώνεται ως $P(C_j|t_x)$ και καλείται η εκ των υστέρων πιθανότητα.

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα σχετικό με την κατηγοριοποίηση είναι η υπερπροσαρμογή. Συγκεκριμένα, κατά την υπερπροσαρμογή η κατηγοριοποίηση αντιστοιχεί ακριβώς τα δεδομένα εκπαίδευσης και πολύ πιθανόν το ενδεχόμενο να είναι αδύνατη η εφαρμογή της σε ευρύτερα ή διαφορετικά δεδομένα.

8.2.1 Απόδοση της Κατηγοριοποίησης

Η επίδοση των αλγορίθμων κατηγοριοποίησης εξετάζεται την ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει την κατηγορία μιας νέας περίπτωσης, δηλαδή την εκτίμηση της ακρίβειας (accuracy estimation). Ενδιαφέρον θέμα αποτελεί και η συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης διαφορετικών αλγορίθμων κατηγοριοποίησης. Αν και η ακρίβεια είναι το πιο σημαντικό μέτρο αποτίμησης της απόδοσης του αλγορίθμου κατηγοριοποίησης που χρησιμοποιούμε, υπάρχουν και άλλα μέτρα σύγκρισης όπως:

- Προβλεπόμενη ακρίβεια (Predictive accuracy).
- Ταχύτητα (Speed): χρόνος κατασκευής, χρήσης/εφαρμογής του μοντέλου (κόστος υπολογισμού).
- Σθεναρότητα (Robustness): πρόβλεψη με ελλιπή δεδομένα ή δεδομένα με θόρυβο.
- Κλιμάκωση (Scalability): αποδοτικότητα του μοντέλου δοθέντος μεγάλης βάσης δεδομένων.
- Ευκρίνεια (Interpretability): Επίπεδο κατανόησης και γνώση που παρέχεται από το μοντέλο.
- Ποιότητα (Goodness of rules - Quality): είναι η ποιότητα του μοντέλου, π.χ. το μέγεθος του δένδρου απόφασης.

Η ακρίβεια της κατηγοριοποίησης συνήθως υπολογίζεται με τον καθορισμό του ποσοστού των πλειάδων που τοποθετούνται την σωστή κατηγορία. Για να εκτιμήσουμε την ακρίβεια του αλγορίθμου κατηγοριοποίησης υπάρχουν οι εξής τρεις τρόποι:

1. Χρησιμοποιείται ένα σύνολο δεδομένων αρχικά για την εκπαίδευση τον αλγορίθμου και στην συνέχεια χρησιμοποιείται το ίδιο σύνολο δεδομένων για την εκτίμηση της ακρίβειας. Η επιλογή αυτή οδηγεί σε ιδιαίτερα αισιόδοξη εκτίμηση της ακρίβειας δεδομένου ότι ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται και αξιολογείται παράλληλα με το ίδιο σύνολο δεδομένων.

2. Άλλη μέθοδος αξιολόγησης επίδοσης ενός αλγορίθμου είναι η μέθοδος της κατακράτησης (holdout method). Το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων διαιρείται με τυχαίο τρόπο σε δυο ανεξάρτητα υποσύνολα. Το πρώτο μεν ονομάζεται σύνολο δεδομένων μάθησης και χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Το δε δεύτερο καλείται σύνολο δεδομένων δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του αλγορίθμου και την εκτίμηση της ακρίβειας. Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται τα 2/3 του συνόλου δεδομένων σαν υποσύνολο μάθησης και το υπόλοιπο 1/3 ως υποσύνολο δοκιμής.
3. Τέλος, με την τεχνική “*k*-fold cross validation” το αρχικό σύνολο δεδομένων αρχικά διαιρείται σε *k* ισομεγέθη υποσύνολα (folds), S_1, S_2, \dots, S_k . Οι διαδικασίες μάθησης και ελέγχου εκτελούνται *k* φορές. Στην *i*-επανάληψη, το υποσύνολο S_i αποτελεί το υποσύνολο δοκιμής, ενώ τα υπόλοιπα $k - 1$ υποσύνολα χρησιμοποιούνται για την μάθηση του αλγορίθμου. Πρακτικά, ο κατάλληλος αριθμός επαναλήψεων είναι $k = 10$ (10-fold cross validation).

Για τον σκοπό της αξιολόγησης της απόδοσης ενός αλγορίθμου κατηγοριοποίησης θα πρέπει να ορισθούν κάποια μέτρα (measures) Δεδομένων μιας συγκεκριμένη κατηγορία, C_i , και μιας πλειάδα της βάσης δεδομένων, t_x , αυτή η πλειάδα είτε θα καταχωρηθεί σε αυτή την κατηγορία είτε όχι, ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να είναι ή να μην είναι μέλος αυτής της κατηγορίας. Ορίζεται λοιπόν ο πίνακας σύγχυσης ή μήτρα σύγχυσης (confusion matrix). Με δεδομένες $m = 5$ κατηγορίες μια μήτρα σύγχυσης είναι μια $m \times m$ μήτρα όπου κάθε καταχώρηση $C_{i,j}$ δείχνει τον αριθμό των πλειάδων οι οποίες τοποθετήθηκαν στην κατηγορία C_j αλλά των οποίων η πραγματική κατηγορία είναι η C_i . Όπως καταλαβαίνουμε, οι καλύτερες λύσεις θα έχουν μόνο μηδενικές τιμές έξω από την κύρια διαγώνιο. Έτσι μπορούμε να ορίσουμε τα κάτωθι μέτρα:

Actual Class	Predicted Class				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1 Bad	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
C_2 Poor	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}
C_3 Fair	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}
C_4 Good	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}
C_5 Excellent	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	C_{55}

Πίνακας 8.1: Πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) για την πρόβλεψη ποιότητας με μεθόδους κατηγοριοποίησης. Το στοιχείο C_{ij} είναι ο αριθμός των εγγραφών της κλάσης C_i που προβλέπονται ως κλάση C_j .

- Αληθώς θετικό (True Positive - $TP(C_i)$): το t_x εκτιμάται ότι ανήκει στην κατηγορία C_i και πράγματι ανήκει σε αυτήν.

$$TP(C_i) = C_{ii} \quad (8.1)$$

- Ψευδώς θετικό (False Positive - $FP(C_i)$): το t_x εκτιμάται ότι ανήκει στην κατηγορία C_i ενώ στην πραγματικότητα δεν ανήκει σε αυτήν.

$$FP(C_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m C_{ji} \quad (8.2)$$

- Αληθώς αρνητικό (True Negative - $TN(C_i)$): το t_x εκτιμάται ότι δεν ανήκει στην κατηγορία C_i και πράγματι δεν ανήκει σε αυτήν.

$$TN(C_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m C_{jj} \quad (8.3)$$

- Ψευδώς αρνητικό (False Negative - $FN(C_i)$): το t_x εκτιμάται ότι δεν ανήκει στην κατηγορία C_i ενώ στην πραγματικότητα ανήκει σε αυτήν.

$$FN(C_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m C_{ij} \quad (8.4)$$

Έτσι ορίζουμε τα εξής μεγέθη:

- Ακρίβεια (Accuracy - $ACC(C_i)$): οι σωστές προβλέψεις στην κατηγορία C_i .

$$ACC(C_i) = \frac{TP(C_i) + TN(C_i)}{TP(C_i) + TN(C_i) + FP(C_i) + FN(C_i)} \quad (8.5)$$

Η συνολική ακρίβεια του μοντέλου δίνεται από την σχέση:

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^m C_{ii}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}} \quad (8.6)$$

- Ρυθμός Σφάλματος (Error Rate - $ERR(C_i)$):

$$ERR(C_i) = 1 - ACC(C_i) \quad (8.7)$$

Ο συνολικός ρυθμός σφάλματος μοντέλου δίνεται από την σχέση:

$$ERR = 1 - ACC \quad (8.8)$$

- Ευαισθησία (Sensitivity ή True Positive Rate - $TPR(C_i)$): το ποσοστό των θετικών εγγραφών t_x που κατηγοριοποιούνται σωστά στην κλάση C_i .

$$TPR(C_i) = \frac{TP(C_i)}{TP(C_i) + FN(C_i)} \quad (8.9)$$

- True Negative Rate - $TNR(C_i)$: το ποσοστό των αρνητικών εγγραφών t_x που κατηγοριοποιούνται σωστά στις υπόλοιπες κλάσεις πλην της C_i .

$$TNR(C_i) = \frac{TN(C_i)}{TN(C_i) + FP(C_i)} \quad (8.10)$$

- False Positive Rate - $FPR(C_i)$: το ποσοστό των αρνητικών εγγραφών που κατηγοριοποιούνται λάθος (δηλαδή ως θετικά).

$$FPR(C_i) = \frac{FP(C_i)}{TN(C_i) + FP(C_i)} \quad (8.11)$$

- False Negative Rate - $FNR(C_i)$: το ποσοστό των θετικών εγγραφών που κατηγοριοποιούνται λάθος (δηλαδή ως αρνητικά).

$$FNR(C_i) = \frac{FN(C_i)}{TP(C_i) + FN(C_i)} \quad (8.12)$$

- Ακρίβεια (Precision - $p(C_i)$ ή Positive Predictive Value - $PPV(C_i)$): πόσες από τις εγγραφές το μοντέλο έχει κατηγοριοποιήσει ως θετικά είναι πραγματικά θετικά.

$$p(C_i) = \frac{TP(C_i)}{TP(C_i) + FP(C_i)} \quad (8.13)$$

Συνολικά για το μοντέλο έχουμε:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^m TP(C_i)}{\sum_{i=1}^m (TP(C_i) + FP(C_i))} \quad (8.14)$$

- Ανάκληση (Recall - $r(C_i)$) : πόσες από τις θετικές εγγραφές της C_i κατάφερε ο κατηγοριοποιητής να βρεί.

$$r(C_i) = \frac{TP(C_i)}{TP(C_i) + FN(C_i)} \quad (8.15)$$

- F μέτρο (F -score): είναι ο αρμονικός μέσος (harmonic mean) των δεικτών r και p .

$$F(C_i) = \frac{2rp}{r+p} = \frac{2}{\frac{1}{r} + \frac{1}{p}} = \frac{2TP(C_i)}{2TP(C_i) + 2FP(C_i) + FN(C_i)} \quad (8.16)$$

- Ειδικότητα Specificity (SPC) ή True Negative Value:

$$SPC(C_i) = \frac{TN(C_i)}{FP(C_i) + TN(C_i)} = 1 - FPR(C_i) \quad (8.17)$$

- False Discovery Rate (FDR):

$$FDR(C_i) = \frac{FP(C_i)}{FP(C_i) + TP(C_i)} \quad (8.18)$$

- Matthews Correlation Coefficient ($MCC(C_i)$):

$$MCC(C_i) = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (8.19)$$

Αν θεωρήσουμε ότι

$$T(C_i) = TN(C_i) + TP(C_i) + FN(C_i) + FP(C_i),$$

$$S(C_i) = \frac{TP(C_i) + FN(C_i)}{N(C_i)},$$

$$P(C_i) = \frac{TP(C_i) + FP(C_i)}{N(C_i)},$$

τότε:

$$MCC(C_i) = \frac{\frac{TP(C_i)}{N(C_i)} - S(C_i) \times P(C_i)}{\sqrt{P(C_i) \times S(C_i)(1 - S(C_i))(1 - P(C_i))}} \quad (8.20)$$

- Σταθμισμένη Ακρίβεια (Weighted Accuracy ($WACC(C_i)$)):

$$WACC(C_i) = \frac{w_1TP + w_4TN}{w_1TP + w_2FP + w_3FN + w_4TN} \quad (8.21)$$

όπου τα βάρη $w_i, \forall i \in \{1, 2, 3, 4\}$ σταθμίζουν την ακρίβεια του μοντέλου. Σύμφωνα με τις τιμές των βαρών τον Πίνακα 8.2 μπορούν να προκύψουν τα μεγέθη r, p, F και ACC .

	w_1	w_2	w_3	w_4
r Recall	1	1	0	0
p Precision	1	0	1	1
F -measure	2	1	1	0
ACC Accuracy	1	1	1	1

Πίνακας 8.2: Πίνακας βαρών στην σταθμισμένη ακρίβεια.

- Χαρακτηριστική καμπύλη εν λειτουργία δέκτη (Receiver Operating Characteristic, ROC): Πρόκειται για ένα γράφημα της ευαισθησίας, ή του ρυθμού των αληθώς θετικών (TPR), ως προς του ρυθμού εσφαλμένων θετικών (TNR ή $1 - SPC$, SPC: ειδικότητα). Ισοδύναμα, η καμπύλη μπορεί να αναπαραστήσει τον ρυθμό TPR ως προς τον ρυθμό FPR [178, 179].

8.2.2 Αλγόριθμοι βασισμένοι στην Απόσταση - Μελέτη Περίπτωσης: k - Πλησιέστεροι Γείτονες

Η αναπαράσταση μιας μέτρησης, αποκαλείται και σημείο, σε ένα μετρικό χώρο είναι ένα διάνυσμα από διάφορες τιμές των παραμέτρων της μέτρησης όπως η στάθμη λήψης σήματος, η ποιότητα του σήματος λήψης, οι δείκτες ποιότητας φωνής, βίντεο και πολυμέσων κλπ. Το πλήθος των χαρακτηριστικών, d αυτών καλείται διάσταση του προβλήματος και θεωρείται σταθερό για όλες τις μετρήσεις, ενώ οι τιμές αναπαριστώνται με την μορφή διανύσματος $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)$, όπου x_i τα χαρακτηριστικά ή συντεταγμένες μιας μέτρησης. Το πλήθος των μετρήσεων συμβολίζεται με n , ενώ η βάση δεδομένων μετρήσεων συμβολίζεται με \mathcal{D} .

Μια συνάρτηση $d : \mathcal{D} \times \mathcal{D} \mapsto \mathbb{R}$ καλείται μετρική, αν ισχύουν:

1. $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0, \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{D}$

2. $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{y}, \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{D}$
3. $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = d(\mathbf{y}, \mathbf{x}), \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{D}$
4. $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + d(\mathbf{y}, \mathbf{z}), \forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathcal{D}$

Σε έναν χώρο που έχει οριστεί μια μετρική συνάρτηση, ορίζεται η έννοια της απόστασης δυο μετρήσεων ή σημείων. Η απόσταση Minkowski είναι η πιο σύνηθης και ορίζεται ως εξής:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left(\sum_{k=1}^d |x_k - y_k|^p \right)^{1/p} \quad (8.22)$$

Για τις διάφορες τιμές της παραμέτρου p ορίζονται οι μετρικές:

1. Για $p = 1$, Απόσταση Manhattan:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^d |x_i - y_i| \quad (8.23)$$

2. Για $p = 2$, η Ευκλείδεια Απόσταση:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^d |x_i - y_i|^2} \quad (8.24)$$

3. Για $p \rightarrow +\infty$, η Απόσταση Chebyshev:

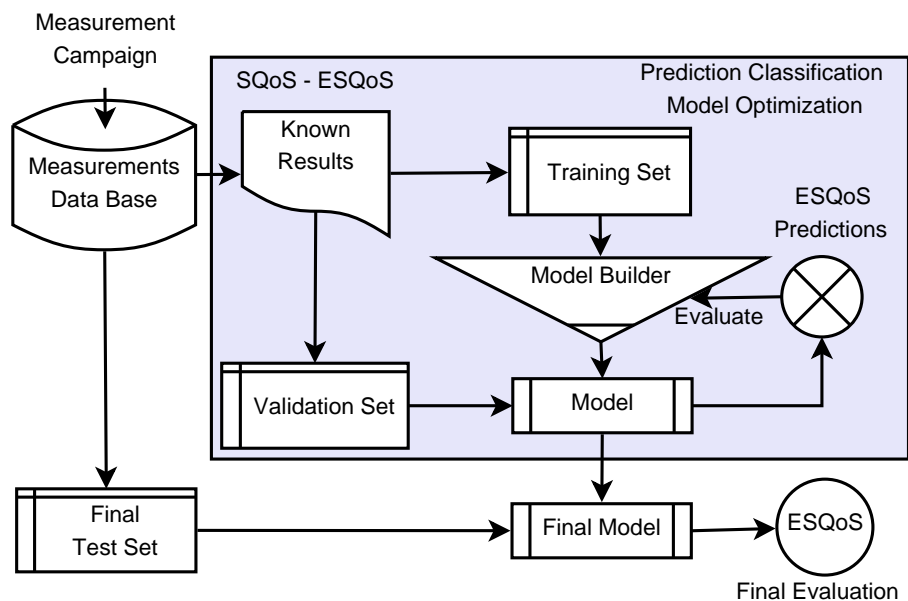
$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_{1 \leq i \leq d} |x_i - y_i| \quad (8.25)$$

Στις παραπάνω συναρτήσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε βάρη, w_k ώστε να σταθμίσουμε την σημαντικότητα των χαρακτηριστικών.

Η βασική ιδέα αυτών των αλγορίθμων είναι ότι κάθε στοιχείο του συνόλου δεδομένων που απεικονίζεται στην ίδια κατηγορία θεωρείται ότι είναι πιο κοντά σε στοιχεία της ίδιας κατηγορίας από όσο είναι σε στοιχεία τα οποία ανήκουν σε άλλες κατηγορίες. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέτρα ομοιότητας (ή απόστασης) ώστε να οριστεί η “ομοιότητα” (similarity) των διαφορετικών στοιχείων της Βάσης Δεδομένων.

Μια συνάρτηση $s : \mathcal{D} \times \mathcal{D} \mapsto \mathbb{R}$ καλείται μετρική, αν ισχύουν:

1. η s είναι συμμετρική, δηλαδή $s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = s(\mathbf{y}, \mathbf{x})$,
2. $0 \leq s(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \leq 1$



Σχήμα 8.2: Μεθοδολογία βελτιστοποίησης μοντέλου πρόβλεψης ποιότητας βασισμένου στην κατηγοριοποίηση.

$\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{D}$.

Επιπλέον, αν ισχύουν

1. $s(\mathbf{x}, \mathbf{y})s(\mathbf{y}, \mathbf{z}) \leq [s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + s(\mathbf{y}, \mathbf{z})]s(\mathbf{x}, \mathbf{z})$
2. $s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{y}$

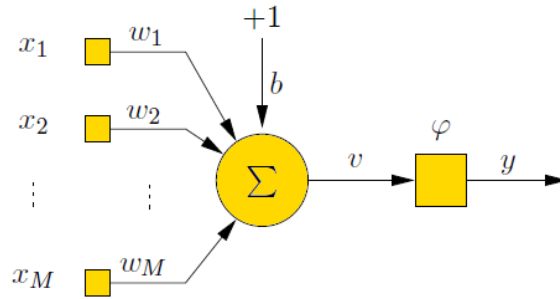
$\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathcal{D}$.

τότε η συνάρτηση s καλείται μετρική ομοιότητας.

Η τεχνική κατηγοριοποίησης των k πλησιέστερων γειτόνων (k Nearest Neighbors - KNN) βασίζεται στη χρήση μέτρων βασισμένων στην απόσταση και πρόκειται για την πιό γνωστή και ευρεία χρησιμοποιούμενη. Η τεχνική KNN προϋποθέτει ότι το σύνολο εκπαίδευσης δεν περιλαμβάνει μόνο τα δεδομένα αλλά επίσης και την επιθυμητή κατηγοριοποίηση για κάθε στοιχείο. Αυτό συνεπάγεται τα δεδομένα εκπαίδευσης να αποτελούν το μοντέλο κατηγοριοποίησης. Όταν πρόκειται να γίνει μια κατηγοριοποίηση για ένα νέο στοιχείο, πρέπει να καθοριστεί η απόσταση του από κάθε στοιχείο του συνόλου εκπαίδευσης και μόνο οι k κοντινότερες εκχωρήσεις στο σύνολο εκπαίδευσης λαμβάνονται υπόψη στη συνέχεια. Το νέο στοιχείο τοποθετείται στην κατηγορία που περιέχει τα περισσότερα στοιχεία από το σύνολο των k κοντινότερων στοιχείων [180].

8.2.3 Νευρωνικά Δίκτυα

Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας παράλληλος καταναμημένος επεξεργαστής, ο νευρώνας, που έχει κατασκευαστεί από απλές μονάδες επεξεργασίας, και αποθηκεύει εμπει-



Σχήμα 8.3: Η δομή ενός νευρώνα.

ρική γνώση για να την κάνει διαθέσιμη για χρήση όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3 [181].

Το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας κατευθυνόμενος γράφος με κόμβους εισόδου, κόμβους εξόδου και εσωτερικούς (κρυμμένους) κόμβους καθώς και τόξα μεταξύ αυτών. Οι κόμβοι είναι σαν ανεξάρτητοι νευρώνες ενώ τα τόξα είναι οι σύνδεσμοί τους. Κάθε ένας κόμβος (στοιχείο επεξεργασίας) λειτουργεί ανεξάρτητα από τους άλλους και χρησιμοποιεί μόνο τοπικά δεδομένα (είσοδο και έξοδο στον κόμβο) που καθοδηγούν την επεξεργασία του. Αυτή η ιδιότητα διευκολύνει τη χρήση των νευρωνικών δικτύων σε ένα καταναμημένο ή/και παράλληλο περιβάλλον.

Ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο που αποτελείται από τρία μέρη:

- Τον γράφο, ο οποίος ορίζει τη δομή δεδομένων του νευρωνικού δικτύου.
- Τον αλγόριθμο μάθησης, που δείχνει με ποιον τρόπο γίνεται η μάθηση.
- Τις τεχνικές ανάκλησης, που καθορίζουν πώς η πληροφορία παρέχεται μέσω του δικτύου.

Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας κατευθυνόμενος γράφος $\mathcal{G} = \{\mathcal{K}, \mathcal{T}\}$ με κορυφές $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, \kappa\}$ και τόξα $\mathcal{T} = \{\tau_{ij}, \forall i, j \in [1, \tau]\}$, με τους παρακάτω περιορισμούς:

- Το \mathcal{K} χωρίζεται σε ένα σύνολο από κόμβους εισόδου \mathcal{K}_{in} , κρυμμένους εσωτερικούς κόμβους \mathcal{K}_h και κόμβους εξόδου \mathcal{K}_{out} .
- Οι κορυφές χωρίζονται σε στρώματα (layers) $\{1, 2, \dots, l\}$ με τους κόμβους εισόδου στο επίπεδο 1, τους κόμβους στα κρυμμένα επίπεδα (hidden layers) $2, \dots, l - 1$ και τους κόμβους εξόδους στο στρώμα l .
- Κάθε τόξο τ_{ij} πρέπει να έχει τον κόμβο i στο επίπεδο $h - 1$ και τον κόμβο j στο επίπεδο h .

Κεφάλαιο 8. Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων

- Το τόξο $\tau_{i,j}$ έχει σαν ετικέτα την αριθμητική τιμή w_{ij} .
- Ο κόμβος i έχει για ετικέτα τη συνάρτηση φ_i .

Όλα τα τόξα έχουν βάρη, όπου w_{ij} είναι το βάρος μεταξύ των κόμβων i και j . Όταν το w_{ij} είναι μεγάλο, τότε η συνεισφορά του σήματος από τον κόμβο i είναι μεγάλη και το αντίθετο. Κάθε κόμβος έχει το όνομα μιας συνάρτησης (συνάρτηση ενεργοποίησης), η οποία δείχνει τη λειτουργία του κόμβου στα δεδομένα που έρχονται μέσα από αυτόν. Οι συναρτήσεις του στρώματος εισόδου απλά παίρνουν τις αντίστοιχες τιμές των χαρακτηριστικών και τις αναπαράγουν στις εξόδους τους. Οι συναρτήσεις των άλλων στρωμάτων επιτελούν πιο πολύπλοκες λειτουργίες. Η έξοδος κάθε κόμβου μεταδίδεται σε όλα τα τόξα εξόδου του κόμβου. Οι πιο συνηθισμένες συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι:

- Η συνάρτηση βήματος (step) ή κατωφλίου (threshold) που δίνεται από τον τύπο

$$\varphi(S) = \begin{cases} 1 & \text{αν } S > S_{th} \\ 0 \text{ (ή } -1) & \text{αν } S < S_{th} \end{cases} \quad (8.26)$$

όπου S_{th} το κατώφλι.

- Η λογιστική σιγμοειδής συνάρτηση με καμπύλη και με τιμές εξόδου μεταξύ -1 και 1 (ή 0 και 1) και δίνεται από τον τύπο:

$$\varphi(S) = \frac{1}{1 + e^{-cS}} \quad (8.27)$$

όπου c είναι μια σταθερά που λαμβάνει θετικές τιμές και αλλάζει την κλίση της συνάρτησης.

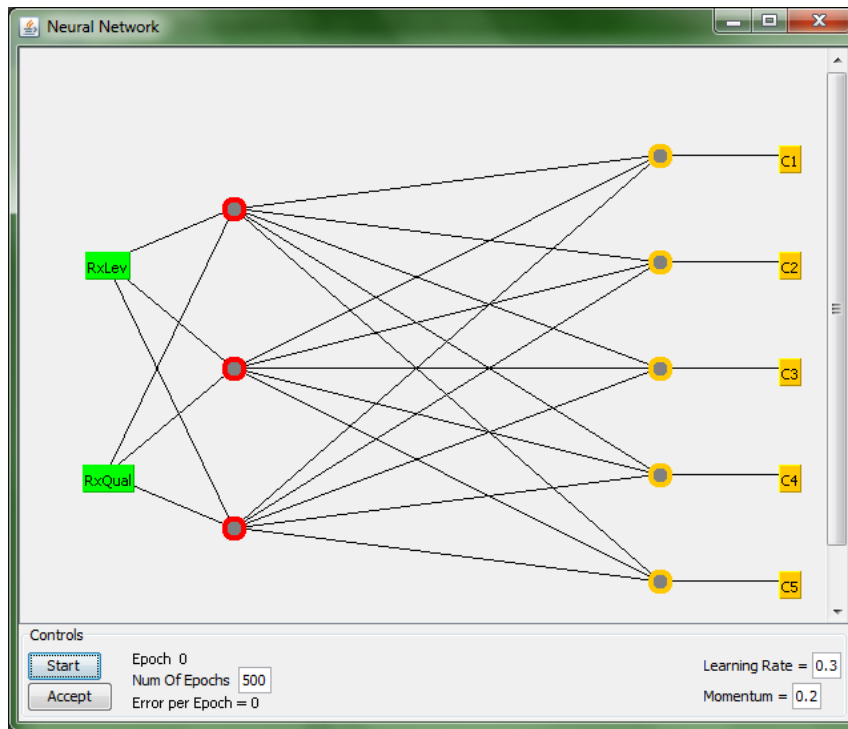
- Η υπερβολική εφαπτομενική συνάρτηση

$$\varphi(S) = \tanh(S) \quad (8.28)$$

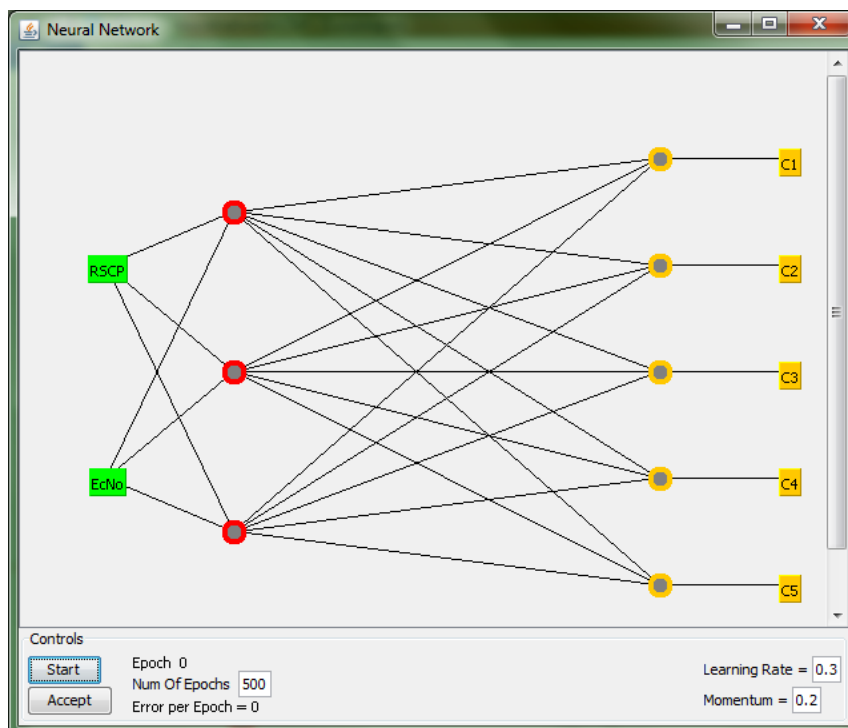
Επίσης, υπάρχει και το γραμμικό μοντέλο νευρώνα:

$$y = \sum_{i=1}^M w_i x_i \quad (8.29)$$

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τύπο της συνεκτικότητας και μάθησης. Ο βασικός τύπος της συνεκτικότητας είναι προς τα εμπρός τροφοδοτούμενο (feed-forward) όπου οι συνδέσεις γίνονται μόνο με στρώματα



(α') GSM τηλεφωνία



(β') UMTS τηλεφωνία

Σχήμα 8.4: Η δομή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων τύπου Multi-Layer Perceptron για την πρόβλεψη ποιότητας φωνής βασισμένη στην μέθοδο της κατηγοριοποίησης για (α) GSM και (β) UMTS κινητή τηλεφωνία.

που βρίσκονται προς τα εμπρός της δομής του δικτύου. Εναλλακτικά, ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να είναι τύπου ανάδρασης (feedback) όπου μερικοί σύνδεσμοι είναι προς τα πίσω, δηλαδή προς προηγούμενα στρώματα.

Η μάθηση μπορεί να είναι εποπτευόμενη ή μη εποπτευόμενη.

- Εποπτευόμενη μάθηση (supervised learning) έχουμε όταν είναι γνωστό εκ των προτέρων ποια θα πρέπει να είναι η επιθυμητή τιμή της εξόδου [182].
- Μη εποπτευόμενη μάθηση έχουμε όταν η έξοδος δεν είναι γνωστή [183].

8.2.4 Δένδρα Αποφάσης

Τα δένδρα απόφασης (decision trees) χρησιμοποιούνται ευρέως στην στατιστική, την εξόρυξη δεδομένων και την μηχανική μάθηση. Ένα δένδρο απόφασης λειτουργεί ως ένα μοντέλο πρόβλεψης που αντιστοιχεί τις παρατηρήσεις για ένα μέγεθος σε συμπεράσματα για την τιμή στόχο (target value) του μεγέθους. Εναλλακτικές καλούνται δένδρα ταξινόμησης (classification trees) ή δένδρα παλλινδρόμησης (regression trees). Στη δομή δένδρου, τα φύλλα (leaves) αναπαριστούν ετικέτες κατηγορίας και οι κλάδοι (branches) αναπαριστούν συζεύξεις των χαρακτηριστικών που οδηγούν στις ετικέτες κατηγορίας [184, 185].

Αν και στην ανάλυση αποφάσεων (decision analysis) ένα δένδρο απόφασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οπτικοποίηση και την αυστηρή αναπαράσταση αποφάσεων και τη λήψη αποφάσεων, στην εξόρυξη δεδομένων, το δένδρο απόφασης περιγράφει τα δεδομένα.

Η μάθηση ενός δένδρου αποφάσεων (decision tree learning) είναι μια μέθοδος που έχει ως στόχο την δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα προβλέπει την κατηγορία ποιότητας εμπειρίας (ESQoE) βάσει ενός συνόλου μεταβλητών εισόδου. Ένα δένδρο μπορεί να “εκπαιδευτεί” από την διάσπαση του αρχικού συνόλου δεδομένων μετρήσεων (source set) σε υποσύνολα με βάση μια τιμή δοκιμής ενός χαρακτηριστικού (attribute value test). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε κάθε υποσύνολο που προκύπτει με αναδρομικό τρόπο ο οποίος καλείται αναδρομική διαμέριση (recursive partitioning). Η αναδρομική διαδικασία ολοκληρώνεται μόλις το υποσύνολο σε έναν κόμβο έχει την ίδια τιμή με την τιμή στόχο, ή όταν η διαμέριση δεν προσθέτει πλέον τιμές στις προβλέψεις.

Έστω στη βάση δεδομένων μετρήσεων $\mathcal{D} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, όπου και έστω ότι το σχήμα της βάσης περιέχει τα χαρακτηριστικά (attributes) x_1, x_2, \dots, x_k . Επίσης, έστω ότι $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ το σύνολο κατηγοριών. Το δένδρο απόφασης είναι μια δομή δένδρου που συσχετίζεται με το \mathcal{D} και έχει τις ιδιότητες:

- Κάθε εσωτερικός κόμβος παίρνει το τιμή από ένα χαρακτηριστικό, x_i .

- Κάθε κλάδος είναι μια μαθηματική έκφραση ή έλεγχος που μπορεί να εφαρμοστεί στο χαρακτηριστικό που συνδέεται με τον πατέρα - κόμβο.
- Κάθε φύλλο έχει τιμή μια κατηγορία C_j .

Τα δένδρα αποφάσεων μπορούν να περιγραφούν ως ένας συνδυασμός μαθηματικών και υπολογιστικών τεχνικών που συμβάλλουν στην κατηγοριοποίηση ενός δοσμένου συνόλου δεδομένων. Τα δεδομένα μετρήσεων έχουν την εξής οργάνωση: $(\mathbf{x}, Y) = (x_1, x_2, \dots, x_k, Y)$. Θεωρούμε το \mathbf{x} περιέχει τις ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου, ήτοι τις παραμέτρους SQoS του δικτύου, και ότι το Y είναι εξαρτημένη μεταβλητή στόχος, ήτοι την ποιότητα εμπειρίας ESQoS των προσφερόμενων υπηρεσιών - ποιότητα φωνής, βίντεο και πολυμέσων.

Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι για την δημιουργία ενός δένδρου αποφάσεων προτάθηκαν από τον Ross Quinlan και είναι:

- Ο αλγόριθμος ID3 (Iterative Dichotomiser 3) [186].
- Ο αλγόριθμος C4.5¹ [187].
- Ο αλγόριθμος C5.0 ή See5 [188].

Στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζεται η δομή του δένδρου απόφασης με εφαρμογή του αλγόριθμου J.48 (υλοποίηση του C4.5 σε Weka) για την πρόβλεψη ποιότητας φωνής στις περιπτώσεις (α') GSM και (β') UMTS τηλεφωνίας βασισμένη στην μέθοδο της κατηγοριοποίησης.

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιούνται επιπλέον δύο μέτρα, η εντροπία της πληροφορίας (information entropy) και το κέρδος (gain) [189, 190]:

- Η εντροπία χρησιμοποιείται για να καθορίσουμε ποιος κόμβος θα πρέπει να “σπάσει” (split) περαιτέρω με τον αλγόριθμο. Η εντροπία της πληροφορίας υπολογίζεται από την σχέση:

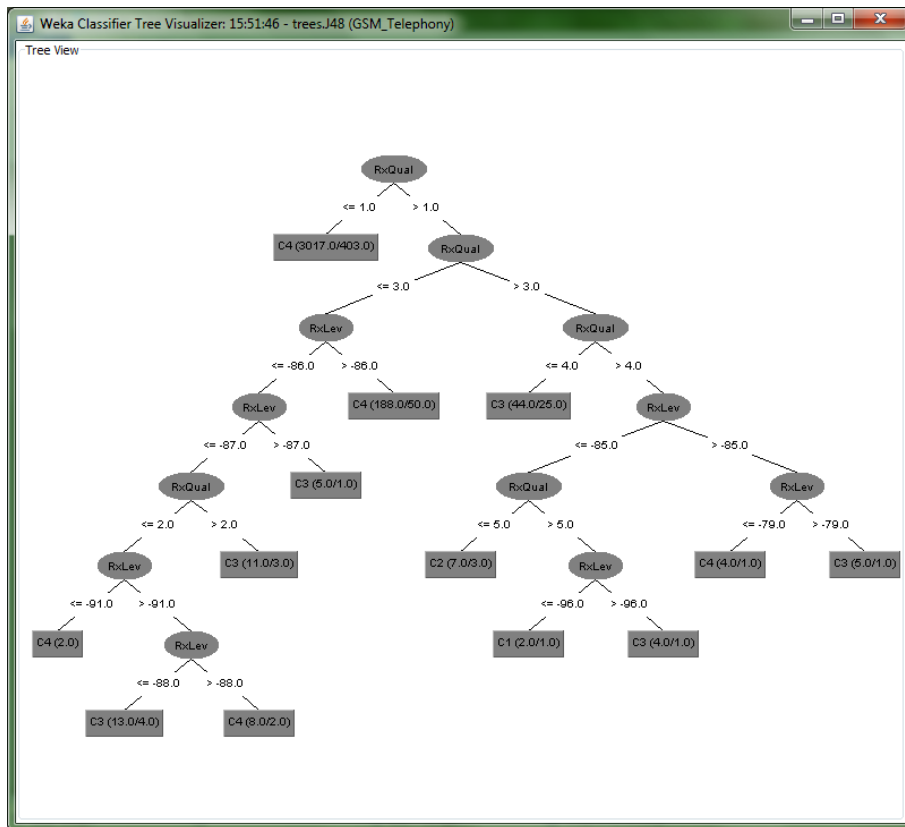
$$E(S) = - \sum_{k=1}^n f_S(x_{ik}) \log_2 f_S(x_{ik}) \quad (8.30)$$

όπου:

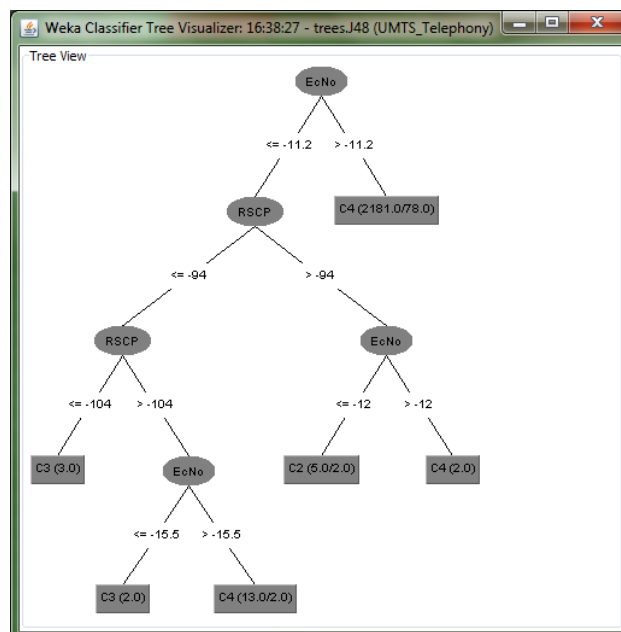
$E(S)$: η εντροπία της πληροφορίας ενός συνόλου S και για ένα επιλεγμένο χαρακτηριστικό,

¹Ο αλγόριθμος C4.5 έχει υλοποιηθεί στο περιβάλλον WEKA σε γλώσσα προγραμματισμού Java και καλείται J48.

Κεφάλαιο 8. Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων



(α) GSM τηλεφωνία



(β) UMTS τηλεφωνία

Σχήμα 8.5: Η δομή του δένδρου απόφασης με εφαρμογή του αλγόριθμου J.48 (υλοποίηση του C4.5 σε Weka) για την πρόβλεψη ποιότητας φωνής στις περιπτώσεις (α) GSM και (β) UMTS τηλεφωνίας βασισμένη στην μέθοδο της κατηγοριοποίησης.

Κεφάλαιο 8. Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων

- n : το πλήθος των διαφορετικών τιμών x_{ik} του χαρακτηριστικού x_i στο σύνολο S ,
- $f_S(x_{ik})$: η συχνότητα εμφάνισης της τιμής x_{ik} στο σύνολο S ,
- \log_2 : η λογαριθμική συνάρτηση με βάση 2.

Σημειώνεται ότι για $E(S) = 0$, έχουμε ένα τέλεια (χωρίς λάθη) κατηγοριοποιημένο σύνολο S . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εντροπίας, τόσο περισσότερο δύναται να βελτιωθεί η δομή του δένδρου απόφασης.

- Το κέρδος υπολογίζεται με σκοπό την εκτίμηση του οφέλους από την διάσπαση κόμβου επί ενός χαρακτηριστικού και υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$G(S, x_i) = E(S) - \sum_{k=1}^n f_S(x_{ik}) E(S_{x_i}) \quad (8.31)$$

όπου:

- $G(S, x_i)$: είναι το κέρδος για το σύνολο S κατόπιν της διάσπασης επί του χαρακτηριστικού x_i ,
- $E(S)$: η εντροπία πληροφορίας του συνόλου S ,
- n : ο αριθμός των διαφορετικών τιμών του χαρακτηριστικού x_i στο S ,
- x_{ik} : η k -οστή πιθανή τιμή χαρακτηριστικού x_i ,
- $S_{x_{ik}}$: το υποσύνολο του S που περιέχει όλες τις εγγραφές με την τιμή του x_i να είναι x_{ik} .

Όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος, τόσο περισσότερο έχει βελτιωθεί η εντροπία από την διάσπαση του κόμβου επί ενός χαρακτηριστικού.

Η πολυπλοκότητα σε χρόνο και χώρο των αλγορίθμων δένδρων απόφασης εξαρτάται από το μέγεθος των δεδομένων εκπαίδευσης q_{tr} , τον αριθμό των χαρακτηριστικών n_{ch} , και το σχήμα του δένδρου. Καθώς το δένδρο κατασκευάζεται για κάθε ένα από αυτούς τους κόμβους, κάθε χαρακτηριστικό θα εξεταστεί για να καθοριστεί αν είναι το καλύτερο. Αυτό δίνει μια πολυπλοκότητα στο χρόνο για να κατασκευαστεί το δένδρο της τάξης $O(n_{ch} q_{tr} \log q_{tr})$. Ο χρόνος κατηγοριοποίησης μιας βάσης δεδομένων μεγέθους n_{db} βασίζεται στο ύψος του δένδρου. Υποθέτοντας ένα ύψος της τάξης $O(\log q_{tr})$, αυτός ο χρόνος γίνεται $O(n_{db} \log q_{tr})$.

8.3 Στρατηγική Εξόρυξης Πληροφορίας ESQoS-SQoS

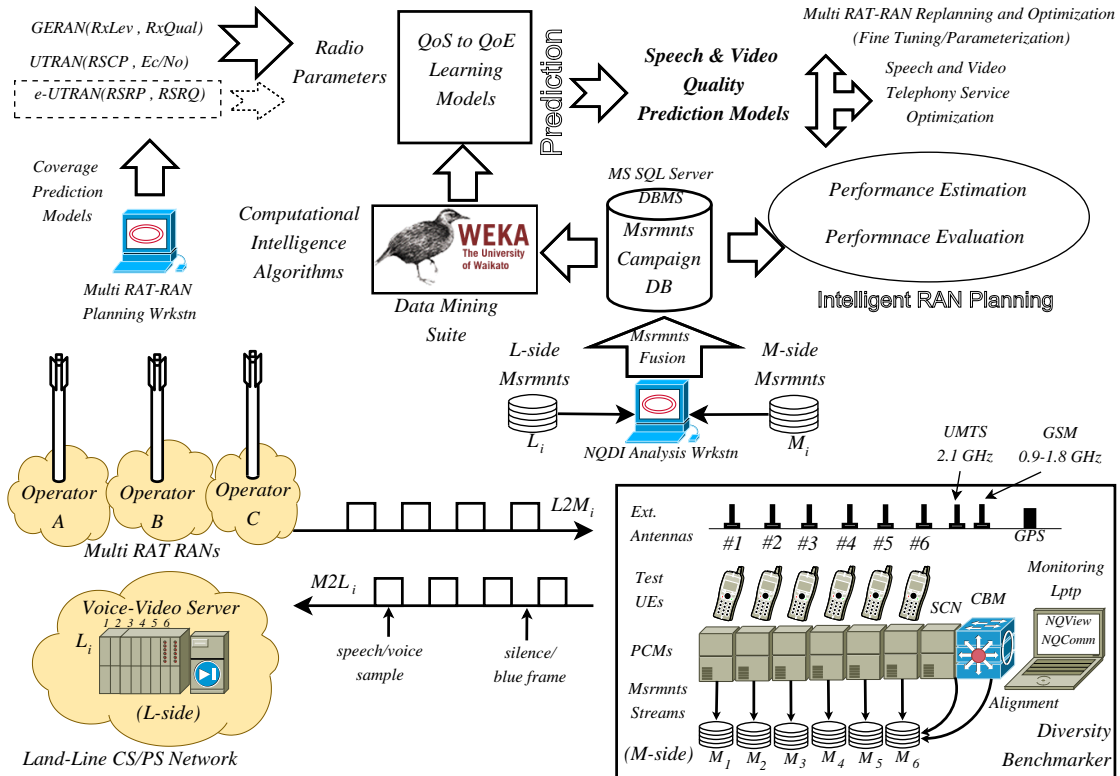
Στην παρούσα ενότητα, προτείνουμε μια στρατηγική πρόβλεψης ποιότητας βασισμένη καταρχήν στον πειραματικό εξοπλισμό, ειδικά στα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων μετρήσεων, και στο τμήμα εφαρμογής των αλγορίθμων εξόρυξης πληροφορίας από τα δεδομένα των μετρήσεων χρήση του ευρέως διαδεδομένου λογισμικού ανοικτού κώδικα. Στην συνέχεια, θα παρουσιάσουμε αναλυτικά την αρχιτεκτονική του συστήματος και την μεθοδολογία ανάλυσης καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

8.3.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Η συμβολή της καινοτόμας έρευνάς μας είναι η αξιολογημένη πρόταση εφαρμογής μιας ευφυούς βαθμίδας data mining για την εξαγωγή εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας αξιοποιώντας τα δεδομένα που συλλέγονται από μια καμπάνια μετρήσεων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.6.

Το σύστημα μετρήσεων εν λειτουργία διαθέτει ένα σύνολο από πηγές μετρήσεων (measurements sources) οι οποίες δημιουργούν ροές δεδομένων (measurements data streams/flows) σε ισάριθμες βάσεις δεδομένων ανά υπολογιστική συσκευή (PCM) κατά την διάρκεια μιας καμπάνιας και εφόσον είναι ενεργή μια δοκιμή μέτρησης. Συγκεκριμένα, οι πηγές μετρήσεων είναι τα τηλέφωνα δοκιμών, ο γρήγορος καταγραφέας φάσματος GSM/UMTS και ο αυτόματος τηλεφωνητής ή εξυπηρετητής πολυμέσων (voice/multimedia server). Τονίζεται ότι όλες οι συσκευές είναι συγχρονισμένες. Κάθε πηγή μέτρησης δημιουργεί μια ροή δεδομένων που καταγράφεται τοπικά σε μια βάση δεδομένων. Μετά το πέρας της καμπάνιας μετρήσεων, εκτελείται η σύντηξη των δεδομένων (data fusion) [191] σε μια ενιαία βάση δεδομένων με έμφαση της σύζευξη των δεδομένων που προέρχονται από την πλευρά του κινητού συστήματος μέτρησης (mobile side, M-side) και την πλευρά του εξυπηρετητή (fixed/land side, L-side).

Αφού δημιουργηθεί η κεντρική βάση δεδομένων και εκτελεστούν οι διαδικασίες προεπεξεργασίας (preprocessing), τότε εφαρμόζεται η διαδικασία της εξόρυξης πληροφορίας από τα δεδομένα μετρήσεων. Επιλέχθηκε, το WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) [192] ένα ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένους την πλειοψηφία των αλγορίθμων της μηχανικής μάθησης [193] με αντικειμενικό σκοπό της εξαγωγή εμπειρικών ESQoS-SQoS μοντέλων μάθησης και πρόβλεψης. Ενδεικτικά, επιλέχθηκε η μέθοδος της κατηγοριοποίησης με τις τεχνικές των k -πλησιέστερων γειτόνων, των νευρωνικών δικτύων και των δένδρων απόφασης. Τα μοντέλα αξιολογήθηκαν ως προς την επίδοσή τους σύμφωνα με τα μέτρα που προαναφέρ-



Σχήμα 8.6: Η αρχιτεκτονική της στρατηγικής εξόρυξης πληροφορίας για την πρόβλεψη ποιότητας από βάσεις δεδομένων από καμπάνιες μετρήσεων.

θηκαν.

8.3.2 Αξιολόγηση των Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Αντικείμενο μελέτης και εξόρυξης πληροφορίας αποτέλεσαν τα δεδομένα μετρήσεων (α') ποιότητας τηλεφωνίας, $ESQoS_{voice}^{GSM}$, σε GSM δίκτυα χρήσει των κωδικοποιητών φωνής EFR, AMR FR και AMR HR, (β') ποιότητας τηλεφωνίας, $ESQoS_{voice}^{UMTS}$, σε UMTS δίκτυα χρήσει κωδικοποιητή φωνής AMR WB, και (γ') ποιότητας πολυμέσων, $ESQoS_{mm}^{UMTS}$, βιντεοτηλεφωνίας σε UMTS δίκτυα.

Σε φάση προεπεξεργασίας, δημιουργήθηκαν τα σχετικά αρχεία ειδικής μορφής (Attribute Relation File Format, ARFF). Επιλέχθηκαν οι αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης:

1. k -πλησιέστεροι γείτονες (k -NN)
2. Δένδρα απόφασης (αλγόριθμος J48 (C4.5)),
3. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα τύπου Multi-layer Perceptron,

Οι εκτιμήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο *10-fold cross validation*. Εναλλακτικές μέθοδοι είναι η χρήση συνόλου εκπαίδευσης (*training set*) επιλογής που οδηγεί σε "αισιόδοξα (*optimistic*)" αποτελέσματα. Επίσης παρέχεται στο

Weka η μέθοδος *Percentage Split* κατά την οποία επιλέγεται το ποσοστό του αρχικού συνόλου δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί για εκπαίδευση και το ποσοστό για δοκιμή, καθώς και η μέθοδος *Supplied test set* εφόσον είναι διαθέσιμο ένα ξεχωριστό σύνολο για έλεγχο. Όσον αφορά την μέθοδο αναζήτησης, είναι δυνατόν να μην εφαρμοστεί καμία ή να εφαρμοστεί η εμπρόσθια (*forward*) ή όπισθεν (*backward*) αναζήτηση. Λόγω του γεγονότος ότι υφίσταται ανισοκατανομή των πλειάδων ανάμεσα στις κλάσεις, για να αποφευχθεί λανθασμένη εκπαίδευση του μοντέλου, υπάρχει η δυνατότητα επαναλαμβανόμενης δειγματοληψίας των δεδομένων εκπαίδευσης με καθορισμό της παραμέτρου *biastoUniformclass* του φίλτρου *resample*.

Στην περίπτωση του αλγορίθμου βασισμένου στην απόσταση k -NN, είναι δυνατή η διερεύνηση των αποτελεσμάτων για πλήθος γειτόνων από 1 έως 10. Στη περίπτωση των κατασκευής των νευρωνικών δικτύων δύναται να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων όπως πλήθος κρυφών νευρώνων (*hidden layers*), ρυθμού εκπαίδευσης (*learning rate*) και αριθμού επαναλήψεων (*training times*).

Στο Σχήμα 8.7 παρουσιάζεται η συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας φωνής, $ESQoS_{voice}^{GSM}$, σε GSM δίκτυα επικοινωνιών χρήσει κωδικοποιητών φωνής EFR, AMR FR και AMR HR. Όμοια στο Σχήμα 8.8 απεικονίζεται η απόδοση των αλγορίθμων για την εκτίμηση της ποιότητας φωνής, $ESQoS_{voice}^{UMTS}$, σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών χρήσει κωδικοποιητή φωνής AMR WB.

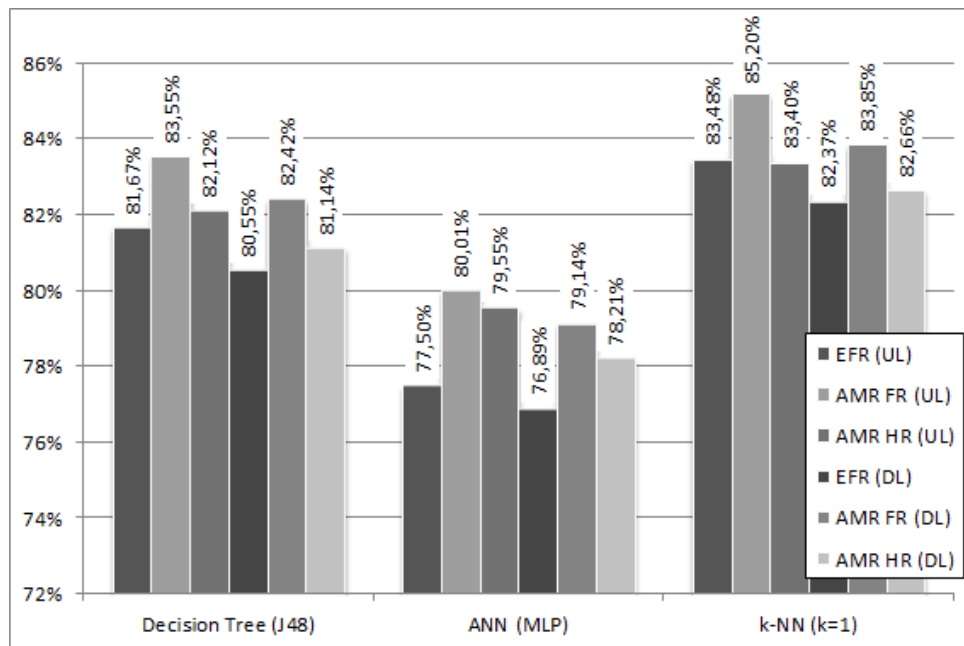
Στην περίπτωση της βιντεοτηλεφωνίας UMTS, στο Σχήμα 8.9 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των αλγορίθμων για την εκτίμηση της ποιότητας βίντεο, $ESQoS_{video}^{UMTS}$. Τέλος, στο Σχήμα 8.10 αποτιμάται εκτίμηση της ποιότητας πολυμέσων, $ESQoS_{mm}^{UMTS}$. Εδώ επισημαίνεται ότι στην περίπτωση εκτίμησης της ποιότητας βίντεο η απόδοση των αλγορίθμων είναι σχετικά χαμηλή σε σχέση με την εκτίμηση της ποιότητας φωνής. Σε αντίθετη περίπτωση, η εκτίμηση της ποιότητας πολυμέσων είναι σχετικά καλή διότι υπεισέρχεται στον υπολογισμό και η ποιότητα φωνής.

8.4 Σύνοψη Κεφαλαίου

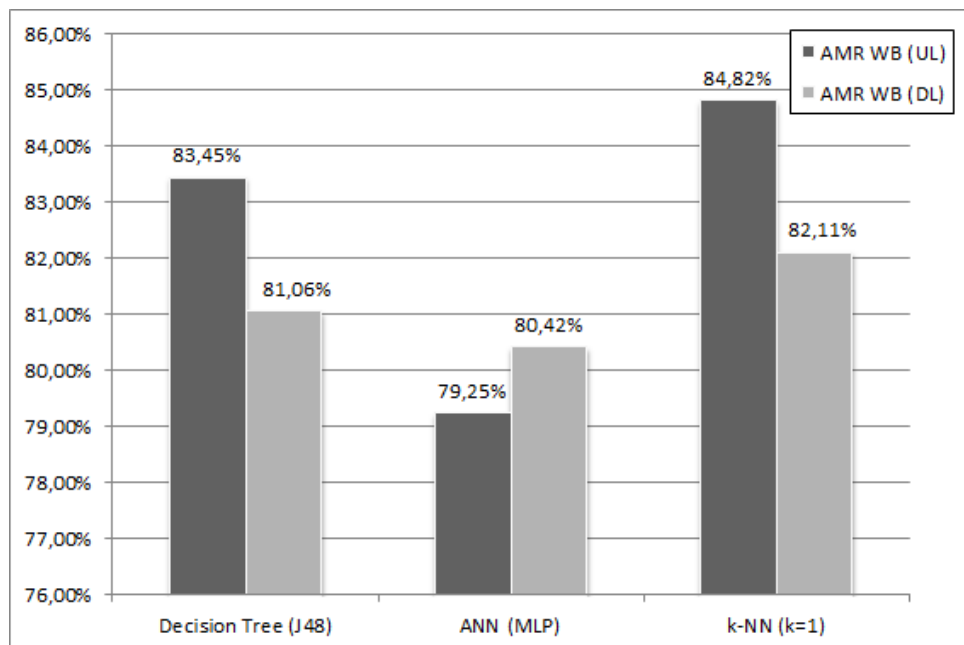
Συνοψίζοντας, στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια παρουσίαση της εφαρμογής τεχνικών της Εξόρυξης Δεδομένων ή Εξόρυξης Γνώσης Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων, ειδικότερα δε παρουσιάστηκαν οι τεχνικές κατηγοριοποίησης όπως τα δένδρα αποφάσεων, οι k -πλησιέστεροι γείτονες, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ενώ έγινε αναφορά και σε άλλες προηγμένες μεθόδους. Πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της επίδοσης των μεθόδων με πειραματικές μετρήσεις και συγκεντρώνονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Στα πλαίσια της έρευνας που εκπονήθηκε ανακοινώθηκε η εργασία [194] σε συνέ-

Κεφάλαιο 8. Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων

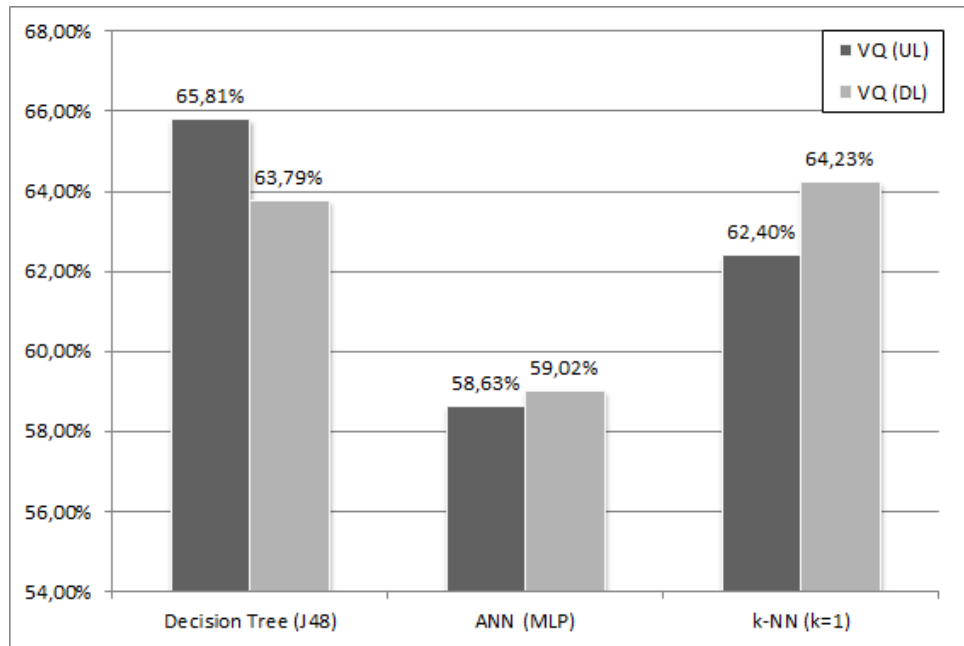


Σχήμα 8.7: Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας φωνής, $ESQoS_{voice}^{GSM}$, σε GSM δίκτυα επικοινωνιών χρήσει κωδικοποιητών φωνής EFR, AMR FR και AMR HR.

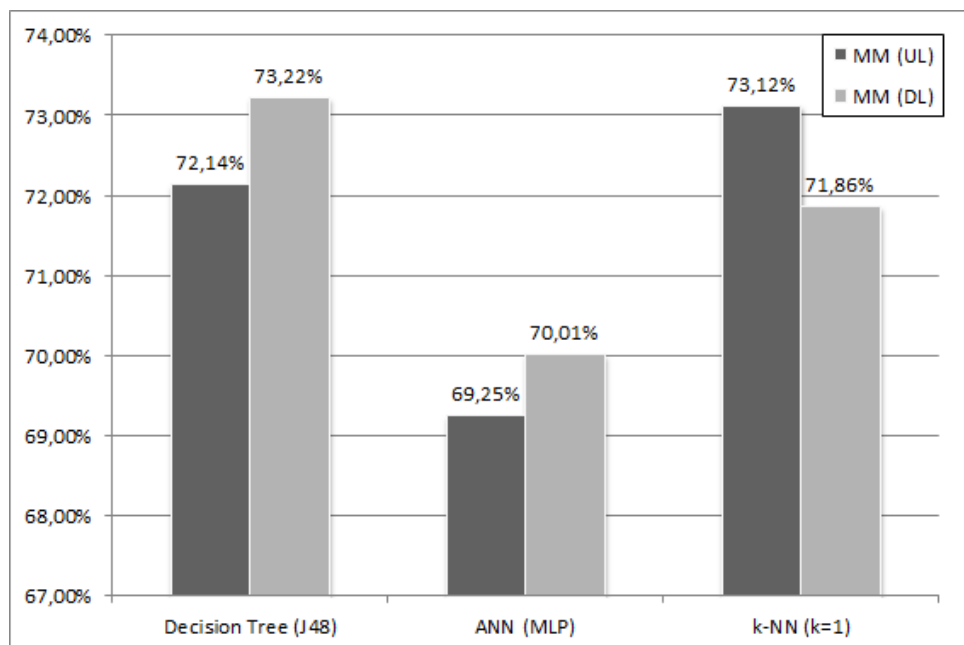


Σχήμα 8.8: Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας φωνής, $ESQoS_{voice}^{UMTS}$, σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών χρήσει κωδικοποιητή φωνής AMR WB.

Κεφάλαιο 8. Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων



Σχήμα 8.9: Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας βίντεο, $ESQoS_{video}^{UMTS}$, της υπηρεσίας βιντεοτηλεφωνίας σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών.



Σχήμα 8.10: Απόδοση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης για την εκτίμηση της ποιότητας πολυμέσων, $ESQoS_{mm}^{UMTS}$, της υπηρεσίας βιντεοτηλεφωνίας σε UMTS δίκτυα επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 8. Μοντέλα Εξόρυξης Πληροφορίας Ποιότητας από Δεδομένα Μετρήσεων

δριο, ενώ η εργασία [195] είναι σε στάδιο υποβολής και κρίσης. Είναι άξιο έρευνας η εις βάθος διερεύνηση των παραμέτρων (ρυθμός μάθησης, μέθοδο αναζήτησης, πλήθος γειτόνων, πλήθος κρυφών νευρώνων, πλήθος επαναλήψεων μάθησης κ.α.) που επηρεάζουν την επίδοση των αλγορίθμων που μελετήθηκαν. Επί του παρόντος η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στην διαδικασία μάθησης την αξιολόγηση των βέλτιστων μοντέλων μάθησης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, είναι προς καθορισμό ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου ώστε να παρουσιάζει ισοκατανομή η ποιότητα φωνής/βίντεο. Διευρευνάται επίσης η αύξηση των κατηγοριών, ή η δημιουργία υποκατηγοριών C_i^j , ώστε να εκτιμηθεί η επίδοση σε καλύτερη κλίμακα, λ.χ. μελετάται η δημιουργία 5 υποκατηγοριών ανά κατηγορία, δηλαδή συνολικά 10 υποκατηγορίες.

□

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα, οι καινοτομίες και η συμβολή της έρευνας στο αντικείμενο του χαρακτηρισμού και πρόβλεψης ποιότητας σε συγχρονων δίκτυα επικοινωνιών ευρείας ζώνης.

9.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων - Καινοτομίες της Διδακτορικής Διατριβής

Στα πλαίσια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής, έγινε θεωρητική και πειραματική μελέτη επί των μεθόδων και τεχνικών μετρήσεων χαρακτηρισμού και μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας υπηρεσίας και εμπειρίας χρήστη σε εν λειτουργία σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Οι καινοτομίες και τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στα εξής σημεία:

- Έγινε εκτενής μελέτη των υφιστάμενων συστημάτων κινητών επικοινωνιών GSM, UMTS, HSPA (HSDPA/HSUPA), καθώς και των προηγμένων συστημάτων LTE/LTE Adv.
- Μελετήθηκαν θέματα τηλεπικοινωνιακής κίνησης με στόχο την αναλυτική μοντελοποίηση ενός κινητού πολυμεσικού δικτύου.
- Μελετήθηκαν οι όροι εμπειρίας χρήστη, ποιότητας εμπειρίας και ειδικότερα οι κρίσιμοι δείκτες και οι υφιστάμενοι αλγόριθμοι χαρακτηρισμού ποιότητας των υπηρεσιών:
 - Ποιότητα Κινητής Τηλεφωνίας,
 - Ποιότητα Εικονοτηλεφωνίας και Πολυμεσικού Βίντεο,

- Ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών δικτύου (όπως πλοήγηση στο διαδίκτυο, μεταφορά αρχείων, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο).
- Παρουσιάζεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των συστημάτων. Σημαντικό στην εκτέλεση των μετρήσεων είναι η λεπτομερής παραμετροποίηση της διάταξης, η βαθμονόμηση των επιμέρους τμημάτων (κεραιών και τερματικών συσκευών μετρήσεων) και ο καθορισμός των δοκιμών/σεναρίων μετρήσεων.
- Εφαρμόστηκαν στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης και εξάχθηκαν νέα μοντέλα για τους δείκτες επίδοσης.
- Χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης βασισμένες στην εξόρυξη πληροφορίας, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα δένδρα αποφάσεων και την ασαφή λογική και προέκυψαν νέα θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού των παραμέτρων αυτών.
- Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία η τεχνική της εύρωστης βελτιστοποίησης σε δεδομένα ποιότητας υπηρεσίας.

9.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

- Διερεύνηση και πρόταση νέων δεικτών επίδοσης και χαρακτηρισμού της ποιότητας εμπειρίας αντιλαμβανόμενης από τον χρήστη για νέες υπηρεσίες όπως τρισδιάστατο πολυμεσικό υλικό, (3D Web Browsing, 3D TV, 3D Video Streaming, Social Networks, Peer-to-peer Services) καθώς και σε δημοφιλείς εφαρμογές των τερματικών συσκευών (Android Applications).
- Εκτέλεση εκτεταμένων πειραματικών μετρήσεων των δικτύων κινητών επικοινωνιών δεδομένου ότι νέες τεχνολογίες πρόσβασης υιοθετούνται από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Άμεσα, κρίνεται σκόπιμη η αξιολόγηση δημόσιων δικτύων LTE. Προτάσεις νέων μεθοδολογιών βελτιστοποίησης και συγκριτικής αξιολόγησης (benchmarking) των συστημάτων επικοινωνιών βασισμένες στην διεξαγωγή επί τω πεδίο μετρήσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκύπτει για την αξιολόγηση νέων συστημάτων ασύρματης πρόσβασης που υλοποιούν αυτόματη οργάνωση και βελτιστοποίηση (Self Organizing and Optimizing Networks, SON)
- Ανάπτυξη νέων προηγμένων στατιστικών και υπολογιστικών μοντέλων πρόβλεψης ποιότητας για όλες τις υπηρεσίες. Προτείνεται η μελέτη των μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines, SVMs) και των αυτο-οργανώμενων

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα

χαρτών (Self-Organizing Maps, SOMs) ως αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Επιπλέον, ένα νέο ερευνητικό πεδίο είναι η εξόρυξη πληροφορίας από πολυμέσα (Multimedia/Ubiquitous Data Mining).

- Ανάπτυξη ειδικών μεθοδολογιών (αυτο)βαθμονόμησης των διατάξεων του πειραματικού εξοπλισμού.
- Μελέτη και ανάπτυξη συστήματος εξοικονόμησης και διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος για εγκατάσταση του εξοπλισμού μετρήσεων σε όχημα υβριδικής τεχνολογίας (Green Drive Testing) με σκοπό τη μείωση εκπομπής αερίων ρύπων.
- Μελέτη της ποιότητας εμπειρίας του χρήστη σε δεδομένες εφαρμογές τηλεματικής και τηλε-ελέγχου όπως τηλε-ιατρική, τηλε-εκπαίδευση, ευφυών συστημάτων μεταφοράς (Intelligent Transportation Systems), ευφυών ηλεκτρικών δικτύων (Smart Grid) κ.α..
- Ανάπτυξη εξοπλισμού βασισμένο σε ενσωματωμένο υλικό και λογισμικό (embedded system) καθώς και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής (distributed system) για την μέτρηση και παρακολούθηση επίδοσης κινητών δικτύων πολλαπλών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης.
- Ανάπτυξη δικτυοκεντρικού πληροφοριακού και γεωγραφικού συστήματος πρόσβασης και ενημέρωσης του κοινού και των παρόχων σε πληροφορία ποιότητας υπηρεσιών παρεχόμενων από δίκτυα κινητών επικοινωνιών.
- Ανάπτυξη προσαρμοστικών μεθοδολογιών χρέωσης (QoE adaptive charging systems) κινητών υπηρεσιών βασισμένων στην ποιότητα εμπειρίας χρήστη.
- Ανάπτυξη πρωτοτύπου για την μέτρηση ποιότητας εμπειρίας του χρήστη σε κινητες δορυφορικές και στρατοσφαιρικές επικοινωνίες (DVB-SH, HAP Communications κ.α.).

Κλείνοντας, παραθέτονται δυο παραρτήματα:

- Η *Βιβλιογραφία* που μελετήθηκε κατά την διάρκεια της έως τώρα έρευνας.
- Η λίστα με τις *Ερευνητικές Εργασίες* που έχουν υποβληθεί σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με κρίση. Επίσης τρέχοντα αποτελέσματα της έρευνας βρίσκονται στο στάδιο της προετοιμασίας και υποβολής σε διεθνή έγκριτα περιοδικά.

□

Βιβλιογραφία

- [1] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου και Γ. Πάντος, *Συστήματα Κινητών Τηλεπικοινωνιών*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008.
- [2] Μ. Θεολόγου, *Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [3] T. Halonen, J. Romero, and J. Melero, *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS*, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [4] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA FOR UMTS – HSPA Evolution and LTE*, 4th ed. John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [5] H. Kaaranen, A. Ahtiainen, L. Laitinen, S. Naghian, and V. Niemi, *UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services*, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [6] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skfild, and P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd, 2008.
- [7] P. Tapia, J. Liu, Y. Karimli, and M. Feuerstein, *HSPA Performance and Evolution: A Practical Perspective*. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [8] 3GPP Technical Specification TS 36.300 Ver. 11.0.0 (2011-12), *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description, 3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, 2012.
- [9] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [10] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge University Press, 2009.

- [11] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [12] M. Rummey, *LTE and the Evolution to 4G Wireless*. Agilent Technologies Publications, 2009.
- [13] S. Ahmadi, “An Overview of Next-Generation Mobile WiMAX Technology,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 6, pp. 84–98, Jun 2009.
- [14] ETSI Technical Report TR 136 913 Ver. 10.0.0 (2011-04), *LTE; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)*, Europ Telecom Stand Inst, 2011.
- [15] M. Ergen, *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*. Springer Science and Business Media, LLC, 2009.
- [16] P. Constantinou, C. N. Pitas, et al, “Evaluating Packet Data Performance Of Commercial UMTS Network in an Urban Environment - Comparison with HSDPA,” in *Proc. IIR Telecoms*, Amsterdam, Netherlands, Sep. 2006.
- [17] ETSI Technical Report TR 102 643 Ver. 1.0.2 (2010-01), *Human Factors; Quality of Experience (QoE) Requirements for Real-time Communication Services*, European Telecom. Standards Institute, 2010.
- [18] ETSI Specialist Task Force STF 354, *Guidelines and Tutorials for Improving the User Experience of Real-time Communication Services*, European Telecom. Standards Institute.
- [19] ETSI Guide EG 202 057-1 Ver. 1.3.7 (2012-02 Draft), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 1: General*, European Telecom. Standards Institute, 2012.
- [20] ETSI Guide EG 202 057-2 Ver. 1.3.2 (2011-04), *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 2: Voice telephony, Group 3 fax, modem data services and SMS*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [21] ETSI Guide EG 202 057-3 Ver. 1.1.1 (2005-04), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 3: QoS parameters specific to Public Land Mobile Networks (PLMN)*, European Telecom. Standards Institute, 2005.

- [22] ETSI Guide EG 202 057-3 Ver. 1.2.1 (2008-07), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 4: Internet access*, European Telecom. Standards Institute, 2008.
- [23] 3GPP Technical Specification TS 23.107, *Quality of Service (QoS) concept and architecture*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2010.
- [24] R. Stankiewicz, P. Cholda, and A. Jajszczyk, “QoX: What is it really?” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 4, pp. 148–158, 2011.
- [25] D. Soldani, M. Li, and R. Cuny (eds), *QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems*. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [26] P. Jain, “Quality of Experience,” *IEEE Multimedia*, vol. 11, no. 1, pp. 96–95, 2004.
- [27] H. Batteram, G. Damm, A. Mukhopadhyay, L. Philippart, R. Odysseos, and C. Urrutia-Valdés, “Delivering Quality of Experience in Multimedia Networks,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 175–194, 2010.
- [28] K. Kilkki, “Quality of Experience in Communications Ecosystem,” *Journal of Universal Computer Science*, vol. 14, no. 5, pp. 615–624, 2008.
- [29] K. De Moor, I. Ketyko, W. Joseph, T. Deryckere, L. De Marez, L. Martens, and G. Verleye, “Proposed Framework for Evaluating Quality of Experience in a Mobile, Testbed-oriented Living Lab Setting,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, pp. 378–391, 2010.
- [30] R. Stankiewicz and A. Jajszczyk, “A survey of QoE assurance in converged networks,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 7, pp. 1459–1473, 2011.
- [31] ITU-T Recommendation E.800 (2009-08), *Definitions of terms related to quality of service*, Int’l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2009.
- [32] ITU-T Recommendation P.800 (1996-08), *Methods for subjective determination of transmission quality*, Int’l Telecom. Union, Telecom. Sector, 1996.
- [33] ITU-T Recommendation P.800.1 (2006-07), *Mean Opinion Score (MOS) terminology*, Int’l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2006.
- [34] ITU-T Recommendation P.862 (2001-02), *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of*

- narrow-band telephone networks and speech codecs*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2001.
- [35] K. Vlachodimitropoulos and E. Katsaros, “Monitoring the End User Perceived Speech Quality Using the Derivative Mean Opinion Score (MOS) Key Performance Indicator,” in *Proc. 18th Annual IEEE Int'l Symp. on Pers, Indoor & Mobile Radio Comms, (PIMRC'07)*, 2007.
- [36] B. Rohani, B. Rohani, M. Caldera, and H.-J. Zepernick, “Monitoring of In-Service Perceptual Speech Quality in Modern Cellular Radio Systems,” in *Proc. 8th Int'l Conf. on Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks, (MESAQIN '08)*, 2008.
- [37] M. Goudarzi, L. Sun, and E. Ifeachor, “PESQ and 3SQM Measurement of Voice Quality over Live 3G Networks,” in *Proc. 8th Int'l Conf. on Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks, (MESAQIN '09)*, 2009.
- [38] A. Kajackas, V. Batkauskas, and A. Medeisis, “Individual QoS Rating for Voice Services in Cellular Networks,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, no. 6, pp. 88 – 93, 2004.
- [39] A. Kajackas and A. Vindašius, “Analysis and Monitoring of End-User Perceived QoS in Mobile Networks,” in *Proc. 14th Int'l Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS'10)*, 2010.
- [40] O. Nipp, M. Kuhn, and T. Wittneben, A. & Schweinhuber, “Speech quality evaluation and benchmarking in cellular mobile networks,” in *Proc. 16th IST Mobile & Wireless Communications Summit, (IST MWCS '09)*, 2007.
- [41] ITU-T Recommendation P.862.1 (2003-11), *Mapping function for transforming P.862 raw result scores to MOS-LQO*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2003.
- [42] ITU-T Recommendation P.862.2 (2005-11), *Wideband extension to Recommendation P.862 for the assessment of wideband telephone networks and speech codecs*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2005.
- [43] ITU-T Recommendation P.863 (2011-01), *Perceptual Objective Listening Quality Assessment (POLQA) An Adv. objective perceptual method for end-to-end listening speech quality evaluation of fixed, mobile, and IP-based networks and speech codecs covering narrowband, wideband, and super-wideband signals.*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2011.

- [44] ETSI Technical Specification TS 126 071 Ver. 10.0.0 (2011-04), *AMR speech Codec; General description*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [45] ETSI Standard EN 300 726 Ver. 5.2.1 (2006-02), *Enhanced Full Rate (EFR) speech transcoding*, European Telecom. Standards Institute, 2006.
- [46] ETSI Technical Specification TS 126 190 Ver. 10.0.0 (2011-04), *Adaptive Multi-Rate – Wideband (AMR-WB) speech codec; Transcoding functions*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [47] ETSI Technical Specification TS 126 290 Ver. 10.0.0 (2011-04), European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [48] ETSI Technical Report TR 102 506 Ver. 1.4.1 (2011-08), *Estimating Speech Quality per Call*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [49] ITU-T Recommendation Y.1540 (2011-03), *IP packet transfer and availability performance parameters*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2011.
- [50] ITU-T Recommendation Y.1541 (2011-12), *Network Performance Objectives for IP-Based Services*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2011.
- [51] ITU-T Recommendation G.1000 (2001-11), *Communications Quality of Service: A Framework and Definitions*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2001.
- [52] ITU-T Recommendation G.1010 (2001-11), *End-User Multimedia QoS Categories*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2001.
- [53] ITU-T Recommendation G.1020 (2006-07), *Performance Parameter Definitions for Quality of Speech and other Voiceband Applications Utilising IP Networks*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2006.
- [54] ITU-T Recommendation G.1030 (2005-11), *Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2005.
- [55] ETSI Technical Report TR 102 493 Ver. 1.2.1 (2009-06), *Guidelines for the Use of Video Quality Algorithms for Mobile Applications*, European Telecom. Standards Institute, 2010.
- [56] VQEG Report, *Validation of objective models of multimedia quality assessment*, Video Quality Experts Group, 2010.

- [57] ITU-T Recommendation J.246, *Perceptual visual quality measurement techniques for multimedia services over digital cable television networks in the presence of a reduced bandwidth reference*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2008.
- [58] ITU-T Recommendation J.247, *Objective perceptual multimedia video quality measurement in presence of a full reference*, Int'l Telecom. Union, Telecom. Sector, 2008.
- [59] ETSI Technical Specification TS 126 114, *Multimedia telephony; Media handling and interaction*, European Telecom. Standards Institute, 2010.
- [60] ITU-T Rec. H.324, *Terminal for Low Bit Rate Multimedia Communication.*, Int Telecommun Union, Telecommun Stand Sect, Apr 2009.
- [61] L. Hanzo, P. Cherriman, and J. Streit, *Video Compression and Communications From Basics to H.261, H.263, H.264, MPEG4 for DVB and HSDPA-Style Adaptive Turbo-Transceivers*. John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [62] L. Hanzo, F. Somerville, and J. Woodard, *Voice and Audio Compression for Wireless Communications*, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [63] ETSI Technical Specification TS 126 233, *End-to-end transparent streaming service; General description*, European Telecom. Standards Institute, 2010.
- [64] P. Chou and M. Schaar, *Multimedia Over IP and Wireless Networks- Compression, Networking, and Systems*. Elsevier, 2007.
- [65] OptiCom, *PEVQ: Adv. Perceptual Evaluation of Video Quality*. OptiCom GmbH, 2005.
- [66] S. Winkler, *Digital Video Quality Vision Models and Metrics*. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [67] Z. Wang and A. Bovik, *Modern Image Quality Assessment*. Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [68] A. Eden, "No-Reference Estimation of the Coding PSNR for H.264-coded Sequences," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 667–674, 2007.
- [69] O. Nemethova et al, "PSNR-based Estimation of Subjective Time-Variant Video Quality for Mobiles." in *Proc. Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks(MESAQIN'06)*, Jan. 2006.

- [70] Q. Huynh-Thu, and M. Ghanbari, “Scope of Validity of PSNR in Image/Video Quality Assessment,” *IET Electronics Letters*, vol. 44, no. 13, pp. 800 –801, 2008.
- [71] J.-R. Ohm, *Bildsignalverarbeitung für multimedia-systeme*, Skript, TU Berlin, 1999.
- [72] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, “Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity,” *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600 –612, 2004.
- [73] A. Loza, L. Mihaylova, N. Canagarajah, and D. Bull, “Structural Similarity-Based Object Tracking in Video Sequences,” in *Proc. 9th Int’l Conf. on Information Fusion*, Jul 2006, pp. 1 –6.
- [74] D. Hands, “A basic multimedia quality model.” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 6, no. 6, pp. 806 – 816, 2004.
- [75] ITU-T SG12 COM12-D14-E, *Example of multimedia quality integration function for videophones; Source: NTT-Japan.*, Int Telecommun Union, Telecommun Stand Sect, Jan. 2005.
- [76] ITU-T P.911., *Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications*, ITU-T Recommendation, Dec 1998.
- [77] ETSI Technical Report TR 126 944 Ver. 10.0.0 (2011-04), *End-to-end multimedia services performace metrics*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [78] K. S. Trivedi, S. Dharmaraja and X. Ma, “Analytic Modeling of Handoffs in Wireless Cellular Networks,” *Information Sciences*, vol. 148, pp. 155 –166, 19 2002.
- [79] H. Sun, Y. Cao and K.S. Trivedi, “Availability and Performance Evaluation for Automatic Protection Switching in TDMA Wireless System,” in *Proc. Pacific Rim Int’l Symp. on Dependable Computing (PRDC’99)*, Dec. 1999, pp. 15 –22.
- [80] D. Wisely, *IP for 4G*. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [81] H. Inamura, et al, *RFC 3481 (2003-02): TCP over Second (2.5G) and Third (3G) Generation Wireless Networks*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2003. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3481.txt>

- [82] A. Haider and R. Harris, “A Note on the Performance of TCP over HSDPA,” in *Proc. 6th Int’l Conf. on Information, Communications Signal Processing*, Dec. 2007, pp. 1 –5.
- [83] M. Assaad and D. Zeghlache, *TCP Performance over UMTS-HSDPA Systems*. Taylor & Francis Group, 2007.
- [84] C. N. Pitas, A. Tsopelas, V. Sofras and P. Constantinou, “Adaptive Radio Resources Management in a DVB-S2 based HAP Network for Broadband Internet Access and Multimedia Content Delivery,” in *Proc. 7th Int’l Airship Convention, COST297-HAPCOS Workshop*, Oct. 2008.
- [85] ———, “Quality of Service in High Altitude Platform Networks: Study of a DVB-S2 based Architecture,” in *Proc. 1st Pan-Hellenic Conf. on Electronics and Telecommunications*, 2009.
- [86] R. Kreher, *UMTS Performance Measurement: A Practical Guide to KPIs for the UTRAN Environment*. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [87] G. Panagiotou, “Bringing SWOT into Focus,” *Business Strategy Review*, vol. 14, no. 2, pp. 8 – 10, 2003.
- [88] X. N. Πήτας, “Τεχνο-Οικονομική Μελέτη Ραδιοδικτύου UMTS (UTRAN): Μεθοδολογίες Σχεδιασμού, Βελτιστοποίησης, Κοστολόγησης και Τιμολόγησης - Επιχειρηματικό Σχέδιο,” *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλ/γων Μηχ. · Μηχ. Η/Υ, ΕΜΠ*, 2006.
- [89] ETSI Technical Specification TS 102 250-1 Ver. 2.2.1 (2011-04), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 1: Identification of Quality of Service criteria*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [90] ETSI Technical Specification TS 102 250-2 Ver. 2.2.1 (2011-04), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [91] ETSI Technical Specification TS 102 250-3 Ver. 2.2.1 (2011-04), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 3: Typical procedures for Quality of Service measurement equipment*, European Telecom. Standards Institute, 2011.

- [92] ETSI Technical Specification TS 102 250-4 Ver. 2.2.1 (2011-04), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 4: Requirements for Quality of Service measurement equipment*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [93] ETSI Technical Specification TS 102 250-5 Ver. 2.3.1 (2011-11), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 5: Definition of typical measurement profiles*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [94] ETSI Technical Specification TS 102 250-6 Ver. 1.2.1 (2004-10), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 6: Post processing and statistical methods*, European Telecom. Standards Institute, 2004.
- [95] ETSI Technical Specification TS 102 250-7 Ver. 1.1.1 (2009-10), *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 7: Network based Quality of Service measurements*, European Telecom. Standards Institute, 2009.
- [96] Electronic Communications Committee (ECC) Report 118, “Monitoring Methodology to Assess the Performance of GSM Networks,” in *European Conference of Postal and Tele-communications Administrators (CEPT)*, May 2008.
- [97] Electronic Communications Committee (ECC) Report 103, “UMTS Coverage Measurements.” in *European Conference of Postal and Tele-communications Administrators (CEPT)*, May 2007.
- [98] ETSI Technical Specification TS 136 213 Ver. 10.4.0 (2012-01), *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*, European Telecom. Standards Institute, 2012.
- [99] ETSI Technical Report TR 102 678 Ver. 1.2.1 (2011-05), *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS Parameter Measurements based on fixed Data Transfer Times*, European Telecom. Standards Institute, 2011.
- [100] ETSI Technical Report TR 102 505 Ver. 1.2.1 (2011-12), *Speech and Multimedia Transmission Quality (STQ); Development of a Reference Web Page*, European Telecom Stand Inst, 2011.

- [101] SwissQual AG, *Diversity Benchmark*, Network Benchmarking, Optimization & Service Monitoring. [Online]. Available: <http://www.swissqual.com>
- [102] ETSI Technical Specification TS 100 910 Ver. 8.20.0 (2005-11), *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio Transmission and Reception*, European Telecom. Standards Institute, 2005.
- [103] PCTEL Technical Specifications 10MRK3-10 (2008-09), *RF & GPS Antennas for SeeGull[®] Scanning Receivers*, PCTEL, Inc., RF Solutions Group, 2008.
- [104] ETSI Technical Specification TS 125 101 Ver. 10.4.0 (2012-01), *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)*, European Telecom. Standards Institute, 2012.
- [105] ETSI Technical Specification ETS 300 607-1 Ver. 15.6.0 (2000-08), *Digital cellular telecommunications system (Phase 2); Mobile Station (MS) conformance specification; Part 1: Conformance specification*, European Telecom. Standards Institute, 2000.
- [106] ASCOM Report 80000840-QVAN Ver 1.1 (2006-12), *Antennas for QVoice*, Ascom (Schweiz) AG, 2006.
- [107] C. Chevallier, C. Brunner, A. Garavaglia, K. P. Murray and K. R. Baker (Eds.), *WCDMA (UMTS) Deployment Handbook: Planning and Optimization Aspects*. QualComm Inc. - Wiley, 2006.
- [108] R. Bonica, et al, *RFC 4884 (2007-04): Extended ICMP to Support Multi-Part Messages*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2007. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4884.txt>
- [109] J. Klensin, *RFC 5321 (2008-10): Simple Mail Transfer Protocol*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2008. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc5321.txt>
- [110] J. Myers and M. Rose, *RFC 1939 (1996-05): Post Office Protocol, Version 3*, Internet Engineering Task Force (IETF), 1996. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1939.txt>
- [111] M. Crispin, *RFC 3501 (2003-03): Internet Message Access Protocol, Version 4, Rev. 1*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2003. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3501.txt>

- [112] ANACOM, *Sistemas de Comunicações Móveis GSM/UMTS - Aferição da qualidade de serviço - Avaliação da QoS dos serviços de voz, videotelefonía e cobertura das redes GSM e WCDMA, nos principais aglomerados urbanos e eixos rodoviários de Portugal Continental*, Autoridade Nacional de Comunicações, 2011. [Online]. Available: http://www.anacom.pt/streaming/Relatorio_QoS_GSM_UMTS_Dez2010.pdf
- [113] —, *Estudo de aferição da qualidade do serviço de acesso à Internet banda larga (versão integral)*, Autoridade Nacional de Comunicações, 2011. [Online]. Available: http://www.anacom.pt/streaming/QoSacesso_internet_julho2010.pdf
- [114] EETT, *ΑΠ.480/017/13.05.2008: Καθορισμός των δεικτών ποιότητας των παρεχόμενων προς το κοινό υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών και προσδιορισμός του περιεχομένου και της μορφής των προς δημοσίευση πληροφοριών καθώς και του τρόπου και χρόνου δημοσίευσής τους από τους παρόχους υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών (ΦΕΚ 1153/Β/24.06.2008)*, Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων, 2008. [Online]. Available: http://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Telecoms/QualityIndicators/LegalFramework/
- [115] —, *ΑΠ. 621/011/01.11.2011: Τροποποίηση και κωδικοποίηση της απόφασης της ΕΕΤΤ ΑΠ. 480/017/13.05.2008: Καθορισμός των δεικτών ποιότητας των παρεχόμενων προς το κοινό υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών και προσδιορισμός του περιεχομένου και της μορφής των προς δημοσίευση πληροφοριών καθώς και του τρόπου και χρόνου δημοσίευσής τους από τους παρόχους υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών (ΦΕΚ 2417/Β/01.11.2011)*, Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων, 2011. [Online]. Available: http://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Telecoms/QualityIndicators/LegalFramework/
- [116] C. N. Pitas, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, “Speech and Video Telephony Quality Characterization and Prediction of Live Contemporary Mobile Telecommunication Systems,” *Wireless Personal Communications*, 2012.
- [117] C. Pitas, N. Moraitis, A. Panagopoulos, and P. Constantinou, “Speech and Video Quality Assessment of GSM and WCDMA Rollout Mobile Radio Access Networks in a Regulated and Competitive Market,” in *Proc. 9th Int’l Conf. on Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks, (MESAQIN ’10)*, 2010.

- [118] C. N. Pitas, A. D. Panagopoulos and P. Constantinou, “Performance Measurements and QoS Analysis of High Speed Packet Access Networks,” in *Proc. Joint Workshop COST 2100, SWG 3.1 & FP7-ICT-SOCRATES*, Braunschweig, Germany, Feb. 2009.
- [119] C. N. Pitas, E. D. Avgeri, M. P. Kallenou and P. Constantinou, “Quality of Service in Real High Speed Packet Access Networks: Survey Measurements and Performance Evaluation,” in *Proc. 1st Pan-Hellenic Conf. on Electronics and Telecommunications*, Patras, Greece, Mar. 2009.
- [120] —, “Measurements and QoS Analysis of Live-World Mobile Telecommunication Networks,” in *Proc. 3rd Pan-Hellenic Conf. of Electrical and Computer Engineering Students*, Thessaloniki, Greece, Apr. 2009.
- [121] X. N. Πήτας, “Ποιότητα Υπηρεσιών σε Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών,” *Επιστημονική Ημερίδα: Τηλεπικοινωνίες Βασικός Μοχλός Ανάπτυξης, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, ΤΕΙ Ιονίων Νήσων, Λευκάδα*, 2009.
- [122] M. Fiedler, T. Hossfeld, and T.-G. Phuoc, “A Generic Quantitative Relationship between Quality of Experience and Quality of Service,” *IEEE Network*, vol. 24, no. 2, pp. 36–41, 2010.
- [123] H. Rifai, S. Mohammed, and A. Mellouk, “A Brief Synthesis of QoS-QoE Methodologies,” in *Proc. 10th Symp. Programming and Systems (ISPS’11)*, Apr. 2011, pp. 32–38.
- [124] J. Shaikh, M. Fiedler, and D. Collange, “Quality of Experience from User and Network Perspectives,” *Annals of Telecommunications*, vol. 65, no. 1–2, pp. 47–57, 2010.
- [125] L. Sun and E. Ifeachor, “Voice Quality Prediction Models and their Application in VoIP Networks,” *IEEE Trans. on Multimedia*, vol. 8, no. 4, pp. 809–820, Aug. 2006.
- [126] T. Hossfeld and A. Binzenhöfer, “Analysis of Skype VoIP traffic in UMTS: End-to-end QoS and QoE measurements,” *Computer Networks*, vol. 52, no. 3, pp. 650–666, 2008.
- [127] T. Hossfeld, P. Tran-Gia, and M. Fiedler, “Quantification of Quality of Experience for Edge-Based Applications,” *Managing Traffic Performance in Converged Networks*, vol. 4516, pp. 361–373, 2007.

- [128] M. Fiedler and T. Hoßfeld, “Quality of Experience-Related Differential Equations and Provisioning-Delivery Hysteresis,” in *Proc. 21st ITC Specialist Seminar on Multimedia Applications - Traffic, Performance and QoE*, Phoenix Seagaia Resort, Miyazaki, Japan, Mar. 2010.
- [129] N. R. Draper and H. Smith, Eds., *Applied Regression Analysis (3rd Edn)*. John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [130] E. Vonesh and V. Chinchilli, *Linear and Nonlinear Models for the Analysis of Repeated Measurements Statistics*. Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [131] A. Izenman, *Modern Multivariate Statistical Techniques Regression, Classification, and Manifold Learning*. Springer Science and Business Media, LLC, 2008.
- [132] T. Ryan, *Modern Regression Methods*. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [133] G. Ronald, *Nonlinear Statistical Models*. John Wiley & Sons, Inc, 1987.
- [134] D. Bertsimas, and M. Sim, “The Price of Robustness,” *Operations Research*, vol. 52, no. 1, pp. 35 –53, 2004.
- [135] A. G. Fertis, *A Robust Optimization Approach to Statistical Estimation Problems*, PhD Dissertation, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Boston, US, 2009.
- [136] A.-L. Soyster, “Convex Programming with Set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming,” *Operations Research*, vol. 21, no. 5, pp. 1154 –1157, 1973.
- [137] A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, and A. Nemirovski, *Robust Optimization*. Princeton University Press, 2009.
- [138] C. Campbell and Y. Ying, *Learning with Support Vector Machines: Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*. Morgan & Claypool, 2011.
- [139] S. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [140] D. G. Cacuci, *Sensitivity and Uncertainty Analysis, Vol. I: Theory*. Chapman & Hall, 2003.

- [141] D. G. Cacuci, M. Ionescu-Bujor, and I. M. Navon, *Sensitivity and Uncertainty Analysis, Vol. II: Applications to Large-Scale Systems*. Chapman & Hall, 2005.
- [142] J. M. Danskin, “The Theory of Max-Min with Applications,” *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 14, no. 4, Jul. 1966.
- [143] H. Xu, C. Caramanis, and S. Mannor, “Robust Regression and Lasso,” *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 56, no. 7, pp. 3561–3574, 2010.
- [144] R. Tibshirani, “Regression Shrinkage and Selection via the Lasso,” *Journal Royal Stat. Society*, vol. 57, no. 1, pp. 267–288, 1995.
- [145] J. F. Sturm, “Using SeDuMi 1.02, a MATLAB Toolbox for Optimization over Symmetric Cones,” *Optimization Methods and Software – Special Issue on Interior Point Methods*, vol. 11, no. 1–4, pp. 625–653, 1999.
- [146] I. Pólik, T. Terlaky, and Y. Zinchenko, “SeDuMi: a package for conic optimization.” in *IMA Workshop on Optimization and Control*, 2007.
- [147] D. P. Bertsekas, *Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. I*, 3rd ed. Athina Scientific, Nashua, US, 2005.
- [148] ———, *Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. II*, 3rd ed. Athina Scientific, Nashua, US, 2007.
- [149] C. N. Pitas, A. G. Fertis, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, “Robust Optimization in Non-Linear Regression for Speech and Video Quality Prediction in Mobile Multimedia Networks,” *Operations Research Proceedings 2011, Springer*, vol. XVI, 2012.
- [150] ———, “End-to-End Multimedia Quality Estimation with Robust Optimization in Real-World Mobile Computing Networks,” *to be submitted for review, IEEE Trans. on Mobile Computing*.
- [151] D. Birkes and Y. Dodge, *Alternative Methods of Regression*. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [152] D. Bates and W. D.G., *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [153] E. Uusipaikka, *Confidence Intervals in Generalized Regression Models*. Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

- [154] J. Marques de Sa, *Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [155] MATLAB, *Statistics Toolbox: Linear and Non-Linear Modeling*, The MathWorks, Inc. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/statistics>
- [156] STATISTICA, *Data Mining Software, Statistical Analysis, Predictive Analytics, Credit Scoring*, StatSoft Company. [Online]. Available: <http://www.statsoft.com/>
- [157] SPSS, *Statistics, Modeler, Data Collection*, IBM Corporation. [Online]. Available: <http://www.ibm.com/software/analytics/spss/>
- [158] G.J. Klir and B. Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall, 1995.
- [159] L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, vol. 8, 1965.
- [160] —, “Toward a Theory of Fuzzy Systems,” *Aspects of Network and System Theory*, New York: Rinehart and Winston, pp. 469–490, 1971.
- [161] —, “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes,” *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, no. 1, pp. 28–44, 1973.
- [162] —, “The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning, Parts: I, II, III,” *Information Sciences*, vol. 8, pp. 199–249, 1975.
- [163] —, “Fuzzy Logic = Computing with Words,” *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 103–111, 1996.
- [164] C. Karr, “Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers,” *AI Expert*, vol. 6, pp. 26–33, 1991.
- [165] L.A. Zadeh, “Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing,” *Commun. ACM*, vol. 37, no. 3, pp. 77–84, Mar. 1994.
- [166] J.-S. R. Jang, “ANFIS: Adaptive-Neural-network-based Fuzzy Inference System,” *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, May/June 1993.

- [167] MATLAB, *Fuzzy Logic Toolbox*, The MathWorks Inc. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/fuzzy/>
- [168] C. N. Pitas, D. E. Charilas, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, “Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Models for Speech and Video Quality Prediction in Real-World Mobile Networks,” *Wireless Communications Magazine, IEEE*, 2012.
- [169] C. N. Pitas, D. E. Charilas, A. D. Panagopoulos, P. Chatzimisios, and P. Constantinou, “ANFIS-based Quality Prediction Models for AMR-Telephony in Public 2G/3G Mobile Networks,” in *Proc. IEEE Global Communications Conference*, Dec. 2012.
- [170] H. Koumaras, A. Kourtis, C.-H. Lin, and C.-K. Shieh, “End-to-End Prediction Model of Video Quality and Decodable Frame Rate for MPEG Broadcasting Services,” *Advances in Networks and Services*, vol. 1, no. 1, pp. 19–29, 2008.
- [171] A. Khan, L. Sun, and E. Ifeachor, “Learning Models for Video quality Prediction over Wireless Local Area Network and Universal Mobile Telecommunication System Networks,” *Communications, IET*, vol. 4, no. 12, pp. 1389–1403, Aug. 2010.
- [172] —, “QoE Prediction Model and its Application in Video Quality Adaptation over UMTS Networks,” *IEEE Trans. on Multimedia*, vol. 14, no. 2, pp. 431–442, Apr. 2012.
- [173] A. Höglund, *Advanced Mobile Network Monitoring and Automated Optimization Methods*, PhD Dissertation. Dept of Eng Physics and Mathematics, Helsinki Univ of Techn, Espoo, 2006.
- [174] P. Lehtimäki, *Data Analysis Methods for Cellular Network Performance Optimization.*, PhD Dissertation. Dept of Information and Computer Science, Helsinki Univ of Technol, Espoo, 2008.
- [175] R. Mikut and M. Reischl, “Data Mining Tools,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 1, no. 5, pp. 431–443, 2011.
- [176] I. H. Witten, E. Frank and M. A. Hall, *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (3rd Edn.)*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann - Elsevier, 2011.

- [177] I. Masaaki, *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill, 1986.
- [178] T. Fawcett, "ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers," *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 882–891, 2004.
- [179] P. A. Flach, "The Geometry of ROC Space: Understanding Machine Learning Metrics through ROC Isometrics," in *Proc. 20th Int'l Conf. on Machine Learning*, 2003, pp. 194–201.
- [180] T. M. Cover and P. E. Hart, "Nearest Neighbor Pattern Classification," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, 1967.
- [181] S. Haykin, *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*, 2nd ed. Prentice-Hall Inc: NJ, USA, 2009.
- [182] S. Geman, E. Bienenstock, and R. Doursat, "Neural Networks and the Bias/Variance Dilemma," *Neural Computation*, vol. 4, pp. 1–58, 1992.
- [183] G. E. Hinton and T. J. Sejnowski (Eds.), *Unsupervised Learning: Foundations of Neural Computation*. MIT Press, USA, 1999.
- [184] L. Rokach and O. Maimon, "Top-Down Induction of Decision Trees Classifiers - A Survey," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 35, no. 4, pp. 476 – 487, Nov. 2005.
- [185] R. C. Barros, M. P. Basgalupp, A. C. P. L. F. de Carvalho and A. A. Freitas, "A Survey of Evolutionary Algorithms for Decision-Tree Induction," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. PP, no. 99, pp. 1 –10, 2011.
- [186] J. R. Quinlan, "Induction of Decision Trees," *Machine Learning*, vol. 1, no. 1, pp. 81 –106, 1986.
- [187] —, *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publ: CA, USA, 1993.
- [188] —, *Data Mining Tools See5 and C5.0*, RuleQuest Research, Australia. [Online]. Available: <http://www.rulequest.com/see5-info.html>
- [189] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379 –423, 623 –656, Oct. 1948.

- [190] C. E. Shannon and W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*. Univ of Illinois Press, USA, 1971.
- [191] S. Das, *High-Level Data Fusion*. Artech House Inc., Norwood, MA, USA, 2008.
- [192] WEKA 3, *Data Mining Software in Java*, Machine Learning Group, University of Waikato, New Zeland. [Online]. Available: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- [193] R. R. Bouckaert, E. Frank, M. A. Hall, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann and I. H. Witten, “WEKA – Experiences with a Java Open-Source Project,” *Journal of Machine Learning Research*, vol. 11, pp. 2533–2541, 2010.
- [194] C. N. Pitas, K. E. Chourdaki, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, “QoS Mining Methods for Performance Estimation of Mobile Radio Networks.” in *Proc. Int’l Conf. on Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks (MESAQIN’11)*, Jun. 2011.
- [195] C. N. Pitas, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, “An Empirical Review of Data Mining Algorithms for Speech and Video Quality Estimation in Roll-out Mobile Communication Networks,” *to be submitted for review, European Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*.

Δημοσιεύσεις του Συγγραφέα

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και βιβλία

1. Charalampos N. Pitas, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “Speech and Video Telephony Quality Characterization and Prediction of Live Contemporary Mobile Telecommunication Systems”, *Int’l Journal on Wireless Personal Communications*, Springer, DOI: 10.1007/s11277-012-0566-x, 2012.
2. Charalampos N. Pitas, Dimitris E. Charilas, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Models for Speech and Video Quality Prediction in Real-World Mobile Networks”, accepted for publication in *Wireless Communications*, IEEE, 2012.
3. Charalampos N. Pitas, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “A Survey on Contemporary Terrestrial and Handheld Multimedia Broadcasting Networks”, accepted for publication in *Int’l Journal on Communications - Special Issue on New Trends in Telecommunications*, Scientific Letters of the University of Žilinská, Slovakia, Vol. 14, No. 2, pp. 48 – 54, 2012.
4. Charalampos N. Pitas, Apostolos G. Fertis, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou “Robust Optimization in Non-Linear Regression for Speech and Video Quality Prediction in Mobile Multimedia Networks”, Klatte D, Lüthi H-J, Schmedders K (Eds.) *Operations Research Proceedings 2011 - Selected Papers of the Annual Int’l Conf. of German speaking OR societies from Austria (ÖGOR), Germany (GOR) & Switzerland (SVOR) under the patronage of SVOR*, Vol. 16, pp. 381 – 386, Springer, 2012.

Εργασίες σε διαδικασία υποβολής και κρίσης σε έγκριτα διεθνή επιστημονικά περιοδικά

1. Charalampos N. Pitas, Apostolos G. Fertis, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou “End-to-End Multimedia Quality Estimation with Ro-

bust Optimization in Real-World Mobile Computing Networks”, to be submitted for review, *IEEE Transactions on Mobile Computing*.

2. Charalampos N. Pitas, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “An Empirical Review of Data Mining Algorithms for Speech and Video Quality Estimation in Rollout Mobile Communication Networks”, to be submitted for review, *Transactions on Emergency Telecommunications Technologies (European Transactions on Telecommunications)*, Wiley.

Ανακοινώσεις Ερευνητικών Εργασιών σε Διεθνή Συνέδρια

1. Charalampos N. Pitas, Dimitris E. Charilas, Athanasios D. Panagopoulos, Periklis Chatzimisios, and Philip Constantinou, “ANFIS-based Quality Prediction Models for AMR-Telephony in Public 2G/3G Mobile Networks”, submitted in *IEEE Global Communications (GlobeComm'12)*, Anaheim, California, US (2012).
2. Charalampos N. Pitas, Apostolos G. Fertis, and Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “Robust Optimization in Non-Linear Regression for Speech and Video Quality Prediction in Mobile Multimedia Networks”, In Proc. *10th Int'l Conf. on Operations Research, (OR 2011)*, Aug. - Sep. 2011, Zurich, Switzerland (2011).
3. Charalampos N. Pitas, Konstantina E. Chourdaki, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “QoS Mining Methods for Performance Estimation of Mobile Radio Networks”, In Proc. *10th Int'l Conf. on Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks (MESAQIN 2011)*, June 2011, Prague, Czech Republic (2011).
4. Charalampos N. Pitas, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “Measurements and Quality Analysis of Mobile DVB-T/H Multimedia Networks”, In Proc. *10th Int'l Conf. on Measurement of Speech, Audio and Video Quality in Networks (MESAQIN 2011)*, June 2011, Prague, Czech Republic (2011).
5. Charalampos N. Pitas, Nektarios Moraitis, Athanasios D. Panagopoulos, and Philip Constantinou, “Speech and Video Quality Assessment of GSM and WCDMA Rollout Mobile Radio Access Networks in a Regulated and Competitive Market”, In Proc. *9th Int'l Conf. on Measurement of Speech, Audio*

and Video Quality in Networks (MESAQIN 2010), June 2010, Prague, Czech Republic (2010).

6. Philip Constantinou, Charalampos N. Pitas, *et al*, “Evaluating Packet Data Performance Of Commercial UMTS Network in an Urban Environment - Comparison with HSDPA”, *IIR Telecoms*, September 2006, Amsterdam, Netherlands (2006).

Ανακοινώσεις Ερευνητικών Εργασιών σε Ευρωπαϊκές Ευρευνητικές Δράσεις COST

1. Charalampos N. Pitas, Athanasios Panagopoulos, and Philip Constantinou, “Performance Measurements and QoS Analysis of High Speed Packet Access Networks”, *7th MCM COST2100*, February 2009, Braunschweig, Germany (2009).
2. Charalampos N. Pitas, Andreas Tsopeles, Vasilios Sofras, and Philip Constantinou, “Adaptive Radio Resource Management in a DVB-S2 based HAP Network for Broadband Internet Access and Multimedia Content Delivery”, *7th Int’l Airship Convention, COST297-HAPCOS Workshop*, October 2008, Friedrichshafen, Germany (2008).

Ανακοινώσεις Ερευνητικών Εργασιών σε Εθνικά Συνέδρια και Ημερίδες

1. Χαράλαμπος Ν. Πήτας, “Ποιότητα Υπηρεσιών σε Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών”, Επιστημονική Ημερίδα “Τηλεπικοινωνίες Βασικός Μοχλός Ανάπτυξης”, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, ΤΕΙ Ιονίων Νήσων, Λευκάδα, Δεκέμβριος 2009.
2. Charalampos N. Pitas, Eleni D. Avgeri, Marilena P. Kallinou, and Philip Constantinou, “Measurements and QoS Analysis of Live-World Mobile Telecommunication Networks”, In Proc. *3rd Pan-Hellenic Conf. of Electrical and Computer Engineering Students*, April 2009, Thessaloniki, Greece (2009).
3. Charalampos N. Pitas, Eleni D. Avgeri, Marilena P. Kallinou, and Philip Constantinou, “Quality of Service in Real High Speed Packet Access Networks: Survey Measurements and Performance Evaluation”, In Proc. *1st Pan-Hellenic Conf. on Electronics and Telecommunications*, March 2009, Patras, Greece (2009).

4. Charalampos N. Pitas, Andreas Tsopelas, Vasilios Sofras, and Philip Constantinou, “Quality of Service in High Altitude Platform Networks: Study of a DVB-S2 based Architecture”, In Proc. *1st Pan-Hellenic Conf. on Electronics and Telecommunications*, March 2009, Patras, Greece (2009).

□

Βιογραφικό Σημείωμα



Ο Χαράλαμπος Ν. Πήτας γεννήθηκε στις 7 Οκτωβρίου 1979 στο Αγρίνιο. Έλαβε το Δίπλωμα (*Diplom-Ingenieur*) Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών, και τα μεταπτυχιακά διπλώματα ειδίκευσης (M.B.A.) στα Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα - Διοίκηση Τεχνολογίας και (M.Sc.) στην Γεωπληροφορική (GIS) - Περιβάλλον και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.) τα έτη 2003, 2006 και 2008, αντίστοιχα. Στα πλαίσια της συνεχούς εκπαίδευσης, το 2005 παρακολούθησε το ευρωπαϊκό εντατικό πρόγραμμα *SOCRATES "EMC related to Wireless Communication Systems"* στο Πολυτεχνείο της Ανκόνα,

Ιταλία, και το 2006 το καλοκαιρινό σχολείο "*Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες*" στο Ινστιτούτο Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Το 2005, ξεκίνησε την εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στην περιοχή της ποιότητας υπηρεσιών σε ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα επικοινωνιών. Τα ερευνητικά ενδιαφέροντα του Χ. Πήτα είναι τα σύγχρονα ευρυζωνικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών με έμφαση τον σχεδιασμό, την βελτιστοποίηση και την αξιολόγηση επί θεμάτων ποιότητας υπηρεσιών τηλεφωνίας, βίντεο-πολυμέσων και εν γένει κινητού διαδικτύου, η ψηφιακή τηλεόραση και τα ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα. Παράλληλα, έχει παράσχει επικουρικό διδακτικό έργο (Εργαστήριο: Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες, 4ου εξ.) και έχει συμμετάσχει σε επίβλεψη 6 διπλωματικών εργασιών από το 2005 έως σήμερα στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ. Παράλληλα συμμετείχε με εργασίες στις ευρωπαϊκές ερευνητικές δράσεις *COST297-HAPCOS "High Altitude Platforms for Communications and Other Services"* και *COST2100 "Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications"* ενώ είναι ενεργό μέλος στο *COST-IC1004 "Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments"* και υπό ένταξη μέλος στο *COST-IC1003 "European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services"*.

Από το 2011 έως σήμερα εργάζεται ως Μηχανικός Σχεδιασμού, Περιβάλλοντος και Προϋπολογισμού Υποσταθμών (Υ/Σ) και Κέντρων Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ) στη Διεύθυνση Νέων Έργων Μεταφοράς του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ Α.Ε.).

Το β' εξάμηνο του 2010, ήταν Τεχνικός Υπεύθυνος σε έργο με αντικείμενο την συγκριτική

αξιολόγηση (*Benchmarking*) των δικτύων ραδιοπρόσβασης και των υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών των εταιριών Cosmote, Vodafone-GR και Wind σε όλη την επικράτεια της Ελλάδας με το Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών ΕΜΠ.

Από το 2008 έως το 2010, ήταν Εργαστηριακός Συνεργάτης (έκτακτος Καθηγητής Εφαρμογών) στο Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων, Παράρτημα Λευκάδας, στο Τμήμα Εφαρμογών Πληροφορικής στη Διοίκηση και την Οικονομία, και στο Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών όπου δίδαξε αυτοδύναμα προπτυχιακά μαθήματα Δικτύων Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Βάσεων Δεδομένων. Παράλληλα, ο ίδιος επέβλεψε 17 πτυχιακές εργασίες και υπήρξε μέλος τριμελών συμβουλευτικών επιτροπών σε πλέον των 20 πτυχιακών εργασιών. Παράλληλα ήταν υπεύθυνος πρακτικής άσκησης τελειοφοίτων και πρόσφερε αμισθί ποικίλο διοικητικό και επιστημονικό - τεχνικό έργο.

Από το 2005 έως το 2008, συμμετείχε ως Τηλεπικ/κός Μηχανικός/Υπεύθυνος Έργου σε ποικίλα έργα εκτεταμένων μετρήσεων και ανάλυσης ποιότητας δικτύων ραδιοπρόσβασης (GSM/UMTS/HSPA) με το ΕΚΡ-ΕΜΠ και το Τμήμα Βελτιστοποίησης Δικτύου Πρόσβασης της COSMOTE Κινητές Τηλεπικοινωνίες ΑΕ. Για την εν λόγω κατηγορία έργων ενημέρωσε με νέες απαιτούμενες διαδικασίες το σύστημα διαχείρισης ποιότητας ISO του ΕΚΡ-ΕΜΠ.

Παράλληλα, δίδαξε ως ωρομίσθιος Καθηγητής Πληροφορικής (ΠΕ.19) σε Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια (ΤΕΕ) και Επαγγελματικές Σχολές (ΕΠΑΣ) του ΟΑΕΔ επί 3 έτη καθώς και ως Εισηγητής σε προγράμματα επαγγελματικής κατάρτισης και δια βίου μάθησης στο αντικείμενο των Τεχνολογιών Πληροφορίας και Επικοινωνιών.

Από το 2003 έως το 2005, υπηρέτησε την στρατιωτική του θητεία στον Ελληνικό Στρατό ως Έφεδρος Αξιωματικός. Αποφοίτησε από τις σχετικές σχολές Διαβιβάσεων (Σ.Α.Κ.Ε.ΔΒ.) και Έρευνας Πληροφορικής (Σ.Α.Ε.Π.) και έλαβε την ειδικότητα του Αναλυτή - Προγραμματιστή Η/Υ. Υπηρέτησε ως Τμηματάρχης στο Γραφείο Έρευνας Πληροφορικής στην 88 Στρατιωτική Διοίκηση (ΣΔΙ) Λήμνου και ως Διαχειριστής Δικτύου στην Μηχανογράφηση του 1ου ΕΓ/ΓΕΣ. Το καλοκαίρι του 2004 ήταν Σύμβουλος Τεχνικής Ασφάλειας - Επιθεωρητής ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων σε όλη την Περιοχή Ευθύνης της 88 ΣΔΙ και για το έργο του τιμήθηκε με ηθική αμοιβή. Απολύθηκε ευδοκίμως το 2005 με τον βαθμό του Έφεδρου Ανθυπολοχαγού του Σώματος Έρευνας Πληροφορικής.

Στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας έχει δημοσιεύσει 4 εργασίες σε διεθνή περιοδικά και βιβλία με κρίση, ενώ 2 είναι στο στάδιο υποβολής και κρίσης, και 10 ανακοινώσεις σε διεθνή και πανελλήνια συνέδρια.

Είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ), του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (ΙΕΕΕ) και της Ελβετικής Ένωσης Επιχειρησιακής Έρευνας (ASRO/SVOR). Επιπλέον είναι κριτής σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια κύρους.

Ξένες Γλώσσες: Αγγλική, Γερμανική, Ισπανική.

Στοιχεία Επικοινωνίας:

Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών, Σχολή Ηλ/γων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ

☒ Ηρώων Πολυτεχνείου 9, ΤΚ 157 73, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα

☎: +30.6977.909015 - 📠: +30.210.772.4196 - 📠: +30.210.772.3851 - ✉: chpitas@mobile.ntua.gr