ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Παροχή Δυναμικής Ποιότητας Εμπειρίας για Υπηρεσίες Πολυμέσων σε Ασύρματα Ετερογενή Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΑΡΙΑΝΝΑΣ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

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

Παροχή Δυναμικής Ποιότητας Εμπειρίας για Υπηρεσίες Πολυμέσων σε Ασύρματα Ετερογενή Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΑΡΙΑΝΝΑΣ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....	.....	.....
Σ. Παπαβασιλείου	Μ. Θεολόγου	Ε. Συκάς
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ

.....

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΑΡΙΑΝΝΑ

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

© 2013 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Συμεών Παπαβασιλείου, υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας για την ανάθεση αυτής και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το διδάκτορα Γιώργο Αριστομενόπουλο για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη βοήθειά και τη συνεργασία σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τη μητέρα μου για την αγάπη, τη στήριξη, την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και την υπομονή καθ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο ΕΜΠ.

Περίληψη

Στα πλαίσια της αλματώδους ανάπτυξης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, που αντικατοπτρίζουν τις αυξημένες ανάγκες του κοινωνικού συνόλου για δικτύωση, καθίσταται απαραίτητος ο σχεδιασμός υπηρεσιών με τέτοιο τρόπο ώστε πέρα από ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας, να εξασφαλίζουν και την ευχαρίστηση των χρηστών. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη παροχής Ποιότητας Εμπειρίας στα σύγχρονα ετερογενή και, ως επί το πλείστον, ασύρματα δίκτυα. Γίνεται αντιληπτό ότι η Ποιότητα Εμπειρίας δεν εξαρτάται μόνο από αντικειμενικούς παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του συστήματος ή του δικτύου που συνθέτουν την Ποιότητα της Υπηρεσίας και μπορούν να μετρηθούν και να ποσοτικοιηθούν, αλλά και από υποκειμενικούς παράγοντες που σχετίζονται με το χρήστη (διάθεση, κοινωνικοοικονομική κατάσταση, προσωπικές εμπειρίες) που είναι δύσκολο να προβλεφθούν. Συνεπώς, σε αυτή τη διπλωματική, προτείνουμε ένα πλαίσιο δυναμικής παροχής Ποιότητας Εμπειρίας, σύμφωνα με το οποίο, παρέχεται βέλτιστη εκχώρηση των ασύρματων πόρων με γνώμονα τόσο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου, όσο και τη ικανοποίηση των υποκειμενικών κριτηρίων του χρήστη. Ο χρήστης παρεμβαίνει στη διαδικασία εκχώρησης πόρων, δηλώνοντας σε πραγματικό χρόνο την ευχαρίστηση ή τη δυσαρέσκειά του από την υπηρεσία που του προσφέρεται, ζητώντας τη δυναμική αναπροσαρμογή της υπηρεσίας του. Η επαλήθευση της εγκυρότητας αλλά και της απόδοσης του προτεινόμενου μοντέλου επιτυγχάνεται μέσω εκτεταμένων πειραμάτων προσομόιωσης στο περιβάλλον του Planetlab.

Λέξεις κλειδιά: Ποιότητα Εμπειρίας, Ποιότητα της Υπηρεσίας, διαχείριση ασύρματων πόρων, ετερογενή ασύρματα δίκτυα, Planetlab.

Abstract

The exponential development of telecommunication networks and networking needs, necessitates the design of services in such a way, jointly providing a high level of quality and assuring the users' satisfaction. Consequently, Quality of Experience provisioning in contemporary heterogenous wireless networks is attaining much attention. Quality of Experience relies not only on objective factors, like network and system characteristics that contribute to the Quality of Service and can be measured and quantified, but also on subjective factors related to the user (mood, socioeconomic status, personal experiences), which are difficult to predict. For that reason, a novel utiliy-based dynamic QoE provisioning framework is proposed, aiming to both optimize the utility of the heterogeneous network and to maximize users' subjective satisfaction. User intervenes in the resource allocation process by expressing in real time his satisfaction or dissatisfaction to the offered service. The validity and efficacy of the proposed framework is proved via extensive simulation results in Planetlab.

Key words: Quality of Experience, Quality of Service, wireless resource allocation, heterogenous wireless networks, Planetlab.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή 15

1.1 Ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων τηλεπικοινωνιών 15

1.2 Στοιχεία ασύρματων κυψελωτών τηλεπικοινωνιών 16

1.3 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LANS) 17

1.4 Η διαλειτουργικότητα στα σύγχρονα ετερογενή ασύρματα δίκτυα επιβάλλει την παροχή ποιότητας εμπειρίας 19

1.5 Συναρτήσεις χρησιμότητας (Utility functions) 20

1.6 Αντικείμενο διπλωματικής - Συνεισφορά 21

1.7 Οργάνωση κειμένου 22

2 Η έννοια της ποιότητας εμπειρίας 23

2.1 Εισαγωγή 23

2.2 Ορισμοί 23

2.2.1 Η έννοια της ποιότητας 23

2.2.2 Εμπειρία του χρήστη 25

2.2.3 Ποιότητα της υπηρεσίας 27

2.2.4 Ποιότητα εμπειρίας 28

2.2.5 Σχέση ποιότητας της υπηρεσίας και ποιότητας εμπειρίας 30

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα εμπειρίας 31

2.3.1 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από το χρήστη 31

2.3.2 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και το περιεχόμενο της υπηρεσίας 32

2.3.3 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας 33

2.3.4 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από το τερματικό που χρησιμοποιεί ο χρήστης 35

2.3.5 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από την ευρωστία του συστήματος 37

2.3.6 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από το βαθμό εξυπηρέτησης του χρήστη 38

2.3.7 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από την πολιτική κοστολόγησης 40

2.4 Προκλήσεις για την εξασφάλιση της απ άκρη σε άκρη ποιότητα εμπειρίας (End to end qoe assurance) 42

2.4.1.Μέτρηση της ποιότητας εμπειρίας 44

2.4.2 Έλεγχος και ανάδραση της ποιότητας εμπειρίας 44

2.4.3 Διάγνωση της ποιότητας εμπειρίας 45
2.4.4 Διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας 46
3 Σχετικές εργασίες 47
3.1 Εισαγωγή 47
3.2 Παροχή ποιότητας εμπειρίας μέσα από τη βελτιστοποίηση της απ άκρη σε άκρη ποιότητας της υπηρεσίας 48
3.2.1 Σχέση QoS-QoE σε υπηρεσίες Internet και σχέση QoE με το χρόνο απόκρισης,το διαθέσιμο εύρος ζώνης και το χρόνο παράδοσης αντικειμένου..... 48
3.2.2 Μέθοδος αξιολόγησης του QoE μέσα από το μοντέλο συσχέτισης QoS-QoE.. 51
3. 3 Παροχή QoE μέσα από τη βελτιστοποίηση του MOS 53
3.3.1 Βελτιστοποίηση ποιότητας εμπειρίας σε πολλαπλά στρώματα (cross-layer) με χρήστη του MOS 53
3.3.2 Βελτιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας σε πολλαπλά στρώματα(cross-layer) για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων 55
3.4 Παροχή QoE μέσα από τη δυναμική προσαρμογή της λειτουργίας του δικτύου 57
3.4.1 Μοντέλο εξασφάλισης QoE στα δίκτυα επόμενης γενιάς 57
3.4.2 Μοντέλο βελτιστοποίησης της χρησιμότητας της υπηρεσίας βασισμένο στις προτιμήσεις του χρήστη σε IP δίκτυα 60
4 Προτεινόμενο πλαίσιο παροχής QoE 63
4. 1 Εισαγωγή..... 63
4.2 Πλαίσιο δυναμικής παροχής της ποιότητας εμπειρίας 63
4.3 Δυναμική πρόβλεψη της ποιότητας εμπειρίας σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα..... 66
4.4 Μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου. 67
4.4.1 Μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου σε CDMA δίκτυα. 67
4.4.2 Μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου σε WLAN δίκτυα..... 76
4.5 Αλγόριθμος παροχής QoE 79
5 Αριθμητικά αποτελέσματα 81
5.1 Εισαγωγή 81
5.2 Planetlab..... 81
5.3 Αρχιτεκτονική πειράματος..... 82
5.4 Τοπολογίες 84
5.4.1 1η τοπολογία: 5 χρήστες συνδέονται σε ένα σημείο πρόσβασης ενός ασύρματου δικτύου WLAN 84

5.4.2 2η τοπολογία: 15 χρήστες συνδέονται σε ένα σημείο πρόσβασης ενός ασύρματου δικτύου WLAN 89

5.4.3 3η τοπολογία: Μια κυψέλη CDMA συνδεδεμένη με 5 χρήστες και ένα σημείο πρόσβασης ενός WLAN συνδεδεμένο με 8 χρήστες 93

5.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων: 98

6 Επίλογος 99

7 Βιβλιογραφία 101

1 Εισαγωγή

1.1 Ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων τηλεπικοινωνιών

Τα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών επιτρέπουν την επικοινωνία κινητών χρηστών παρέχοντας υπηρεσίες πραγματικού και μη-πραγματικού χρόνου [1]. Η τεράστια ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων, σε συνδυασμό με τη μεγάλη ανάπτυξη των φορητών υπολογιστών και των υπολογιστών χειρός, αποτελούν μια ισχυρή ένδειξη για την ταχύτατη εξέλιξη των ασύρματων δικτύων στο μέλλον.

Τα ασύρματα διίκτυα επικοινωνιών του μέλλοντος θα διακατέχονται από ετερογένεια, ποικιλομορφία, πολυπλοκότητα και πολλαπλότητα, αναφορικά με την πληθώρα πολλαπλών χρηστών με ποικίλες ανάγκες συνδεδεμένους σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης. Η υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υψηλής ποιότητας μεταξύ φορητών τερματικών συσκευών, οπουδήποτε κι αν βρίσκονται είναι ήδη γεγονός, ενώ αναμένεται να πολλαπλασιαστεί τα επόμενα χρόνια.

Με τον όρο ασύρματες επικοινωνίες αναφερόμαστε σε εφαρμογές, σε συστήματα αλλά και σε περιοχές κάλυψης [1]. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν τη μετάδοση σήματος φωνής απ ευθείας ή μέσω πρωτοκόλλου διαδικτύου (VoIP- Voice over IP), την πρόσβαση στο διαδίκτυο, την πλοήγηση και την αναζήτηση στον παγκόσμιο ιστό, τη μεταφορά αρχείων μεταξύ υπολογιστών, υπηρεσίες συνδρομητών και video τηλεδιασκέψεις. Με τον όρο συστήματα αναφερόμαστε σε κλασσικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών (GSM/CDMA), σε ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών που καλούνται WLAN ή και σε δίκτυα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής ραδιοπρόσβασης (WMAN). Με τον όρο περιοχή κάλυψης αναφερόμαστε στην εμβέλεια των ασύρματων δικτύων που εκτείνεται από μια μικρή περιοχή, σε μια πόλη, σε μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή ή και σε ολόκληρη τη γη.

Στις μέρες μας, παρατηρείται ένας κατακερματισμός στη βιομηχανία που εμφανίζεται με την κατασκευή διαφορετικών προϊόντων, τη δημιουργία διαφορετικών προτύπων και την προσφορά διαφορετικών υπηρεσιών [1]. Ο βασικός λόγος για αυτόν τον κατακερματισμό

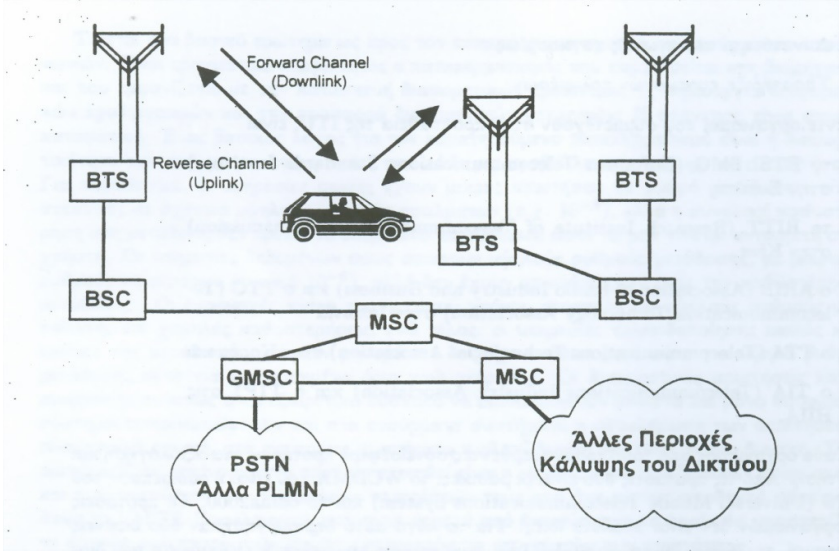
είναι η διαφορετικότητα των ασύρματων εφαρμογών, που κάθε μια προβάλλει και διαφορετικές απαιτήσεις. Τις υπηρεσίες τις εξετάζουμε κυρίως με βάση τρία χαρακτηριστικά: τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, το μέγιστο ανεκτό ρυθμό σφαλμάτων και τη μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες φωνής έχουν μικρές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης, είναι ανεκτικές σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων αλλά εμφανίζουν σχεδόν μηδενική ανεκτικότητα στις καθυστερήσεις. Οι εφαρμογές βίντεο πραγματικού χρόνου απαιτούν και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλές καθυστερήσεις, ενώ για παράδειγμα οι υπηρεσίες τηλεειδοποίησης όπως τα ηλεκτρονικά μηνύματα δεν έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις από τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Οι διαφορετικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής είναι συνεπώς δύσκολο να ικανοποιηθούν από ένα και μόνο ασύρματο σύστημα επικοινωνιών. Αν και στα ενσύρματα συστήματα η ολοκλήρωση των απαιτήσεων αυτών είναι γενικά εφικτή, στα ασύρματα δεν είναι ακόμα δυνατή.

1.2 Στοιχεία ασύρματων κυψελωτών τηλεπικοινωνιών

Τα δομικά χαρακτηριστικά ενός ασύρματου συστήματος τηλεπικοινωνιών φαίνονται στο σχήμα 1.

Ο κινητός σταθμός (MS- Mobile Station) επικοινωνεί με το σταθμό βάσης (BS- Base Station) χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους ραδιοδιαύλους και την αντίστοιχη ραδιοεπαφή [1]. Με τον όρο ραδιοεπαφή εννοούμε το σύνολο των κανόνων που καθορίζουν πως γίνεται η πρόσβαση στο ραδιοδίαυλο. Με τον όρο κινητός σταθμός εννοούμε όλα τα τερματικά που χρησιμοποιούνται. Οι σταθμοί βάσης είναι οι σταθεροί σταθμοί του δικτύου που χρησιμοποιούνται για ραδιοεπικοινωνία με τους κινητούς σταθμούς. Ένας σταθμός βάσης είναι εγκατεστημένος είτε στο κέντρο είτε στα όρια μιας περιοχής κάλυψης και αποτελείται από τις κεραίες εκπομπής και λήψης, καθώς και από τους αντίστοιχους πομποδέκτες. Κάθε σταθμός βάσης συνδέεται με το δίκτυο κορμού του παρόχου, μέσω ενός ελεγκτή (BSC- Base Station Controller). Πολλοί σταθμοί βάσης συνδέονται σε ένα κέντρο μεταγωγής (MSC- Mobile Switch Centre) που διαχειρίζεται και δρομολογεί τις κλήσεις σε μια μεγάλη περιοχή εξυπηρέτησης. Συνήθως ένα από τα κέντρα μεταγωγής αναλαμβάνει και τη διασύνδεση του δικτύου κινητών επικοινωνιών (PLMN- Public Land Mobile Network) με το σταθερό δίκτυο επικοινωνιών (PSTN- Public Subscriber Telephone Network) και ονομάζεται GSMC (Gateway Mobile Switching Centre).

Με την εισαγωγή κυψελωτών συστημάτων, τα δίκτυα προσφέρουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας σε μεγάλο αριθμό χρηστών με περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων [1]. Η βασική ιδέα των κυψελωτών συστημάτων είναι ο περιορισμός της εκπεμπόμενης ισχύος από τους σταθμούς βάσης, ώστε να περιοριστεί η έκταση της κάλυψης σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, που καλλείται κυψέλη και η επαναχρησιμοποίηση των ραδιοδιαύλων ενός σταθμού βάσης από κάποιον άλλο που βρίσκεται σε κάποια απόσταση. Στα CDMA κυψελωτά συστήματα, ακόμα και γειτονικές κυψέλες είναι δυνατό να χρησιμοποιούν τους ίδιους ραδιοδιαύλους. Συνήθως, κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από ένα σταθμό βάσης ενώ κατά τη μετάβαση ενός χρήστη από μια κυψέλη σε μια νέα, το σύστημα φροντίζει τη σύνδεση του κινητού σταθμού με το νέο σταθμό βάσης. Αν ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, συνήθως ανταλάσσονται μηνύματα ελέγχου μεταξύ του κινητού σταθμού και του δικτύου ώστε να είναι πάντα γνωστή η κυψέλη στην οποία κινείται ο κινητός σταθμός.



Σχήμα 1: Στοιχεία συστήματος ασύρματων τηλεπικοινωνιών (πηγή [1]).

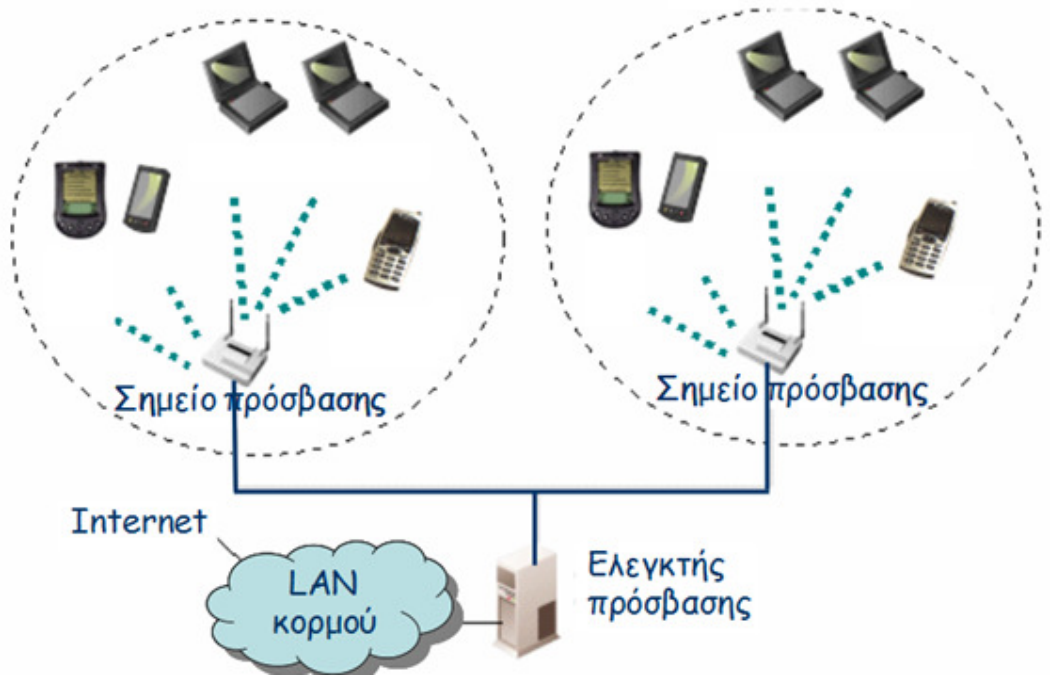
1.3 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LANS)

Οι ανάγκες των ανθρώπων για δικτύωση μεταβάλλονταν στη διάρκεια των ετών. Στις μέρες μας, καθώς οι απαιτήσεις έχουν πολλαπλασιαστεί, απαιτούν να δουλεύουν σε δίκτυα με πολλούς υπολογιστές, καθένας από τους οποίους χρησιμοποιεί διαφορετικό λειτουργικό σύστημα και λογισμικό εξοπλισμου. Γι αυτό το σκοπό, υπήρξε η ανάγκη δημιουργίας των ασύρματων δικτύων. Σε αυτά, το σημείο πρόσβασης του κάθε χρήστη δεν είναι σταθερό,

αλλά καθώς ο χρήστης μετακινείται το σημείο πρόσβασής του αλλάζει από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλον [2]. Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο υπολογιστών (WLAN- Wireless Local Area Network) έχει ως στόχο την παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης σε σχέση με τα κυψελωτά δίκτυα (αρκετά Mbps) σε φορητά τερματικά, που μετακινούνται σε περιορισμένης έκτασης περιοχές.

Οι ασύρματες τεχνολογίες έχουν συμβάλλει στην απλοποίηση των δικτύων, καθώς επιτρέπουν σε πολλούς χρήστες να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα πόρους όπουδήποτε βρίσκονται, χωρίς να απαιτείται ανάγκη καλωδίωσης. Αυτοί οι πόροι περιλαμβάνουν είτε μια ευρυζωνική σύνδεση στο Internet, είτε συσκευές που συνδέονται στο δίκτυο όπως ένας εκτυπωτής, είτε αρχεία δεδομένων και οπτικοακουστικό εξοπλισμό [2]. Τα WLANs παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε μια μικρή περιοχή με κινητικότητα των χρηστών [1]. Τα συστήματα τοπικης ασύρματης δικτύωσης λειτουργούν στις ζώνες ISM στα 2.4 GHz και στα 5.8 GHz, καθώς και στη ζώνη των 5.2 GHz, με κάποιες παραλλαγές ανα γεωγραφική περιοχή. Τα σύγχρονα WLANs σχεδιάζονται έτσι ώστε να υποστηρίζουν mobile computing σε μικρές περιοχές, όπως για παράδειγμα κτίρια, πάρκα, αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα (σχήμα 2) [2].

Το βασικό χαρακτηριστικό των ασυρμάτων τοπικών δικτύων είναι η ευελιξία τους. Μπορούν να επεκτείνουν την πρόσβαση σε τοπικά δίκτυα, καθώς και να υποστηρίξουν πρόσβαση στο διαδίκτυο με μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης σε τόπους όπου παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση ανθρώπων [2]. Η ανάπτυξή τους βασίστηκε σε μια ποικιλία νέων τεχνολογιών. Σήμερα, η μεγάλη διαφοροποίηση των WLANs από τα κυψελωτά συστήματα έγκειται στον τρόπο παράδοσης δεδομένων στους χρήστες, στους ρυθμούς μετάδοσης και στους κανονισμούς, όσον αφορά στη ζώνη λειτουργίας τους. Οι ρυθμοί μετάδοσης στους ασύρματους διαύλους των WLANs κυμαίνονται από μερικές δεκάδες kbps μέχρι μερικές δεκάδες Mbps. Οι υπηρεσίες δεδομένων στα κυψελωτά συστήματα προσφέρονται κυρίως από παρόχους υπηρεσίας, ενώ στα WLANs οι χρήστες ανήκουν στο φορέα που έχει το δίκτυο. Μια άλλη διαφοροποίηση είναι ότι τα περισσότερα WLANs λειτουργούν σε ανεπίσημες ζώνες συχνοτήτων, όπου οι μηχανισμοί είναι χαλαροί και δεν υπάρχει χρέωση ή χρόνος αναμονής για την κατάληψη της ζώνης.



Σχήμα 2: Ασύρματα τοπικά δίκτυα (πηγή [2]).

1.4 Η διαλειτουργικότητα στα σύγχρονα ετερογενή ασύρματα δίκτυα επιβάλλει την παροχή ποιότητας εμπειρίας

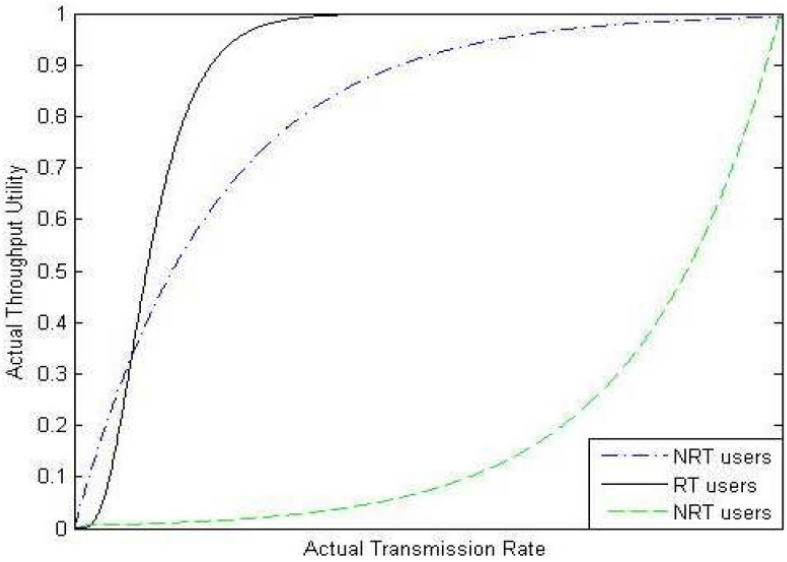
Στις μέρες μας, λόγω της εξέλιξης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, του διαδικτύου και των εφαρμογών-υπηρεσιών που προσφέρουν, εισάγεται η έννοια της διαλειτουργικότητας (convergence). Η διαλειτουργικότητα είναι η αποτελεσματική συνύπαρξη τηλεφωνίας, βίντεο και εφαρμογών δεδομένων σε ένα δίκτυο και κρίνεται απαραίτητη για την ικανοποίηση των αυξημένων απαιτήσεων των χρηστών. Οι χρήστες πλέον αναμένουν από το δίκτυο να τους παρέχει μια πληθώρα εφαρμογών οπουδήποτε βρεθούν και κάθε χρονική στιγμή, σε οποιαδήποτε συσκευή χρησιμοποιούν και από οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσιών. Κατά συνέπεια, οι πάροχοι υπηρεσιών ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να παρέχουν στους πελάτες το υψηλότερο δυνατό επίπεδο ποιότητας στις υπηρεσίες που προσφέρουν με τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη ικανοποίηση των χρηστών. Το επίπεδο λαμβανόμενης ποιότητας περιγράφεται από τον όρο «Ποιότητα της υπηρεσίας» (Quality of Service –QoS). Ο όρος ποιότητα της υπηρεσίας ορίζεται ως «ένα

σύνολο απαιτήσεων στις οποίες πρέπει να ανταποκριθεί το δίκτυο όταν μεταδίδεται μία κίνηση» [3]. Αφορά κυρίως τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας υπηρεσίας, δηλαδή παραμέτρους που σχετίζονται με τις καθυστερήσεις, την ταχύτητα μετάδοσης, την πιθανότητα αποτυχίας μετάδοσης, το τρέμουλο, την απόδοση του δικτύου. Όμως, η ικανοποίηση του χρήστη δεν εξασφαλίζεται απαραίτητα από ένα ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας. Εξαρτάται και από υποκειμενικούς παράγοντες, όπως η διάθεσή του, η κοινωνικοοικονομική του κατάσταση, οι προηγούμενες εμπειρίες του από παρεμφερείς υπηρεσίες που τυχόν είχε χρησιμοποιήσει, από τη σημασία που έχει για εκείνον η υπηρεσία τη στιγμή που τη χρησιμοποιεί, από τις προσδοκίες του. Ως εκ τούτου, ο όρος της ποιότητας της υπηρεσίας δεν είναι επαρκής για να προβλέψει την ικανοποίηση του χρήστη από την υπηρεσία που λαμβάνει. Συνεπώς, αναπτύχθηκε ο όρος της «Ποιότητας εμπειρίας» (Quality of Experience - QoE). Η ποιότητα εμπειρίας ορίζεται ως «η συνολική αποδοχή μιας εφαρμογής ή μιας υπηρεσίας όπως την αντιλαμβάνεται υποκειμενικά ο τελικός χρήστης» [4]. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότιι η έννοια της ποιότητας εμπειρίας δημιουργήθηκε για να γεφυρώσει το χάσμα ανάμεσα στις πραγματικές ανάγκες του χρήστη και στο επίπεδο QoS που παρέχει μια υπηρεσία, περιλαμβάνοντας την υποκειμενικότητα και τη μοναδικότητα του κάθε χρήστη στο πως εκείνος αντιλαμβάνεται την υπηρεσία που του παρέχεται.

1.5 Συναρτήσεις χρησιμότητας (Utility functions)

Συνέπεια όλων των παραπάνω αποτελεί η ανάγκη έκφρασης των προτιμήσεων των χρηστών στο σχεδιασμό μιας δικτυακής υπηρεσίας ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες και οι προσδοκίες τους. Για το σκοπό αυτό υιοθετήθηκαν από το πεδίο των οικονομικών οι συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions). Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός δικτυακού μηχανισμού, οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι το απαραίτητο εργαλείο που επιτρέποντας την αυτοβελτιστοποίηση μιας ολότητας (ενός αυτόνομου συστήματος ή ενός τμήματός του) [5]. Στο μοντέλο που προτείνουμε, οι συναρτήσεις χρησιμότητας εκφράζουν και υπολογίζουν το βαθμό ικανοποίησης των χρηστών σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας που τους παρέχονται. Έτσι, επεκτείνοντας τις συναρτήσεις χρησιμότητας, διατυπώνεται η θεωρία μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου, η οποία αποτελεί ένα αξιόπιστο θεωρητικό πλαίσιο για το σχεδιασμό εσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών.

Ανάλογα με την υπηρεσία στην οποία αναφέρονται, οι συναρτήσεις χρησιμότητας παίρνουν και διαφορετική μορφή. Παραδείγματος χάριν, για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (RT- Real Time), όπως η τηλεφωνία και οι βιντεοκλήσεις, οι συναρτήσεις χρησιμότητας συνήθως απεικονίζονται σαν σιγμοειδείς συναρτήσεις δεδομένου πως απαιτείται υποχρεωτικά ένα ελάχιστο ποσό πόρων προκειμένου να είναι εφικτή η υπηρεσία. Υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (NRT- Non Real Time), όπως η μεταφορά αρχείων (ftp), αναπαρίστανται με αυστηρά κυρτές ή αυστηρά κοίλες συναρτήσεις χρησιμότητας. Παραδείγματα τέτοιων συναρτήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 3:



Σχήμα 3:Απεικόνιση των τριών τύπων συναρτήσεων χρησιμότητας

1.6 Αντικείμενο διπλωματικής - Συνεισφορά

Με την παρούσα εργασία εισάγουμε την υποκειμενικότητα στην διαδικασία διαμοιρασμού πόρων και προτείνουμε ένα πλαίσιο που στοχεύει στην μεγιστόποιηση της συνολικής QoE των χρηστών όπως αυτή εκφράζεται με χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας, επεκτείνοντας την έννοια της παροχής QoS σε παροχή QoE. Ειδικότερα, αντιμετωπίζουμε το QoE σαν το όχημα που συνδέει χρήστες, εφαρμογές και μηχανισμούς διαχείρισης πόρων. Ως εκ τούτου, προτείνουμε ένα πλαίσιο QoE που επιτρέπει στους χρήστες να εκφράσουν δυναμικά και ασύγχρονα την ευχαρίστηση ή τη δυσαρέσκεια τους σε σχέση με την εμπειρία που αποκομίζουν από το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας. Για το σκοπό αυτό, συσχετίζουμε τις συναρτήσεις χρησιμότητας με τη διαδικασία εκχώρησης πόρων με σκοπό τη

βελτιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου, αποτρέποντας ταυτόχρονα τους χρήστες από μια εγωιστική συμπεριφορά. Το προτεινόμενο πλαίσιο εφαρμόζεται και πειραματικά στο δίκτυο του Planetlab, από το οποίο επωφεληθήκαμε για τις προσομοιώσεις μας.

1.7 Οργάνωση κειμένου

Ο τόμος αποτελείται από 6 κεφάλαια που καλύπτουν πλήρως την ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στις έννοιες της ποιότητας της υπηρεσίας και της ποιότητας εμπειρίας. Παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ποιότητας εμπειρίας και ποιότητας της υπηρεσίας καθώς και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η πρώτη. Αναφέρονται επίσης, οι απαιτήσεις σε ποιότητα της εμπειρίας στα δίκτυα επόμενης γενιάς.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία ως προς τρόπους παροχής ποιότητας εμπειρίας σε ασύρματα δίκτυα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου παροχής ποιότητας εμπειρίας σε ασύρματα ετερογενή δίκτυα, ενώ επίσης παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος βέλτιστης εκχώρησης πόρων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου παροχής ποιότητας εμπειρίας στο περιβάλλον του Planetlab. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του πειράματος και αναλυτικά τα σενάρια προσομοίωσης και τα αποτελέσματά τους.

Τέλος. **στο έκτο κεφάλαιο** που αποτελεί και τον επίλογο της διπλωματικής, γίνεται επισκόπηση της εργασίας, εξαγωγή συμπερασμάτων και αναφορά σε ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις.

2 Η έννοια της ποιότητας εμπειρίας

2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η παροχή ποιότητας εμπειρίας σε ασύρματα ετερογενή δίκτυα. Δεδομένου πως η ποιότητα εμπειρίας αρχικά θεωρούταν απλά σαν μια προέκταση της ποιότητας της υπηρεσίας, κρίνεται σκόπιμο να δοθούν αναλυτικοί ορισμοί των κυριότερων ενοιών. Συνεπώς παρατίθεται ο ορισμός της έννοιας της ποιότητας, της εμπειρίας του χρήστη (User experience), της ποιότητας της υπηρεσίας (Quality of Service) και της ποιότητας εμπειρίας (Quality of experience). Στη συνέχεια, περιγράφεται η σχέση ανάμεσα στην ποιότητα της εμπειρίας και την ποιότητα της υπηρεσίας. Επί πλέον, γίνεται αναφορά στους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ποιότητα εμπειρίας και αναφέρονται οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές των δικτύων για να παρέχουν όσο το δυνατό υψηλότερο επίπεδο ποιότητας εμπειρίας στα σύγχρονα ετερογενή ασύρματα δίκτυα.

2.2 Ορισμοί

2.2.1 Η έννοια της ποιότητας

Έχουν δοθεί πολλοί ορισμοί για την έννοια της ποιότητας. Η ποιότητα ορίζεται στο [1] ως «το σύνολο των χαρακτηριστικών μιας ολότητας που έχει την ικανότητα να ικανοποιήσει τόσο τις ανάγκες που ο χρήστης δηλώνει (stated) όσο και αυτές που υπαινίσσεται (implied)». Στο [6] η ποιότητα ορίζεται ως μια αξία για ένα συγκεκριμένο πρόσωπο. Αυτός ο ορισμός τονίζει την υποκειμενικότητα στην έννοια της ποιότητας. Σημαίνει ότι κάθε άνθρωπος θα αντιληφθεί διαφορετικά την ποιότητα ενός συγκεκριμένου προιόντος [8]. Επίσης, στο [9] η ποιότητα ορίζεται ως μια «πολύπλοκη και πολυδιάστατη έννοια» που γίνεται αντιληπτή μέσα από πέντε οπτικές γωνίες:

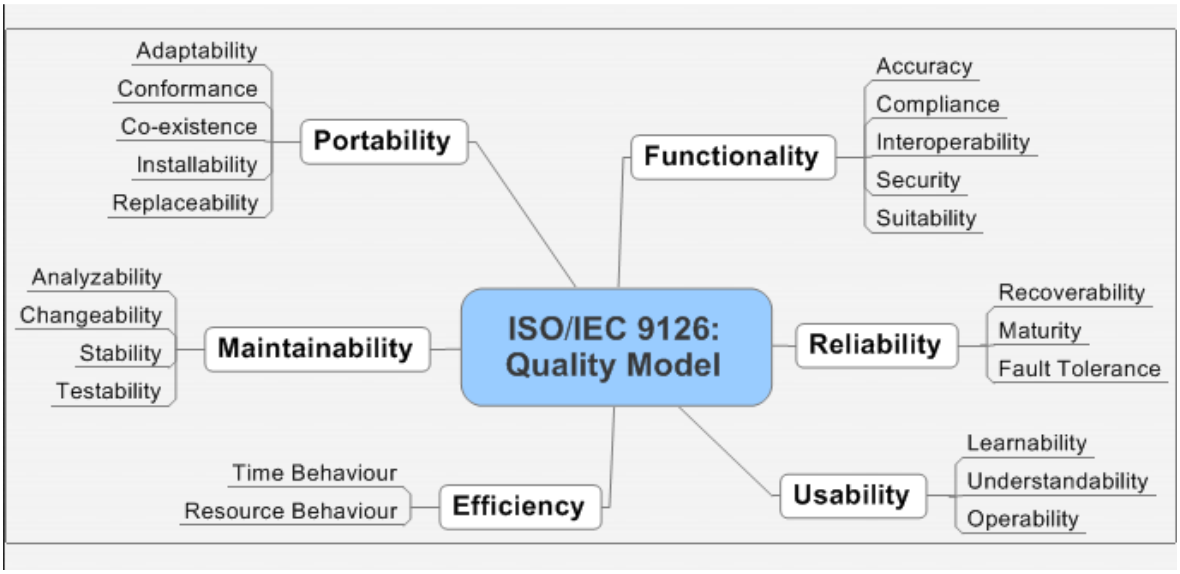
- Έχει υπερβατική έννοια. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα είναι κάτι που μπορεί να αναγνωριστεί αλλά δεν μπορεί να οριστεί επακριβώς.
- Από την πλευρά του χρήστη, η ποιότητα ενός προιόντος ή μιας υπηρεσίας γίνεται αντιληπτή μέσα από την καταλληλότητα χρήστης του-της.
- Από την πλευρά των κατασκευαστών, η ποιότητα ορίζεται μέσα από τη συμμόρφωση του προιόντος ή της υπηρεσίας στις σχεδιαστικές απαιτήσεις.
- Σχετικά με τα προιόντα, η ποιότητα ενός προιόντος αξιολογείται με βάση τα εγγενή χαρακτηριστικά του.
- Από μια οικονομική άποψη, η ποιότητα ορίζεται με βάση την αξία που δίνει ο χρήστης στο προιόν, δηλαδή εξαρτάται από το αν ο πελάτης προθυμοποιείται να πληρώσει για το προιόν ή την υπηρεσία.

Η ποιότητα ενός προιόντος ή μιας υπηρεσίας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO [10], εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Συνοπτικά αναφέρονται ως εξής:

- Η ποιότητα εξαρτάται από τη λειτουργικότητα του προιόντος ή της υπηρεσίας, δηλαδή το σύνολο των χαρακτηριστικών που σχετίζεται με την ύπαρξη συναρτήσεων οι οποίες εκφράζουν τις ανάγκες των χρηστών. Η λειτουργικότητα περιλαμβάνει και άλλα χαρακτηριστικά όπως την ακρίβεια, τη διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια και την καταλληλότητα του προιόντος ή της υπηρεσίας.
- Η ποιότητα εξαρτάται από την αξιοπιστία του προιόντος ή της υπηρεσίας. Αξιοπιστία είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την ικανότητα του προιόντος να διατηρεί το επίπεδο απόδοσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η αξιοπιστία περιλαμβάνει επίσης τη δυνατότητα ανάκτησης και την ανοχή σε σφάλματα.
- Η ποιότητα εξαρτάται από τη χρηστικότητα του προιόντος, δηλαδή το σύνολο των χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την ποσότητα προσπάθειας που πρέπει να καταβάλλου οι χρήστες για να χρησιμοποιήσουν το προιόν. Η χρηστικότητα περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως η ευκολία στο να καταλάβει και να μάθει να χρησιμοποιεί το προιόν ο χρήστης.
- Η ποιότητα εξαρτάται από την αποδοτικότητα του προιόντος δηλαδή από το σύνολο των χαρακτηριστικών που δείχνουν τη σχέση ανάμεσα στο επίπεδο ποιότητας του προιόντος ή της υπηρεσίας και της ποσότητας των πόρων που χρησιμοποιήθηκαν, υπό καθορισμένες συνθήκες.

- Η ποιότητα εξαρτάται από τη δυνατότητα συντήρησης, δηλαδή από την προσπάθεια που πρέπει να καταβληθεί για να γίνουν συγκεκριμένες τροποποιήσεις.
- Η ποιότητα εξαρτάται και από τη φορητότητα του προιόντος. Η φορητότητα περιλαμβάνει την ικανότητα ενός προιόντος να προσαρμόζεται, να εγκαθίσταται και να λειτουργεί σε πολλαπλά περιβάλλοντα.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά της ποιότητας, όπως περιγράφονται από το πρότυπο ISO [10].



Σχήμα 4: Χαρακτηριστικά της ποιότητας σύμφωνα με το μοντέλο ISO 9126 (πηγή [10]).

2.2.2 Εμπειρία του χρήστη

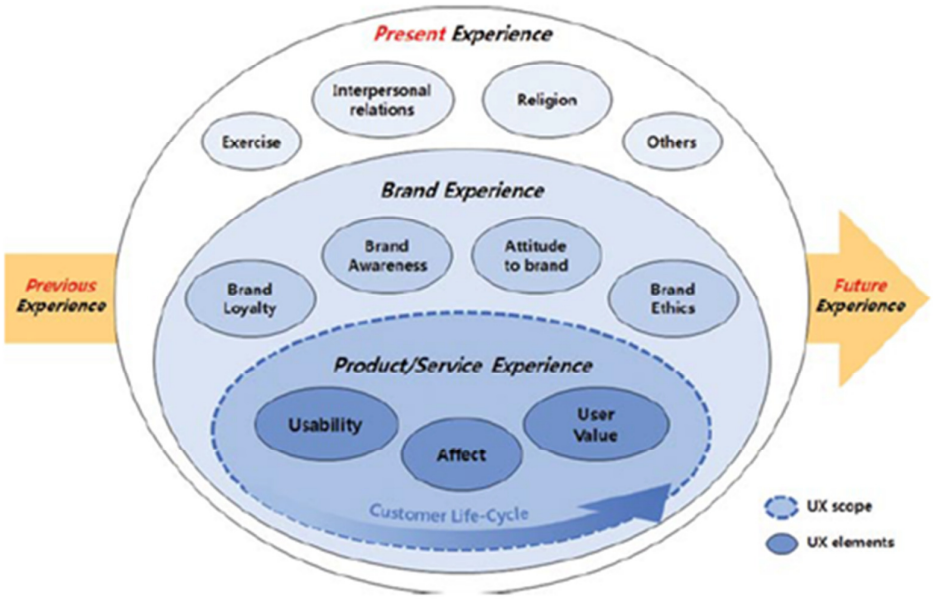
Εμπειρία είναι οτιδήποτε μας συμβαίνει από το οποίο αποκτούμε γνώση, συναισθήματα και δεξιότητες [11]. Σύμφωνα με μια χρονολογική προσέγγιση, οι εμπειρίες κατατάσσονται ανάλογα με το αν ανήκουν στο παρελθόν, στο παρόν ή στο μέλλον. Καθώς οι εμπειρίες του παρελθόντος, επηρεάζουν τις εμπειρίες του παρόντος και εκείνες με τη σειρά τους τις μελλοντικές εμπειρίες, οι ερευνητές εστιάζουν περισσότερο στο παρόν. Οι ερευνητές επικεντρώνονται περισσότερο στην παρούσα εμπειρία που λαμβάνει ο χρήστης μέσα από ένα προιόν ή μια υπηρεσία που χρησιμοποιεί (product experience) [12,13].

Πολλοί παράγοντες καθορίζουν την εμπειρία του χρήστη από το προιόν που χρησιμοποιεί. Ένας βασικός παράγοντας είναι η χρησιμότητα του προιόντος. Αρχικά, η

χρησιμότητα οριζόταν ως η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα ενός προιόντος ή μιας υπηρεσίας που επιτρέπουν στο χρήστη να πετύχει συγκεκριμένους στόχους σε ένα καθορισμένο περιβάλλον [14]. Στις μέρες μας, οι διαστάσεις της χρησιμότητας περιλαμβάνουν μια ευρεία γκάμα παραμέτρων [11]. Μερικές από τις παραμέτρους αυτές είναι η απλότητα του προιόντος ή της υπηρεσίας, η ευκολία πρόσβασης του προιόντος από το χρήστη, η αποτελεσματική λειτουργία του, η ευελιξία της χρήσης του, δηλαδή το να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το προιόν σε οποιεσδήποτε συνθήκες και το να παρέχει δυνατότητα διαλειτουργικότητας με άλλα προιόντα ή υπηρεσίες. Επίσης, η χρησιμότητα ενός προιόντος επηρεάζεται από το πόσο κατανοητό είναι και από την υποστήριξη που παρέχει στο χρήστη (ευκολία εγκατάστασης, πρόληψη λαθών, ανάδραση) .

Ο επόμενος παράγοντας είναι η επιρροή (affect) [11]. Η επιρροή σχετίζεται κυρίως με τα χαρακτηριστικά του προιόντος που προκαλούν συναισθήματα στο χρήστη, όπως για παράδειγμα η ελκυστικότητά του, η απλότητα, η υφή, το χρώμα, η πολυτέλεια.

Τελευταίος παράγοντας είναι η αξία που έχει το προιόν για το χρήστη (user value) [11]. Αντανακλά δηλαδή την υποκειμενική αξιολόγηση του χρήστη. Σχετίζεται με το πως ο χρήστης πιστεύει ότι το προιόν ή η υπηρεσία είναι σημαντικά για τη ζωή του. Προσδιορίζεται από το τί συμβολίζει το προιόν για το χρήστη και το κοινωνικοπολιτισμικό πλαίσιο στο οποίο κινείται. Περιλαμβάνει στοιχεία όπως η ικανοποίηση που παρέχει στο χρήστη δηλαδή το βαθμό στον οποίο το προιόν ή η υπηρεσία κάνει το χρήστη να αισθάνεται ευχαριστημένος με τον εαυτό του και τις επιτεύξεις του, την ευχαρίστηση που του παρέχει (συναισθήματα χαράς, ξεκούρασης, ανανέωσης), το κατά πόσο το προιόν τονώνει την κοινωνικότητα του με την έννοια του ότι κάνει το χρήστη να αισθάνεται πιο αποδεκτός από το κοινωνικό σύνολο. Επίσης, σχετίζεται με το βαθμό που το προιόν ανταποκρίνεται στις ανάγκες και στις προσδοκίες του χρήστη αλλά και τη συναισθηματική σύνδεση του χρήστη με το προιόν, δηλαδή το κατα πόσο καινοτόμο, πολύτιμο ή αξιόπιστο το θεωρεί. Στο σχήμα 5 απεικονίζονται τα συστατικά που συνθέτουν την εμπειρία του χρήστη , όπως περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5: Η έννοια της εμπειρίας του χρήστη (πηγή [11]) .

2.2.3 Ποιότητα της υπηρεσίας

Ο όρος ποιότητα της υπηρεσίας είναι ευρείας σημασίας [15], ποικίλοντας ανάλογα με τα εγγενή χαρακτηριστικά του δικτύου ή τα χαρακτηριστικά της αντίληψης του χρήστη ως προς την υπηρεσία που λαμβάνει και την εμπειρία του. Αρχικά, οριζόταν ως η ικανότητα του δικτύου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των χρηστών και των εφαρμογών [16] ή ως η συνολική επίδραση της απόδοσης του δικτύου στο βαθμό ικανοποίησης του χρήστη [17].

Στις μέρες μας, με τον όρο ποιότητα της υπηρεσίας (QoS-Quality of Service) ορίζεται από την IETF (Internet Engineering Task Force) ως «ένα σύνολο απαιτήσεων στις οποίες πρέπει να ανταποκριθεί το δίκτυο όταν μεταδίδεται μία κίνηση» [3]. Εναλλακτικά, όπως ορίζεται από τη σύσταση της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union ITU) στον τομέα ITU-T (Telecommunication Standardization Sector), είναι «η ικανότητα του δικτύου ή ενός τμήματος του δικτύου να παρέχει τις λειτουργίες που συνδέονται με την επικοινωνία ανάμεσα στους χρήστες» [17]. Επίσης, η ποιότητα της υπηρεσίας αναφέρεται από τον ITU-T ως η απόδοση του δικτύου.

Οι μηχανισμοί QoS θεωρούνται ότι λαμβάνουν χώρα σε 2 στρώματα: στο στρώμα εφαρμογής και στο στρώμα δικτύου [18]. Το στρώμα εφαρμογής αποτελείται από παραμέτρους που σχετίζονται με τις εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η ευκρίνεια της

εικόνας, ο ρυθμός πλαισίων, το χρώμα, η κωδικοποίηση. Οι παράμετροι του στρώματος δικτύου περιλαμβάνουν το τρέμουλο, την καθυστέρηση, την απώλεια πακέτων και σχετίζονται με την απόδοση του δικτύου.

Μέσα από τη χρήση τεχνολογιών παροχής QoS, καθίσταται δυνατή η μέτρηση του εύρους ζώνης αλλά και ο εντοπισμός μεταβολών των συνθηκών του δικτύου (για παράδειγμα η διαθεσιμότητα του δικτύου ή η συμφόρηση). Επίσης, είναι πιθανό να δοθεί προτεραιότητα σε συγκεκριμένο τύπο κίνησης, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές που παρουσιάζουν μικρή ανεκτικότητα στις καθυστερήσεις. Τέτοιες εφαρμογές είναι οι εφαρμογές φωνής και οι εφαρμογές βίντεο.

Πολλές υπηρεσίες παρέχονται από το επίπεδο εφαρμογής για να πετύχουν το απαιτούμενο επίπεδο και αφορούν ποικίλες δικτυακές συσκευές όπως για παράδειγμα μεταγωγείς και δρομολογητές [18]. Στην κορυφή αυτών των στρωμάτων, υπάρχει ένα «ψευδοστρώμα» που είναι η εμπειρία του χρήστη, η οποία ορίζεται σαν μια επέκταση του στρώματος εφαρμογής όπως ορίζεται από το μοντέλο του OSI. Η μετρική που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την απόδοση του παραπάνω στρώματος, είναι η ποιότητα της εμπειρίας όπως ορίζεται παρακάτω.

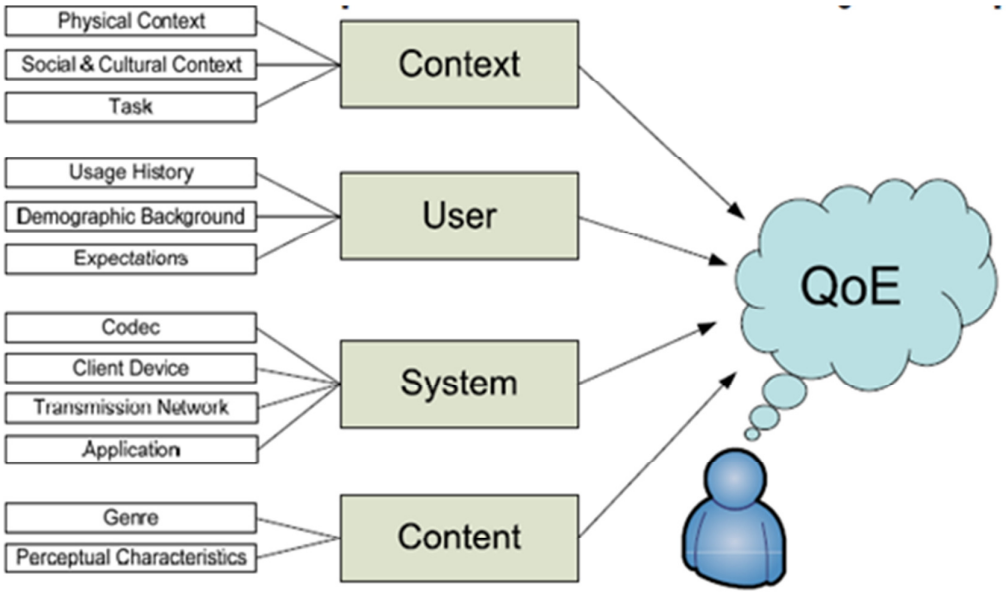
2.2.4 Ποιότητα εμπειρίας

Έχουν υπάρξει πολλές απόπειρες στο παρελθόν για την απόδοση του ορισμού της ποιότητας εμπειρίας. Στο [19] η ποιότητα εμπειρίας ορίζεται ως επέκταση της ποιότητας της υπηρεσίας με την έννοια ότι παρέχει πληροφορίες λαμβάνοντας υπ όψιν την υποκειμενική πλευρά του χρήστη. Ακόμα, στο [20] ορίζεται ως μετρητής χρησιμότητας μιας υπηρεσίας καθώς εκφράζει την ικανοποίηση που λαμβάνει ο χρήστης από διάφορα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας όπως την αξιοπιστία της, τη χρησιμότητα και την προσβασιμότητά της. Στο [21] η ποιότητα εμπειρίας ορίζεται ως τα χαρακτηριστικά των αισθήσεων, των αντιλήψεων και των απόψεων των ανθρώπων καθώς αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ευχάριστα ή δυσάρεστα. Πολλοί παράγοντες συντελλούν στην ποιότητα εμπειρίας που λαμβάνει ένας χρήστης από μια συγκεκριμένη συσκευή, μια υπηρεσία ή ένα λογισμικό και περιλαμβάνει την καταλληλότητα του, την αποδοτικότητά του, την αξιοπιστία του και την κατανοησιμότητά του [18]. Στο [22] η ποιότητα εμπειρίας περιγράφεται ως η συνολική απόδοση του συστήματος από την πλευρά του χρήστη. Το QoE δηλαδή μετρά τα

επίπεδα της απ άκρη σε άκρη απόδοσης του δικτύου κατά τη γνώμη του χρήστη και είναι μια ένδειξη του κατά πόσο καλά το σύστημα ανταποκρίνεται στις ανάγκες του χρήστη. Επίσης, έχει χαρακτηριστεί ως ο βαθμός ικανοποίησης του χρήστη από μια υπηρεσία επηρεαζόμενος από το περιεχόμενο, το δίκτυο, τη συσκευή, την εφαρμογή, τις προσδοκίες και τους στόχους του [23].

Μέχρι την προηγούμενη δεκαετία,η ποιότητα εμπειρίας συσχετιζόταν άμεσα με την ποιότητα της υπηρεσίας, δηλαδή είχε σχέση με τις καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων, το τρέμουλο, την απώλεια πακέτων, το ρυθμό δεδομένων, τη μετάδοση λαθών (packet errors) και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου [24]. Γενικότερα δηλαδή, το QoE θεωρούταν ότι εξασφαλίζεται μέσα από την ικανότητα του δικτύου να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των χρηστών και των εφαρμογών. Ωστόσο, η ποιότητα της υπηρεσίας και η ποιότητα εμπειρίας προσδιορίζονται από διαφορετικούς παράγοντες, με την ποιότητα της υπηρεσίας να αντικατροπτίζει τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά και την απόδοση του δικτύου και την ποιότητα εμπειρίας την επίδραση όλων αυτών των χαρακτηριστικών στην αντίληψη και στην ικανοποίηση του χρήστη, περιλαμβάνοντας το στοιχείο της υποκειμενικότητας.

Στις μέρες μας, η ποιότητα εμπειρίας ορίζεται ως «η συνολική αποδοχή μιας εφαρμογής ή μιας υπηρεσίας όπως την αντιλαμβάνεται υποκειμενικά ο τελικός χρήστης» [25]. Λαμβάνει υπ' όψη τα συνολικά χαρακτηριστικά του συστήματος που καθορίζεται από το περιβάλλον κωδικοποίησης του, τη συσκευή που χρησιμοποιεί ο χρήστης, το δίκτυο μετάδοσης και την εφαρμογή. Επηρεάζεται από την κατάσταση του χρήστη που διαμορφώνεται από την ιστορία του, το δημογραφικό του παρελθόν και τις προσδοκίες του καθώς και από το περιεχόμενο του δηλαδή τα χαρακτηριστικά της αντιληπτικότητάς του, το φύλο του αλλά και το πλαίσιο ύπαρξης του (context) σε φυσικό, κοινωνικό, πολιτισμικό και επίπεδο καθηκόντων του. Πλέον ο ορισμός της ποιότητας της υπηρεσίας είναι επικεντρωμένος στο χρήστη και στις εξατομικευμένες του ανάγκες και προσδοκίες [24].



Σχήμα 6: Η έννοια της ποιότητας εμπειρίας (πηγή [24]).

2.2.5 Σχέση ποιότητας της υπηρεσίας και ποιότητας εμπειρίας

Η αντίληψη της ποιότητας εμπειρίας όπως την αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης είναι κρίσιμη ώστε να γίνει αντιληπτό τι πραγματικά χρειάζεται ο πελάτης. Ως εκ τούτου, φαίνεται η σχέση μεταξύ QoS και QoE. Ο συνδυασμός των δύο δίνει στον πάροχο υπηρεσιών τη δυνατότητα να εντοπίσει πως να εξασφαλίσει ή και να βελτιώσει την εμπειρία των πελατών. Στο [26] αναφέρεται ότι οι βασικές διαφορές ανάμεσα στο QoS και στο QoE είναι ότι το QoS αφορά κυρίως τα χαρακτηριστικά του δικτύου ενώ το QoE την αντίληψη του χρήστη. Οι ορισμοί δείχνουν ότι το QoE ανήκει σε ένα υψηλότερο, πιο αφηρημένο «ψευδοεπίπεδο». Αυτό το ψευδοεπίπεδο αφορά την εμπειρία του τελικού χρήστη και μπορεί να είναι μια επέκταση στο επίπεδο εφαρμογής, όπως ορίζεται στο [27]. Έτσι, το QoE γίνεται αντιληπτό σαν μια επέκταση του QoS [19].

Το QoE είναι μια πολυ σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό πολυμεσικών εφαρμογών και επομένως οι σχεδιαστές επιβάλλεται να λάβουν υπ όψιν τους όχι μόνο τις μετρικές του QoS (όπως καθυστέρηση, η ευκρίνεια της εικόνας και άλλα) αλλά και την υποκειμενικότητα των χτηστών. Δηλαδή χρειάζεται να αναρωτηθούν εάν το QoS που παρέχει η πολυμεσική εφαρμογή εξασφαλίζει ικανοποιητικό επίπεδο QoE, μιας και αυτό που ενδιαφέρει τελικά το χρήστη είναι το κατά πόσο η υπηρεσία που χρησιμοποιεί θα

ανταποκριθεί στις ανάγκες του και θα του παρέχει ευχαρίστηση. Δεν είναι εύκολο να βρεθούν αυτοί οι παράγοντες, διότι η εμπειρία έχει υποκειμενικό χαρακτήρα. Όπως αναφέρεται στο [28] «το πολιτισμικό υπόβαθρο, η κοινωνικοοικονομική κατάσταση και οι προσωπικές εμπειρίες διαμορφώνουν τον τρόπο που ένας άνθρωπος αντιδρά σε ένα προιόν». Συνεπώς, είναι δύσκολο ο προσδιορισμός των παραμέτρων που θα εξασφαλίσουν μια υπηρεσία με υψηλό δείκτη QoS και ταυτόχρονα θα παρέχουν υψηλό επίπεδο QoE στους χρήστες.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα εμπειρίας

Σ αυτή την ενότητα, θα περιγράψουμε αναλυτικά τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα εμπειρίας, όπως ορίστηκε παραπάνω. Μέσα από αυτή την περιγραφή, γίνεται φανερή η σημασία της ποιότητας εμπειρίας για το σχεδιασμό και τη λειτουργία των σύγχρονων ετερογενών ασυρμάτων δικτύων. Η ποιότητα εμπειρίας καθορίζεται τόσο από υποκειμενικούς παράγοντες που τις περισσότερες φορές είναι μη ελέγξιμοι όσο και από αντικειμενικούς παράγοντες που αφορούν κυρίως στα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Στους υποκειμενικούς παράγοντες, περιλαμβάνεται η κατάσταση του χρήστη δηλαδή τα συναισθήματα, η κοινωνική του θέση, οι προσδοκίες του. Στους αντικειμενικούς παράγοντες περιλαμβάνονται κυρίως τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας αλλά και του συστήματος, όπως τα χαρακτηριστικά του προιόντος, το είδος της υπηρεσίας, η ευρωστία του συστήματος, η εφαρμογή και το τερματικό που χρησιμοποιεί ο χρήστης. Επίσης, σημαντικό ρόλο στο επίπεδο QoE που λαμβάνει ο χρήστης παίζει η πολιτική κοστολόγησης που ακολουθεί ο πάροχος της υπηρεσίας. Τα συστατικά που συνιστούν την ποιότητα εμπειρίας του χρήστη αναλύονται παρακάτω.

2.3.1 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από το χρήστη

Η κατάσταση του χρήστη είναι θεμελιώδης παράγοντας προσδιορισμού του QoE. Κατ αρχήν, επηρεάζεται από την ηλικία, το επίπεδο εκπαίδευσης καθώς και την επαγγελματική απασχόληση του χρήστη [29]. Δεύτερον, καθορίζεται από ψυχολογικούς και κοινωνικούς παράγοντες και το περιβάλλον δραστηριοποίησης του χρήστη. Επίσης, το QoE επηρεάζεται από τα συναισθήματα, τις προηγούμενες εμπειρίες και τις προσδοκίες του χρήστη τη στιγμή που λαμβάνει μια υπηρεσία. Ακόμα, η εμπειρία του χρήστη επηρεάζεται και από τις γνώμες

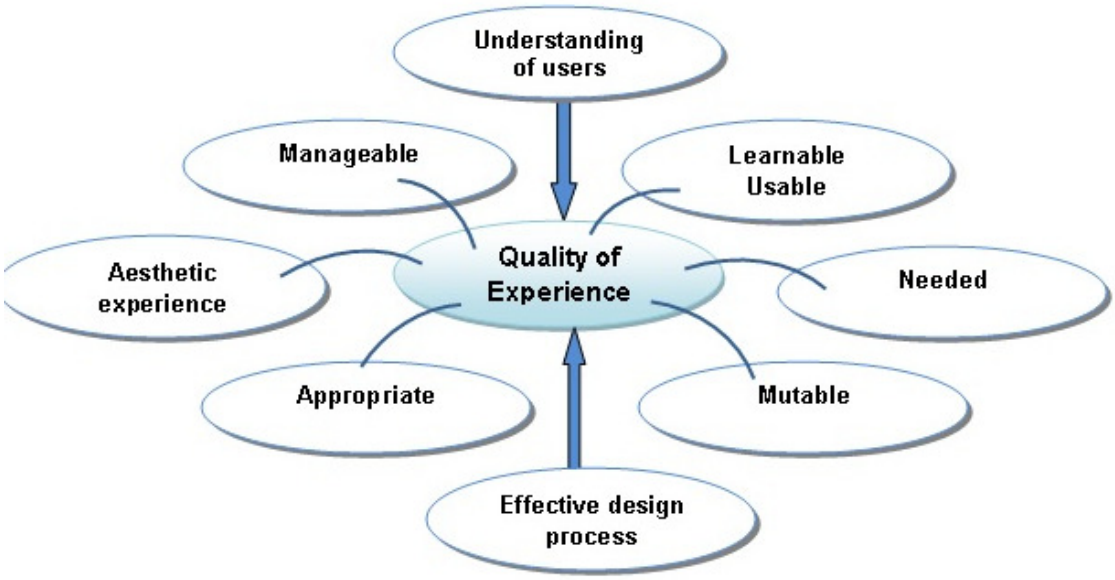
άλλων που έχουν χρησιμοποιήσει την υπηρεσία και έχουν κατά κάποιον τρόπο προδιαθέσει το χρήστη. Ως εκ τούτου, ακόμα κι αν ένας αριθμός χρηστών λάβει την ίδια υπηρεσία με τα ίδια χαρακτηριστικά ποιότητας, το επίπεδο QoE θα είναι διαφορετικό από χρήστη σε χρήστη εξ αιτίας όλων των υποκειμενικών χαρακτηριστικών που περιγράψαμε προηγουμένως [15]. Βέβαια, τα συναισθήματα, οι προτιμήσεις αλλά και οι προσδοκίες των χρηστών δεν είναι στατικά χαρακτηριστικά αλλά μεταβάλλονται με το χρόνο. Συμπερασματικά, οι προτιμήσεις των χρηστών αλλά και οι απαιτήσεις είναι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ όψιν για το σχεδιασμό μιας υπηρεσίας και δύσκολα μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια. Η πρόβλεψη αυτή είναι ακόμα πιο δύσκολη αν σκεφτούμε ότι ακόμα και εντός ενός δικτύου οι χρήστες ενδέχεται να έχουν διαφορετικές προσιμήσεις. Για παράδειγμα, οι τοπικοί συνδρομητές έχουν διαφορετικό επίπεδο ενδιαφέροντος όσον αφορά στα on line παιχνίδια και στη μεταφορά αρχείων σε σχέση με τους συνδρομητές μιας επιχείρησης.

2.3.2 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και το περιεχόμενο της υπηρεσίας

Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προιόντος ή της υπηρεσίας που χρησιμοποιεί ο χρήστης [12]. Αυτά τα χαρακτηριστικά απεικονίζονται στο σχήμα 7 και περιλαμβάνουν τα εξής:

- Το βαθμό κατανόησης του προιόντος, δηλαδή το κατά πόσο οι σχεδιαστές δημιούργησαν ένα προιόν που είναι κατανοητό προς το χρήστη και ανταποκρίνεται στο περιβάλλον του.
- Τη διαδικασία αποτελεσματικού σχεδιασμού, δηλαδή τη μεθοδολογία του σχεδιασμού προκειμένου το προιόν να λειτουργεί αποδοτικά και να ικανοποιήσει τις ανάγκες των χρηστών εξασφαλίζοντάς τους την ικανοποίηση από τη χρήση του.
- Τη χρησιμότητα του προιόντος, δηλαδή αν το προιόν έχει μια σημαντική συνεισφορά σε κοινωνικό, οικονομικό ή περιβαλλοντικό επίπεδο. Η χρησιμότητα του προιόντος και η ευκολία στη χρήση του, δηλαδή πόσο εύκολο είναι για το χρήστη να χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο προιόν.
- Την καταλληλότητα του προιόντος δηλαδή πως το προιόν λύνει το πρόβλημα σε διαφορετικά επίπεδα και αν το προιόν εξυπηρετεί τους πελάτες με αποδοτικό και πρακτικό τρόπο.

- Το αισθητικό αποτέλεσμα, δηλαδή χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τα γραφικά του προιόντος, το βιομηχανικό του σχεδιασμό και την αλληλεπίδρασή του με το χρήστη. Περιλαμβάνει ακόμα και το κατά πόσο συμβαδίζει με τις τρέχουσες τεχνολογίες.
- Την ευκολία στη διαχείριση και την επεκτασιμότητά του.
- Την ευμεταβλητότητά του ανάλογα με το αν απαιτείται ή όχι και το κατά πόσο το προιόν προσαρμόζει τη λειτουργία του στις ανάγκες του χρήστη.



Σχήμα 7: Τα χαρακτηριστικά του προιόντος που επηρεάζουν την ποιότητα εμπειρίας (πηγή [18]).

2.3.3 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας

Στο Διαδίκτυο τίθεται σε διαθεσιμότητα μια τεράστια ποικιλία εφαρμογών και υπηρεσιών. Τα δίκτυα επόμενης γενιάς (NGN- Next Generation Networks) θα παρέχουν όλες αυτές τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται η πλοήγηση στο Διαδίκτυο (web browsing), το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail), ηλεκτρονικές υπηρεσίες εκπαίδευσης (e-learning), τραπεζικές υπηρεσίες (e-banking), παιχνίδια (online gaming), εφαρμογές p2p (δεδομένων, φωνής και βίντεο), τηλεφωνία, τηλεσυνδιαλέξεις, υπηρεσίες ράδιο, υπηρεσίες Video on Demand (VoD), και πολλές άλλες. Επίσης, σαν τύποι εφαρμογών Internet θεωρούνται τα ιδιωτικά εικονικά δίκτυα (Virtual Private Networks-VPNs) και τα προσωπικά δίκτυα (Personal Networks- PNs) [29]. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι διαφορετικοί

τύποι υπηρεσιών έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις από το δίκτυο και κατά συνέπεια, διαφορετική επίδραση στο QoE του χρήστη. Καθώς ο τύπος της υπηρεσίας ή της εφαρμογής παίζει σημανικό ρόλο στο QoE του χρήστη, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ο όρος «τύπος της υπηρεσίας» (Class of Service). Ο επίσημος ορισμός που έχει δώσει ο τομέας ITU-T είναι «τα χαρακτηριστικά μιας υπηρεσίας όπως περιγράφονται από την ταυτότητα της υπηρεσίας (service identity), το εικονικό δίκτυο (virtual network), τις απαιτήσεις από την ικανότητα της σύνδεσης (link capability requirements), τις παραμέτρους που ορίζουν το κατώφλι της κίνησης (threshold) και της ποιότητας της υπηρεσίας» [30]. Η IETF ορίζει το είδος της υπηρεσίας ως «οι ορισμοί των παραμέτρων και των σημασιολογιών ενός συγκεκριμένου τύπου ποιότητας της υπηρεσίας» [3] .

Οι διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες ασκούν διαφορετική επίδραση στο QoE που λαμβάνει ο χρήστης [29]. Κατ αρχήν, από την πλευρά του χρήστη, κάθε εφαρμογή ή κάθε υπηρεσία έχει διαφορετική σημασία για αυτόν. Δεύτερον, οι διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών και εφαρμογών έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τις παραμέτρους ποιότητας που παρέχει το δίκτυο. Συνήθως κατηγοριοποιούνται με βάση τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης, την ανεκτικότητα σε καθυστέρηση (tolerance to delay), το τρέμουλο, την απώλεια πακέτων και στο βαθμό που επιδρούν αυτές οι παραμέτροι στο επίπεδο του QoE. Μια συνήθης κατηγοριοποίηση των εφαρμογών έχει ως εξής: α) ελαστικές μη αλληλεπιδραστικές (elastic non-interactive) όπως κατέβασμα αρχείων (file download), ηλεκτρονικά μηνύματα(e-mail), β) ελαστικές αλληλεπιδραστικές (elastic interactive) όπως πλοήγηση ιστού (web browsing), γ) μη ελαστικές μη αλληλεπιδραστικές (non-elastic non-interactive) όπως ζωντανή τηλεόραση (live TV), ράδιο, βιντεοπαραγγελία (video on demand-VoD), δ) μη ελαστικές αλληλεπιδραστικές (non-elastic interactive) όπως τηλεφωνία, Voice over IP (VoIP), συνδιάλεξη μέσω βίντεο (video conference), online παιχνίδια [15]. Μια γενικότερη κατηγοριοποίηση των εφαρμογών που προτείνει ο τομέας ITU-T είναι σε εφαρμογές ήχου, βίντεο και δεδομένων [31]. Οι εφαρμογές που ανήκουν σε μία κατηγορία έχουν συχνά κοινά χαρακτηριστικά, συγκεκριμένες απαιτήσεις από το δίκτυο και παρόμοια ευαισθησία σε παραμέτρους ποιότητας της υπηρεσίας. Για παράδειγμα, οι φωνητικές υπηρεσίες παρουσιάζουν μηδαμινή ανεκτικότητα στις καθυστερήσεις και στο τρέμουλο. Αντίστοιχα, οι υπηρεσίες βίντεο παρουσιάζουν ευαισθησία τόσο στην απώλεια πακέτων όσο και στις καθυστερήσεις και αυτή τους η ευαισθησία εξαρτάται από την ποιότητα του βίντεο, την ευκρίνεια της εικόνας (resolution) και την κωδικοποίηση του (codec). Όσον αφορά στις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, αυτές σχετίζονται με τη μέθοδο συμπίεσης και την ανάλυση του

βίντεο. Μάλιστα, οι νέες αναδυόμενες εφαρμογές όπως τα τρισδιάστατα βίντεο (3D video) επιβάλλουν νέες αυξημένες απαιτήσεις. Βέβαια, ακόμα και δυο εφαρμογές που ανήκουν στην ίδια κατηγορία έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε παραμέτρους ποιότητας από το δίκτυο. Για παράδειγμα, στην κατηγορία υπηρεσιών βίντεο ανήκουν τόσο οι υπηρεσίες τηλεόρασης όσο και οι συνδιαλέξεις μέσω βίντεο. Όμως, οι χρήστες που βλέπουν τηλεόραση έχουν πολύ μεγαλύτερες απαιτήσεις όσον αφορά την ευκρίνεια της εικόνας, το ρυθμό μετάδοσης και τις καθυστερήσεις από τους συμμετέχοντες μιας βιντεο-συνδιάλεξης [15]. Τρίτον, κάθε εφαρμογή χρησιμοποιεί τις δικές της παραμέτρους για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου ποιότητας που παρέχει [29]. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να εκφραστούν είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά. Συνήθως, οι παράμετροι ενός είδους υπηρεσίας ή εφαρμογής δεν ορίζονται αυστηρά αλλά κυμαίνονται εντός κάποιων ορίων (bounded). Για παράδειγμα, η ευκρίνεια της εικόνας, ο ρυθμός πλαισίων, το χρώμα και το θέμα κωδικοποίησης είναι τυπικές παράμετροι για τις εφαρμογές βίντεο. Η ρυθμαπόδοση και ο χρόνος ανάκτησης των html αρχείων είναι βασικές παράμετροι για τις εφαρμογές πρόσβασης του ιστού (web access).

2.3.4 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από το τερματικό που χρησιμοποιεί ο χρήστης

Στις μέρες μας, υπάρχει μεγάλη ποικιλία συσκευών που μπορούν να φιλοξενήσουν μια εφαρμογή. Θα επικεντρωθούμε κυρίως σε εφαρμογές βίντεο καθώς είναι οι πιο απαιτητικές εφαρμογές σε επίπεδο εξοπλισμού. Για παράδειγμα, για μια εφαρμογή βίντεο, η συσκευή μπορεί να είναι ένα κινητό τηλέφωνο, ένας υπολογιστής τσέπης (PDA) , ένας φορητός ή επιτραπέζιος υπολογιστής, μια τηλεόραση. Η επεξεργασία του μέσου, οι δυνατότητες του όπως η ευκρίνεια της εικόνας, το χρώμα, το μέγεθος και η φωτεινότητα της οθόνης, η κωδικοποίηση, το βάθος των χρωμάτων, ο χώρος αποθήκευσης, το μέγεθος της μνήμης, η υπολογιστική ισχύς, η ενέργεια που καταναλώνουν και η ευαισθησία του δέκτη διαφέρουν από συσκευή σε συσκευή. Ο τερματικός εξοπλισμός (TE-terminal equipment) επιδρά στο QoE του χρήστη με τρεις διαφορετικούς τρόπους [29]. Πρώτον, εξ αιτίας της διαφορετικής επεξεργασίας και της διαφορετικής χωρητικότητας αποθήκευσης των συσκευών, οι χρήστες που έχουν καλύτερες συσκευές έχουν υψηλότερο QoE ακόμα και εάν η δικτυακή υπηρεσία που τους παρέχεται έχει το ίδιο επίπεδο ποιότητας. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε δύο πελάτη που χρησιμοποιούν μια εφαρμογή VoD ή live TV. Ο ένας λαμβάνει αυτή την υπηρεσία στο σπίτι, σε μια μεγάλη οθόνη με υψηλή ευκρίνεια. Ο άλλος επιθυμεί να λάβει την ίδια υπηρεσία ενώ ταξιδεύει στο κινητό του τηλέφωνο. Ωστόσο, η ευκρίνεια και το

βάθος χρωμάτων μιας οθόνης ενός κινητού τηλεφώνου δεν είναι δυνατό να είναι ίδια με μιας τηλεόρασης. Αυτό φυσικά οφείλεται στο ότι οι υπολογιστές τσέπης και τα κινητά τηλέφωνα δεν έχουν αρκετούς υπολογιστικούς πόρους αλλά ακόμα και αν υπήρχε η δυνατότητα, θα ήταν σπατάλη των δικτυακών πόρων [15]. Συνεπώς, ο πάροχος της υπηρεσίας πρέπει να προσφέρει την ίδια ταινία σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας προσαρμοσμένα στην κάθε συσκευή. Παραδείγματα λύσεων σ' αυτό το πρόβλημα αποτελούν το MDC (Multiple Description Coding) και το SVC (Scalable Video Coding) [15]. Και οι δύο τεχνικές μεταβάλλουν δυναμικά το ρυθμό πλαισίων και την ανάλυση του βίντεο με σκοπό τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη. Δεύτερον, οι χρήστες με καλύτερες συσκευές απαιτούν από το δίκτυο καλύτερη ποιότητα στην υπηρεσία τους. Για παράδειγμα, οι χρήστες μιας τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας έχουν μεγαλύτερες προσδοκίες ποιότητας και πιθανόν επιθυμούν υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και χαμηλότερη απώλεια δεδομένων στη μετάδοση του σήματος [29]. Τρίτον,το QoE του χρήστη εξαρτάται και από την απόδοση της τερματικής συσκευής, για παράδειγμα από την ενέργεια που καταναλώνει ένα κινητό τηλέφωνο ή ένας υπολογιστής τσέπης.

Λόγω της ετερογένειας των συσκευών χρειάζεται να βρεθούν λύσεις για την πολυεκπομπή βίντεο. Οι λύσεις αυτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: την επαναλαμβανόμενη ροή, τη συσσωρευτική διαστρωμάτωση και τη μη συσσωρευτική διαστρωμάτωση [15]. Στην επαναλαμβανόμενη ροή, έχουμε ταυτόχρονη πολυεκπομπή διαφορετικών ροών σε διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων. Στη συσσωρευτική και μη συσσωρευτική διαστρωμάτωση, υπάρχει μόνο μία ροή πολυεκπομπής αλλά το βίντεο κωδικοποιείται σε ένα ή περισσότερα στρώματα. Στη συσσωρευτική διαστρωμάτωση, το βίντεο κωδικοποιείται σε ένα βασικό στρώμα που είναι ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα και σε άλλο ένα ή περισσότερα βελτιωτικά στρώματα που αποκωδικοποιούνται συσσωρευτικά ενώ στη μη συσσωρευτική το βίντεο κωδικοποιείται σε δύο ή περισσότερα στρώματα που είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Συμπερασματικά, απαιτούνται βελτιωμένα και ισχυρότερα τερματικά για να ανταποκριθούν στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των εφαρμογών και στις προσδοκίες του χρήστη ως προς την κατανάλωση ενέργειας, την ισχύ λειτουργίας, την ευκρίνεια της οθόνης και τη δυνατότητα αποθήκευσης.

2.3.5 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από την ευρωστία του συστήματος

Η ευρωστία του συστήματος αναφέρεται κυρίως στην επιβιωσιμότητα του δικτύου. Περιλαμβάνει δηλαδή, το χρόνο ανάκτησης μετά από μια ανεπιτυχή σύνδεση, τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας καθώς και την πιθανότητα που έχει μια υπηρεσία να παραμένει λειτουργική για μεγάλο χρονικό διάστημα [15]. Παραδοσιακά, η διαθεσιμότητα του δικτύου γίνεται αντιληπτή μέσα από τις παραμέτρους ποιότητας του συστήματος. Να σημειωθεί ότι η αποτυχία μιας σύνδεσης δε συνδέεται μόνο με την αποτυχία του εξοπλισμού του παρόχου. Μια υπηρεσία ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμη εξ αιτίας για παράδειγμα υψηλής συμφόρησης σε ορισμένα τμήματα του δικτύου. Επίσης, ακόμα και η αποτυχία σε μία σύνδεση που λαμβάνει χώρα σε ένα μέρος του εξοπλισμού που δεν περιλαμβάνεται στην κίνηση της υπηρεσίας, ενδέχεται να επηρεάσει τη διαθεσιμότητά της.

Προκειμένου να οριστεί μια εγγύηση διαθεσιμότητας του δικτύου, ορίζεται ένα συμφωνητικό παροχής υπηρεσιών (Service Level Agreement-SLA) μεταξύ του παρόχου και του πελάτη. Συνήθως σε αυτό ορίζεται ότι το δίκτυο θα είναι διαθέσιμο και λειτουργικό για το 99.99% του χρόνου. Όμως, αυτό το ποσοστό έχει προκύψει κατόπιν μακροσκελών μετρήσεων, οπότε σε βραχύχρονες περιόδους δεν είναι αντιπροσωπευτικό της διαθεσιμότητας του δικτύου και επομένως δεν είναι ικανοποιητικό για το χρήστη. Γι αυτό το λόγο, απαιτούνται παράμετροι που δίνουν σαφέστερη εικόνα της διαθεσιμότητας του δικτύου, όπως για παράδειγμα η μέγιστη διάρκεια που μια σύνδεση δεν είναι επιτυχής αλλά και ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο ανεπιτυχών συνδέσεων. Γενικότερα, η αξιοπιστία μιας σύνδεσης συνδέεται με παραμέτρους όπως η συνοχή (continuity), ο χρόνος μη διαθεσιμότητας (downtime) και η διαθεσιμότητα (availability). Επίσης, άλλα θέματα που απασχολούν τον πάροχο προκύπτουν όταν για παράδειγμα αποτύχει η σύνδεση του δικτύου και αντ αυτού εξασφαλιστεί από ένα εναλλακτικό μονοπάτι ανάκτησης (recovery path) [15]. Ενδιαφέρει αν αυτό το μονοπάτι ανταποκριθεί στο βαθμό και στην ποιότητα της υπηρεσίας του προηγούμενου και αν και κατά πόσο το ελαττωματικό μονοπάτι επηρεάσει τα υπόλοιπα μέρη του δικτύου λόγω, παραδείγματος χάριν, συμφόρησης. Επίσης ενδιαφέρει και η ποσότητα της κίνησης που χάνεται κατά τη διάρκεια μιας αποτυχημένης σύνδεσης. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ευρωστία του συστήματος είναι η ανθεκτικότητα στις πολλαπλές και συχνές αποτυχίες, η δυνατότητα κάλυψης μιας αποτυχίας καθώς και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το σενάριο ανάκτησης και τις υπόλοιπες

λειτουργίες όπως η επεκτασιμότητα, η ευελιξία, οι απαιτήσεις παραμετροποίησης αλλά και το φορτίο που απαιτεί το δίκτυο.

Έχουν αναπτυχθεί ξεχωριστοί μηχανισμοί για την παροχή ευρωστίας σε ένα δίκτυο. Αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια [15]. Για παράδειγμα, ενδιαφέρει αν το μονοπάτι ανάκτησης υπολογίζεται από πριν ή όχι καθώς επίσης και ο τρόπος χρήσης των πόρων ανάκτησης δηλαδή αν θα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για ανάκτηση (dedicated) ή αν θα χρησιμοποιούνται και σε άλλα μέρη του δικτύου (shared) ή για το αν θα χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι πόροι του δικτύου σε περίπτωση ανάκτησης. Επίσης, οι μηχανισμοί ανάκτησης ταξινομούνται με βάση το πεδίο δράσης της διαδικασίας ανάκτησης δηλαδή σε πόσα επίπεδα και σε πόσους τομείς λαμβάνει χώρα.

Η εξασφάλιση ποιότητας της ευρωστίας επηρεάζει το βαθμό και την ποιότητα της υπηρεσίας και εντέλει το πως ο χρήστης αντιλαμβάνεται την υπηρεσία του, δηλαδή την ποιότητα εμπειρίας. Η απουσία μηχανισμών ανάκτησης γίνεται αντιληπτή από διακοπές των συνδέσεων και άρα έχουν άμεση επίδραση στην εμπειρία του χρήστη. Αντίστοιχα, αργοί μηχανισμοί ανάκτησης ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την εμπειρία του χρήστη κυρίως όσον αφορά εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Από την άλλη, ενδέχεται ταχείς μηχανισμοί ανάκτησης από διάσπαρτους πόρους να προκαλέσουν συμφόρηση σε μερικά μέρη του δικτύου καθώς θα απαιτήσουν πολλούς πόρους, καθυστερήσεις σε άλλα μέρη, προσωρινή αταξία στη ροή μετάδοσης των δεδομένων ή και αλλαγές στις παραμέτρους καθυστερήσεων κατά μήκος των μονοπατιών. Συνεπώς, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων σε ποιότητα εμπειρίας αλλά και της αυξανόμενης ζήτησης εφαρμογών πραγματικού χρόνου χρειάζονται αποτελεσματικοί μηχανισμοί που να εξασφαλίζουν ευρωστία στο δίκτυο.

Συμπερασματικά, η παροχή ευρωστίας στα μελλοντικά διαλειτουργικά δίκτυα θεωρείται ένα σημαντικό πεδίο μελέτης προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλό επίπεδο QoE στους χρήστες. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται η ανάπτυξη συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων τομέων του δικτύου αλλά και η θέσπιση συγκεκριμένων στόχων ευρωστίας.

2.3.6 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από το βαθμό εξυπηρέτησης του χρήστη

Ο βαθμός εξυπηρέτησης περιλαμβάνει οτιδήποτε συμβαίνει κατά την έναρξη (setup),την απόλυση (release) και τη συντήρηση (maintenance) μιας σύνδεσης [15]. Οι βασικές

παράμετροι του είναι η καθυστέρηση για την έναρξη της κλήσης, η πιθανότητα αποτυχίας έναρξης της κλήσης, η καθυστέρηση στην επιβεβαίωση γνησιότητας (authentication), η πιθανότητα ξαφνικής διακοπής της σύνδεσης (εξαναγκασμένης ή απρόβλεπτης). Εάν θεωρήσουμε μηχανισμούς ελέγχου εισόδου, στα δίκτυα επόμενης γενιάς για παράδειγμα, μια παράμετρος του βαθμού εξυπηρέτησης θα μπορούσε να είναι η πιθανότητα απόρριψης της αίτησης (request rejection propability). Επίσης, στα ασύρματα κινητά δίκτυα, η πιθανότητα κατάρρευσης μιας σύνδεσης λόγω ανεπιτυχούς μεταπομπής είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το βαθμό εξυπηρέτησης του χρήστη καθώς και την εμπειρία του.

Όσον αφορά στη μεταπομπή, είναι φανερό ότι στα σύγχρονα δίκτυα οι χρήστες έχουν την απαίτηση να λαμβάνουν την υπηρεσία που επιθυμούν οπουδήποτε. Αυτή η απαίτηση τους μεταφράζεται σε δύο κυρίαρχα θέματα: στο να έχει ο χρήστης πρόσβαση στην αγαπημένη του υπηρεσία οπουδήποτε στον κόσμο και στο να έχει ο χρήστης συνεχόμενη πρόσβαση σε μία υπηρεσία χωρίς διακοπές και χωρίς να χειροτερεύον οι παράμετροι ποιότητας της υπηρεαίας που λαμβάνουν οι υπόλοιποι χρήστες, ενώ ο χρήστης βρίσκεται σε κίνηση [15]. Το πρώτο θέμα σημαίνει ότι ένας χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιεί τις ίδιες υπηρεσίες οπουδήποτε βρίσκεται ανεξάρτητα από το αν συνδέεται σε ένα σταθερό ή ένα κινητό δίκτυο και ανεξάρτητα από το διαχειριστή του δικτύου πρόσβασης. Συνεπώς, οι πάροχοι δικτυακών υπηρεσιών απαιτείται να παρέχουν υπηρεσίες με υψηλό δείκτη QoE ανεξάρτητα από την απόσταση, τις διάφορες διαδικτυακές τεχνολογίες και τον αριθμό των διαχειριστών που εξυπηρετούν τη συνολική περιοχή. Το δεύτερο θέμα αφορά κατά κύριο λόγο τις ασύρματες τεχνολογίες. Βέβαια, από τη μία η κάλυψη ενός ασυρμάτου δικτύου είναι περιορισμένη και από την άλλη, υπάρχουν διάφορα ασύρματα πρότυπα και οι διάφορες υπηρεσίες που διατίθενται στους χρήστες δεν υποστηρίζουν απαραίτητα όλα αυτά. Για παράδειγμα, οι χρήστες υπηρεσιών περιαγωγής θα χρειαστεί να συνδεθούν προσωρινά σε διαφορετικά δίκτυα που υποστηρίζονται από διαφορετικούς διαχειριστές. Έτσι όμως προκύπτει η ανάγκη του της ύπαρξης επιχειρηματικής συμφωνίας μεταξύ των διαχειριστών. Το κόστος όμως που προκύπτει το αναλαμβάνει ο χρήστης. Στις μέρες μας, η περιαγωγή μεταξύ των διαχειριστών εντός της ίδιας χώρας δεν είναι πάντα εφικτή, ενώ η διεθνής περιαγωγή κοστίζει ακριβά. Συνεπώς, στα μελλοντικά διαλειτουργικά δίκτυα είναι απαραίτητη η παροχή δυνατότητας μεταπομπής.

2.3.7 Η ποιότητα εμπειρίας εξαρτάται από την πολιτική κοστολόγησης

Τα μελλοντικά συστήματα τηλεπικοινωνιών προβλέπεται να ενσωματώσουν ποικίλες δικτυακές τεχνολογίες ώστε να παρέχουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων και υψηλής ποιότητας με συνεχή και αδιάκοπο τρόπο. Η κοστολόγηση αποτελεί ένα από τα βασικά θέματα σε ένα ετερογενές δίκτυο που επηρεάζει καταλυτικά την ποιότητα εμπειρίας. Από μια οικονομική άποψη, η κοστολόγηση παίζει σημαντικό ρόλο στη διακίνηση οποιασδήποτε υπηρεσίας και οποιουδήποτε πόρου [32]. Ο βασικός στόχος της κοστολόγησης είναι να παρέχει οφέλη και στους πωλητές και στους αγοραστές. Συνεπώς, η κοστολόγηση πρέπει να καταστρωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε το κέρδος των παρόχων να μεγιστοποιηθεί και οι πελάτες να λαμβάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή ικανοποίηση. Στη ρύθμιση του κόστους, δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που παίζουν ρόλο: η ζήτηση από την πλευρά των χρηστών και ο ανταγωνισμός ανάμεσα στους παρόχους. Εάν η ζήτηση είναι υψηλή, οι πάροχοι μπορούν να αυξήσουν το κόστος της υπηρεσίας προκειμένου να αυξήσουν το κέρδος τους. Όσον αφορά στους παρόχους, οι πάροχοι ανταγωνίζονται μεταξύ τους προκειμένου να προσφέρουν πρόσβαση σε ασύρματες υπηρεσίες μέσα από τη ρύθμιση του κόστους. Αυτό σημαίνει μεταξύ δύο παρόμοιων υπηρεσιών, ο χρήστης θα προτιμήσει την υπηρεσία που του προσφέρεται στο χαμηλότερο κόστος. Καθώς τα σύγχρονα και τα μελλοντικά δίκτυα αφορούν ετερογενή περιβάλλοντα θα επικεντρωθούμε στη μελέτη της κοστολόγησης σε ετερογενή δίκτυα.

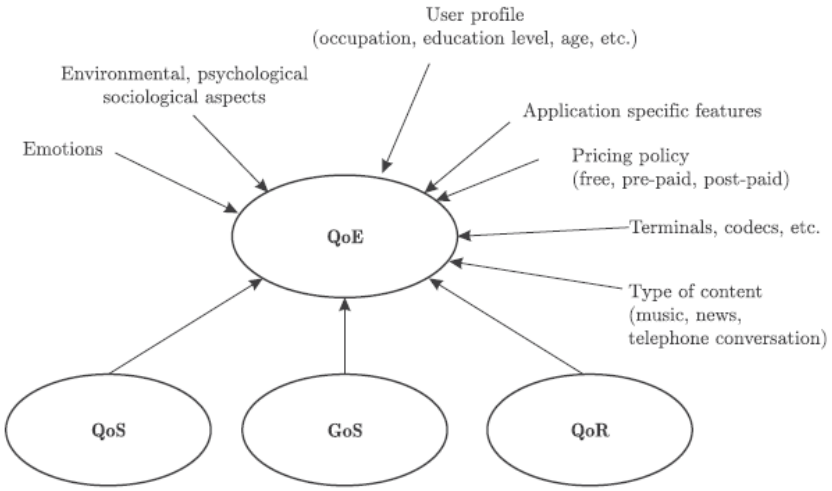
Για να καταστρωθεί μια πολιτική κοστολόγησης πρέπει να ληφθούν υπ όψιν οι παρακάτω παράγοντες [32]:

- Η ετερογένεια του δικτύου πρόσβασης: Η χωρητικότητα, η περιοχή κάλυψης, η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας και οι μηχανισμοί πρόβλεψης ποιότητας των υπηρεσιών διαφέρουν στα διάφορα συστήματα ασύρματης πρόσβασης.
- Ο ανταγωνισμός ανάμεσα στους παρόχους υπηρεσιών: τα διάφορα δίκτυα πρόσβασης εξυπηρετούνται από διαφορετικούς παρόχους, καθένας από τους οποίους επιθυμεί να μεγιστοποιήσει τα οφέλη του.
- Υποκατάσταση υπηρεσίας: Οι ασύρματες υπηρεσίες δεν μπορούν να παρέχονται από όλα τα δίκτυα πρόσβασης. Αυτό οφείλεται στο ότι μερικά κινητά τερματικά δεν είναι εξοπλισμένα με όλες τις διεπαφές που υποστηρίζονται από το σύστημα. Επίσης, λόγω εξοικονόμησης ενέργειας οι χρήστες ενδεχομένως να προτιμούν πρόσβαση μικρής εμβέλειας.

- Κάθετη μεταπομπή: Ενδέχεται να υπάρχει μεταπομπή ενός κινητού χρήστη ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους δικτύων κατά τη μετακίνηση του.Αυτή η περίπτωση πρέπει να συμπεριληφθεί στην κατάστρωση της κοστολόγησης.
- Τρόπος κοστολόγησης υπηρεσιών: Ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό της πολιτικής κοστολόγησης είναι το αν η υπηρεσία θα πρέπει να παρέχεται με συνδρομή ή κατόπιν αίτησης. Στην πρώτη περίπτωση, η υπηρεσία χρεώνεται σε συνδρομητική βάση και εφαρμόζεται ενιαίο τιμολογιακό σύστημα. Σ αυτή την περίπτωση, ο συνδρομητής πληρώνει ξεχωριστά για την πρόσβασή του στο Internet και επομένως, για τις υπηρεσίες που του παρέχονται. Βέβαια, καθώς ο πελάτης πληρώνει παραπάνω χρήματα για την υπηρεσία, πρέπει να γίνεται σαφές το όφελος που απολαμβάνει. Όμως, αυτό το όφελος δεν είναι πάντα ορατό, για παράδειγμα όσον αφορά σε χρήστες ευρυζωνικής πρόσβασης. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι πελάτες δε θα αντιληφθούν κάποια αισθητή διαφορά στην υπηρεσία που τους παρέχεται και επομένως δε θα είναι πρόθυμοι να πληρώσουν παραπάνω χρήματα. Επι πλέον,οι πελάτες που σπάνια χρησιμοποιούν υπηρεσίες που απαιτούν ειδικούς μηχανισμούς ποιότητας, ενδέχεται να επιθυμούν QoS κατόπιν αίτησης ώστε να αποφύγουν να πληρώσουν για ένα προιόν το οποίο κατ'ουσίαν δε χρησιμοποιούν. Η παροχή της υπηρεσίας κατόπιν αίτησης θα πρεπε είτε να πωλείται σαν μια ξεχωριστή υπηρεσία από τον ISP (ο πελάτης πληρώνει τον πάροχο) είτε να συμπεριλαμβάνεται στην τιμή της υπηρεσίας (ο πελάτης πληρώνει τον πάροχο υπηρεσίας ο οποίος αντίστοιχα πληρώνει το δικτυακό του πάροχο για πρόβλεψη του QoS). Σε μια τέτοια περίπτωση, ο πελάτης έχει συνήθως να επιλέξει στο αν θα αγοράσει μια υπηρεσία με ή χωρίς εγγύηση ποιότητας. Εάν η διαφορά στην υπηρεσία που θα αντιληφθεί ο χρήστης δεν είναι σημαντική, οι χρήστες δε θα αγοράσουν εγγυήσεις ποιότητας και θα διαλέξουν μια φτηνότερη υπηρεσία χωρίς συγκεκριμένες εγγυήσεις QoS.
- Συμπερίληψη της αρχής της ουδετερότητας: Ένα άλλο σημαντικό θέμα αφορά στο ποιοί πρέπει να λάβουν καλύτερη υπηρεσία: αυτοί που πληρώνουν για αυτή ή αυτοί που τη χρειάζονται [15]. Η απάντηση δεν είναι αμφίδρομη λαμβάνοντας υπ όψιν την αρχή της ουδετερότητας που θέτει μια πρόκληση στην πολιτική κοστολόγησης. Μια από τις βασικές ιδέες αυτής της αρχής είναι ότι πρέπει να αποφεύγονται οι διακρίσεις στην κυκλοφορία στο διαδίκτυο στους διαφόρους χρήστες και στις διάφορες εφαρμογές. Ειδικότερα, οι διαδικτυακοί πάροχοι δεν

πρέπει να ευνοούν τους πελάτες που πληρώνουν για εγγυήσεις ποιότητας των υπηρεσιών εις βάρος των υπολοίπων. Η αρχή της ουδετερότητας προσεγγίζεται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Στην αυστηρή της προσέγγιση, απαγορεύεται οποιαδήποτε προτεραιότητα. Για παράδειγμα ,το κάθε είδους κίνηση (για παράδειγμα VoIP) θα έχει σε όλο το δίκτυο την ίδια ακριβως αντιμετώπιση, ανεξάρτητα ποιος την παρήγαγε και σε ποιον πάροχο ανήκει. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει ισότητα μεταξύ παρόχων. Στη δεύτερη προσέγγιση, οι διαδικτυακοί πάροχοι μπορούν να χρησιμοποιούν συγκεκριμένους μηχανισμούς QoS αλλά επιτρέπεται προτεραιότητα μόνο σχετικά με τον τύπο της κίνησης. Αυτά τα θέματα επηρεάζουν σημαντικά τα επιχειρηματικά μοντέλα που σχετίζονται με το την παροχή ποιότητας εμπειρίας.

Στο σχήμα 8 απεικονίζονται οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το QoE, οι οποίοι περιγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω:

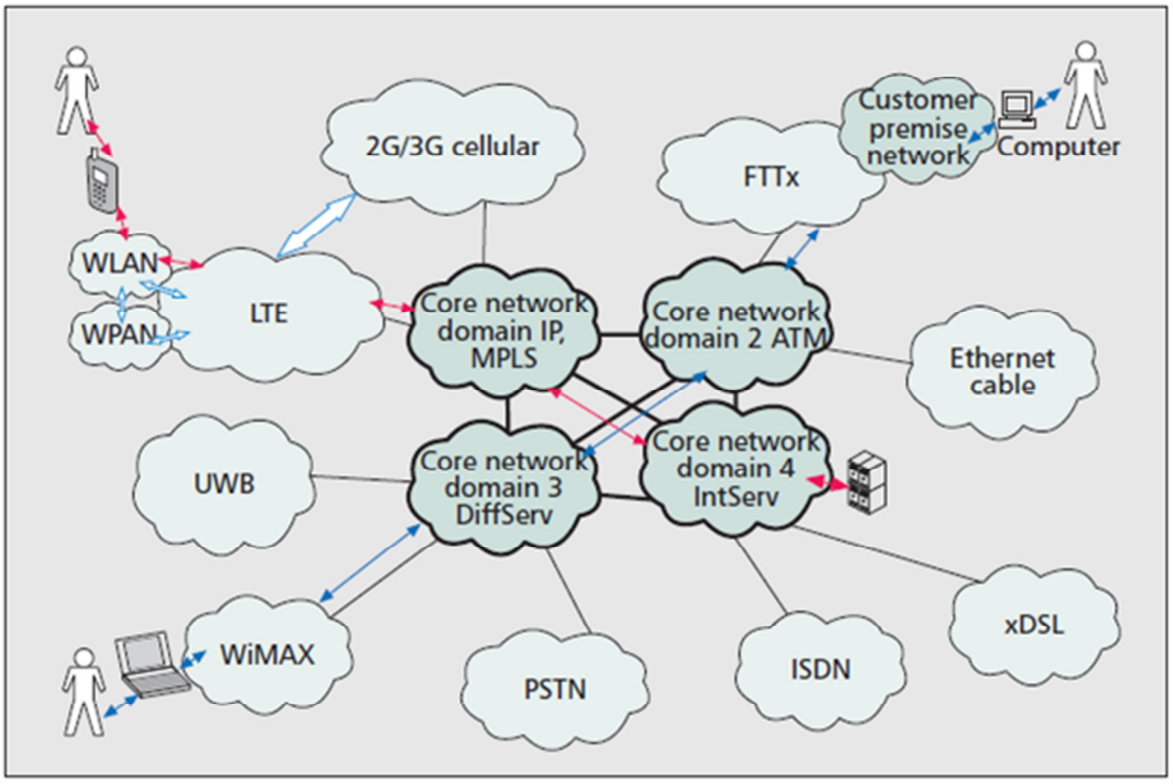


Σχήμα 8: Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα εμπειρίας (πηγή [15]).

2.4 Προκλήσεις για την εξασφάλιση της απ άκρη σε άκρη ποιότητα εμπειρίας (End to end qoe assurance)

Τα δίκτυα επόμενης γενιάς (NGN) καλλούνται να εξασφαλίσουν την απ άκρη σε άκρη ποιότητα εμπειρίας στους χρήστες (E2E QoE) [29].Το σχήμα 9 παρουσιάζει τα βασικά συστατικά ενός NGN. Ο κορμός του δικτύου αποτελείται τις εξής τεχνολογίες μεταφοράς: ATM (Asynchronous Transfer Mode), Ethernet, IP και IP/MPLS, ενώ υποστηρίζουν δύο βασικές αρχιτεκτονικές την αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ-

Differentiated Services) και την αρχιτεκτονική ενοποιημένων υπηρεσιών (IntServ- Integrated Services), όπως έχουν οριστεί από την IETF [29]. Το δίκτυο πρόσβασης παρέχει διάφορες ασύρματες και ενσύρματες τεχνολογίες για να παρέχει ποιοτικές υπηρεσίες στους χρήστες. Για την επίτευξη της απ άκρη σε άκρη επικοινωνίας ανάμεσα στους χρήστες ή ανάμεσα σε ένα χρήστη και το διαχειριστή μιας εφαρμογής απαιτείται ο συντονισμός δικτύων που ανήκουν σε διαφορετικούς διαχειριστές και χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες και έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (κατηγορία υπηρεσιών, ρυθμό δεδομένων, υποστήριξη κινητικότητας). Η ποικιλία των τομέων των παρόχων και των τεχνολογιών μεταφοράς θέτουν προκλήσεις για τη διασύνδεση των δικτύων, τη διαλειτουργικότητα, τη συνεργασία μεταξύ τους και επομένως την απ άκρη σε άκρη ποιότητα εμπειρίας. Επομένως, τα δίκτυα επόμενης γενιάς έχουν να αντιμετωπίσουν διάφορες προκλήσεις για να εξασφαλίσουν σταθερή ποιότητα εμπειρίας πραγματικού χρόνου στους χρήστες.



Σχήμα 9: Τεχνολογίες δικτύων επόμενης γενιάς (NGN) (πηγή [29]).

2.4.1.Μέτρηση της ποιότητας εμπειρίας

Για τη μέτρηση του QoE υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις η υποκειμενική και η αντικειμενική [29]. Με την υποκειμενική προσέγγιση, οι χρήστες αξιολογούν και βαθμολογούν την εμπειρία από την υπηρεσία που έλαβαν σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, προκύπτουν ακριβή αποτελέσματα μιας και το QoE αντανακλά την υποκειμενική άποψη του χρήστη για την υπηρεσία. Παρόλ αυτά, οι χρήστες συχνά δείχνουν απροθυμία να βαθμολογήσουν μια υπηρεσία και ακόμα μεγαλύτερη στο να εξηγήσουν τους λόγους για τη δυσαρέσκειά τους από την ποιότητα μιας υπηρεσίας. Από την άλλη, ενδεχομένως, οι χρήστες να επωφεληθούν από τη δυνατότητα μέτρησης και να ζητήσουν καλύτερη ποιότητα ακόμα κι αν είναι ευχαριστημένοι από την υπηρεσία που έλαβαν και έτσι να καταναλωθούν άσκοπα δικτυακοί πόροι.

Η αντικειμενική προσέγγιση βασίζεται σε αλγορίθμους και τύπους που βασίζονται στις αντικειμενικές παραμέτρους του δικτύου, των εφαρμογών, των τερματικών, του περιβάλλοντος και των χρηστών. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει το μοντέλο του QoE μέσα από συναρτήσεις του επιπέδου δικτύου και του επιπέδου εφαρμογών και βελτιώνει το μοντέλο αυτό με θεωρητικούς υπολογισμούς και ελέγχους του υποκειμενικού QoE (testing subjective QoE) [18] . Η εκμάθηση μηχανών ή η υπολογιστική νοημοσύνη που παρέχουν για παράδειγμα τα νευρωνικά δίκτυα και οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να εξάγουν συμπεράσματα για το πως ο χρήστης αντιλαμβάνεται την υπηρεσία, βασιζόμενα σε πληροφορίες QoE. Πρόσφατα, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει για τη βελτίωση της αντικειμενικής μέτρησης. Ωστόσο, δεν υπάρχει ακόμα συγκεκριμένη τεχνολογία για να χαρτογραφήσει τις αντικειμενικές παραμέτρους ποιότητας τις εμπειρίας και να αφορά όλες τις εφαρμογές, όλες τις συσκευές και όλους τους υποκειμενικούς παράγοντες.

2.4.2 Έλεγχος και ανάδραση της ποιότητας εμπειρίας

Εφόσον η ποιότητα εμπειρίας χαρακτηρίζει την αντίληψη του χρήστη ως προς μια υπηρεσία, η ακριβής απόδοση της πρέπει να μετρηθεί και να ελέγχεται στους τελικούς χρήστες και να ανατροφοδοτείται στο δίκτυο [29].

Για να ανταποκριθεί με ακρίβεια ένα NGN σε ένα χαμηλό QoE, το δίκτυο πρέπει να ενημερωθεί σε πραγματικό χρόνο για το χαμηλό QoE που έλαβαν οι χρήστες. Παρόλ αυτά, απαιτείται χρόνος ώστε η τιμή αυτή να φτάσει στο δίκτυο και στην πηγή που μπορεί να είναι

είτε ο χρήστης είτε ο εξυπηρετητής της εφαρμογής. Επομένως, οι τιμές του QoE ενδέχεται να φτάσουν αργοπορημένα εξ αιτίας των καθυστερήσεων μετάδοσης και ενδέχεται να αποπροσανατολίσουν την προσαρμογή των συναρτήσεων μεταφοράς αλλά και τη διαμόρφωση των παραμέτρων του επιπέδου εφαρμογής. Από την άλλη, οι συχνές ενημερώσεις των παραμέτρων του QoE και του QoS έχουν ως αποτέλεσμα την ακριβέστερη καταγραφή της κατάστασης του χρήστη αλλά επιφέρουν επιπλέον φορτίο στο δίκτυο.

Για να προφυλάξουμε το δίκτυο από την υποβάθμιση του QoE, είναι απαραίτητο να ελέγξουμε την κατάσταση κάθε στοιχείου του δικτύου που συμμετέχει στο απ'άκρη σε άκρη μονοπάτι (end to end path) της συνεδρίας ενός χρήστη [29]. Στοιχεία του δικτύου αποτελούν οι δρομολογητές πυρήνα (core routers),οι δρομολογητές στα άκρα του δικτύου (edge routers), οι κόμβοι πρόσβασης και τα ασύρματα κανάλια. Παρόλ αυτά, είναι δύσκολο να αντιληφθούμε την επίδραση της απόδοσης ενός δικτυακού στοιχείου στην απ άκρη σε άκρη ποιότητα εμπειρίας (End to End QoE), χωρίς να έχουμε πληροφορίες για την απόδοση των υπολοίπων στοιχείων. Γι' αυτό το λόγο, ιδεατά, πρέπει να ελέγχεται κάθε στοιχείο του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό όμως θα επιφέρει υψηλό φορτίο ελέγχου. Στη συνέχεια, πρέπει να συσχετιστούν οι αποδόσεις όλων των στοιχείων του δικτύου για να βρούμε την επίδρασή τους στο QoE. Αυτό βέβαια είναι ιδιαίτερα δύσκολο σε ένα NGN καθώς αποτελείται από κατανεμημένα και ετερογενή δίκτυα.

2.4.3 Διάγνωση της ποιότητας εμπειρίας

Όταν διαπιστώνεται χαμηλό QoE, πρέπει να εντοπιστεί η αιτία έτσι ώστε να βελτιωθεί. Παρολ αυτά, ενδεχομένως αυτό να μην είναι εύκολο για τρείς λόγους [29]. Πρώτον, εφόσον οι υποκειμενικοί παράγοντες διαμορφώνονται δυναμικά, δύσκολα μπορούν να μετρηθούν και δεν είναι εύκολο να διακρίνουμε εάν το χαμηλό επίπεδο QoE οφείλεται σε υποκειμενικούς παράγοντες ή αν η αιτία του είναι εξ αιτίας αντικειμενικών παραγόντων που σχετίζονται με το QoS. Δεύτερον, το QoE επηρεάζεται από μη τεχνικά χαρακτηριστικά των υπηρεσιών που ενδεχομένως δεν είναι διαθέσιμα προς διάγνωση. Μία ελλειπής γνώση για όλους τους παράγοντες που συντελούν στο QoE ενδέχεται να καταλήξει και σε μία διάγνωση περιορισμένης ακρίβειας. Τρίτον, η απόδοση του QoS σε επίπεδο δικτύου προσδιορίζεται από δίκτυα που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς και να μην ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, είναι δύσκολο ενδεχομένως να εντοπιστεί ποιο στοιχείο του δικτύου ευθύνεται για την υποβάθμιση του QoE.

2.4.4 Διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας

Κατ αρχήν, στα NGN συμμετέχουν όλο και περισσότεροι χρήστες που χρησιμοποιούν μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών και συσκευών [29]. Επομένως, η διαχείριση του QoE ανά χρήστη, ανά εφαρμογή και ανά τερματικό είναι απαραίτητη για την κλιματοθετησιμότητα του δικτύου. Δεύτερον, η επίτευξη ενός επιθυμητού QoE απαιτεί κάθε μετρική απόδοσης του QoS να ικανοποιεί συγκεκριμένες ποσοτικοποιημένες απαιτήσεις. Παρόλ αυτά, η εξασφάλιση ποσοτικοποιημένου QoS αποτελεί μια πρόκληση σε δίκτυα των οποίων η αρχιτεκτονική επιτρέπει ποιοτικούς ελέγχους (για παράδειγμα η αρχιτεκτονική DiffServ). Τρίτον, η επίτευξη επιθυμητού QoS απαιτεί την κατάλληλη ρύθμιση των συναρτήσεων μεταφοράς όπως για παράδειγμα κατάλληλη επιλογή δικτύου πρόσβασης, δρομολόγησης, κατάλληλο προυπολογισμό σε QoS, εκχώρηση πόρων, έλεγχο εισόδου, προγραμματισμό και έλεγχο μετάδοσης. Βέβαια όλες αυτές οι συναρτήσεις δεν είναι εύκολο να διατυπωθούν.

3 *Σχετικές εργασίες*

3.1 Εισαγωγή

Κεντρικό στόχο του σχεδιασμού οποιουδήποτε δικτύου αποτελεί η ικανοποίηση του χρήστη. Συνεπώς, πληθώρα ερευνητικών εργασιών εστίασαν στο πρόβλημα παροχής του QoE με στόχο το σχεδιασμό των υπηρεσιών με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίσουν υψηλού επιπέδου QoE στους χρήστες. Οι εργασίες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά εργασίες που επιχειρούν να παρέχουν υψηλό επίπεδο ποιότητας εμπειρίας μέσα από τη βελτιστοποίηση της απ άκρη σε άκρη ποιότητας της υπηρεσίας. Σε αυτές τις εργασίες, θεωρείται ότι το QoE εξαρτάται κυρίως από τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά ποιότητας που παρέχει το δίκτυο και συνεπώς, επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών όπως για παράδειγμα στη βέλτιστη χρήσιμοποίηση του εύρους ζώνης [34]. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει εργασίες στις οποίες οι χρήστες εκφράζουν τη γνώμη τους για την υπηρεσία που λαμβάνουν μέσα από το μέσο όρο βαθμολογιών γνώμης (MOS - Mean Opinion Score). Το MOS προκύπτει μέσα από βαθμολογημένα τεστ που δίνουν οι χρήστες εκφράζοντας το επίπεδο ευχαρίστησής τους από την υπηρεσία που λαμβάνουν. Επομένως, αυτή η κατηγορία εργασιών παρέχει QoE υψηλού επιπέδου στους χρήστες μέσα από τη βελτιστοποίηση του MOS [35, 36]. Στην Τρίτη κατηγορία, περιλαμβάνονται οι εργασίες όπου το QoE παρέχεται μέσα από τη δυναμική προσαρμογή της λειτουργίας και της απόδοσης του δικτύου σύμφωνα με αποφάσεις βελτιστοποίησης που παίρνει το ίδιο το δίκτυο, επινοώντας για παράδειγμα μεθόδους για προσαρμοσμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [37].

3.2 Παροχή ποιότητας εμπειρίας μέσα από τη βελτιστοποίηση της απ άκρη σε άκρη ποιότητας της υπηρεσίας

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν δύο εργασίες παροχής ποιότητας εμπειρίας μέσα από τη μελέτη, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της υπηρεσίας. Δηλαδή, μελετώνται τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως το εύρος ζώνης, ο χρόνος απόκρισης, η καθυστέρηση, το τρέμουλο, η απώλεια δεδομένων και η επίδρασή τους στην ποιότητα εμπειρίας που λαμβάνει ο χρήστης.

3.2.1 Σχέση QoS-QoE σε υπηρεσίες Internet και σχέση QoE με το χρόνο απόκρισης,το διαθέσιμο εύρος ζώνης και το χρόνο παράδοσης αντικειμένου

Η βιομηχανία του διαδικτύου ξοδεύει μεγάλα ποσά προκειμένου να παρέχει στους χρήστες της περισσότερους πόρους ώστε να βελτιώσει το επίπεδο ικανοποίησης τους από τις υπηρεσίες που τους παρέχει [33]. Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί η σχέση ανάμεσα στους παρεχόμενους πόρους και στην ικανοποίηση των χρηστών. Δεν είναι ξεκάθαρο κατά πόσο βελτιώνεται η εμπειρία του χρήστη με την αύξηση του εύρους ζώνης ή με τη μείωση των καθυστερήσεων (latency).

Το [33] επικεντρώνεται στη συσχέτιση των αντικειμενικών χαρακτηριστικών των υπηρεσιών που προσφέρονται στο δίκτυο με την ανθρώπινη αντίληψη για την ποιότητά τους. Συζητάται λεπτομερώς πως δύο βασικοί παράμετροι ποιότητας της υπηρεσίας και συγκεκριμένα το εύρος ζώνης παράδοσης (delivery bandwith) και η καθυστέρηση (latency) επηρεάζεουν την ανθρώπινη ικανοποίηση από μια http υπηρεσία (web browsing). Ο στόχος είναι να μετρηθεί το επίπεδο της δυσαρέσκειας του χρήστη σε σχέση με την ποιότητα του περιεχομένου ιστού (web-content), να βρεθούν οι βασικοί λόγοι που συντελούν σε αυτή τη δυσαρέσκεια και να δωθούν λύσεις λαμβάνοντας υπ όψιν πιθανούς τρόπους βελτίωσης των υπηρεσιών του διαδικτύου.

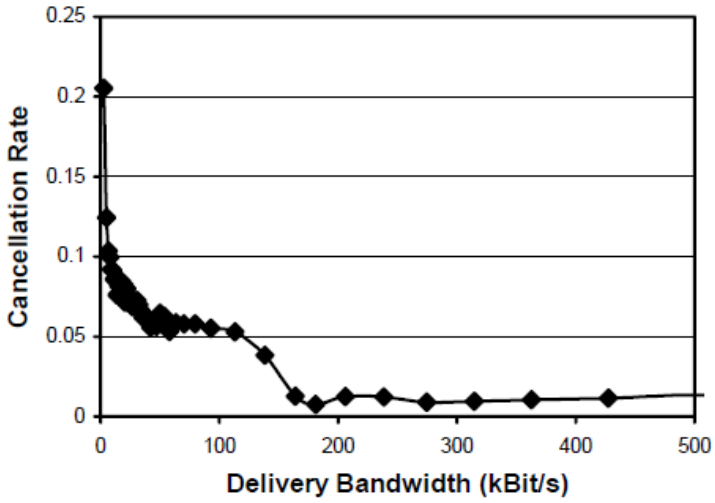
Συνεπώς ερευνάται η συμπεριφορά αμερόληπτων χρηστών κατά την πρόσβαση τους στις προσφερόμενες διαδικτυακές υπηρεσίες. Με τον όρο αμερόληπτοι εννοούν πως η συμπεριφορά τους δεν επηρεάζεται από το γεγονός ότι οι πληροφορίες από τη δράση τους συλλέγονται και αναλύονται. Για το σκοπό αυτό, εγκαταστάθηκε μια εφαρμογή και συγκεκριμένα ένας συλλέκτης δεδομένων στην πλευρά του πελάτη (client), με βασική

λειτουργία τη συλλογή και ανάλυση των πακέτων που κυκλοφορούν στις διάφορες συνδέσεις. Ειδικότερα στο HTTP πρωτόκολλο, ο συλλέκτης αυτός είναι ικανός να συγκρατεί ολόκληρη τη ροή και τα χαρακτηριστικά των ανταλλασόμενων μηνυμάτων, συμπεριλαμβάνοντας το πραγματικό μέγεθος του αντικειμένου παράδοσης, το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του πρώτου αιτήματος και του πρώτου πακέτου απόκρισης (response packet) και το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου πακέτου που φτάνει στον πελάτη. Αυτές οι παράμετροι αναλύονται και συμμετέχουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

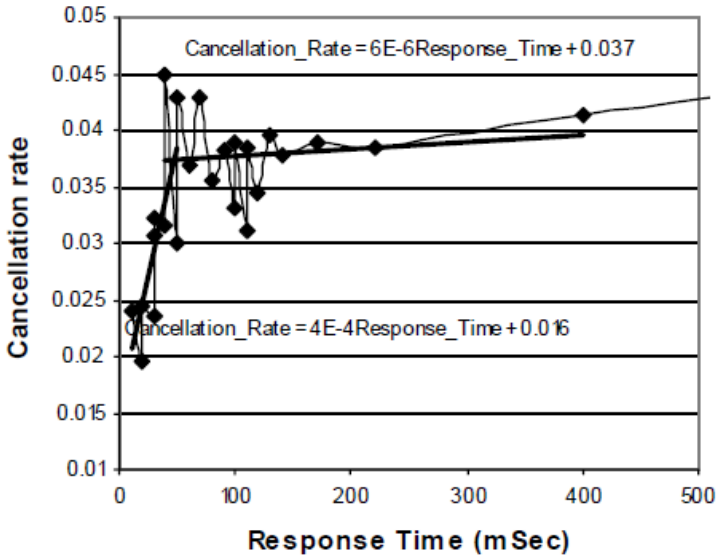
Από τα δεδομένα που αντλήθηκαν προκύπτει μια μη γραμμική σχέση ανάμεσα στο QoS και το QoE [33]. Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι το ενεργό εύρος ζώνης του δικτύου επιδρά σημαντικά στην ικανοποίηση του χρήστη αλλά κυρίως για μικρές ταχύτητες. Το σχήμα 10 δείχνει πως ο ρυθμός ακύρωσης σχετίζεται με το εύρος ζώνης. Για ταχύτητες μικρότερες από 200 kbps η βελτίωση του εύρους ζώνης μειώνει σημαντικά το ρυθμό ακύρωσης και επομένω βελτιώνει αισθητά το QoE του χρήστη. Για ταχύτητες μεγαλύτερες των 200 kbps, περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας δεν επιδρά σημαντικά στο QoE του χρήστη, καθώς ο ρυθμός ακύρωσης διατηρείται σχεδόν σταθερός. Στο σχήμα 11 απεικονίζεται ο ρυθμός ακύρωσης συναρτήσει του χρόνου απόκρισης, όπου ο χρόνος απόκρισης περιλαμβάνει την καθυστέρηση του δικτύου ανάμεσα στο σημείο συλλογής και στον HTTP εξυπηρετητή και του χρόνου επεξεργασίας του πακέτου από την πλευρά του εξυπηρετητή. Φαίνεται ότι για χρόνο απόκρισης στο διάστημα 50-500 msec, ο ρυθμός ακύρωσης εμφανίζει μικρές διακυμάνσεις και αυξάνεται από 2.3% σε 3.8%, επομένως η επίδραση των καθυστερήσεων δεν είναι σημαντική. Όμως, η μείωση του χρόνου απόκρισης κάτω από 50 msec επιφέρει σημαντική βελτίωση στο QoE του χρήστη.

Στην παραπάνω εργασία, μελετάται η επίδραση του εύρους ζώνης και των καθυστερήσεων στο επίπεδο QoE του χρήστη, μέσα από την πλοήγησή του στο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα, μετριέται ο χρόνος και η ταχύτητα παράδοσης των αντικειμένων που ζητάει ο χρήστης και πως αυτά επιδρούν στο QoE του, καθώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ακυρώσει τη σύνδεση εάν η καθυστέρηση ή η ταχύτητα παράδοσης δεν τον ικανοποιούν. Στη δική μας προσέγγιση, λαμβάνεται υπ όψιν η υποκειμενική γνώμη του χρήστη όπως και στην παραπάνω εργασία. Η διαφορά είναι ότι στο μοντέλο παροχής QoE που προτείνουμε αναφερόμαστε σε μια πολυμεσική εφαρμογή και επίσης ανάλογα με το επίπεδο ευχαρίστησης των χρηστών, παρέχουμε το επίπεδο QoE που ζητάνε σε πραγματικό χρόνο.

Επομένως, δεν εξάγονται συμπεράσματα μόνο βάσει των προτιμήσεων των χρηστών σε σχέση με την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνουν, αλλά σε πραγματικό χρόνο τους προσφέρεται η δυνατότητα να βελτιώσουν την εμπειρία τους.



Σχήμα 10: Ρυθμός ακύρωσης συναρτήσει του εύρους ζώνης παράδοσης (πηγή [33]).



Σχήμα 11: Ρυθμός ακύρωσης συναρτήσει του χρόνου απόκρισης (πηγή [33]).

3.2.2 Μέθοδος αξιολόγησης του QoE μέσα από το μοντέλο συσχέτισης QoS-QoE

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, στο [33] συσχέτισαν τις αντικειμενικές συνθήκες του δικτύου με το πως αντιλαμβάνεται ο χρήστης την υπηρεσία. Συγκεκριμένα, ασχολήθηκαν με το πως επηρεάζεται το QoE από δύο βασικές παραμέτρους, την καθυστέρηση και την ταχύτητα παράδοσης. Όμως, σε ένα δίκτυο παίζουν ρόλο και αρκετοί άλλοι παράγοντες. Στο [34] προσπαθούν να συσχετίσουν τις αντικειμενικές συνθήκες του δικτύου με το πως αντιλαμβάνεται ο χρήστης την ποιότητα της υπηρεσίας λαμβάνοντας υπ όψιν περισσότερες παραμέτρους.

Θεμελιώδης παράμετρους της ποιότητας της υπηρεσίας παίζει η χωρητικότητα κίνησης, καθώς επηρεάζει το πως ο χρήστης αντιλαμβάνεται την απόδοση της υπηρεσίας. Επομένως, οι παράμετροι QoS που λαμβάνουν υπ όψιν τους στον υπολογισμό του QoE είναι οι εξής [34]:

<u>1.Καθυστέρηση</u>

Η καθυστέρηση εκδηλώνεται με ποικίλους τρόπους. Για παράδειγμα περιλαμβάνει το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του αρχικού αιτήματος του χρήστη και της εγκατάστασης της σύνδεσης ή το χρόνο που απαιτείται για να ληφθεί μια συγκεκριμένη πληροφορία μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης. Περιλαμβάνει ακόμα και τις καθυστερήσεις στο τερματικό, στο δίκτυο και στους εξυπηρετητές .Από την πλευρά του χρήστη, η καθυστέρηση λαμβάνει υπόψιν και άλλους παράγοντες του δικτύου όπως η ρυθμαπόδοση.

<u>2.Διακύμανση της καθυστέρησης</u>

Η διακύμανση της καθυστέρησης, στη γενική περίπτωση, περιλαμβάνεται στις παραμέτρους απόδοσης της υπηρεσίας καθώς είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συστήματα δεδομένων όπου η σειρά άφιξης των πακέτων αποτελεί καταλυτικό παράγοντα στην σωστή αναπαραγωγή τους. Γι αυτό το λόγο, υπηρεσίες που δεν είναι ανεκτικές στις διακυμάνσεις στις καθυστερήσεις, λαμβάνουν μέτρα όπως η προσωρινή αποθήκευση (buffering) που βελτιώνει αισθητά το πως ο χρήστης αντιλαμβάνεται τις διακυμάνσεις στις καθυστερήσεις.

<u>3.Απώλεια πληροφορίας</u>

Η απώλεια πληροφορίας έχει άμεση επίδραση στο QoE. Σε αυτό το πλαίσιο, η απώλεια της πληροφορίας δεν περιορίζεται στις επιδράσεις της μετάδοσης λαθών (bit errots) ή της

απώλειας πακέτων. Περιλαμβάνει επίσης, την επίδραση οποιασδήποτε υποβάθμισης που εισάγεται στο δίκτυο, λόγω παραδείγματος χάριν κωδικοποίησης.

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα, η εξέυρεση μίας άμεσης σχέσης μεταξύ των προηγούμενων παραμέτρων δεν είναι εύκολο να απεικονιστεί. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κίνησης κάθε υπηρεσίας, το επίπεδο QoS που απαιτείται για να ικανοποιήσει κάθε κατηγορία QoE είναι διαφορετικό. Ωστόσο το κανονικοποιημένο σκορ του QoS της υπηρεσίας που παρέχεται, μπορεί να υπολογιστεί από την επόμενη εξίσωση που αφορά ενοποιημένα δίκτυα:

$$QoS = F\,(D, J, L, E, B, S) \tag{1}$$

Όπου οι παράμετροι είναι οι εξής: *D:* καθυστέρηση (delay), *J:* τρέμουλο (jitter), *L*: ρυθμός απώλειας (loss rate), *E*: ρυθμός λαθών (error rate), *B*: εύρος ζώνης (bandwith), *S*: ρυθμός επιτυχούς μετάδοσης σήματος (success signal rate). Σε κάθε παράμετρο αντιστοιχεί ένας συντελεστής ,ανάλογα με την υπηρεσία και τη σημασία που έχει η παράμετρος για το χρήστη. Αφού έχει υπολογιστεί το κανονικοποιημένο *QoS*, τότε το *QoE* μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$QoE(QoS) = K\{\frac{(e^{QoS-a} + e^{-QoS+a})}{(e^{QoS-a} + e^{-QoS+a} + \beta)} + 1\} \tag{2}$$

Η παράμετρος α αναπαριστά την κατηγορία QoS και εκφράζει στο επίπεδο ποιότητας που το δίκτυο πρέπει να παρέχει στο χρήστη ώστε να ανταποκριθεί στο απαιτούμενο QoE που ζητάει. Στην ουσία, εκφράζει το ελάχιστο QoE που ζητάει ο χρήστης. Η παράμετρος β είναι μια σταθερά που προσδιορίζεται από την κατηγορία της υπηρεσίας. Η παράμετρος K είναι μια κλιμακούμενη σταθερά που δείχνει την ικανοποίηση για την παρεχόμενη υπηρεσία και προκύπτει από την αντιστοίχηση του QoS με την κλίμακα του MOS.

Σχετικά με το δικό μας μοντέλο παροχής QoE, η εργασία αυτή αποτελεί τον πλέον αντικειμενικό τρόπο μέτρησης του QoE καθώς συσχετίζει το επίπεδο του QoE με τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του δικτύου, χωρίς να λαμβάνει υπ όψη τη γνώμη του χρήστη ως προς την ποιότητα της υπηρεσίας που του παρέχεται. Το QoE υπολογίζεται απλά μέσω μιας εξίσωσης, η οποία έχει προκύψει κατόπιν αντιστοίχησης των μετρικών του QoS (καθυστέρηση, τρέμουλο, εύρος ζώνης) με την κλίμακα του MOS, χωρίς όμως ο χρήστης να εκφράζει τη γνώμη του σε πραγματικό χρόνο. Στη δική μας προσέγγιση, η υποκειμενικότητα

του χρήστη παίζει το σημαντικότερο ρόλο καθώς εκείνος επιλέγει την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνει με βάση τις προτιμήσεις του. Επί πλέον, μια άλλη βασική διαφορά είναι ότι εμείς παρέχουμε QoE στους χρήστες σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τις προτιμήσεις τους ενώ στο [34] περιορίζονται μόνο στον υπολογισμό του QoE και στην αντιστοίχηση του με το QoS.

3. 3 Παροχή QoE μέσα από τη βελτιστοποίηση του MOS

Παρακάτω περιγράφουμε δύο προσεγγίσεις παροχής του QoE μέσα από τη βελτιστοποίηση πολλαπλών στρωμάτων (φυσικό στρώμα, ζεύξης και εφαρμογής). Οι δύο εργασίες που ακολουθούν αναφέρονται στη συνεργασία, στην προσαρμογή και στη βέλτιστη λειτουργία πολλαπλών στρωμάτων της στίβας των πρωτοκόλλων με σκοπό να παρέχουν υψηλό QoE στους χρήστες, χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό βέλτιστης εκχώρησης πόρων. Σαν ένδειξη της ευχαρίστησης ή της δυσαρέσκειας των χρηστών χρησιμοποιείται το MOS. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι δυο τρόποι προσέγγισης.

3.3.1 Βελτιστοποίηση ποιότητας εμπειρίας σε πολλαπλά στρώματα (cross-layer) με χρήστη του MOS

Στο [35] προτείνεται μια στρατηγική βελτιστοποίησης που αφορά πολλαπλά στρώματα του πρωτοκόλλου του OSI (cross-layer), δηλαδή το στρώμα εφαρμογής, το στρώμα ζεύξης και το φυσικό στρώμα, χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση. Το πλαίσιο που προτείνουν παρέχει αποτελεσματική εκχώρηση πόρων σε ασύρματα δίκτυα σε ποικίλες εφαρμογές που τρέχουν διαφορετικοί χρήστες, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η χρησιμότητα των πόρων και να βελτιστοποιηθεί η αντίληψη του χρήστη για το QoS που λαμβάνουν. Το πλαίσιο χρησιμοποιεί το μέσο όρο βαθμολογιών γνώμης (MOS) σαν μια μετρική για να ενοποιήσει τις διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών αλλά και να ανιχνεύσει την ικανοποίηση των χρηστών. Η αντικειμενική συνάρτηση που καλλούνται να μεγιστοποιήσουν προκύπτει σαν το μέσο όρο των MOS όλων των χρηστών που διεκδικούν τους πόρους ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος και εκφράζεται ως εξής [35] :

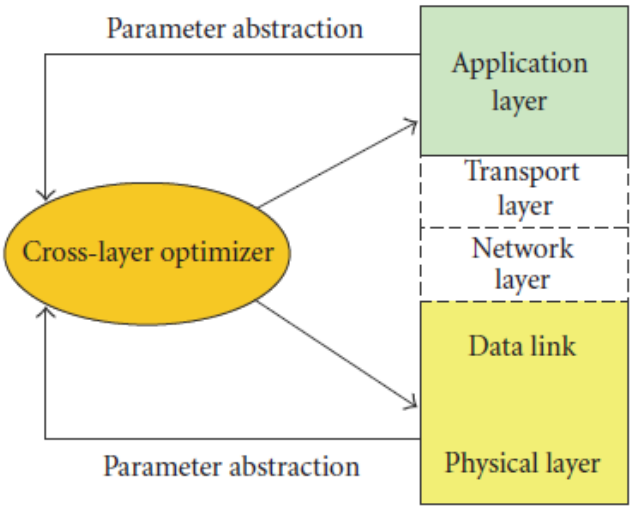
$$F(\tilde{x}) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} \lambda_k \cdot MOS_k(\tilde{x}) \tag{3}$$

όπου $F(\tilde{x})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση της πλειάδας παραμέτρων $\tilde{x} \in \tilde{X}$, $\tilde{X}$ είναι το σύνολο των πιθανών πλειάδων παραμέτρων από τα διάφορα στρώματα πρωτοκόλλων αναπαριστώντας τις διαφορετικές λειτουργίες τους και οι παράμετροι λ_k εκλέγονται έτσι ώστε να εξασφαλίσουν δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες. Η λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφράζεται ως εξής:

$$\widetilde{x_{opt}} = arg\max_{\tilde{x} \in \tilde{X}} F(\tilde{x}) \tag{4}$$

όπου $\widetilde{x_{opt}}$ είναι η πλειάδα παραμέτρων που βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Μετά την εύρεση τους, μοιράζονται στα διαφορετικά στρώματα και κάθε στρώμα αναλαμβάνει να προσαρμόσει τον τρόπο λειτουργίας του ώστε να ανταποκριθεί στις παραμέτρους.

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική του μοντέλου βελτιστοποίησης πολλαπλών στρωμάτων, οι παράμετροι που λαμβάνονται από το φυσικό και το στρώμα ζεύξης είναι ο ρυθμός μετάδοσης *R* (transmission rate) και η πιθανότητα λανθασμένου πακέτου *PEP* (packet error propability) για κάθε χρήστη και για κάθε πιθανή λειτουργία. Από το επίπεδο εφαρμογής, λαμβάνονται οι συναρτήσεις χρησιμότητας, από τις οποίες εξάγονται συμπεράσματα για τη σχέση του MOS με το PEP. Ο βελτιστοποιητής θεωρείται ότι τοποθετείται στο σταθμό βάσης, ενώ οι συναρτήσεις χρησιμότητας παράγονται στην πλευρά του πελάτη (σχήμα 12).



Σχήμα 12: Αρχιτεκτονική μοντέλου βελτιστοποίησης πολλαπλών στρωμάτων [35].

Όσον αφορά τον αλγόριθμο βέλτιστης εκχώρησης πόρων, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Αρχικά σε κάθε χρήστη εκχωρείται ο ίδιος αριθμός πόρων.
- Σε κάθε επόμενο βήμα μια μικρή ποσότητα πόρων εκχωρείται από το χρήστη με τη μικρότερη ευαισθησία στη μείωση των πόρων του σε εκείνων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο κέρδος.
- Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση.

Στο [35] προτείνεται ένα καινοτόμο μοντέλο βελτιστοποίησης που λαμβάνει χώρα σε πολλαπλά στρώματα του δικτύου και χρησιμοποιεί το MOS ως δείκτη της ικανοποίησης των χρηστών. Με την προσέγγιση που πραγματοποιείται, καθίσταται δυνατή η δυναμική βελτιστοποίηση της χρησιμότητας των πόρων και επομένως και η ικανοποίηση του χρήστη σε ένα περιβάλλον στο οποίο πολλοί χρήστες τρέχουν πολλές εφαρμογές. Και στη δική μας προσέγγιση, η βελτιστοποίηση του QoE των χρηστών αφορά πολλαπλά στρώματα του δικτύου και συγκεκριμένα το στρώμα εφαρμογής και το στρώμα ζεύξης. Επίσης, χρησιμοποιούμε συναρτήσεις χρησιμότητας και έναν αλγόριθμο βέλτιστης εκχώρησης πόρων στους χρήστες με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησής του. Η διαφορά έγκειται στο ότι το [35] χρησιμοποιεί το MOS σαν μετρική του επιπέδου ικανοποίησης των χρηστών χωρίς όμως να κάνει παροχή QoE στους χρήστες, ενώ εμείς ελέγχουμε σε πραγματικό χρόνο την ικανοποίηση των χρηστών, μέσα από μια χρονικά μεταβαλλόμενη παράμετρο που καθορίζουν οι χρήστες, και τους παρέχουμε την υπηρεσία που επιθυμούν σε πραγματικό χρόνο.

3.3.2 Βελτιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας σε πολλαπλά στρώματα(cross-layer) για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων

Στο [36] προτείνεται μια αρχιτεκτονική πολλαπλών στρωμάτων (cross layer design) για εκχώρηση πόρων σε δίκτυα πρόσβασης πακέτων με υψηλές ταχύτητες στην κάτω ζεύξη (HSDPA-High Speed Downlink Packet Access) με στόχο τη μεγιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας. Στο πλαίσιο αυτό, λαμβάνεται υπόψιν ο περιορισμός των συνολικών πόρων του συστήματος και περιοδικά επανεκχωρούνται οι πόροι με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησης του χρήστη. Συνεπώς, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσθέτει ένα εργαλείο βελτιστοποίησης σε επίπεδο λογισμικού στο υπάρχον σύστημα, χωρίς να παραβιάζεται η

διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων. Αυτό το εργαλείο βελτιστοποίησης περιοδικά λαμβάνει παραμέτρους από το στρώμα ζεύξης και το στρώμα εφαρμογής και δρα σαν εκχωρητής πόρων. Συγκεκριμένα, περιοδικά αναθεωρεί τους συνολικούς πόρους του συστήματος και κάνει μια εκτίμηση για το χρονομερίδιο (time-share) που χρειάζεται ο κάθε χρήστης για κάθε πιθανή ταχύτητα του στρώματος εφαρμογής. Αν χρειαστεί, το εργαλείο βελτιστοποίησης προτείνει επαναπροσαρμογή των ταχυτήτων των εφαρμογών. Αυτή η προσαρμογή γίνεται για δύο λόγους:

1. Οι στρατηγικές ελέγχου εισόδου (admission control) χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για να εντοπιστούν παραβιάσεις του QoS. Με τον ερχομό νέων απαιτητικών εφαρμογών, είναι σημαντικό να διατηρηθεί ένα επιθυμητό επίπεδο ικανοποίησης του χρήστη λαμβάνοντας υπ όψιν και την αποδοτικότητα του στρώματος εφαρμογής. Συνεπώς, το προτεινόμενο πλαίσιο, προσαρμόζει διαρκώς το δίκτυο και τις ταχύτητες στο στρώμα εφαρμογής ώστε να ανταποκρίνονται στις προσδοκίες του χρήστη και να εξασφαλίζουν αποτελεσματική χρήση του φάσματος των πόρων.

2. Τα δίκτυα HSDPA χαρακτηρίζονται, εξ ορισμού, από κανάλια μεταβλητών ταχυτήτων. Η ροή ενός μέσου μπορεί να τροποποιηθεί χρησιμοποιώντας είτε επανακωδικοποίηση (transcoding) είτε απόρριψη πακέτων (packet dropping). Η επανακωδικοποίηση είναι ένα ευέλικτος αλλά υπολογιστικά απαιτητικός τρόπος, ενώ η απόρριψη πακέτων οδηγεί σε χαμηλότερη πολυπλοκότητα και χειρότερη ποιότητα. Στο προτεινόμενο πλαίσιο, η προσαρμογή του στρώματος εφαρμογής γίνεται μέσω επανακωδικοποίησης, που λαμβάνει χώρα σε έναν κόμβο που βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης.

Στη συνέχεια, η εκτίμηση του QoE γίνεται (όπως και στη δική μας εργασία) με τη χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας. Σαν μέτρο των συναρτήσεων χρησιμότητας χρησιμοποιείται το MOS. Η διαφορά είναι ότι σε αυτή την περίπτωση που αναφερόμαστε σε υψηλές ταχύτητες, λόγω του μηχανισμού επαναμετάδοσης HSDPA στο στρώμα MAC, θεωρούμε ότι όλα τα πακέτα μεταδίδονται επιτυχώς και επομένως η συνάρτηση χρησιμότητας απλοποιείται σαν συνάρτηση ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και εκφράζεται ως εξής:

$$U = f(R), f: R \rightarrow MOS \tag{5}$$

Όπου το R περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς ρυθμούς δεδομένων και το MOS παίρνει τιμές από το σύνολο MOS=[1:4.5].

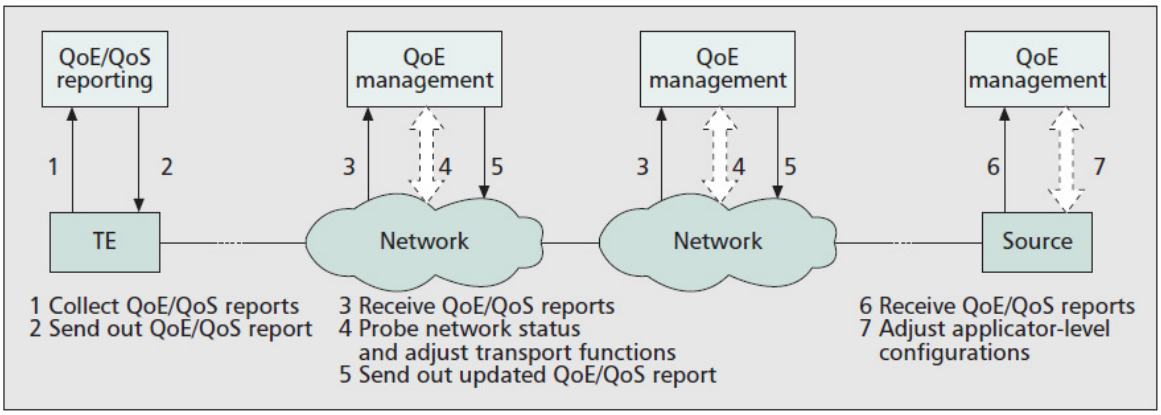
Στο [36] μελετάται το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της Ποιότητας εμπειρίας σε HSDPA κυψελωτά δίκτυα. Συγκεκριμένα προτείνεται η δυναμική προσαρμογή των απαιτήσεων των υπηρεσιών εκφρασμένων σε συναρτήσεις χρησιμότητας και άρα του ζητούμενου ρυθμού μετάδοσης με στόχο τη συνολική μείωση του φόρτου εργασίας στο δίκτυο και την εξισορρόπηση της ποιότητας εμπειρίας ανάμεσα στους χρήστες. Με χρήση ενός ευρετικού άπληστου αλγορίθμου (greedy) επιλέγεται σε κάθε χρονοσχισμή το διάνυσμα ρυθμού μετάδοσης που βελτιστοποιεί την απόδοση του δικτύου και στη συνέχεια η απόφαση μεταφέρεται στο στρώμα εφαρμογής και MAC.

Αντίθετα, στην προτεινόμενη μέθοδό μας, η αναπροσαρμογή των συναρτήσεων χρησιμότητας πραγματοποιείται ασύγχρονα από τους τελικούς χρήστες ανεξάρτητα από τον τύπο του δικτύου που ανήκουν (WLAN, κυψελωτά), ενώ μέσω ενός βέλτιστου μηχανισμού βασισμένου στην Θεωρία Μεγιστοποίησης Δικτύου το πρόβλημα ανάθεσης πόρων επιλύεται βέλτιστα και κατανεμημένα στους ετερογενείς σταθμούς βάσης του ενοποιημένου δικτύου μεγιστοποιώντας την υποκειμενική ποιότητα εμπειρίας των χρηστών.

3.4 Παροχή QoE μέσα από τη δυναμική προσαρμογή της λειτουργίας του δικτύου

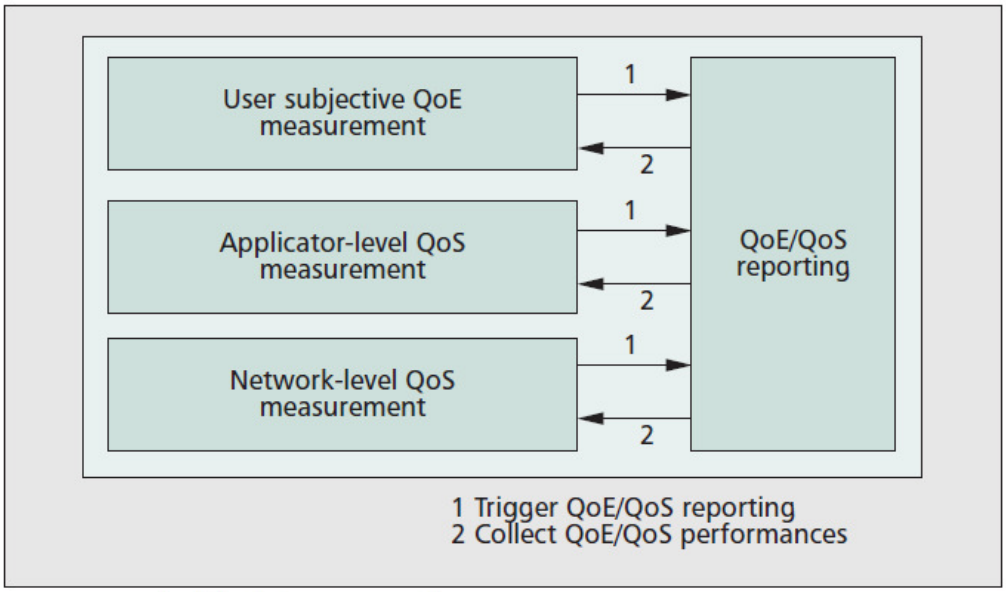
3.4.1 Μοντέλο εξασφάλισης QoE στα δίκτυα επόμενης γενιάς

Στα δίκτυα επόμενης γενιάς, οι υπηρεσίες φωνής, βίντεο και πολυμέσων θα χρειαστεί να λειτουργήσουν παράλληλα σε μια και μόνο δικτυακή πλατφόρμα, γεγονός που θα αυξήσει την πολυπλοκότητα και την ετερογένεια των δικτυακών συστημάτων. Έτσι, στο [29] προτείνεται ένα μοντέλο εξασφάλισης της απ άκρη σε άκρη ποιότητας εμπειρίας σε ένα NGN, βασισμένο σε δύο υποθέσεις. Πρώτον, οι χρήστες είναι διαθετιμένοι να χρησιμοποιήσουν συσκευές που επεξεργάζονται τις αποδόσεις των QoS και QoE τους (μέσω ειδικού λογισμικού) προκειμένου να βελτιώσουν την εμπειρία τους. Δεύτερον, οι πάροχοι ενδιαφέρονται για τη μεγιστοποίηση του QoE του χρήστη.



Σχήμα 13:Οι βασικές συναρτήσεις του συστήματος εξασφάλισης E2E QoE(πηγή [29]).

Το σχήμα 13 απεικονίζει εν συντομία το μοντέλο που προτείνεται στο [29]. Στο τερματικό (TE-terminal equipment) εγκαθίσταται ένα σύστημα αναφοράς (σχήμα 14) που συλλέγει τις παραμέτρους QoS/QoE, υπολογίζει τις αποδόσεις τους και τις αποστέλλει στα δίκτυα και στην πηγή. Συγκεκριμένα, υπολογίζει τις μετρικές του QoS στο στρώμα εφαρμογής και στο στρώμα δικτύου, μέσα από την ανάλυση και την επεξεργασία των πακέτων που λαμβάνονται. Η μέτρηση του υποκειμενικού QoE γίνεται θεωρώντας ότι σε περίπτωση που οι χρήστες δεν είναι ικανοποιημένοι από την υπηρεσία που τους παρέχεται, θα αλληλεπιδράσουν με το τερματικό που χρησιμοποιούν και επομένως, αυτή τους η αλληλεπίδραση θα καταγραφεί από το σύστημα αναφοράς.

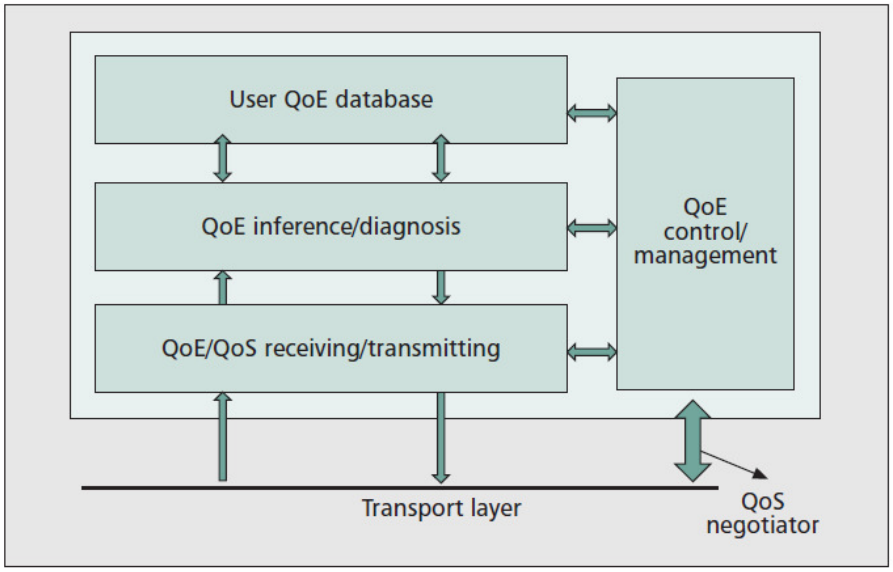


Σχήμα 14: Τμήμα αναφοράς QoS/QoE (πηγή [29]).

Στα δίκτυα και στην πηγή εγκαθίσταται ένα σύστημα διαχείρισης QoE/QoS (σχήμα) το οποίο συλλέγει τις παραμέτρους από το σύστημα αναφοράς, τις αναλύει τοπικά και ρυθμίζει τις συναρτήσεις κίνησης ή επαναρυθμίζει τις παραμέτρους του στρώματος εφαρμογής με σκοπό τη μεγιστοποίηση του QoE των χρηστών. Το σύστημα διαχείρισης (σχήμα 15) αποτελείται από μια βάση δεδομένων, ένα τμήμα συλλογής πληροφοριών QoE/QoS, ένα τμήμα διάγνωσης του επιπέδου QoE και ένα τμήμα ελέγχου QoE. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει τις αποδεκτές τιμές των μετρικών του QoS (καθυστέρηση, τρέμουλο, ρυθμαπόδοση, ευκρίνεια εικόνας και άλλες) ώστε η υπηρεσία να θεωρείται ότι ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των χρηστών. Το τμήμα διάγνωσης του επιπέδου QoE αναλαμβάνει τον εντοπισμό του παράγοντα που οφείλεται για το ενδεχόμενο χαμηλό επίπεδο QoE των χρηστών, με τη βοήθεια των αποδεκτών τιμών QoS που βρίσκονται στη βάση δεδομένων. Στη συνέχεια, το τμήμα συλλογής πληροφοριών QoS/QoE λαμβάνει τις πληροφορίες και τις αποστέλλει στο σύστημα ελέγχου QoE. Το τμήμα ελέγχου QoE προσδιορίζει το επιθυμητό QoE των χρηστών, επικοινωνεί με το τμήμα διάγνωσης και αναλαμβάνει να προσαρμόσει τις συναρτήσεις κίνησης του στρώματος μεταφοράς (NACF – Network Attachment Control Function και RACF- Resource Attachment Control Function) ώστε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των χρηστών και να μεγιστοποιήσει το QoE τους. Οι νέες παράμετροι των συναρτήσεων κίνησης αποστέλλονται από το τμήμα συλλογής πληροφοριών στο υπόλοιπο δίκτυο. Θεωρητικά, το συνολικό σύστημα μετάδοσης δεδομένων θεωρείται ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, η έξοδος του οποίου είναι το QoE του χρήστη και οι παράμετροι που σχετίζονται με την πηγή και το δίκτυο είναι οι μεταβλητές ελέγχου. Συμπερασματικά, εφόσον κάθε δίκτυο ανεξάρτητα μεγιστοποιεί τοπικά το QoE των χρηστών του, το σύστημα απ άκρη σε άκρη εξασφάλισης του QoE μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε NGN, το οποίο εκ φύσεως είναι κατανεμημένο και ετερογενές.

Σε σχέση με το δικό μας μοντέλο, το [29] προτείνει έναν τρόπο διάγνωσης και διαχείρισης του QoE σε ετερογενή δίκτυα. Η διαφορά έγκειται στο ότι στη δική μας προσέγγιση, ο χρήστης δηλώνει άμεσα το επίπεδο ικανοποίησής του από την υπηρεσία που λαμβάνει ενώ στο [29], τα συμπεράσματα για την χρησιμότητα ή τη δυσαρέσκειά του εξάγονται από ενδεχόμενη αλληλεπίδρασή του με το τερματικό που χρησιμοποιεί και σχετίζεται άμεσα με το QoS καθώς γίνεται σύγκριση των τιμών των μετρικών του QoS με τις αποδεκτές που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων που περιγράψαμε παραπάνω. Στη δική μας προσέγγιση, λαμβάνουμε υπ όψιν ότι το QoE εξαρτάται και από εξωγενείς,

υποκειμενικούς παράγοντες και επομένως, ο κάθε χρήστη κάθε στιγμή έχει τη δυνατότητα να εκφράσει τις προτιμήσεις του και να λάβει αντίστοιχα το επιθυμητό QoE.



Σχήμα 15: Τμήμα διαχείρισης QoE σε δίκτυα επόμενης γενιάς (πηγή [29]).

3.4.2 Μοντέλο βελτιστοποίησης της χρησιμότητας της υπηρεσίας βασισμένο στις προτιμήσεις του χρήστη σε IP δίκτυα

Η αυτοβελτιστοποίηση είναι μια σημαντική απαίτηση από τα παρόντα και τα μελλοντικά δίκτυα. Στην πραγματικότητα, εξ αιτίας της αυξανόμενης πολυπλοκότητας, τα δίκτυα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να αυτοδιαχειρίζονται. Για την επιτευξη αυτού του σκοπού, χρειάζονται κάποια αναλυτικά μοντέλα για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του δικτύου και να αξιολογήσουν τη βέλτιστη κατάστασή του. Στην περίπτωση των IP δικτύων, η ικανότητα βελτιστοποίησης συνίσταται στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας των πόρων (για παράδειγμα του εύρους ζώνης) με σκοπό να παρέχει υπηρεσίες υψηλής ποιότητας στους χρήστες και να ικανοποιεί τις απαιτήσεις τους. Γι αυτό το λόγο στο [37], το ενδιαφέρον εστιάζεται στο σχεδιασμό και στον υπολογισμό του QoE η οποία αντικατοπτρίζει το επίπεδο ευχαρίστησης του χρήστη. Συνεπώς, προτείνεται ένα αναλυτικό μοντέλο ικανό να εκτιμήσει την ποιότητα εμπειρίας σε ένα IP δίκτυο και να τη βελτιστοποιήσει.

Το προτεινόμενο μοντέλο συνίσταται στη χαρτογράφηση του δικτύου και της κατάστασης των πόρων του μέσα από αντικειμενικές συναρτήσεις που ανταποκρίνονται σε

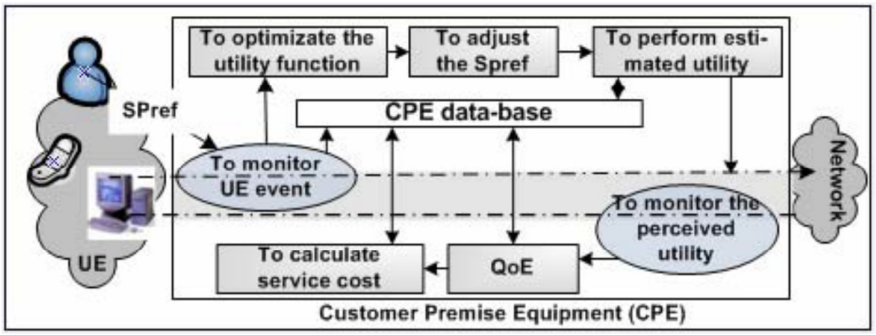
κάποιους περιορισμούς. Ως πόρος εκχώρησης στους χρήστες θεωρείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επομένως, για τη μεγιστοποίηση της ποιότητας της υπηρεσίας και επομένως της ποιότητας εμπειρίας τους, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ όψιν οι προτιμήσεις του χρήστη καθώς και το διαθέσιμο εύρος ζώνης B_w ώστε η εκχώρηση των πόρων να ικανοποιεί όλες τις παραμέτρους.

Η βασική ιδέα συνίσταται στο να μοιραστεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης στις υπηρεσίες ανάλογα με τη σημασία που έχουν για το χρήστη. Συνεπώς, το αναλυτικό μοντέλο στηρίζεται στη βελτιστοποίηση των δύο ακόλουθων παραμέτρων: 1) της ευχαρίστησης όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης, και 2) της χρησιμότητας των υπηρεσιών που παρέχει το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εκτιμηθεί η ποιότητα εμπειρίας καθώς και το κόστος της υπηρεσίας. Προτείνουν επίσης και μια διαδικασία που επιτρέπει στον πελάτη, μέσω του κατάλληλου εξοπλισμού, να ρυθμίσει ο ίδιος αυτές τις παραμέτρους για να εξασφαλίσει τη βέλτιστη χρησιμότητα τους.

Συγκεκριμένα, καθώς ο εξοπλισμός του πελάτη είναι το βασικό στοιχείο στο περιβάλλον του χρήστη, ο χρήστης καθορίζει μέσω αυτού την τιμή μιας παραμέτρου (SP_{ref}) που αντικατοπτρίζει τις προτιμήσεις του. Η ρύθμιση της παραμέτρου αυτής στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησης του χρήστη, αφού εκφράζει τις επιθυμίες του. Γι αυτό το λόγο, όπως περιγράφεται και σχηματικά, ο εξοπλισμός του πελάτη ελέγχει διαρκώς τις αντιδράσεις του χρήστη. Όταν ο χρήστης ενεργοποιήσει ή απενεργοποιήσει μια υπηρεσία και συνεπώς αλλάξει τις προτιμήσεις του, αυτή του η αντιδραση ανιχνεύεται από τους αισθητήρες. Ο εξοπλισμός του πελάτη εντοπίζει και αναλύει αυτό το γεγονός, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη συνάρτηση βελτιστοποίησης της χρησιμότητάς του. Υπολογίζει τη βέλτιστη εκχώρηση του εύρους ζώνης λαμβάνοντας υπ όψιν την υπηρεσία που προτιμά περισσότερο ο χρήστης. Έπειτα, ρυθμίζει και αλλάζει τις παραμέτρους των υπόλοιπων υπηρεσιών για να μεγιστοποιήσει την ευχαρίστηση του χρήστη από την υπηρεσία που προτιμά περισσότερο. Σε κάθε μεταβολή της εν λόγω παραμέτρου, υπολογίζεται η καλύτερη δυνατή κατάτμιση του εύρους ζώνης Bw μέσα από τη συνάρτηση χρησιμότητας. Εφόσον η χρησιμότητα που προσφέρεται από το δίκτυο είναι ανάλογη της τιμής της παραμέτρου, η ρύθμιση της επιτρέπει την αποτελεσματική βελτιστοποίηση της χρησιμότητας του χρήστη και της ποιότητας εμπειρίας του.

Στο [37], όπως και στη δική μας προσέγγιση, γίνεται εκχώρηση πόρων μέσω της βελτιστοποίησης των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών. Λαμβάνεται υπ όψη η

υποκειμενικότητα του χρήστη με την έννοια της ανίχνευσης της δυσαρέσκειας του μέσα από τους αισθητήρες του εξοπλισμού του. Εφόσον γίνει αντιληπτή η αρνητική αντίδραση του χρήστη ως προς μια υπηρεσία που του παρέχεται, το σύστημα προσαρμόζει την τιμή μιας παραμέτρου και προχωρά σε επανεκχώρηση του εύρους ζώνης με σκοπό τη μέγιστη ευχαρίστηση των χρηστών. Στη δική μας προσέγγιση, ο χρήστης εκφράζει ο ίδιος τη δυσαρέσκεια ή την ευχαρίστηση του από την υπηρεσία που του προσφέρεται δηλώνοντας ο ίδιος, μέσω αντίστοιχα μιας παραμέτρου, το εύρος ζώνης στο οποίο επιθυμεί να λάβει την υπηρεσία που του παρέχεται. Αντίστοιχα τότε, το δίκτυο προσαρμόζει την εκχώρηση των πόρων ώστε οι χρήστες να λάβουν την υπηρεσία που επιθυμούν. Ο δικός μας τρόπος είναι υποκειμενικότερος και παρέχει υψηλό QoE στους χρήστες σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 16: Πλαίσιο διαχείρισης του εξοπλισμού του πελάτη(CPE-customer premise equipment) (πηγή [37]).

4 Προτεινόμενο πλαίσιο παροχής QoE

4. 1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, προσπαθήσαμε να εξελίξουμε την έννοια της ποιότητας εμπειρίας από τη μέχρι τώρα προσέγγισή της και να σχεδιάσουμε ένα δυναμικό δίκτυο στο οποίο οι συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών να προσαρμόζονται δυναμικά στις ανάγκες τους. Αυτό το επιτυγχάνουμε συσχετίζοντας τις προτιμήσεις/ανάγκες του χρήστη με τις δυνατότητες του διαχειριστή. Ειδικότερα, προτείνουμε έναν καινοτόμο μηχανισμό για να επεκτείνουμε την ποιότητα της υπηρεσίας σε ποιότητα εμπειρίας σε κινητά ασύρματα δίκτυα, δίνοντας έμφαση στις κινητές εφαρμογές πολυμέσων κατά παραγγελία (on demand). Γι αυτό το λόγο, ο στόχος μας είναι να μεταχειριστούμε την ποιότητα εμπειρίας του χρήστη σαν μια δυναμική διαδικασια που επιτρέπει στους χρήστες να εκφράσουν τις προτιμήσεις τους σε πραγματικό χρόνο αναφορικά με τη στιγμιαία εμπειρία από την απόδοση της πολυμεσικής υπηρεσίας τους. Κάτι τέτοιο γίνεται δυνατόν διαμέσω της άμεσης εμπλοκής των επιθυμιών και επιλογών των χρηστών στο μηχανισμό διαχείρισης ασύρματων πόρων, και όχι με μια εκ των προτέρων χαρτογράφηση της αντιλαμβανόμενης εμπειρίας από την πλευρά του χρήστη όπως συνηθίζεται σε υπάρχοντες μηχανισμούς. Για να πετύχουμε το στόχο μας, χρησιμοποιούμε τη θεωρία μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου (NUM- Network Utility Maximization Theory) σαν ένα έγκυρο μαθηματικό εργαλείο που συσχετίζει αποτελεσματικά την αλληλεπίδραση του χρήστη με τη διαδικασία εκχώρησης πόρων που στηρίζεται στην ποιότητα της υπηρεσίας, μέσα από τη δυναμική προσαρμογή των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών [38].

4.2 Πλαίσιο δυναμικής παροχής της ποιότητας εμπειρίας

Στοχεύοντας στην παροχή δυναμικής ποιότητας εμπειρίας, υποθέτουμε ένα ετερογενές ασύρματο δίκτυο με πολλαπλούς χρήστες και πολλαπλές υπηρεσίες, το οποίο λαμβάνει υπ

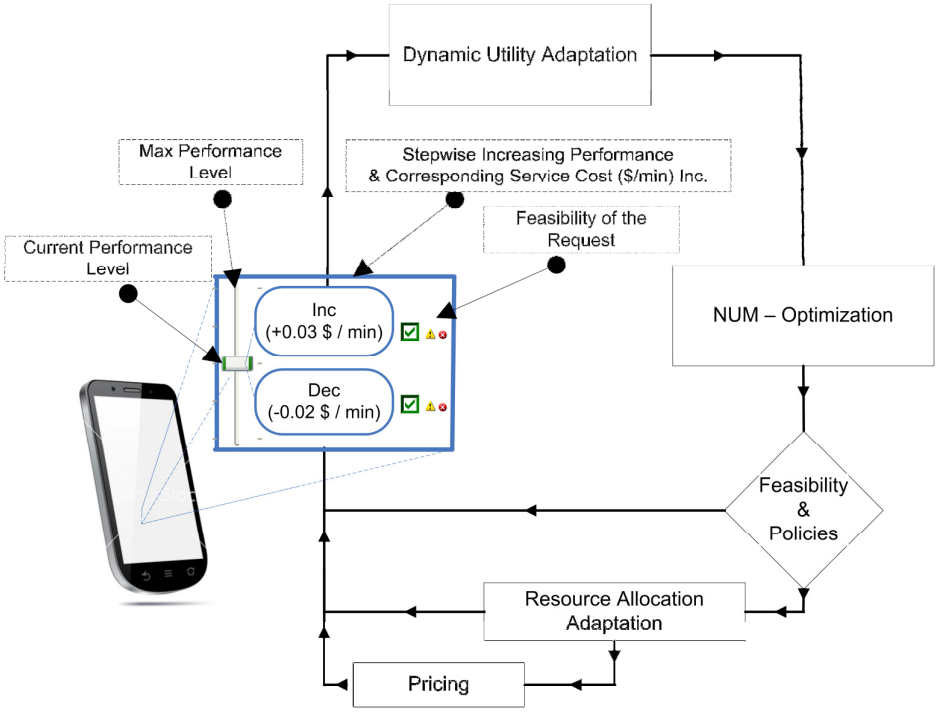
όψιν τις υποκειμενικές προτιμήσεις των χρηστών και αντιμετωπίζει το QoE σαν ένα μέσο διασύνδεσης των χρηστών με τις εφαρμογές και τους μηχανισμούς εκχώρησης πόρων [38].

Σύμφωνα με το προτεινόμενο πλαίσιο, αρχικά, ο χρήστης εκφράζει τις προτιμήσεις του μέσα από μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI- Graphical User Interface) που χρησιμεύει στο να εκδηλώνει τις επιλογές του με ξεκάθαρο, απλό και πραγματικό τρόπο. Για να διευκολυνθεί η επιλογή του, ο χρήστης χρειάζεται να είναι ενήμερος για τις επιλογές του, το κατά πόσο είναι εφικτές οι επιθυμίες του (τα όρια που τίθενται σε μια συγκεκριμένη υπηρεσία) και τις συνέπειες των επιλογών του (κόστος). Προς αυτό το στόχο, υιοθετείται ένα πλαίσιο δυναμικής προσαρμογής των συναρτήσεων χρησιμότητας (DUA- Dynamic Utility Adaptation) για την παροχή QoE εξασφαλίζοντας την αδιάκοπη συμμετοχή της υποκειμενικότητας του χρήστη στο μηχανισμό εκχώρησης πόρων σε πολλαπλά στρώματα (cross-layering) [38] που εξασφαλίζει την ενσωμάτωση της υποκειμενικότητας των χρηστών στο μηχανισμό εκχώρησης πόρων, επιτρέποντας τη συνεργασία των επιπέδων εφαρμογής και MAC (cross-layering). Το παραπάνω επιτυγχάνεται με την εξής μεθοδολογία:

- ***Δυναμική προσαρμογή των συναρτήσεων χρησιμότητας:*** Η προτίμηση του χρήστη - που μπορεί να ζητήσει καλύτερη ή χειρότερη υπηρεσία - αντανακλάται άμεσα στη συνάρτηση χρησιμότητας U_i μέσα από τη μεταβολή κάποιας παραμέτρου.
- ***Βελτιστοποίηση-μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου:*** Διατυπώνεται και επιλύεται το πρόβλημα NUM έπειτα από κάθε μεταβολή της συνάρτησης χρησιμότητας του χρήστη.
- ***Εφικτότητα και στρατηγικές:*** Οι απαιτήσεις του χρήστη πρέπει να είναι τέτοιες ώστε το δίκτυο να δύναται να ανταποκριθεί σε αυτές. Αν οι απαιτήσεις του είναι ανέφικτες, ενημερώνεται μέσω της γραφικής διεπαφής. Γι αυτό το λόγο, οι στρατηγικές των διαχειριστών πρέπει να εισάγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχουν τις απαιτήσεις των χρηστών (θέτοντας όρια στην απόδοση της υπηρεσίας που μπορούν να παρέχουν) και τη συμπεριφορά του συνολικού συστήματος που οφείλει να αντιμετωπίζει δίκαια όλους τους χρήστες. Δηλαδή, η βελτίωση της υπηρεσίας που λαμβάνει ένας χρήστης να μην πραγματοποιείται εις βάρος της ποιότητας των υπηρεσιών των άλλων χρηστών.
- ***Προσαρμογή της* εκχώρησης *πόρων:*** Το δίκτυο ανταποκρινόμενο στις απαιτήσεις των χρηστών, θα κατανείμει τους πόρους σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου. Μέσω της δυναμικής προσαρμογής των συναρτήσεων χρησιμότητας, το προτεινόμενο πλαίσιο στηρίζεται σε ήδη υπαρκτούς

μηχανισμούς εκχώρησης πόρων, προσθέτοντας ελάχιστο φορτίο στη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος. Συνεπώς, η προσαρμογή των συναρτήσεων όχι μόνο επιτρέπει την έκφραση των προτιμήσεων των χρηστών από τις υπηρεσίες που λαμβάνουν σε ένα ετερογενές δίκτυο αλλά συνεπάγεται και τη βέλτιστη εκχώρηση πόρων.

- ***Κοστολόγηση:*** Ο διαχειριστής δύναται να εφαρμόσει τιμολογιακή πολιτική. Με αυτό τον τρόπο, παρέχονται κίνητρα στους χρήστες να συμπεριφερθούν με μη εγωιστικό τρόπο που βελτιώνει τόσο το βαθμό αξιοποίησης του συνολικού δικτύου όσο και τη μεγιστοποίηση του κέρδους των διαχειριστών.



Σχήμα 17: Πλαίσιο δυναμικής πρόβλεψης της ποιότητας εμπειρίας(πηγή [39]).

4.3 Δυναμική πρόβλεψη της ποιότητας εμπειρίας σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο δυναμικής ποιότητας εμπειρίας του χρήστη σε υπηρεσίες πολυμέσων, ο ακρογωνιαίος λίθος είναι η χρήση δυναμικών συναρτήσεων χρησιμότητας, όπως ορίσαμε και περιγράψαμε στο κεφάλαιο 1.

Διατυπώνουμε ένα γενικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου. Θεωρούμε μια ασύρματη κυψέλη με N χρήστες. Κάθε χρήστης εκφράζει την ευχαρίστηση του από την υπηρεσία που του παρέχεται μέσω μιας συνάρτησης χρησιμότητας, την $U_i(x_i)$. Η συνάρτηση αυτή αναπαριστά το βαθμό ικανοποίησης του κάθε χρήστη σε σχέση με τους πόρους που επιθυμεί να λάβει x_i (ισχύς εκπομπής, ρυθμός μετάδοσης κλπ). Έτσι το πρόβλημα βέλτιστης εκχώρησης πόρων στους χρήστες που λύνεται περιοδικά στο σταθμό βάσης και διατυπώνεται ως εξής:

$$\max_{\bar{X}} \sum_{i=1}^{N} U_i(x_i, \bar{X}, \alpha_i) \tag{6}$$

$$subject\ to: \sum_{i=1}^{N} x_i \leq X_{max} \tag{7}$$

$$0 \leq x_i(t) \leq X_{max} \text{ για } i=1, \ldots, N \tag{8}$$

Όπου $\bar{X}=(x_1, \ldots, x_N)$ είναι το διάνυσμα με τους πόρους που εκχωρεί το δίκτυο σε κάθε χρήστη και η μεταβλητή X_{max} εκφράζει τη μέγιστη τιμή τους εξ αιτίας φυσικών περιορισμών. Η μεταβλητή α_i καθορίζει το σημείο καμπής της συνάρτησης χρησιμότητας ή την κλίση-καμπυλότητά της (steepness).

Όπως διατυπώνεται στο [39], για να μπορέσουμε να εισάγουμε την υποκειμενικότητα των χρηστών στις συναρτήσεις χρησιμότητας, αλλάζουμε δυναμικά τα χαρακτηριστικά των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών. Η δυναμική προσαρμογή της συνάρτησης χρησιμότητας αναπαριστάται ως $U_i(x_i, \bar{X}, \alpha_i(t))$, όπου η χρονικά εξαρτώμενη ρυθμιζόμενη μεταβλητή $\alpha_i(t)$ καθορίζει το σημείο καμπής ή την κλίση της συνάρτησης. Η τιμή της μεταβλητής εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας που προσφέρεται στους χρήστες και πρέπει να ακολουθεί τους εξής κανόνες:

- Η παράμετρος $\alpha_i(t)$ πρέπει να είναι μια βηματική συνάρτηση των προτιμήσεων του χρήστη. Για παράδειγμα, $\alpha_i(t+1) = \alpha_i(t) \pm A_i \cdot I_i(t)$, όπου $I_i(t) = 1$ για $t > 0$ και 0 αλλού.
- Η παράμετρος $\alpha_i(t)$ εκφράζει την προσαρμογή της συνάρτησης χρησιμότητας και επηρρεάζει το μηχανισμό εκχώρησης πόρων με τρόπο ώστε να αντανακλά τις προτιμήσεις του χρήστη. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου (που όπως είπαμε καθορίζει τη θέση του σημείου καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης), τόσο μεγαλύτερη είναι η απαίτηση του χρήστη σε ρυθμαπόδοση. Συνεπώς, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εκφράσει την ικανοποίηση του ή τη δυσαρέσκειά του σε σχέση με την υπηρεσία που λαμβάνει και να ζητήσει είτε καλύτερη υπηρεσία αυξάνοντας την τιμή του α, είτε χειρότερη μειώνοντας την τιμή της παραμέτρου, είτε να ικανοποιηθεί πλήρως και να μη ζητήσει αλλαγή.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται σε ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς εκχώρησης πόρων και δρα συμπληρωματικά σε αυτούς, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της συνάρτησης χρησιμότητας προσθέτοντας ελάχιστο φορτίο στη συνολική αρχιτεκτονική. Έτσι, το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα ασύρματων δικτύων που ποικίλουν από μία κυψέλη έως ολόκληρα ετερογενή δίκτυα.

4.4 Μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου.

Στη συνέχεια διατυπώνουμε το πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου που παρέχει το δίκτυο σε ασύρματα WLAN και CDMA δίκτυα. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόμοιες διατυπώσεις ισχύουν και σε άλλες ασύρματες τεχνολογίες.

4.4.1 Μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου σε CDMA δίκτυα.

Σϋμφωνα με την (6) σε ένα CDMA δίκτυο, η μεταβλητή x_i εκφράζει την προσφερόμενη ισχύ εκπομπής που εκχωρεί η κυψέλη στον χρήστη i δηλαδή: $x_i \equiv p_i$ με τον ακόλουθο περιορισμό για τη συνολική ισχύ που παρέχεται στην κάτω ζεύξη : $\sum_{i=1}^{N} x_i \leq X_{max} \equiv$: $\sum_{i=1}^{N} p_i \leq P_{max}$. Επι πλέον, η αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει την ωφέλιμη ρυθμαπόδοση που λαμβάνει ο κάθε χρήστης γράφεται ως εξής: $U_i(R_i, p_i, \gamma_i) = R_i^{max} f_i(p_i, \gamma_i, \alpha_i(t))$ όπου R_i^{max} είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στην κάτω ζεύξη, η

μεταβλητή $\gamma_i \triangleq E_b/I_o$ (ενέργεια bit προς την πυκνότητα παρεμβολής) εκφράζει κάθε στιγμή το λόγο του σήματος προς το θόρυβο και την παρεμβολή (SINR- Signal to Noise and Interference Ratio) στο κινητό τερματικό και εξαρτάται από τη διαμόρφωση και το επίπεδο κωδικοποίησης. Η συνάρτηση f_i είναι η σιγμοειδής συνάρτηση για το συγκεκριμένο λόγο σήματος προς θόρυβο και αναπαριστά την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων.

Στη συνέχεια διατυπώνεται αναλυτικά ο αλγόριθμος εκχώρησης πόρων σε ένα CDMA δίκτυο. Περιληπτικά, αναφέρουμε ότι αποτελείται από δυο στάδια, το στάδιο επιλογής κινητών και το στάδιο εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης. Στο πρώτο στάδιο, κάθε κινητός κόμβος υπολογίζει το μέγιστο κόστος ανά μονάδα ισχύος λ_i^{max}, που ισούται με τη χρησιμότητα του μείον το αντίστοιχο κόστος το οποίο και μεταδίδει στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης με τη σειρά του ταξινομεί κατά φθίνουσα σειρά τα λ_i^{max} από όλους τους συνδεδεμένους χρήστες. Με βάση τον περιορισμό $\sum_{j=1}^{M} P_j(\lambda_M^{max}) \leq P_\tau$, ο σταθμός βάσης επιλέγει ποιά κινητά θα επιλεγούν για μετάδοση, και στη συνέχεια υπολογίζει την τιμή ισορροπίας λ^* που αντιπροσωπεύει την τιμή ισορροπίας ανά μονάδα πόρων που βελτιστοποιεί το διαμοιρασμό των πόρων στην κυψέλη. Τέλος, η τιμή λ^* μεταδίδεται στους κινητούς χρήστες, οι οποίοι μπορούν να υπολογίζουν τη τιμή $P_i(\lambda^*)$ που αντιπροσωπεύει τους πόρους που τελικά θα τους εκχωρηθούν.

4.4.1.1 Μοντελοποίηση CDMA δικτύου

Θεωρούμε την κάτω ζεύξη σε ένα CDMA δίκτυο που αποτελείται από B σταθμούς βάσης (κυψέλες) και M κινητά [40]. Σε κάθε χρονοσχισμή (time slot), εκτελείται ο αλγόριθμος εκχώρησης ισχύος και ρυθμού δεδομένων. Η χρονοσχισμή ορίζεται αυθαίρετα και σε κάθε χρονοσχισμή μεταδίδονται είτε ένα είτε περισσότερα πακέτα. Κάθε σταθμός βάσης έχει ένα μέγιστο όριο ισχύος P_τ και κάθε κινητό επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης. Για ένα δεδομένο κινητό i, R_i^{max} είναι ο μέγιστος ρυθμός στον οποίο μπορεί να λάβει δεδομένα. Μπορούμε να εκφράσουμε το γ_i για το κινητό i που επικοινωνεί με το σταθμό βάσης b ως:

$$\gamma_i(R_i,\bar{P}(\mathrm{b})) = \frac{W}{R_i}\frac{G_i(b)P_i}{\sum_{m\in M(b)} P_m - \theta G_i(b)P_i + I_i(b)}$$

$$= \frac{W}{R_i}\frac{P_i}{\sum_{m\in M(b)} P_m - \theta P_i + I_i(b)/G_i(b)}$$

$$= \frac{W}{R_i}\frac{P_i}{\sum_{m\in M(b)} P_m - \theta P_i + A_i(b)}$$

όπου:

W : η ζώνη εξάπλωσης.

Θ : ο παράγοντας ορθογωνικότητας

P_i : η ισχύς που εκχωρείται στο κινητό i

R_i: ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για το κινητό i

$\overline{P}(b)$:το διάνυσμα με την εκχώρηση ισχύος των κινητών που συνδέονται στο σταθμό βάσης b

$G_i(b)$: το κέρδος μονοπατιού από το σταθμό βάσης b στο κινητό i

$I_i(b)$: ο θόρυβος και η ενδοκυψελική παρεμβολή στο κινητό i που επικοινωνεί με το σταθμό βάσης b

$M(b)$: το σύνολο των κινητών που επικοινωνούν με το σταθμό βάσης b

$A_i(b) : I_i(b)/G_i(b)$

Θεωρούμε ότι η συνάρτηση f έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

(α). Η f είναι αύξουσα συνάρτηστη του γ_i.

(β). Η f είναι 2 φορές διαφορίσιμη.

(γ). $f(0)=0$.

(δ). Η εξίσωση $\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2}\left(\frac{W}{R_i}+\theta\gamma_i\right)+2\theta\frac{\partial f_i}{\partial \gamma_i}=0$ έχει το πολύ μια λύση για $\gamma_i>0$.

(ε). Εάν η εξίσωση $\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2}\left(\frac{W}{R_i}+\theta\gamma_i\right)+2\theta\frac{\partial f_i}{\partial \gamma_i}=0$ έχει μία λύση στο $\gamma_i^o>0$ τότε $\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2}\left(\frac{W}{R_i}+\theta\gamma_i\right)+2\theta\frac{\partial f_i}{\partial \gamma_i}>0$ για $\gamma_\iota<\gamma_i^o$ και $\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2}\left(\frac{W}{R_i}+\theta\gamma_i\right)+2\theta\frac{\partial f_i}{\partial \gamma_i}<0$ για $\gamma_\iota>\gamma_i^o$.

Από τις παραπάνω υποθέσεις προκύπτει ότι εάν $\sum_{i\in M(b)} P_i$ είναι μια σταθερά, τότε η $\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial P_i^2}$ έχει το πολύ ένα σημείο καμπής [39]. Επί πλέον, εάν έχει ένα σημείο καμπής P_i^o τότε

$\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial P_i^2} > 0$ για $P_i<P_i^o$ και το $\frac{\partial^2 f_i(\gamma_i)}{\partial P_i^2} < 0$ για $P_i>P_i^o$ και ισχύει ότι $\sum_{i\in M(b)} P_i = P_\tau$. Επομένως, η συνάρτηση f_i μπορεί να έχει τρεις μορφές: σιγμοειδής, κοίλη ή κυρτή συνάρτηση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου μπορεί να περιγραφεί από μία εκ των τριών αυτών μορφών συναρτήσεων.

4.4.1.2 Προτεινόμενος αλγόριθμος επίλυσης σε CDMA δίκτυα

Ο αλγόριθμος επίλυσης περιλαμβάνει δύο στάδια, το στάδιο εκχώρησης ισχύος και ρυθμού δεδομένων και το στάδιο επιλογής κινητών [40].

Α. Στάδιο εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης

Μελετάμε την εκχώρηση ισχύος και ρυθμού δεδομένων εστιάζοντας σε μία κυψέλη του συστήματος. Υποθέτουμε ότι τα κινητά *1… M* επικοινωνούν με ένα σταθμό βάσης. Αρχικά, ορίζουμε την U_i, τη συνάρτηση χρησιμότητας του κινητού *i* ως εξής:

$$U_i(R_i, \bar{P}) = R_i f_i\big(\gamma_i(R_i, \bar{P})\big),\ i = 1, 2,\ \dots, M \tag{9}$$

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει την αναμενόμενη ρυθμαπόδοση για το κινητό *i*. Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης δίνεται από τις σχέσεις:

$$\text{(A)} \qquad max \sum_{i=1}^{M} U_i(R_i, \overline{P)}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{M} P_i \le P_\tau$$

$$0 \le P_i \le P_\tau \ \text{ για i=1, 2,…,M}$$

$$0 \le R_i \le R_i^{max} \text{ για i = 1, 2, . . . M.}$$

Συνεπώς, ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η συνολική αναμενόμενη ρυθμαπόδοση του συστήματος (το άθροισμα των ρυθμαποδόσεων όλων των κινητών) με περιορισμούς τη συνολική μεταδιδόμενη ισχύ σε κάθε σταθμό βάσης και το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης κάθε κινητού.

Για να λυθεί το πρόβλημα (Α), υπολογίζεται ο βέλτιστος ρυθμός δεδομένων για μια δεδομένη εκχώρηση ισχύος, και στη συνέχεια, βρίσκεται η εκχώρηση ισχύος. Εύκολα

αποδεικνύεται ότι, για να μεγιστοποιηθεί η ρυθμαπόδοση του συνολικού συστήματος, ο σταθμός βάσης πρέπει να μεταδίδει στη μέγιστη ισχύ του, ίση με P_τ. Αυτό σημαίνει ότι $\sum_{i=1}^{M} P_i = P_\tau$ και

$$\gamma_i(R_i, \bar{P}) = \frac{W}{R_i} \frac{P_i}{\theta \sum_{m=1}^{M} P_m - \theta P_i + A_i} == \frac{W}{R_i} \frac{P_i}{\theta P_\tau - \theta P_i + A_i} \triangleq \gamma_i(R_i, P_i), \text{ i=1, 2, } \dots \text{, M.}$$

Να σημειωθεί ότι πια η $\gamma_i(R_i, P_i)$ δεν εξαρτάται από την εκχώρηση ισχύος των υπολοίπων κινητών επομένως η συνάρτηση χρησιμότητας του κινητού i μπορεί να ξαναγραφεί ως :

$$U_i(R_i, P_i) = R_i f_i\big(\gamma_i(R_i, P_i)\big) \tag{10}$$

Επομένως, το κάθε κινητό μπορεί να ορίσει το βέλτιστο ρυθμό δεδομένων ως $R_i^*(P_i)$ για δεδομένη ισχύ P_i χωρίς να λαμβάνει υπ όψιν τα υπόλοιπα κινητά. Η σχέση για το βέλτιστο ρυθμό δεδομένων του κινητού i για μια δεδομένη ισχύ δίνεται από την παρακάτω πρόταση.

Πρόταση 1 [40]**:** Για μια δεδομένη ισχύ P_i ο βέλτιστος ρυθμός δεδομένων για το κινητό i δίνεται από τη σχέση

$$R_i^*(P_i) = \begin{cases} \dfrac{W P_i}{\gamma_i^*(\theta P_\tau - \theta P_i + A_i)} & , \quad \text{εάν } P_i \le \dfrac{R_i^{max} \gamma_i^*(\theta P_\tau + A_i)}{W + \theta R_i^{max} \gamma_i^*} \\ R_i^{max} & , \quad \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Όπου $\gamma_i^* = arg \max_{\gamma \ge 1} \left\{ \frac{1}{\gamma} f_i(\gamma) \right\}$

Από την πρόταση 1 και την εξίσωση (10) η συνάρτηση χρησιμότητας του κινητού i στο βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για μια δεδομένη ισχύ P_i, $U_i(R_i^*(P_i), P_i)$ δίνεται από τη σχέση:

$$U_i^{R_i^*}(\boldsymbol{P_i}) \triangleq U_i(R_i^*(P_i), P_i) = \begin{cases} \frac{W}{\gamma_i^*} \frac{P_i}{\theta P_\tau - \theta P_i + A_i} f_i(\gamma_i^*) & \text{εάν } P_i \le \frac{R_i^{max} \gamma_i^*(\theta P_\tau + A_i)}{W + \theta R_i^{max} \gamma_i^*} \\ R_i^{max} f_i\big(\gamma_i(R_i^{max}, P_i)\big), & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{11}$$

και το πρόβλημα Α ισοδυναμεί με το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης

$$\text{(B)} \qquad \max \sum_{i=1}^{M} U_i^{R_i^*}(\boldsymbol{P_i})$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{M} \boldsymbol{P_i} \leq \boldsymbol{P_\tau},$$

$$0 \leq \boldsymbol{P_i} \leq \boldsymbol{P_\tau}, \qquad \boldsymbol{i = 1, 2, \ldots, M}.$$

Έτσι το πρόβλημα εκφυλίστηκε σε ένα πρόβλημα εκχώρησης ισχύος. Λύνοντας το πρόβλημα (B), υπολογίζεται για την εκχωρημένη ισχύ ο βέλτιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από την πρόταση 1.

Στην εξίσωση (11) η $U_i^{R_i^*}(\boldsymbol{P_i})$ είναι μια κυρτή συνάρτηση για $P_i \leq \frac{R_i^{max}\gamma_i^*(\theta P_\tau + A_i)}{W + \theta R_i^{max}\gamma_i^*}$ και το σχήμα της $U_i^{R_i^*}(\boldsymbol{P_i})$ ακολουθεί το σχήμα της f_i, για $\frac{R_i^{max}\gamma_i^*(\theta P_\tau + A_i)}{W + \theta R_i^{max}\gamma_i^*} < P_i < P_\tau$. Συνεπώς, η $U_i^{R_i^*}(\boldsymbol{P_i})$ είναι κυρτή ή σιγμοειδής συνάρτηση του P_i αφού από υπόθεση η f_i είναι κοίλη ή κυρτή ή σιγμοειδής συνάρτηση του P_i.

Εφόσον η $U_i^{R_i^*}(\boldsymbol{P_i})$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση, η λύση του προβλήματος (B) δεν είναι εύκολη. Θα ακολουθήσουμε τον αλγόριθμο εκχώρησης ισχύος όπως παρουσιάζεται στο [41] για να βρεθεί μια σχεδόν βέλτιστη εκχώρηση για σιγμοειδείς, κοίλες και κυρτές συναρτήσεις. Επίσης, στο [41], αποδεικνύεται ότι η εκχώρηση ισχύος είναι ασυμπτωτικά βέλτιστη.

Ο αλγόριθμος εκχώρησης ισχύος στηρίζεται στη δυναμική κοστολόγηση. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει με λ (το κόστος ανά μονάδα ισχύος) σε όλα τα κινητά που επικοινωνούν με αυτόν. Με βάση την τιμή του λ, κάθε κινητό i ζητάει ένα επίπεδο ισχύος $P_i(\lambda)$ που μεγιστοποιεί την ευχαρίστησή του καθώς, $P_i(\lambda) = \arg\max_{0 \leq P \leq P_\tau}\{U_i^{R_i^*}(P) - \lambda P\}$

Σύμφωνα με την ποσότητα ισχύος που ζητείται από όλα τα κινητά, ο σταθμός βάσης μεταβάλλει το λ για να μεγιστοποιήσει τη συνολική χρησιμότητα του συστήματος.

B. Αλγόριθμος επιλογής κινητών

Ο αλγόριθμος επιλογής κινητών ακολουθεί τα παρακάτω βήματα [40]:

Βήμα 1°: Εάν $P_1(\lambda_1^{max}) = P_\tau$, επιλέγεται το κινητό 1.

Βήμα 2°: Εάν $\sum_{j=1}^{k-1} P_j(\lambda_{k-1}^{max}) < P_\tau$ και, $\sum_{j=1}^{k-1} P_j(\lambda_k^{max}) \geq P_\tau$, επιλέγονται τα κινητά 1, 2, . . . , k-1.

Βήμα 3ο: Εάν $\sum_{j=1}^{k-1} P_j(\lambda_k^{max}) < P_\tau$ και $\sum_{j=1}^{k-1} P_j(\lambda_k^{max}) > P_\tau$, επιλέγονται τα κινητά 1, 2, . . . , k-1.

Βήμα 4ο: Εάν $\sum_{j=1}^{M} P_j(\lambda_M^{max}) \leq P_\tau$, επιλέγονται τα κινητά 1, 2, . . . , M .

Η μεταβλητή λ_i^{max} είναι το μέγιστο κόστος ανά μονάδα ισχύος του κινητού *i* και ορίζεται ως $\lambda_i^{max} = \arg\min_{0\leq\lambda\leq\infty} \max_{0\leq P\leq P_T}\{U_i^{R_i^*}(P) - \lambda P\} = 0$ και υποθέτουμε ότι $\lambda_1^{max} > \lambda_2^{max} > \ . \ . \ . \ > \lambda_M^{max}$. Επίσης ισχύει ότι $P_i(\lambda) > 0$ για $\lambda \leq \lambda_i^{max}$ και $P_i(\lambda) = 0$ για για $\lambda > \lambda_i^{max}$. Έτσι, τα κινητά ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά του λ_i^{max}ικανοποιώντας τον περιορισμό ισχύος. Το κάθε κινητό μπορεί να υπολογίσει την τιμή του λ_i^{max} ως εξής:

$$\lambda_i^{max} = \begin{cases} \dfrac{\partial U_i^{R_i^*}(P)}{\partial P}|P = P^*, \text{εάν } 0 < P_i^o < P_\tau \text{ και εφόσον υπάρχει το } P^* \\ \dfrac{U_i^{R_i^*}(P_\tau)}{P_\tau} \ , \qquad \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Η τιμή P_i^o είναι ένα σημείο καμπής της $U_i^{R_i^*}(P)$ και η P^* είναι η λύση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$U_i^{R_i^*}(P) - P\frac{\partial U_i^{R_i^*}(P)}{\partial P} = 0\ ,\ P_i^o \leq P \leq P_\tau.$$

4.4.1.3 Μελέτη των ιδιοτήτων του αλγόριθμου εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης σε CDMA δίκτυα

Στη συνέχεια ακολουθούν τα πορίσματα που εξάγονται από την μελέτη των ιδιοτήτων του προτεινόμενου αλγορίθμου εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης και του αλγορίθμου επιλογής κινητών.

4.4.1.3.1 Ιδιότητες του προτεινόμενου αλγόριθμου εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης.

Η επόμενη σχέση δίνει το βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των επιλεγόμενων κινητών:

Έστω ότι το κινητό *i* επιλέγεται από τον αλγόριθμο επιλογής κινητών, τότε ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων R_i^* για το κινητό *i* δίνεται από τη σχέση

$$R_i^* = \begin{cases} \frac{P_\tau W}{\gamma_i^* A_i} < R_i^{max}, & \text{εάν } A_i > \frac{P_\tau W}{\gamma_i^* R_i^{max}} \\ R_i^{max}, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι κάθε κινητό μπορεί να υπολογίσει το ρυθμό μετάδοσης που του αντιστοιχεί όταν επιλέγεται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο, πριν τη διαδικασία εκχώρησης ισχύος, εφόσον η R_i^* δεν εξαρτάται από την ισχύ P_i [40]. Δηλαδή, εάν $R_i^* < R_i^{max}$, τότε στο κινητό *i* εκχωρείται η ισχύς μετάδοσης P_τ σε τιμή $\lambda^* = \lambda_i^{max}$. Αυτό σημαίνει ότι εάν το κινητό επιλεγεί για μετάδοση και εκχωρηθεί σε αυτό η ισχύς που ζητάει, τότε θα λάβει δεδομένα με ρυθμό $R_i^* = R_i^{max}$. Ως εκ τούτου, συμπεραίνουμε ότι η R_i^* δεν εξαρτάται από την εκχωρημένη ισχύ στο κινητό *i*, P_i. Συνεπώς, το κινητό *i* μπορεί να υπολογίσει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων R_i^* έχοντας υπολογίσει το περιβάλλον μετάδοσης του A_i και λαμβάνει δεδομένα στο συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης καθ όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Επόμενο πόρισμα είναι ότι εάν το κινητό *i* επιλεγεί από τον αλγόριθμο επιλογής κινητών και εάν $R_i^* < R_i^{max}$, μόνο το κινητό *i* επιλέγεται και η συνολική ισχύς εκχωρείται σε αυτό. Αυτό σημαίνει ότι το πολύ σε ένα κινητό μπορεί να εκχωρηθεί ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μικρότερος από το μέγιστο. Αυτό γίνεται διότι αν μπορούσε να ανατεθεί η ίδια ποσότητα ισχύος σε κάποιον άλλο χρήστη ώστε να ικανοποιηθεί και να λάβει με R_i^{max}, τότε θα επιλεγόταν εκείνο το κινητό και όχι αυτό για το οποίο η ισχύς δεν είναι αρκετή.

Ακόμα, εάν $\overline{P^*} = (\bar{P}_1^*, \ldots, \bar{P}_M^*)$ είναι η συνολική εκχώρηση ισχύος τότε το πολύ ένα κινητό πετυχαίνει τιμή χρησιμότητας στην κυρτή περιοχή της συνάρτησης [40]. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι το πολύ σε ένα κινητό μπορεί να εκχωρείται ρυθμός μετάδοσης μικρότερος από το μέγιστο, καθώς όταν ένα κονητό βρίσκεται στην κυρτή περιοχή της συνάρτησης χρησιμότητας, εκχωρείται σε αυτό ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης. Εάν σε κάποιο κινητό εκχωρηθεί μικρότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από το μέγιστο, τότε σημαίνει ότι χρησιμοποιεί την ισχύ που του δίνεται λιγότερο αποτελεσματικά από τα υπόλοια κινητά. Σε αυτή την περίπτωση, ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν εκχωρεί ισχύ στο κινητό αλλά ανακατανέμει την ισχύ από τα άλλα επιλεγμένα κινητά βέλτιστα. Γενικότερα, εάν το κινητό βρίσκεται στην κυρτή περιοχή χρησιμοποιεί την ισχύ λιγότερο αποδοτικά από τα υπόλοιπα επιλεγμένα κινητά και η τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας στην κυρτή περιοχή είναι σχετικά μικρή.

4.4.1.3.2 Ιδιότητες του αλγορίθμου επιλογής κινητών

Μελετάμε τον τρόπο επιλογής κινητών [40]. Όπως αναφέραμε A_i ορίζεται ως το πηλίκο I_i/G_i όπου I_i είναι ο θόρυβος και η ενδοκυψελική παρεμβολή στο κινητό i και G_i είναι το κέρδος μετάβασης από το σταθμό βάσης στο κινητό *i*, f_i είναι η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτων για το κινητό *i* και R_i^{max} ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για το κινητό *i*. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του A_i τόσο καλύτερο είναι το περιβάλλον μετάδοσης.

Ισχύει ότι εάν το κινητό *i* πιο αποδοτικό από το κινητό *j*, τότε $\lambda_i^{max} \geq \lambda_j^{max}$ και το κινητό *i* έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγεί έναντι του κινητού *j*. Αυτό συμβαίνει γιατί στον προτεινόμενο αλγόριθμο τα κινητά ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά του λ_i^{max}. Με το συνδυασμό μιας αποτελεσματικής επιλογής κινητών και της συνολικά βέλτιστης εκχώρησης ισχύος για τα επιλεγόμενα κινητά, ο αλγόριθμός μας μπορεί να επιφέρει στο σύστημα υψηλή επίδοση.

Αρχικά, ορίζεται ότι το κινητό *i* θεωρείται ότι είναι αποδοτικότερο από το κινητό *j* εάν: $U_i^{R_i^*}(P) \geq U_j^{R_j^*}(P)$ για $0 \leq P \leq P_\tau$ [40]. Συμπερασματικά, εάν το κινητό *i* είναι αποδοτικότερο από το κινητό *j,* τότε $\lambda_i^{max} \geq \lambda_j^{max}$. Επίσης, ισχύει ότι εάν οι υπόλοιπες συνθήκες είναι ίδιες, το κινητό με υψηλότερο μέγιστο ρυθμό δεδομένων έχει προτεραιότητα να επιλεγεί έναντι εκείνου με χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων.

Όσον αφορά το ρόλο του περιβάλλοντος μετάδοσης, εάν οι υπόλοιπες συνθήκες είναι ίδιες, ένα κινητό που βρίσκεται σε καλύτερο περιβάλλον μετάδοσης έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα να επιλεγεί απ ότι ένα κινητό σε χειρότερο περιβάλλον μετάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι εάν όλα τα κινητά είναι ομογενή, τότε τα κινητά επιλέγονται σε αύξουσα σειρά του A_i δηλαδή τα κινητά επιλέγονται σύμφωνα με το περιβάλλον μετάδοσης στο οποίο βρίσκονται.

Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα προβλήματα εκχώρησης ισχύος και ρυθμού μετάδοσης. Σε συστήματα με ετερογενή κινητά, η επιλογή των κινητών δεν εξαρτάται μόνο από το περιβάλλον μετάδοσης αλλά και από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τον τύπο μετάδοσης των κινητών. Συνεπώς, σε γενικές καταστάσεις όπου οι συνθήκες είναι πολύπλοκες, δεν είναι εύκολο να προσδιορίσουμε ποιά

κινητά πρέπει να επιλεγούν για τη βέλτιστη λύση. Παρόλ αυτά, η επιλογή των κινητών που ταξινομεί τα κινητά σε φθίνουσα σειρά του λ_i^{max} δίνει μια απλή και συλλογική στρατηγική για την επιλογή των κινητών, παρέχοντας ταυτόχρονα μια καλή προσέγγισης της συνολικής βέλτιστης λύσης.

4.4.2 Μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του δικτύου σε WLAN δίκτυα

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11, στην περίπτωση ασυρμάτων δικτύων όπου όλοι οι κόμβοι μεταφέρουν ελαστική κίνηση, μόνο ένα μέρος της διάρκειας του καναλιού (channel time) χρησιμοποιείται για επιτυχή μετάδοση πακέτων και λέγεται ενεργός χωρητικότητα και συμβολίζεται με C [42]. Η υπόλοιπη διάρκεια του καναλιού καταναλώνεται από τη διαδικασία υποχώρησης (backoff process) ή τις συγκρούσεις των πακέτων. Ως εκ τούτου, το εύρος ζώνης s_i που εκχωρείται στον κόμβο i είναι:

$$s_i = x_i C \tag{12}$$

όπου x_i είναι το κλάσμα της ενεργού χωρητικότητας του κόμβου i και $\sum_{i \in N} x_i = 1$. N είναι το σύνολο των κόμβων μετάδοσης.

Εισάγουμε τη μεταβλητή W_i που δηλώνει το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού του κόμβου i και παίρνει τιμές στο διάστημα $[W^{min}, W^{max}]$, όπου W^{min} και W^{min} είναι το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού αντίστοιχα.

Ισχύει ότι όταν $W_i \gg 1$ για $\forall i \in N$ τότε $s_i/s_j \approx (L_i W_j)/(L_j W_i)$ όπου L_i είναι ο ρυθμός μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο πολλαπλασιασμένος με τη διάρκεια της επιτυχούς μετάδοσης. Η προσεγγιστική συνθήκη $W_i \gg 1$ είναι αληθής όταν το δίκτυο έχει χαμηλή πιθανότητα συγκρούσεων. Συνεπώς με τη βοήθεια αυτής της προσεγγιστικής συνθήκης και την εξίσωση (9) μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το ρυθμό μετάδοσης ενός κόμβου ως,

$$x_i \approx \frac{\frac{L_i}{W_i}}{\sum_{k \in N} \frac{L_k}{W_k}} \tag{13}$$

Οι εξισώσεις (12) και (13) δείχνουν τη σχέση ανάμεσα στο μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού και στην εκχώρηση εύρους ζώνης. Με βάση αυτή τη σχέση ο αλγόριθμος μπορεί να ρυθμίζει το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού W_i ώστε να πετύχει δίκαιη και αποτελεσματική εκχώρηση εύρους ζώνης.

4.4.2.1 Διατύπωση προβλήματος

Στη συνέχεια διατυπώνονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης της εκχώρησης του εύρους ζώνης και του παραθύρου ανταγωνισμού καθώς και η επίλυση τους.

4.4.2.1.1 Βέλτιστη εκχώρηση εύρους ζώνης σε WIFI δίκτυα

Σε κάθε χρήστη αντιστοιχεί μια συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(s_i)$ [42]. Για ελαστική κίνηση, η $U_i(s_i)$ είναι αύξουσα, αυστηρά κοίλη και συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση του s_i όταν $s_i \geq 0$. Για δεδομένη μέγιστη ενεργό χωρητικότητα C_{max}, το πρόβλημα βέλτιστης εκχώρισης εύρους ζώνης γίνεται:

$$max \sum_{i \in N} U_i(s_i)$$

$$s.t. \sum_{i \in N} U_i(s_i) \leq C_{max}$$

$$s_i \geq 0 \text{ για } i \in N$$

Σύμφωνα με τη συνθήκη βελτιστοποίησης στο [42], η μοναδική λύση δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} U_i'(s_i) = \mu \\ \sum_{i \in N} s_i = C_{max} \end{cases} \quad i \in N \tag{14}$$

όπου $\mu>0$ ο πολλαπλασιαστής Lagrange και $U_i'(s_i)$ είναι η παράγωγος της $U_i(s_i)$ ως προς s_i.

Ο αλγόριθμος δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατ ευθείαν για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του εύρους ζώνης, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται και από το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού που εκχωρείται στον κόμβο. Επομένως, πρέπει να διατυπωθεί και να επιλυθεί παράλληλα και το πρόβλημα βέλτιστης εκχώρησης του παραθύρου ανταγωνισμού.

4.4.2.1.2 Βέλτιστη εκχώρηση παραθύρου ανταγωνισμού σε WIFI δίκτυα

Με βάση τις εξισώσεις (12) και (13) διατυπώνεται το πρόβλημα εκχώρησης του παραθύρου διαμάχης ως εξής:

$$max \sum_{i \in N} U_i \left(\frac{\frac{L_i}{W_i}}{\sum_{k \in N} \frac{L_k}{W_k}} C \right)$$

$$\text{s.t. } W_i > 0 \; \gamma\iota\alpha \; i \in N$$

$$C \leq C_{max,}$$

όπου το C σχετίζεται με την εκχώρηση του παραθύρου διαμάχης. Από τις εξισώσεις (12), (13) και (14) η βέλτιστη λύση είναι:

$$U_i'(x_i C_{max}) = \widetilde{U}_i' \left(\frac{\frac{L_i}{W_i}}{\sum_{k \in N} \frac{L_k}{W_k}} \right) = \mu > 0, \gamma\iota\alpha \; \forall i \in N \tag{15}$$

$$C = C_{max} \tag{16}$$

Όπου $U_i(s_i) = \widetilde{U_i'}(\frac{s_i}{C_{max}})$ και $\widetilde{U_i'}(x_i)$ είναι η παράγωγος της $U_i(x_i)$ ως προς x_i. Παρόμοια με πρίν, η $\widetilde{U_i'}(x_i)$ είναι αύξουσα, αυστηρά κοίλη και συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση του x_i για $x_i \geq 0$. Ουσιαστικά, η εξίσωση (15) δείχνει τον ορισμό της δίκαιης εκχώρησης εύρους ζώνης και η εξίσωση (16) είναι η αναγκαία συνθήκη για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση του καναλιού.

Η λύση της εξίσωσης (15) δεν είναι μοναδική καθώς προσδιορίζει μόνο το λόγο ανάμεσα στα παράθυρα ανταγωνισμού. Δεδομένης μιας θετικής σταθεράς α και ενός παραθύρου ανταγωνισμού $W = \{W_i : i \in N\}$ η επίλυση του προβλήματος βέλτιστης εκχώρησης του παραθύρου ανταγωνισμού, $\alpha W = \{\alpha W_i : i \in N\}$ είναι επίσης μια πιθανή λύση. Ανάμεσα στις πιθανές λύσεις της εξίσωσης (15), η ενεργός χωρητικότητα C διαφέρει εξ αιτίας των διαφορετικών μεγεθών του παραθύρου ανταγωνισμού. Επομένως, απαιτείται η εύρεση μιας λύσης που να επιλύει την (15) ικανοποιώντας ταυτόχρονα και την (16), μεγιστοποιώντας δηλαδή τη χρησιμοποίηση του καναλιού. Συμφωνα με το [42], προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση, κάθε κόμβος ανανενώνει κατανεμημένα το παράθυρο ανταγωνισμού του σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\dot{W}_i(t) = -aW_i(t)[\widetilde{U}_i'(x_i) - f(\Omega)]$$

Όπου α είναι ένα θετικό σταθερό βήμα, $\dot{W}_i(t)$ είναι η παράγωγος της $W_i(t)$ ως προς το t, και το $f(\Omega)$ αντικατοπτρίζει την τοπικά παρατηρούμενη από τον κόμβο κατάσταση Ω του

καναλιού. Ο παραπάνω κανόνας ανανέωσης σύμφωνα με το [42] συγκλίνει σε πεπερασμένο χρόνο επιτυγχάνοντας δικαιοσύνη μεταξύ των κόμβων.

4.5 Αλγόριθμος παροχής QoE

Τόσο στην περίπτωση CDMA όσο και στην περίπτωση WLAN δικτύου, υποθέτουμε σιγμοειδείς συναρτήσεις χρησιμότητας που ορίζονται ως εξής:

$$U_i(x_i, v_i, b_i) = c_i\{\frac{1}{1 + e^{-b_i(x_i - v_i)}} - d\}$$

όπου $c_i = {(1 + e^{v_i b_i})}/{e^{v_i b_i}}$, $d_i = {1}/{(1 + e^{v_i b_i})}$ και v_i, b_i είναι οι 2 παράμετροι της σιγμοειδούς συνάρτησης. Η παράμετρος v_i προσδιορίζει το μοναδικό σημείο καμπής της συνάρησης, ενώ η παράμετρος b_i καθορίζει την κλίση της συνάρτησης. Συγκεκριμένα, η παράμετρος v_i εκφράζει την απαίτηση του χρήστη σε ωφέλιμη ρυθμαπόδοση (goodput). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παράμετρος $\alpha_i(t)$ της συνάρτησης χρησιμότητας καθορίζει την προτεραιότητα του χρήστη i να επιλεγεί έναντι των υπολοίπων χρηστών για εκχώρηση πόρων από το μηχανισμό εκχώρησης πόρων. Η παράμετρος v_i ($v_i \equiv \alpha_i(t)$) καθορίζει τη βελτιστοποίηση του QoE του χρήστη [39]. Αυτό γίνεται ως εξής: αν ο χρήστης δεν είναι ικανοποιημένος με την ποιότητα της υπηρεσίας που του προσφέρεται, ζητά καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας αυξάνοντας την τιμή της μεταβλητής και το αντίστροφο. Φυσικά, αυτή η αλλαγή συνεπάγεται ότι δε θα είναι εις βάρος των υπολοίπων χρηστών. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο χρήστης ενημερώνεται ότι το αίτημά του είναι ανέφικτο.

Έχοντας ενσωματώσει το πλαίσιο δυναμικής πρόβλεψης της ποιότητας εμπειρίας στο μηχανισμό εκχώρησης πόρων τόσο σε CDMA όσο και σε WLAN ασύρματα δίκτυα, υιοθετώντας τις αρχές της μεγιστοποίησης της χρησιμότητας που παρέχει το δίκτυο, ορίζουμε τον ακόλουθο αλγόριθμο που τρέχει στους χρήστες και επιτρέπει τη δυναμική πρόβλεψη του QoE σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα [38]:

Βήμα 1: Ο χρήστης ελέγχει συνεχώς την απόδοση της υπηρεσίας (έτσι όπως την αντιλαμβάνεται) και το αντίστοιχο κόστος της μέσα από τη γραφική διεπαφή του.

Βήμα 2: Εάν δεν υπάρχει υπηρεσία διαθέσιμη, εάν δηλαδή $I_i(t+1) = 0$ πήγαινε

στο βήμα 1. Αλλιώς υπολόγισε τη νέα τιμή του $a_i(t+1)$.

Βήμα 3: Η συνάρτηση χρησιμότητας προσαρμόζεται δυναμικά και διαδίδεται στο σταθμό βάσης (ή σημείο πρόσβασης). Ο σταθμός βάσης (ή το σημείο πρόσβασης) επιλύει το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου, υποδεικνύοντας το πόσο εφικτό είναι το αίτημα του χρήστη.

Βήμα 4: Ο μηχανισμός διαχείρισης πόρων κατανέμει ανάλογα τους απαιτούμενους πόρους. Πήγαινε στο βήμα 1.

Όπως αναφέραμε, ο προτεινόμενος μηχανισμός παροχής QoE έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να ενταχθεί συμπληρωματικά στα υπάρχοντα ασύρματα συστήματα, επιτρέποντας την άμεση υιοθέτηση του από πληθώρα ασύρματων δικτύων. Ειδικότερα, δεδομένης την ύπαρξης ενός μηχανισμού εκχώρησης ασύρματων πόρων σε κάθε κυψέλη, ο προτεινόμενος μηχανισμός παροχής QoE ενεργεί μόνο όταν δεχτεί κάποια εντολή, ενώ οι επιδράσεις της θα αξιολογηθούν από το μηχανισμό εκχώρησης πόρων την επόμενη χρονοσχισμή (time slot), χωρίς τη χρήση συγχρονισμού. Επίσης, ο μηχανισμός QoE στηρίζεται μόνο σε ήδη υπάρχουσα τοπικά διαθέσιμη σηματοδοσία, δηλαδή την υποκειμενική αντίληψη της υπηρεσίας από τον χρήστη, ενώ η ασύγχρονη φύση του δεν εισάγει κανέναν περιορισμό στο μέγεθος ή τύπο του συστήματος, επιτρέποντας έτσι την επεκτασιμότητα.

5 *Αριθμητικά αποτελέσματα*

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετούμε μέσω πειραμάτων προσομοίωσης στο PlanetLab, την απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου παροχής QoE, στοχεύοντας στην ικανοποιήση των υποκειμενικών κριτηρίων ποιότητας των χρηστών και τελικά στην μεγιστοποίηση του επιπέδου ποιότητας εμπειρίας. Στη συνέχεια, ακολουθούν πληροφορίες για το περιβάλλον του Planetlab, η περιγραφή της αρχιτεκτονικής του πειράματος και παρουσιάζονται αναλυτικά τρεις διαφορετικές τοπολογίες με τα αποτελέσματά τους. Στο τέλος, δίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

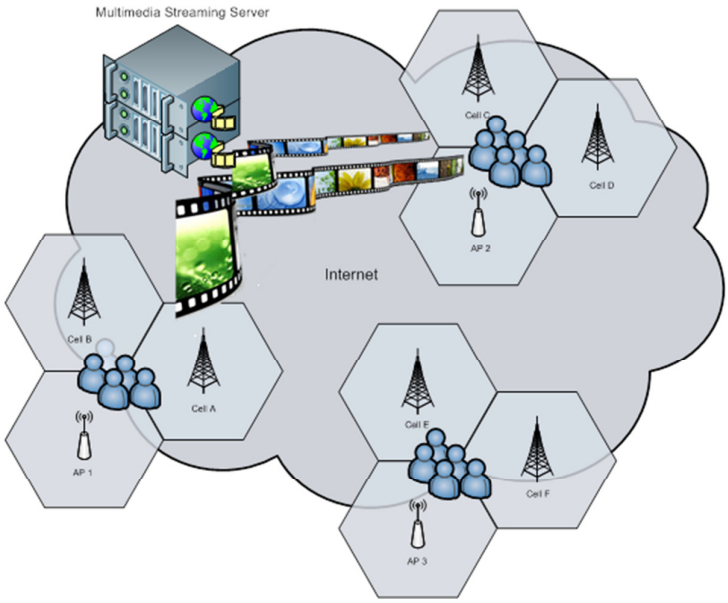
5.2 Planetlab

Το Planetlab είναι ένα ερευνητικό δίκτυο αποτελούμενο από υπολογιστές σε όλο τον κόσμο, το οποίο σχεδιάστηκε και χρησιμοποιείται ως ένα περιβάλλον δοκιμής εφαρμογών που σχετίζονται με τη δικτύωση υπολογιστών και κατανεμημένων συστημάτων. Φτιάχτηκε το 2002 και μέχρι σήμερα μετράει 1165 κόμβους σε 549 τοποθεσίες παγκοσμίως. Σε κάθε χρήστη που επιθυμεί να τρέξει πειράματα στο Planetlab ανατίθεται μία «φέτα» (slice) που με τη σειρά του απαρτίζεται από πολλαπλούς κόμβους. Κάθε κόμβος είναι ένα εικονικό μηχανήμα (Virtual Machine) στο οποίο ο χρήστης έχει πρόσβαση και μπορεί να τοποθετήσει τον κώδικα του.

Η πρόσβαση στο Planetlab επιτρέπεται σε άτομα που σχετίζονται με ακαδημαικούς χώρους ή εταιρείες που φιλοξενούν κόμβους του Planetlab [43]. Το δίκτυο του Planetlab αποτελείται από οπτικές ίνες και μπορεί να παρέχει ταχύτητες μέχρι και 10Gbps.

5.3 Αρχιτεκτονική πειράματος

Για τις ανάγκες του πειράματος, προσομοιώσαμε στο Planetlab την ακόλουθη αρχιτεκτονική. Θεωρούμε μια υπηρεσία βίντεο που προσφέρεται στους χρήστες. Κάθε χρήστης είναι συνδεδεμένος με ένα σταθμό βάσης (για CDMA κυψελωτά δίκτυα) ή ένα σημείο πρόσβασης (για ασύρματα WLAN δίκτυα) μέσω του οποίου λαμβάνει την υπηρεσία με έναν προκαθορισμένο ρυθμό μετάδοσης. Κάθε κινητός χρήστης, σταθμός βάσης ή σημείο πρόσβασης είναι και ένας διαφορετικός κόμβος του Planetlab. Προκειμένου να εξομειώσουμε το μηχανισμό βέλτιστης εκχώρησης πόρων (όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4), που είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των πόρων και άρα και της πραγματικής ρυθμαπόδοσης που λαμβάνουν οι χρήστες, χρησιμοποιούμε έναν ξεχωριστό κόμβο με περιβάλλον MATLAB τον οποίο ονομάζουμε MATLAB server. Έτσι κάθε σταθμός βάσης συνδέεται με τον MATLAB server και λαμβάνει περιοδικά το βέλτιστο διάνυσμά εκχώρησης πόρων ανά συνδεδεμένο χρήστη.

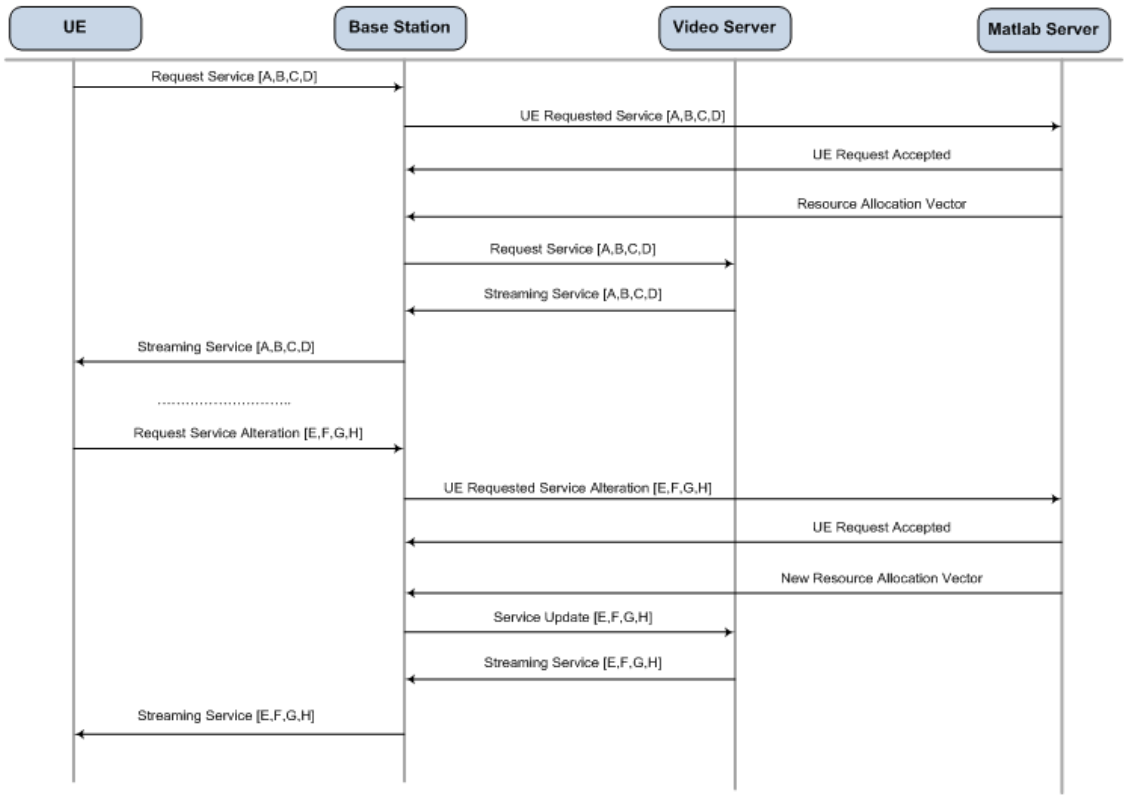


Σχήμα 18: Αρχιτεκτονική πειραμάτων.

Αρχικά, όλοι οι χρήστες που συνδέονται λαμβάνουν την υπηρεσία με τιμή ρυθμαπόδοσης περίπου ίση με 365kbps. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, οι χρήστες ενημερώνουν το σταθμό βάσης ή το σημείο πρόσβασης για το αν είναι ευχαριστημένοι ή όχι με τη ρυθμαπόδοση που τους παρέχεται ζητώντας καλύτερη ή χειρότερη υπηρεσία προσαρμόζοντας κατάλληλα την τιμή της παραμέτρου v_i από το σύνολο $v_i = \{0.08,\ 0.192,$

$0.348,\ 0.512,\ 1.2\}$, που αναπαριστά ουσιαστικά τους τύπους στους οποίους η υπηρεσία παρέχεται. Αν ο χρήστης είναι ικανοποιημένος με τη ρυθμαπόδοση που του παρέχεται διατηρεί σταθερή την τιμή της παραμέτρου. Αν είναι δυσαρεστημένος και θέλει καλύτερη υπηρεσία, αυξάνει την τιμή της παραμέτρου ενώ στην αντίθετη περίπτωση τη μειώνει. Ο σταθμός βάσης (ή το σημείο πρόσβασης), λαμβάνει αυτά τα δεδομένα μέσω TCP συνδέσεων από όλους τους χρήστες. Στη συνέχεια, τα στέλνει στο MATLAB server και εκείνος εκτελεί τον αλγόριθμο εκχώρησης πόρων και σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών κατανέμει τη ρυθμαπόδοση στους χρήστες. Έπειτα, επιστρέφει τα αποτελέσματα στο σταθμό βάσης (ή στο σημείο πρόσβασης) και αυτός με τη σειρά του ενημερώνει τους χρήστες. Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 4, αν το αίτημα του χρήστη είναι ανέφικτο, δηλαδή αν το δίκτυο δεν δύναται να του παρέχει την υπηρεσία που ζητάει ή το αίτημα του είναι εις βάρος των υπολοίπων χρηστών, τον ενημερώνει με κατάλληλο μήνυμα. Η παραπάνω επικοινωνία περιγράφεται αναλυτικά στο Σχήαμ 19.

Στα πλαίσια του πειράματος, προκειμένου να εξομειώσουμε την προσφερόμενη υπηρεσία βίντεο χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο iperf. Το iperf δημιουργεί point-to-point TCP και UDP σύνδέσεις δεδομένων (data streams), ενώ ταυτόχρονα μπορεί να μετρήσει και την απόδοση τους σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 19: Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου παροχής QoE

5.4 Τοπολογίες

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τις τοπολογίες τριών πειραμάτων καθώς και τα αποτελέσματά τους.

5.4.1 1η τοπολογία: 5 χρήστες συνδέονται σε ένα σημείο πρόσβασης ενός ασύρματου δικτύου WLAN

Στην πρώτη τοπολογία παριστάνουμε ένα σημείο πρόσβασης (access point) ενός ασύρματου τοπικού δικτύου WLAN στο οποίο συνδέονται 5 χρήστες. Στους χρήστες προσφέρεται μια υπηρεσία βίντεο, όπως περιγράψαμε παραπάνω. Πρόκειται για μια απλή τοπολογία με σκοπό να διαπιστώσουμε αν ο αλγόριθμος επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Υπενθυμίζουμε ότι (ισχύει σε όλα τα πειράματα), για να αναπαραστήσουμε το βαθμό ικανοποίησης του κάθε χρήστη από την υπηρεσία που λαμβάνει, χρησιμοποιούμε μια σιγμοειδή συνάρτηση χρησιμότητας η οποία εκφράζεται ως εξής:

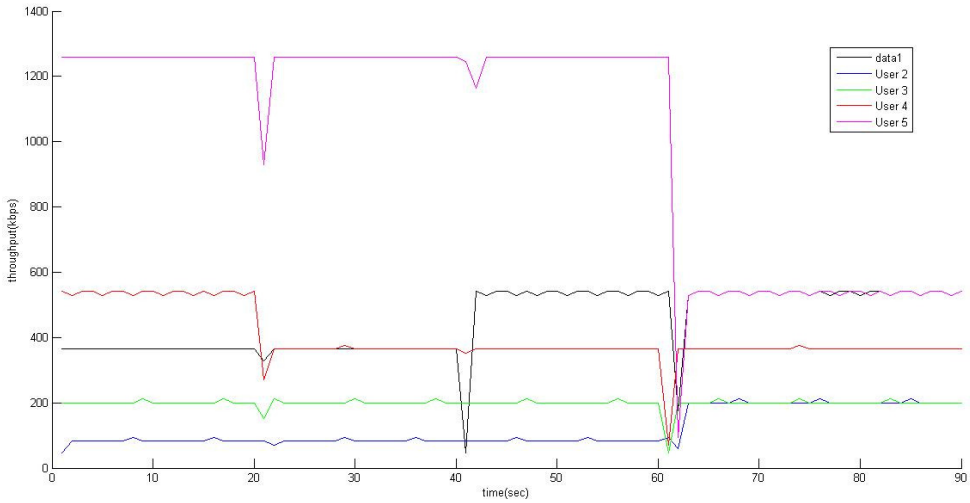
$$U_i(x_i, v_i, b_i) = c_i\{\frac{1}{1 + e^{-b_i(x_i - v_i)}} - d\}$$

Οι χρήστες, ανά ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, εκφράζουν την επιθυμία τους σε σχέση με την τιμή της ρυθμαπόδοσης στην οποία επιθυμούν να λαμβάνουν την υπηρεσία τους, μεταβάλλοντας την τιμή του v_i. Κατά τη διάρκεια του κάθε πειράματος, οι χρήστες εκφράζουν την επιθυμία τους τέσσερις φορές και επομένως, κάθε φορά τρέχει ο αλγόριθμος εκχώρησης πόρων. Οι τιμές της μεταβλητής v_i σε κάθε επανάληψη για κάθε κόμβο απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα:

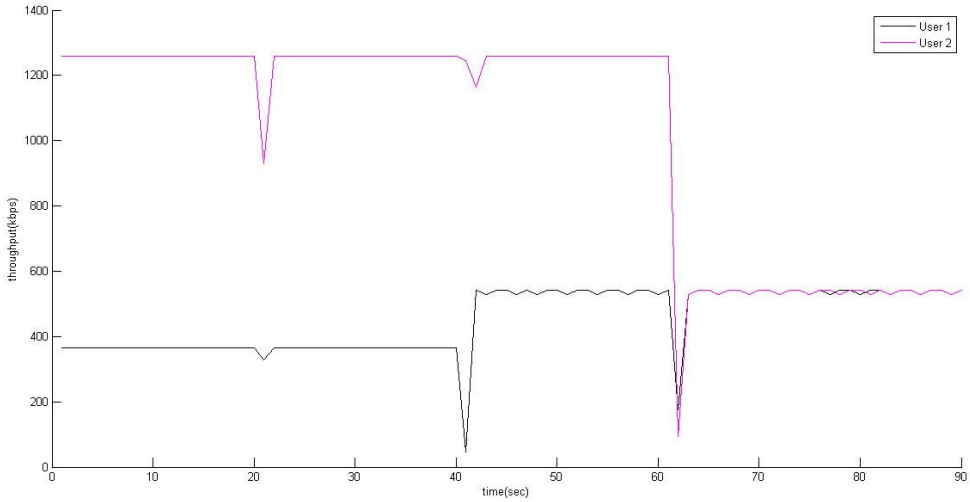
Επανάληψη\ User ID	**User ID=1**	**User ID=2**	**User ID=3**	**User ID=4**	**User ID=5**
1η	**0.348**	**0.080**	**0. 192**	**0.512**	**1.200**
2η	**0.348**	**0.080**	**0. 192**	**0.348**	**1.200**
3η	**0.512**	**0.080**	**0. 192**	**0.348**	**1.200**
4η	**0.512**	**0.192**	**0. 192**	**0.348**	**0.512**

Πίνακας 1: Τιμές μεταβλητής v_i ανά επανάληψη και ανά χρήστη στην 1η τοπολογία

Η γραφική παράσταση των ρυθμαποδόσεων τους συναρτήσει του χρόνου απεικονίζεται παρακάτω:



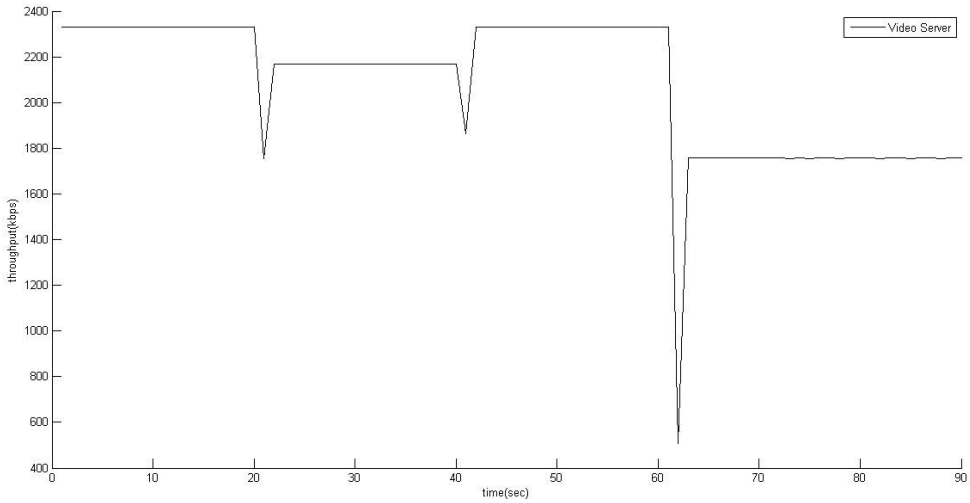
Σχήμα 20 :Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps συναρτήσει του χρόνου που λαμβάνουν οι χρήστες (1η τοπολογία).



Σχήμα 21: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps συναρτήσει του χρόνου που λαμβάνουν οι χρήστες με id=1 και id=5 (1η τοπολογία).

Παρατηρούμε ότι η ρυθμαπόδοση του κάθε χρήστη είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του. Για παράδειγμα, υποθέτουμε πως ο χρήστης με id=1 τη χρονική στιγμή 40sec δεν είναι ικανοποιημένος από την ποιότητα του video που παρακολουθεί - και που σαν αποτέλεσμα συνεπάγεται χαμηλή τιμή του δείκτη ποιότητας εμπειρίας - εξαιτίας των αυξανόμενων παρεμβολών. Σαν αποτέλεσμα, ζητά βελτιωμένη υπηρεσία μεταβάλλοντας την τιμή της

παραμέτρου v_i από 0.348 σε 0.512. Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι μεταβάλλεται και η τιμή της ρυιμαπόδοσης στην οποία λαμβάνει την υπηρεσία video από περίπου 364.56 kbps σε 540.96 kbps. Συνεπώς, η τιμή της ρυθμαπόδοσης στην οποία λαμβάνει την υπηρεσία, προσαρμόζεται πλήρως στις απαιτήσεις του. Αντίστοιχα, ο χρήστης με id=5 τη χρονική στιγμή 60 sec (όταν δηλαδή ξεκινάει η 4η εκτέλεση του αλγορίθμου) ζητά χαμηλότερη ποιότητα της υπηρεσίας καθώς δεν ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για το περιεχόμενο της υπηρεσίας που του παρέχεται. Η τιμή της παραμέτρου v_i μειώνεται από 1.200 σε 0.512 και αντίστοιχα η τιμή της ρυθμαπόδοσης μειώνεται από 1258.320 kbps σε 540.98 kbps.

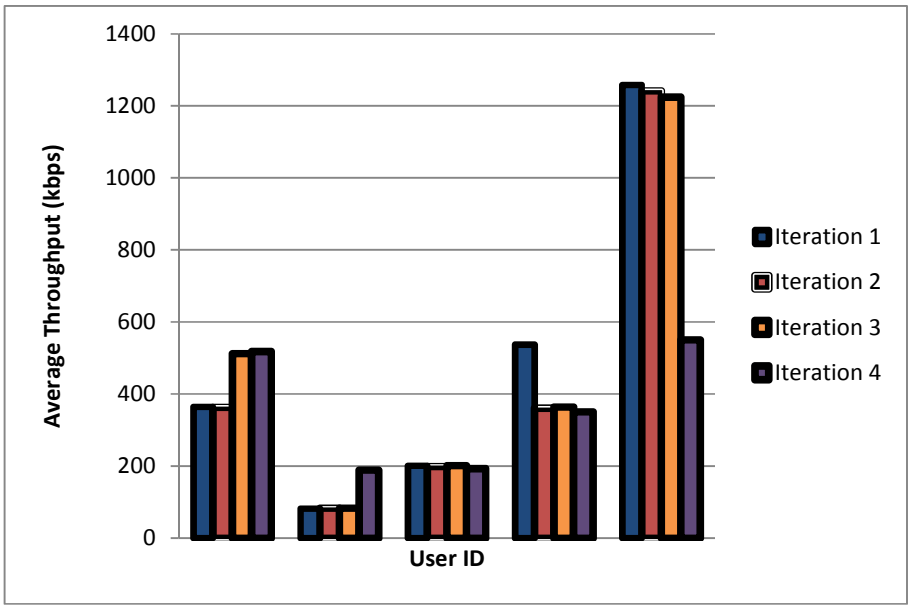


Σχήμα 22: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης του video server συναρτήσει του χρόνου (1η τοπολογία).

Στο σχήμα 22 παριστάνουμε τη ροή bits/sec μεταξύ του video server και του σημείο πρόσβασης. Παρατηρούμε, όπως είναι αναμενόμενο, ότι όταν συνολικά οι απαιτήσεις των χρηστών είναι μεγαλύτερες σε ρυθμαπόδοση, η ροή kbits/sec είναι μεγαλύτερη και αντίστοιχα για μικρότερες συνολικά απαιτήσεις σε ρυθμαπόδοση, έχουμε και μειωμένο ρυθμό ροής δεδομένων. Για παράδειγμα, η συνολική ρυθμαπόδοση στην οποία όλοι οι χρήστες επιθυμούν να λαμβάνουν την υπηρεσία τους από 0-20 sec είναι 2.332 Mbps, ενώ κατά την 4η εκτέλεσή του οι χρήστες συνολικά ζητούν χαμηλότερη τιμή ρυθμαπόδοσης που μεταφράζεται σε 1.756 Mbps. Όπως βλέπουμε από τη γραφική παράσταση, η τιμή της ρυθμαπόδοσης στην οποία προσφέρεται η υπηρεσία μειώνεται αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται βέλτιστη χρήση των πόρων του δικτύου, με τρόπο τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται οι

απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα εμπειρίας, αλλά και να βελτιστοποιείται η απόδοση του δικτύου καθώς δε γίνεται άσκοπη σπατάλη πόρων.

Τέλος, στο σχήμα 23 παρακάτω παριστάνουμε τη μέση τιμή της ρυθμαπόδοσης που λαμβάνει ο κάθε χρήστης σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου.



Σχήμα 23: Μέση τιμή ρυθμαπόδοσης κάθε χρήστη ανά επανάληψη του αλγορίθμου (1η τοπολογία).

Συμπερασματικά, ο αλγόριθμος ανταποκρίνεται σωστά στο πραγματικό δίκτυο. Στις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε σημεία όπου υπάρχουν πολύ μικρές τιμές ρυθμαπόδοσης. Αυτό συμβαίνει μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων του αλγορίθμου και οφείλεται στις διαδικασίες επαναρύθμισης των παραμέτρων αποστολής δεδομένων από τον video server. Επίσης, παρατηρούμε διακυμάνσεις και όχι σταθερές τιμές ρυθμαπόδοσης κατά τη διάρκεια μιας εκτέλεσης του αλγορίθμου (iteration). Αυτό οφείλεται στα ενδεχόμενα εμπόδια που συναντά η κίνηση κατά τη μετάδοσή της σε ένα πραγματικό δίκτυο υπολογιστών.

5.4.2 2η τοπολογία: 15 χρήστες συνδέονται σε ένα σημείο πρόσβασης ενός ασύρματου δικτύου WLAN

Στην παρούσα τοπολογία επιλέξαμε να αυξήσουμε τον αριθμό των χρηστών που συνδέονται στο σημείο πρόσβασης προκειμένου να διαπιστώσουμε η αύξηση του αριθμού των χρηστών θα επηρεάσει την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου.

Θεωρούμε ένα ασύρματο δίκτυο WLAN με ένα σημείο πρόσβασης στο οποίο συνδέονται 15 χρήστες. Όπως και προηγουμένως, οι απαιτήσεις των χρηστών από την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνουν, μεταβάλλονται και άρα μεταβάλλεται και ο δείκτης ποιότητας εμπειρίας τους. Στον πίνακα απεικονίζονται οι τιμές που λαμβάνει η μεταβλητή v_i σε κάθε επανάληψη για τον κάθε χρήστη:

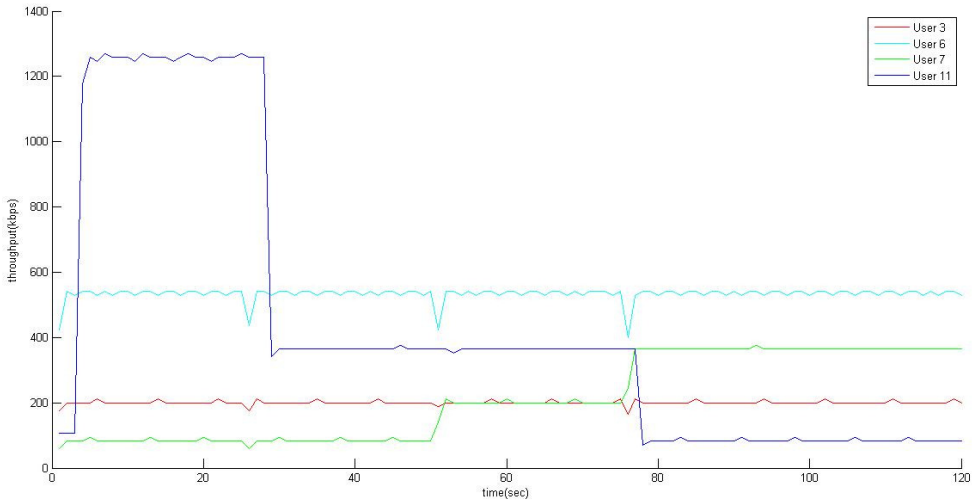
Επανάληψη/Id χρήστη	**1η**	**2η**	**3η**	**4η**
1	**0.348**	**0.348**	**0.512**	**0.512**
2	**0.080**	**0.080**	**0.080**	**0.192**
3	**0.192**	**0.192**	**0.192**	**0.192**
4	**0.512**	**0.348**	**0.348**	**0.348**
5	**1.200**	**1.200**	**1.200**	**0.512**
6	**0.512**	**0.512**	**0.512**	**0.512**
7	**0.080**	**0.080**	**0.192**	**0.348**
8	**0.348**	**1.200**	**1.200**	**1.200**
9	**0.080**	**0.080**	**0.080**	**0.080**
10	**0.512**	**0.348**	**0.348**	**0.348**

11	**1.200**	**0.348**	**0.348**	**0.080**
12	**0.080**	**0.192**	**0.192**	**0.192**
13	**0.348**	**0.348**	**0.348**	**0.348**
14	**0.192**	**0.192**	**0.192**	**0.192**
15	**0.080**	**0.192**	**0.348**	**0.512**

Πίνακας 2: Τιμές μεταβλητής v_i ανά επανάληψη και ανά χρήστη στην 2η τοπολογία

Για απεικονιστικούς λόγους θα παρασταθούν ομαδοποιημένα οι γραφικές παραστάσεις των ρυθμαποδόσεων των χρηστών σε συνάρτησει με το χρόνο των χρηστών. Ακολουθεί η γραφική παράσταση των χρηστών με ids: 3, 6, 7, 11 (Σχήμα 24).

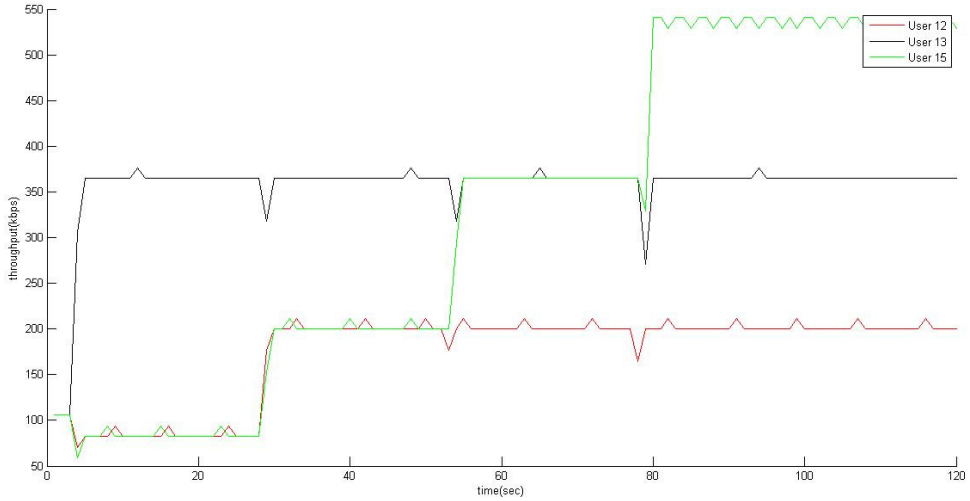
Παρατηρούμε και σε αυτό το πείραμα ότι οι κόμβοι λαμβάνουν τη ρυθμαπόδοση που ζητάνε ρυθμίζοντας κατάλληλα την τιμή της παραμέτρου τους. Για παράδειγμα ο χρήστης με id=11, αρχικά δίνει τιμή για τη μεταβλητή v_i ίση με 1.2. Πράγματι λαμβάνει την υπηρεσία βίντεο σε τιμή ρυθμαπόδοσης περίπου ίση με περίπου 1250 kbps. Στη συνέχεια, στα 25 sec περίπου, επιθυμεί να λάβει την υπηρεσία σε χαμηλότερη τιμή ρυθμαπόδοσης και έτσι μειώνει την τιμή της μεταβλητής v_i σε 0.348. Πράγματι, παρατηρούμε ότι η υπηρεσία προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του σε πραγματικό χρόνο και του παρέχεται σε τιμή ρυθμαπόδοσης περίπου ίση με 3 64.560 kbps. Στη συνέχεια, περίπου στα 80 sec ζητά ακόμα χαμηλότερη τιμή ρυθμαπόδοσης μέσω της αλλαγής της τιμής της παραμέτρο v_i, στην οποία δίνει την τιμή 0.080. Πράγματι, η υπηρεσία προσαρμόζεται και του παρέχεται σε τιμή ρυθμαπόδοσης ίση με 82.320 kbps. Αντίστοιχα, οι χρήστες με ids 3 και 6 είναι απόλυτα ικανοποιημένη με την υπηρεσία που λαμβάνουν και επομένως, καθ όλη τη διάρκεια επιθυμούν να λαμβάνουν την υπηρεσία σε συγκεκριμένη τιμή ρυθμαπόδοσης. Γι αυτό το λόγο, οι χρήστες με id=3 και id=6 διατηρούν σταθερές τις τιμές των παραμέτρων v_i σε 0.192 και 0.512 αντίστοιχα. Πράγματι λαμβάνουν την υπηρεσία σε περίπου σταθερή τιμή ρυθμαπόδοσης ίση με 199.920 kbps και 540.960 kbps αντίστοιχα. Από τη γραφική παράσταση, παρατηρούμε ότι οι τιμές των ρυθμαποδόσεων των χρηστών δεν είναι σταθερές, αλλά παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις.



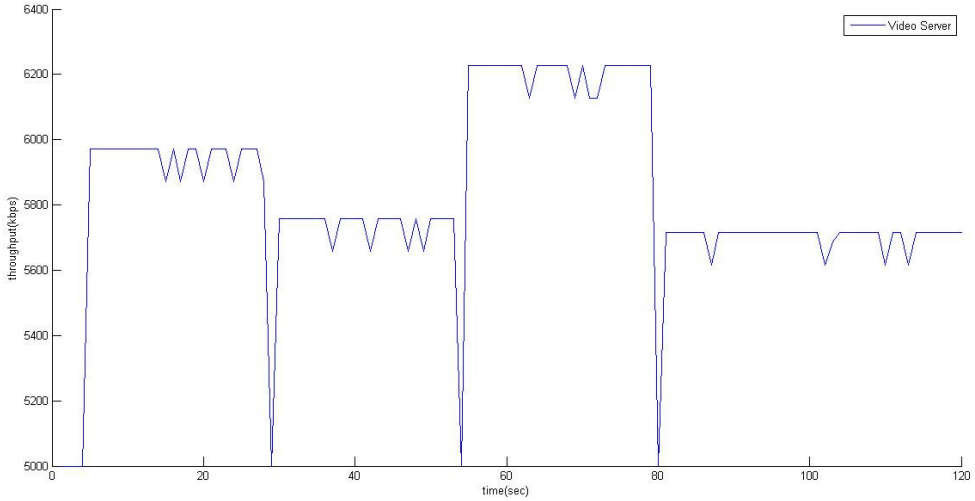
Σχήμα 24: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps συναρτήσει του χρόνου για τους χρήστες με ids: 3, 6, 7, 11 ($2^{η}$ τοπολογία).

Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται πιθανόν στα εμπόδια που παρεμβάλλονται κατά τη μεταφορά της κίνησης, εφόσον τα πειράματα εκτελούνται σε ένα πραγματικό δίκτυο υπολογιστών. Επομένως, η αύξηση του αριθμού των κόμβων που συνδέονται στο σημείο πρόσβασης δεν επηρέασε την ορθή εκχώρησης πόρων που κάνει ο αλγόριθμος αλλά ούτε και την ποιότητα εμπειρίας που λαμβάνει ο κάθε χρήστης. Η αύξηση ή η μείωση της ρυθμαπόδοσης σε ένα χρήστη δε γίνεται εις βάρος των άλλων χρηστών επομένως ο αλγόριθμος είναι δίκαιος.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 25, αναπαριστούμε τη γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης των χρηστών με ids=12, 13, 15. Και σε αυτή την περίπτωση, ο αλγόριθμος ανταποκρίνεται με επιτυχία στις απαιτήσεις των χρηστών. Συγκεκριμένα, ο χρήστης με id 15, επειδή δεν ικανοποιείται από την ποιότητα της υπηρεσίας που του παρέχεται, σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου ζητά και μεγαλύτερη τιμή ρυθμαπόδοσης αυξάνοντας συνεχώς τις απαιτήσεις του. Συγκεκριμένα, την πρώτη φορά που του ζητείται να δηλώσει την επιθυμία του δίνει στη μεταβλητή v_i την τιμή 0.08, τη δεύτερη φορά 0.192, την τρίτη 0.348 και την τέταρτη 0.512. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος ανταποκρίνεται σε αυτή του την επιθυμία και η υπηρεσία του προσφέρεται σε τιμές ρυθμαπόδοσης ίσες με 82.320 kbps, 199.92 kbps, 364.56 kbps και 540.96 kbps αντίστοιχα.



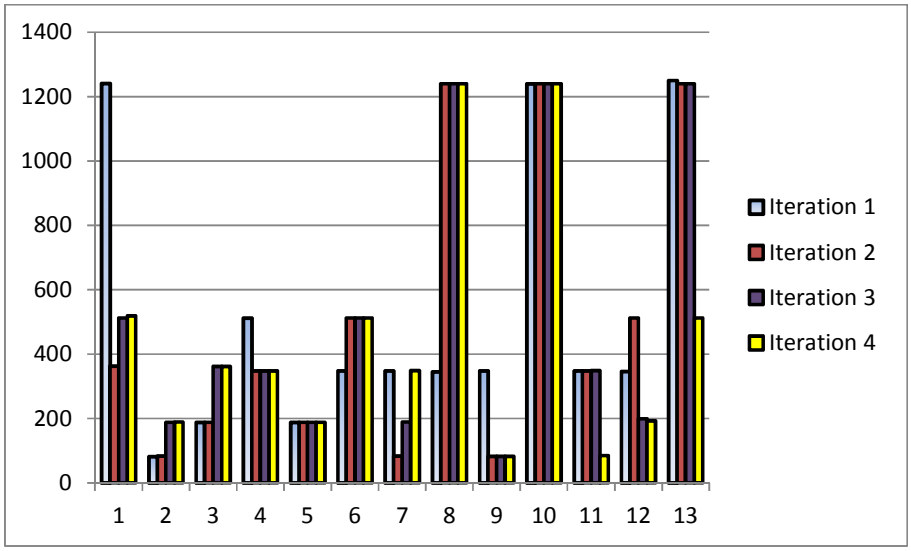
Σχήμα 25: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps συναρτήσει του χρόνου για τους χρήστες με ids: 12, 13, 15 (2η τοπολογία).



Σχήμα 26: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης του video server συναρτήσει του χρόνου (2η τοπολογία).

Αντιθέτως, ο χρήστης με id 13 διατηρεί σταθερή την προτίμηση του και δε μεταβάλλει τις απαιτήσεις του. Ως εκ τούτου, διατηρεί σταθερή την τιμή της μεταβλητής v_i σε 0.348 και αντίστοιχα λαμβάνει την υπηρεσία σε τιμή ρυθμαπόδοσης περίπου ίση με 364.56 kbps καθ όλη τη διάρκεια του πειράματος. Και σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε, ότι καθώς τριπλασιάστηκε ο αριθμός των χρηστών σε σχέση με την πρώτη τοπολογία, αυτομάτως

αυξήθηκαν κατά πολύ και οι συνολικές απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης. Παρατηρούμε ότι το δίκτυο ανταποκρίνεται όπως πρέπει και αυξάνει τη ροή δεδομένων ανάλογα (Σχήμα 26).



Σχήμα 27: Μέση τιμή ρυθμαπόδοσης κάθε χρήστη ανά επανάληψη του αλγορίθμου (2η τοπολογία).

5.4.3 3η τοπολογία: Μια κυψέλη CDMA συνδεδεμένη με 5 χρήστες και ένα σημείο πρόσβασης ενός WLAN συνδεδεμένο με 8 χρήστες

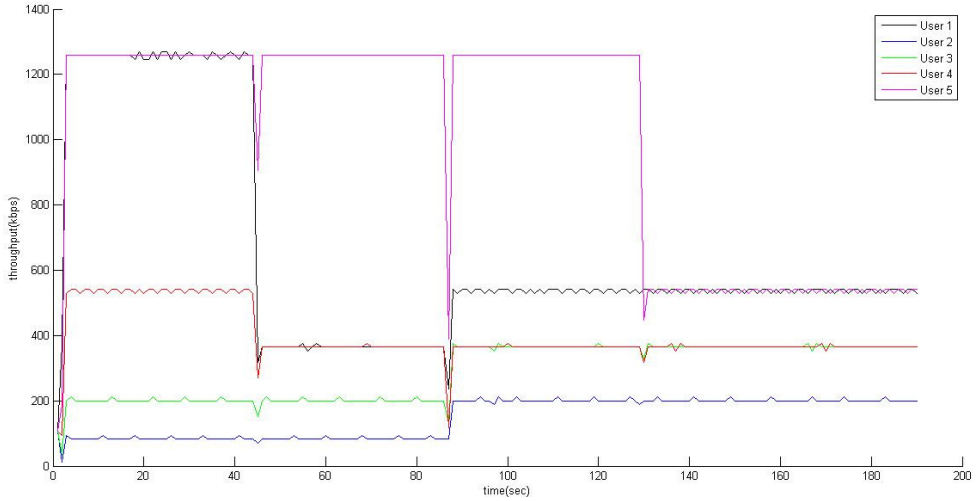
Στην τρίτη τοπολογία θεωρούμε μία κυψέλη CDMA στο κέντρο της οποίας συνδέεται ένας σταθμός βάσης (base station) στον οποία συνδέονται οι κόμβοι 1-5 και ένα ασύρματο δίκτυο WLAN, στο οποίο συνδέονται οι κόμβοι 6-13. Και σε αυτή την περίπτωση όλοι οι κόμβοι επιλέγουν ένα από τα πέντε σύνολα υπηρεσιών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της μεταβλητής v_i για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου και για τους 13 χρήστες.

Επανάληψη/ Id χρήστη	**1η**	**2η**	**3η**	**4η**
1	**1.200**	**0.348**	**0.512**	**0.512**

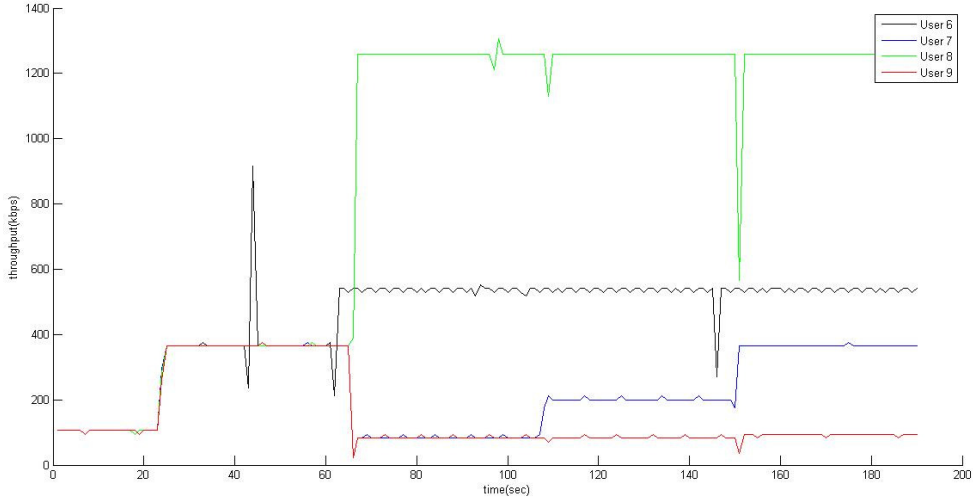
2	**0.080**	**0.080**	**0.192**	**0.192**
3	**0.192**	**0.192**	**0.348**	**0.348**
4	**0.512**	**0.348**	**0.348**	**0.348**
5	**0.192**	**0.192**	**0.192**	**0.192**
6	**0.348**	**0.512**	**0.512**	**0.512**
7	**0.348**	**0.080**	**0.192**	**0.348**
8	**0.348**	**1.200**	**1.200**	**1.200**
9	**0.348**	**0.080**	**0.080**	**0.080**
10	**1.200**	**1.200**	**1.200**	**1.200**
11	**0.348**	**0.348**	**0.348**	**0.080**
12	**0.348**	**0.512**	**0.192**	**0.192**
13	**1.200**	**1.200**	**1.200**	**0.512**

Πίνακας 3: Τιμές μεταβλητής v_i ανά επανάληψη και ανά χρήστη στην 3η τοπολογία

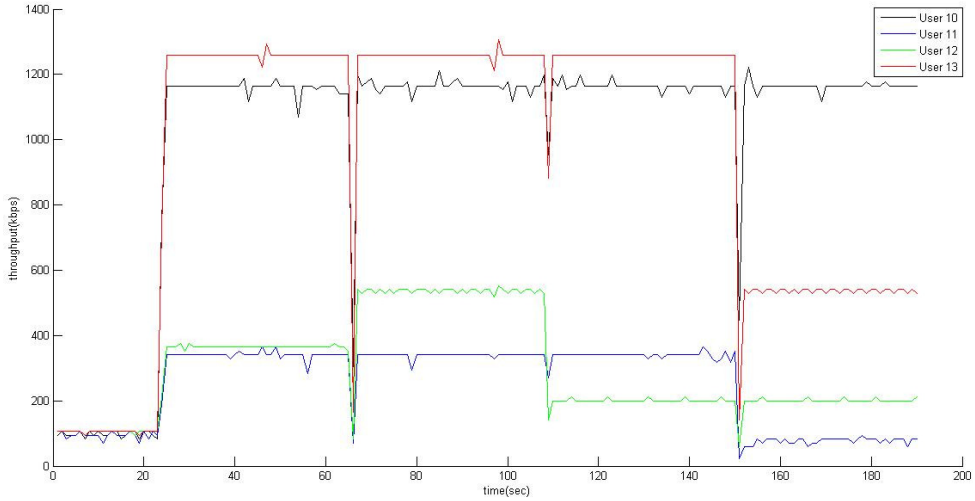
Και σε αυτη την τοπολογία, ο αλγόριθμος κάνει σωστή εκχώρηση πόρων. Για παράδειγμα ο χρήστης με id 1 (σχήμα 28) αρχικά δίνει στη μεταβλητή v_i την τιμή 1.2 και πράγματι λαμβάνει την υπηρεσία σε ρυθμαπόδοση περίπου ίση με 1.164 Mbps, στη συνέχεια μειώνει την τιμή της μεταβλητής v_i σε 0.348 και η ρυθμαπόδοση μειώνεται ανάλογα σε περίπου 364.56 kbps, ενώ στις δυο τελευταίες επαναλήψεις του αλγορίθμου αυξάνει τις απαιτήσεις του και δίνει στη μεταβλητή v_i την τιμή 0.512. Πράγματι, η υπηρεσία προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του και του παρέχεται σε τιμή ρυθμαπόδοσης ίση με 540.96 kbps.



Σχήμα 28: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps των χρηστών 1-5 που συνδέονται στο ασύρματο δίκτο WLAN (3η τοπολογία).



Σχήμα 29: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps των χρηστών 6-9 που συνδέονται στο σταθμό βάσης (3η τοπολογία).

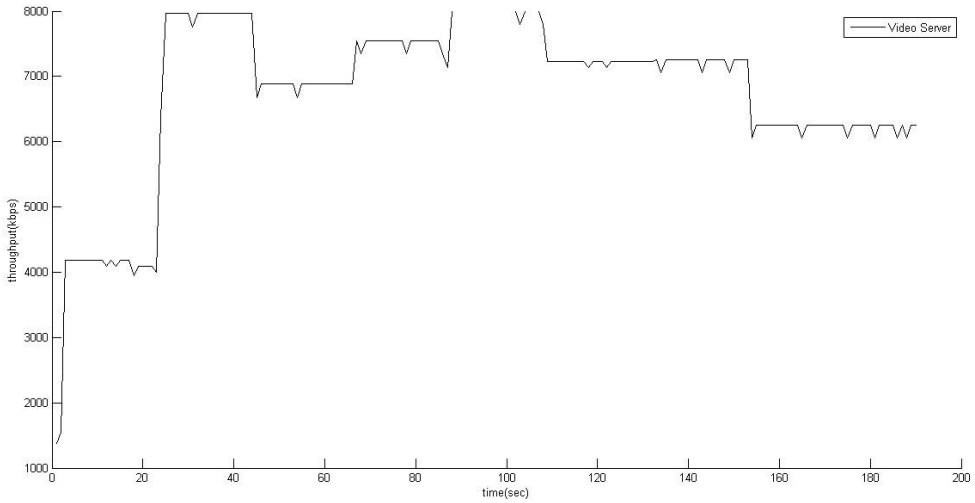


Σχήμα 30: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης σε kbps των χρηστών 10-13 που συνδέονται στο ασύρματο δίκτου WLAN (3η τοπολογία).

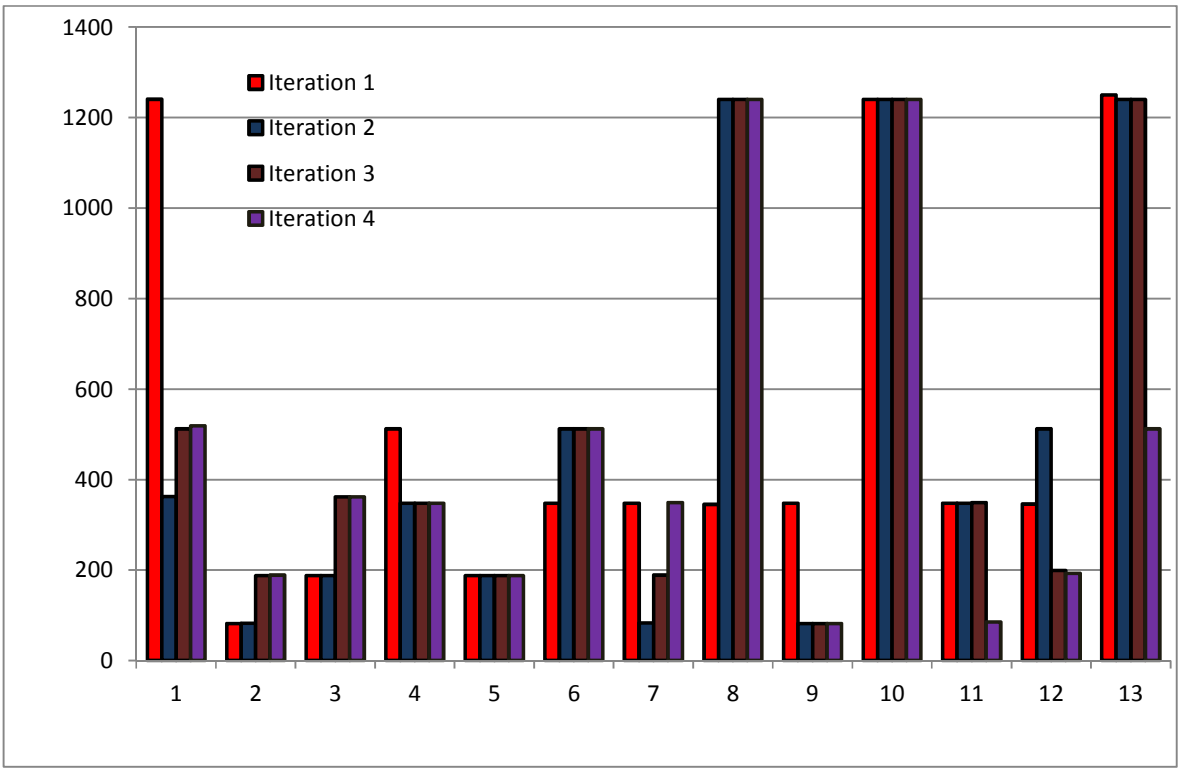
Αντίστοιχα στο σχήμα 29, ο χρήστης με id 8 που συνδέεται στην κυψέλη CDMA, δίνει αρχικά στη μεταβλητή v_i την τιμή 0.348 και πράγματι λαμβάνει την υπηρεσία με 364.56 kbps. Στη συνέχεια, καθώς δεν είναι ικανοποιημένος από την παραπάνω τιμή ρυθμαπόδοσης, αυξάνει ιτις απαιτήσεις του και δίνει στη μεταβλητή v_i την τιμή 1.2. Πράγματι, καθ όλη την υπόλοιπη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος λαμβάνει την υπηρεσία περίπου με 1.164 Mbps.

Στο σχήμα 30, ο χρήστης με id 10, στη μεταβλητή v_i την τιμή 1.2 καθ όλη τη διάρκεια του πειράματος. Πράγματι, λαμβάνει την υπηρεσία σε τιμή περίπου ίση με 1.164 Mbps.

Παρακάτω ακολουθεί η γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης του Video Server σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχήμα 31: Γραφική παράσταση της ρυθμαπόδοσης του video server συναρτήσει του χρόνου(3η τοπολογία).



Σχήμα 32: Μέση τιμή ρυθμαπόδοσης κάθε χρήστη ανά επανάληψη του αλγορίθμου (3η τοπολογία).

5.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων:

- Ο αλγόριθμος πετυχαίνει σωστή εκχώρηση του εύρους ζώνης του δικτύου στους χρήστες σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους.
- Η εκχώρηση των πόρων γίνεται με δίκαιο τρόπο. Δηλαδή, αν ένας χρήστης επιθυμεί καλύτερη ποιότητα της υπηρεσίας και επιθυμεί να λάβει την υπηρεσία σε μεγαλύτερη τιμή ρυθμαπόδοσης και φυσικά αν το αίτημα του είναι εφικτό και μπορεί να το παρέχει το δίκτυο, τη λαμβάνει χωρίς να επηρρεάζεται η ρυθμαπόδοση που λαμβάνουν οι άλλοι χρήστες.
- Ο αλγόριθμος πετυχαίνει την παροχή της υπηρεσίας στους χρήστες με βάση τις προτιμήσεις τους σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, εξασφαλίζεται με αυτόν τον τρόπο, η ικανοποίηση των χρηστών και επομένως διασφαλίζεται ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας εμπειρίας τους.
- Παρατηρούνται κάποιες πολύ μικρές τιμές της ρυθμαπόδοσης σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Αυτές οι τιμές έχουνε πολύ μικρή διάρκεια (1sec) και συμβαίνουν λόγω των διαδικασιών επαναρύθμισης των παραμέτρων αποστολής δεδομένων από τον video server.
- Η ρυθμαπόδοση συχνά δεν έχει σταθερή τιμή αλλά έχει μικρές διακυμάνσεις($\pm 3\%$). Αυτές οι διακυμάνσεις οφείλονται στα εμπόδια που συναντά η κίνηση κατά τη μετάδοσή της σε ένα πραγματικό δίκτυο υπολογιστών.

6 *Επίλογος*

Στην παρούσα εργασία επιχειρήσαμε τη βελτιστοποίηση της Ποιότητας εμπειρίας των χρηστών (QoE) σε πραγματικό χρόνο για υπηρεσίες πολυμέσων μέσω ενός μηχανισμού δυναμικής εκχώρησης πόρων. Η σπουδαιότητα και σημαντικότητα της παροχής Ποιότητας εμπειρίας και ικανοποίησης των υποκειμενικών κριτηρίων ποιότητας των χρηστών γίνεται εμφανής στους παρακάτω λόγους. Κατ αρχήν, η ικανοποίηση του χρήστη έχει μεγάλη σημασία για τους διαχειριστές αφού συνειδητοποιήουν ότι οι ανικανοποίητοι χρήστες εγκαταλείπουν τις περισσότερες φορές το δίκτυο χωρίς να εκφράσουν τη δυσαρέσκειά τους αλλά μοιράζοντας την κακή εμπειρία τους με άλλους ενδεχόμενους μελλοντικά πελάτες. Συνεπώς, η κακή φήμη συνεπάγεται απώλεια εισοδήματος. Επι πλέον, η βέλτιστη εκχώρηση πόρων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του QoE επιτρέπει σε περισσότερους πελάτες να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα ενώ παράλληλα βελτιστοποιείται το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας που παρέχει το δίκτυο αλλά και η χρησιμότητα του δικτύου. Συνεπώς, αυτό το μοντέλο μπορεί να πάρει επιχειρηματικές διαστάσεις και να χρησιμοποιηθεί ενδεχομένως σε σύγχρονα δίκτυα αλλά και να τονίσει την ανάγκη περαιτέρω έρευνας ώστε να επινοηθούν πιο περίτεχνα μοντέλα κοστολόγησης, βασισμένα στη συμφόρηση του δικτύου, τον τύπο της υπηρεσίας, την τιμολογιακή πολιτική αλλά και την επίδρασή τους στη συμπεριφορά του χρήστη και την απόδοση των συστημάτων.

Στην εργασία αυτή αντιμετωπίσαμε την Ποιότητα εμπειρίας σαν μια δυναμική διαδικασία που επιτρέπει στους τελικούς χρήστες να μεταβάλλουν δυναμικά τις προσδοκίες τους και να τις εκφράζουν σε πραγματικό χρόνο στο σταθμό βάσης ή στο σημείο πρόσβασης με τα οποία συνδέονται. Παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο παροχής Ποιότητας εμπειρίας σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα στοχεύοντας στην καθολική μεγιστοποίηση της χρησιμότητας των ασύρματων πόρων αλλά και ικανοποίησης των υποκειμενικών απαιτήσεων των χρηστών. Συγκεκριμένα προτάθηκε μια μεθοδολογία μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του δικτύου βασισμένη σε συναρτήσεις χρησιμοτητας ικανή να εφαρμοστεί

άμεσα σε πληθώρα ετερογενών ασύρματων δικτύων, ενώ η απόδοση, η ευρωστία και η κλιμακωσιμότητά της δοκιμάστηκαν πειραματικά μέσα από το Planetlab.

7 *Βιβλιογραφία*

[1]. Α. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, "Συστήματα κινητών επικοινωνιών", εκδόσεις Παπασωτηρίου.

[2]. Μ. Ε. Θεολόγου, "Δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών", Εκδόσεις Τζιόλα.

[3]. E. Crawley, R. Nair, B. Rajagopalan, H. Sandick, "A framework for QoS-based routing in the Internet", *IETF RFC 2386*, August 1998.

[4]. ITU-T Recommendation P.10, "Vocabulary for performance and quality of service" July 2006.

[5]. W. E. Walsh, G. Tesauro, J. O. Kephart, R. Das "Utility Functions in Autonomic Systems", *In proceedings of the 1st International conference on Autonomic Computing*, May 2004.

[6]. B. Kitchenham, S.L. Pfleeger, "Software quality: the elusive target", *IEEE Software, vol. 13 iss.*1, p.p. 12-21, 1996.

[7]. G. Weinberg, "Quality Software Management – Systems Thinking'', vol. 1, New York: Dorset House Publishing, 1991.

[8]. M. Renier "Software quality" from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Software_quality&oldid=315002355, 2009

[9]. D. A. Garvin, "What Does 'Product Quality' Really Mean?", *Sloan Management Review, vol. 1*, p.p. 25-48, 1984.

[10]. ISO 9126 available at http://qoe.lt/140/iso-9126-standard/

[11]. J. Park, S. H. Han, Hyun K. Kim, Youngseok Cho, Wonkyu Park "Developing elements of user experience for mobile phones and services: survey, interview, and observation approaches" *Human factors and ergonomics in manufacturing and service industries on Wiley Periodicals,Inc.* 00 (0) 1-15 (2011).

[12]. Alben, L "Quality of experience: defining the criteria fot effective interaction design", *Interactions*, 3(3), 11-15.

[13]. McNamara, N. Kirakowski, "Functionality, usability and user experience: three areas of concern", *Interactions*, 15(1), 26-28.

[14]. ISO 9241-11 "Ergonomic requirements for office work for visual display terminals" , Part 11: Guidance on usability, (1998).

[15]. R. Stankiewicz, A. Jajszczyk, "A survey of QoE assurance in converged networks" *Computer Networks*, 2011; 55, 1459-1473.

[16]. K. Kilkki, "Differentiated Services for the Internet", Macmillan Publishing, 1999.

[17]. ITU-T Recommendation E.800, "Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability", August 1993.

[18]. http://qoe.lt/209/quality-of-service/

[19]. D. Lopez, F. Gonzalez, L. Bellido, A. Alonso "Adaptive multimedia streaming over IP based on customer oriented metrics", *Proceedings of ISCN'06 7th International Symposium on Computer Networks*, 2006.

[20]. D. Soldani, M. Li and R. Cuny (eds.), "QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems", ed. John Wiley and Sons, pp.460, June 2006.

[21]. A. Patrick, J. Singer, B. Corrie, S. Noel, K. Khatib, B. Emond "A QoE sensitive architecture for advanced collaborative environments", [Conference Paper], *Proceedings First International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks. IEEE Comput. Soc* (2004).

[22]. J. Goodchild (2005) "Integrating data voice and video – Part II IP Video Implementation and planning guide", *United States Telecom Association* (2005).

[23]. Dagstuhl Seminar, "Quality of Experience: From User Perception to Instrumental Metrics", 1-5 May 2009.

[24]. Dr. Raimund, Dr. Peter Reichi, "Quality of Experience-More Than Just Another Buzzword?" *EuroView 2011 Workshop*, Aug 1-2, Wurzburg, Germany.

[25]. ITU-T Recommendation P.10, "Vocabulary for performance and quality of service" , July 2006.

[26]. J. Goodchild, "Integrating data voice and video – Part II IP Video Implementation and planning guide", *United States Telecom Association* (2005).

[27]. M. Siller J. Woods, "Improving quality of experience for multimedia services by QoS arbitration on a QoE framework", *Packet Video Nantes*, 2003.

[28]. R. Jain, "Quality of Experience", *IEEE Multimedia, Vol. 11*(1), pp. 96-97, 2004.

[29]. Jingjing Zhang, Nirwan Ansari "On assuring End-to-End QoE in Next Generation Networks: Challenges and a Possible Solution" *IEEE Communications Magazine*, July 2011, pp. 185-191.

[30]. ITU-T Recommendation E.360, "Framework for QoS routing and related traffic engineering methods for IP-, ATM-, and TDM-based multiservice networks", May 2002.

[31]. ITU-T Recommendation G.1010, "End-user multimedia QoS categories", November 2001.

[32]. D. Niyato, E. Hossain, "Competitive pricing in heterogenous wireless access networks: issues and approaches", *IEEE Network.* November/December 2008.

[33]. S. Khirman, P. Henrisken, "Relationship between quality of service and quality of experience for public internet service", Passive and Active Network Measurement workshop, PAM 2002.

[34]. H.Kim, D.Lee, J.Lee, K.Lee, W.Lyu, S.Choi "The QoE evaluation method through the QoS-QoE correlation model'', *Fourth international conference on networked computing and advanced information management*, 2008.

[35]. S. Khan, S. Duhovnikov, E. Steinbach, W. Kellerer, "MOS-Based multiuser multiapplication cross-layer optimization for mobile multimedia communication" *Hindawi publishing corporation advances in multimedia*, 2007.

[36]. S. Thakolsri, S. Khan, E. Steinbach, W. Kellerer "QoE-driven cross-layer optimization for high speed downlink packet access", *Journal of communications*, October 2009.

[37]. H. Derbel, N. Agoulmine, M. Salaun, "Service utility optimization model based on user preferences in multiservice ip networks'', *IEEE transactions on SMC associate editors*, January 2010.

[38]. G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, V. Kaldanis, G. Karantonis, S. Papavassiliou, "A novel framework for dynamic utility-based QoE provisioning in wireless networks", *IEEE global communications conference*, Miami 2010.

[39]. G. Aristomenopoulos, V. Kaldanis, G. Katsaros, S. Papavassiliou, "Experimentally driven QoE-aware Multimedia Content Delivery in Modern Wireless Networks", Springer Multimedia Tools and Applications, under review.

[40]. J. W. Lee, Ravi. R. Mazumdar, N. B. Shroff, "Joint resource allocation and base station assignment for the downlink in CDMA networks", *Vehicular Technology Conference*, 2003.

[41]. J. W. Lee, R. R. Mazumdar, N.B. Shroff, "Downlink power allocation for multi-class CDMA wireless networks" *IEEE Infocom'02*, pp.1480-1489, 2002.

[42]. Y. Yang, J. Wang, R. Kravets, "Distributed optimal contention window control for elastic traffic in simple cell wireless LANs- Complete version", 15(5) 795-825, Nov. 2006.

[43]. http://www.planet-lab.eu/