



**ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ / ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ VoIP»

ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΒΑΡΒΕΡΑΚΗΣ

1995104

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΙΑΚΩΒΟΣ ΟΡΦΑΝΟΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Voice-over-IP είναι μια οικογένεια τεχνολογιών επεξεργασίας και μετάδοσης φωνής που έχει σαν στόχο να εκμεταλλευτεί τις υπάρχουσες υποδομές των δικτύων δεδομένων. Τα δίκτυα VoIP υπόσχονται να μειώσουν το κόστος των τηλεφωνικών κλήσεων και να παρέχουν νέες υπηρεσίες επιταχύνοντας έτσι την ολοκλήρωση της τηλεφωνίας με τους υπολογιστές.

Για να γίνει όμως ευρέως αποδεκτό το VoIP θα πρέπει να είναι σε θέση να επιτύχει την ποιότητα σήματος αλλά και γενικά την ποιότητα συνομιλίας που παρέχουν τα δημόσια τηλεφωνικά δίκτυα και στην οποία οι χρήστες είναι συνηθισμένοι. Σε άμεση συνάρτηση με αυτή την πρόκληση είναι η πρόκληση της ενσωμάτωσης του VoIP στα υφιστάμενα δίκτυα φωνητικής τηλεφωνίας και της ομαλής συνεργασίας του με αυτά.

Το E-model είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο που προτείνεται από την ITU και χρησιμοποιεί παραμέτρους της μετάδοσης για να προβλέψει την υποκειμενική ποιότητα της πακετοποιημένης ομιλίας. Συνδυάζει τους διαφορετικούς παράγοντες υποβάθμισης βασιζόμενο στην αρχή ότι το αποτέλεσμα των υποβαθμίσεων που αντιλαμβάνεται ο χρήστης - αν μετατραπεί στην κατάλληλη ψυχοακουστική κλίμακα - είναι προσθετικό.

Στα πλαίσια της εργασίας, με τη χρήση του E-model μελετάται η ενσωμάτωση του VoIP στα υφιστάμενα δίκτυα καταρχήν με την ένταξη μιας γραμμής VoIP που συνδέει τμήματα ενός PSTN δικτύου και σε δεύτερο στάδιο με τη διασύνδεση του PSTN δικτύου με το IP δίκτυο κορμού. Οι επιπτώσεις της κωδικοποίησης στην ποιότητα της ομιλίας ελέγχεται και στις δύο τοπολογίες με τη χρήση του δημοφιλούς στα συστήματα VoIP κωδικοποιητή G.729. Τέλος αναλύονται οι επιπτώσεις που έχει στην ποιότητα της ομιλίας η αύξηση του φορτίου σε μια γραμμή VoIP - που αποτελεί μέρος της διαδρομής της φωνής - καθώς αυξάνεται σταδιακά μέχρι το σημείο που το απαιτούμενο εύρος ζώνης υπερβαίνει την χωρητικότητα της γραμμής.

Λέξεις κλειδιά : VoIP, ποιότητα, ομιλία, E-model

ABSTRACT

Voice-over-IP refers to an expanding family of voice processing and transport technologies that seek to take advantage of existing data network infrastructures. VoIP networks promise to reduce the cost of telephone calls and have the potential to provide unique new services and hasten computer telephony integration.

To be widely accepted and employed, however, VoIP has to match the signal and conversational quality that is consistently delivered by the Public Switched Telephone Networks and to which telephone customers have become accustomed. Related to this challenge of achieving acceptable sound and conversational quality is the technical challenge of integrating and interworking VoIP with existing voice networks.

The E-model is a computational model, standardized by ITU that uses transmission parameters to predict the subjective quality of packetized voice. The E-model combines different impairments based on the principle that the perceived effect of impairments is additive, when converted to the appropriate psycho-acoustic scale.

In this work, with the use of E-model, the integration of VoIP is studied first with the introduction of a VoIP trunk interconnecting parts of the PSTN network, and then by the interworking of PSTN with the IP backbone network. The effect of voice coding in speech quality is also considered in both topologies with the use of codec G.729, among the most popular in VoIP environments. In the end the effects on speech quality are analyzed, when the traffic load of a VoIP trunk in the voice path is gradually incremented until the required bandwidth exceeds the trunk capacity.

Keywords: VoIP, quality, speech, E-model

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ABSTRACT.....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	IV
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	VI
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	VII
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1. Δίκτυα Μεταγωγής και Τεχνολογίες Μετάδοσης Φωνής.....	10
1.1 ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	10
1.1.1 Υποδομή.....	11
1.1.2 Σηματοδοσία.....	11
1.1.2.1 Σηματοδοσία χρήστη – δικτύου.....	11
1.1.2.2 Σηματοδοσία μεταξύ των στοιχείων του δικτύου.....	12
1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΟΥ.....	13
1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΦΩΝΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ.....	14
1.3.1 Τεχνολογία <i>Frame Relay</i>	15
1.3.2 Τεχνολογία <i>ATM</i>	15
1.3.3 Τεχνολογία <i>Voice over Internet Protocol (VoIP)</i>	17
1.3.3.1 Φυσικό στρώμα / Στρώμα ζεύξης.....	17
1.3.3.2 Στρώμα δικτύου.....	18
1.3.3.3 Στρώμα μεταφοράς.....	18
1.3.3.4 Στρώμα εφαρμογής.....	20
2 Ένα σύστημα VoIP.....	32
2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ VOIP.....	32
2.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VOIP.....	32
2.3 ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VOIP.....	34
3 Ποιότητα υπηρεσίας.....	35
3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	36
3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	37
3.3 ΠΑΡΟΧΗ ΕΓΓΥΗΣΕΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ IP.....	39
4 Ποιότητα ομιλίας.....	40
4.1 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΟΜΙΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑ.....	40
4.1.1 Απώλεια έντασης.....	40
4.1.2 Θόρυβος κυκλώματος.....	41
4.1.3 Πλάγιος ήχος.....	41
4.1.4 Θόρυβος δωματίου.....	41
4.1.5 Παραμόρφωση εξασθένησης.....	42
4.1.6 Παραμόρφωση ομαδικής καθυστέρησης.....	42
4.1.7 Ηχώ του ομιλητή.....	42
4.1.8 Ηχώ του ακροατή.....	42
4.1.9 Μη γραμμική παραμόρφωση.....	42
4.1.10 Κατανοητή διαφωνία.....	43
4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ.....	43
4.2.1 Ακουστικές μέθοδοι.....	43
4.2.1.1 Η μέθοδος ACR.....	43
4.2.1.2 Η μέθοδος DCR.....	44
4.2.1.3 Η μέθοδος CCR.....	44
4.2.2 Μέθοδοι με τη χρήση μετρητικών διατάξεων.....	45
4.2.2.1 Μοντέλα μέτρησης σήματος.....	45

4.2.2.2	Μοντέλα που βασίζονται σε παραμέτρους	48
4.2.2.3	Μοντέλα παρακολούθησης	57
5	Ποιότητα ομιλίας στα συστήματα VoIP	58
5.1	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΦΩΝΗΣ	58
5.2	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΕΣ	58
5.2.1	Μετατροπή του σήματος της ομιλίας σε ψηφιακό	59
5.2.2	Κωδικοποιητές φωνής στενής ζώνης.....	59
5.2.2.1	Ο κωδικοποιητής G.711	59
5.2.2.2	Ο κωδικοποιητής G.723.1	60
5.2.2.3	Ο κωδικοποιητής G.729	60
5.2.3	Οι παράγοντες ποιότητας από τη χρήση των <i>codecs</i>	61
5.3	ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.....	62
5.4	ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ	63
5.5	ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΚΕΤΩΝ	64
5.5.1	Κατανομή της απώλειας πακέτων.....	64
5.5.2	Ανάκτηση χαμένων πακέτων	65
5.5.3	Το μέγεθος των πακέτων	66
6	Πειραματικό μέρος	67
6.1	ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	67
6.1.1	Γεννήτρια κλήσεων του δικτύου PSTN.....	67
6.1.1.1	Λειτουργία της γεννήτριας	69
6.1.1.2	Ο αλγόριθμος λειτουργίας.....	69
6.1.1.3	Υπολογισμοί των δεικτών ποιότητας	71
6.1.2	Γεννήτρια κλήσεων του δικτύου IP.....	72
6.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ.....	73
6.2.1	Αντικείμενο των μετρήσεων.....	73
6.2.2	Περιγραφή των μετρήσεων.....	73
6.2.3	Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας στα δίκτυα PSTN και VoIP	74
6.2.3.1	Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας σε δίκτυο PSTN.....	74
6.2.3.2	Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας υβριδικού δικτύου PSTN -VoIP	75
6.2.4	Μελέτη συμπεριφοράς ως προς το φορτίο μιας γραμμής VoIP	79
6.2.4.1	Μετρήσεις στο δίκτυο PSTN.....	80
6.2.4.2	Μετρήσεις στο δίκτυο VoIP.....	87
6.2.5	Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας με τον G.729.....	91
7	Συμπεράσματα	94
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	96
	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	97

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 : Η ιεραρχία του τηλεφωνικού δικτύου	11
Σχήμα 2 : Το σύστημα DTMF για την επικοινωνία του χρήστη με το δίκτυο	12
Σχήμα 3 : Η διεπαφή BRI του δικτύου ISDN.....	12
Σχήμα 4 : Η σηματοδότηση μιας κλήσης στο δίκτυο PSTN.....	13
Σχήμα 5 : Τα πρωτόκολλα που συμμετέχουν για την υλοποίηση του VoIP.....	17
Σχήμα 6 : Η δομή της επικεφαλίδας (header) ενός IP πακέτου.....	18
Σχήμα 7 : Η δομή της επικεφαλίδας ενός UDP datagram	20
Σχήμα 8 : Διασύνδεση δικτύων SS7 - IP	20
Σχήμα 9 : Τα κύρια στοιχεία του περιβάλλοντος του H.323	23
Σχήμα 10 : Συστατικά στοιχεία ενός User Agent	24
Σχήμα 11 : Μορφή SIP μηνυμάτων.....	26
Σχήμα 12 : Οι πύλες (gateways) ως μέσο διασύνδεσης SIP και PSTN δικτύων	28
Σχήμα 13 : Η πληροφορία μαζί με τις επικεφαλίδες που προσθέτουν τα διάφορα πρωτόκολλα	30
Σχήμα 14 : Η δομή ενός RTP πακέτου	31
Σχήμα 15 : Το block διάγραμμα ενός αμιγούς συστήματος VoIP.....	32
Σχήμα 16 : Το block διάγραμμα ενός υβριδικού συστήματος VoIP - PSTN	33
Σχήμα 17 : Το block διάγραμμα ενός υβριδικού συστήματος VoIP - PSTN	33
Σχήμα 18 : Τα στάδια επεξεργασίας της ομιλίας σε μια VoIP διεπαφή χρήστη.....	34
Σχήμα 19 : Καθορισμός των στοιχείων της έντασης σε μια τηλεφωνική σύνδεση	40
Σχήμα 20 : Το αντιληπτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για το PESQ.....	48
Σχήμα 21 : Η σύνδεση αναφοράς του E-model.....	50
Σχήμα 22 : “Good or Better” (GoB) και “Poor or Worse” (PoW) σαν συνάρτηση του δείκτη R	55
Σχήμα 23 : Το MOS _{CQE} σαν συνάρτηση του δείκτη R	56
Σχήμα 24 : Το MOS σαν συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης	61
Σχήμα 25 : Το φαινόμενο του jitter στα συστήματα μεταγωγής πακέτων.....	62
Σχήμα 26 : Η γεννήτρια κλήσεων Allegro	67
Σχήμα 27 : Το γραφικό περιβάλλον Conductor της γεννήτριας κλήσεων Allegro	68
Σχήμα 28 : Ο αλγόριθμος λειτουργίας της γεννήτριας κλήσεων	71
Σχήμα 29 : Το PSQM σαν συνάρτηση του δείκτη MOS	71
Σχήμα 30 : Το PESQ σαν συνάρτηση του δείκτη MOS	71
Σχήμα 31: Το γραφικό περιβάλλον VQT της γεννήτριας κλήσεων PacketGen	73
Σχήμα 32 : Η τοπολογία του δικτύου PSTN	74
Σχήμα 33 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN.....	75
Σχήμα 34 : Η τοπολογία δικτύου PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP	76
Σχήμα 35 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP	77
Σχήμα 36 : Η τοπολογία δικτύου PSTN συνδεδεμένου με δίκτυο VoIP.....	78
Σχήμα 37 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP	79
Σχήμα 38 : Τοπολογία δικτύου για τη φόρτιση γραμμής VoIP.....	79
Σχήμα 39 : Η μεταβολή του MOS σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	81
Σχήμα 40 : Η μεταβολή του δείκτη R σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	81
Σχήμα 41 : Η μεταβολή του PESQ σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	82
Σχήμα 42 : Η μεταβολή της καθυστέρησης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	83
Σχήμα 43 : Η μεταβολή της απώλειας πακέτων σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	84
Σχήμα 44 : Η μεταβολή του SNR σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	84
Σχήμα 45 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	87
Σχήμα 46 : Η μεταβολή του PESQ (μέτρηση εντός του δικτύου IP) σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP.....	88
Σχήμα 47 : Η μεταβολή της καθυστέρησης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (IP).....	89
Σχήμα 48 : Η μεταβολή του jitter σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (IP)	90
Σχήμα 49 : Η μεταβολή της απώλειας πακέτων σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (IP)	91
Σχήμα 50 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP (G.729)	92
Σχήμα 51 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP (G.729)	93

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Οι τύποι αίτησης του SIP	26
Πίνακας 2 : Οι τύποι αποκρίσεων του SIP	27
Πίνακας 3 : Πίνακας βαθμολόγησης στην κλίμακα MOS	44
Πίνακας 4 : Πίνακας βαθμολόγησης στην κλίμακα DMOS	44
Πίνακας 5 : Πίνακας βαθμολόγησης στην κλίμακα CMOS	45
Πίνακας 6 : Παράγοντες για τους οποίους το PESQ έχει επιδείξει αποδεκτή ακρίβεια	47
Πίνακας 7 : Οι κατηγορίες ποιότητας μετάδοσης ομιλίας	49
Πίνακας 8 : Εξ'ορισμού τιμές και επιτρεπόμενη διακύμανση των παραμέτρων εισόδου του E-model ..	52
Πίνακας 9 : Ο παράγοντας I_e σε διάφορους γνωστούς κωδικοποιητές	54
Πίνακας 10 : Οδηγός για τη σχέση μεταξύ του δείκτη R και της ικανοποίησης του χρήστη	56
Πίνακας 11 : Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των πιο γνωστών κωδικοποιητών στα συστήματα VoIP	60
Πίνακας 12 : Συνεισφορά των σταδίων επεξεργασίας του VoIP στη συνολική καθυστέρηση	63
Πίνακας 13 : Όρια για την ποιότητα επικοινωνίας σε σχέση με τη συνολική καθυστέρηση	64
Πίνακας 14 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης του δικτύου PSTN	75
Πίνακας 15 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP	76
Πίνακας 16 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP	78
Πίνακας 17 : Οι τιμές των παραμέτρων της σύνδεσης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP	83
Πίνακας 18 : Οι τιμές των παραμέτρων της σύνδεσης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (μέτρηση εντος του δικτύου IP)	89
Πίνακας 19 : Συνοπτικός πίνακας των επιμέρους καθυστερήσεων σε μια σύνδεση VoIP	89
Πίνακας 20 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP (G.729)	91
Πίνακας 21 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP G.729)	92

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Voice over IP είναι η μετάδοση ομιλίας πάνω από τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και δίκτυα υπολογιστών που χρησιμοποιούν την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων. Καθώς στην κλασική τηλεφωνία η σχέση μεταξύ των παραμέτρων μετάδοσης του σήματος της ομιλίας και της συνεπακόλουθης ποιότητας της ομιλίας έχει διεξοδικά μελετηθεί, η αντίστοιχη ποιότητα στο VoIP έχει αναδειχτεί σε σημαντικό πεδίο έρευνας λόγω της εκρηκτικής εξάπλωσης του τα τελευταία χρόνια.

Με την επιλογή της μετάδοσης ομιλίας πάνω από δίκτυα IP δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η εκτεταμένη υποδομή των δικτύων IP που έχει δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια τόσο σε τοπικά δίκτυα όσο και σε δίκτυα ευρείας ζώνης. Οι χρήστες με τη σειρά τους έχουν εκτιμήσει το μειωμένο κόστος που προσφέρει το VoIP καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και χωρίς χρέωση χρησιμοποιώντας τη σύνδεση στο Διαδίκτυο (internet telephony) σε συνδυασμό με μια πληθώρα διαθέσιμων προγραμμάτων. Έτσι λόγω των οικονομικών και τεχνολογικών πλεονεκτημάτων του, το VoIP έχει αρχίσει βαθμιαία να ενσωματώνεται στα δίκτυα κορμού των τηλεφωνικών δικτύων όπου σταδιακά αντικαθιστά την τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος.

Όμως η μετάδοση πακέτων εισάγει διάφορα προβλήματα όπως η απώλεια πακέτων ή η καθυστέρηση τα οποία είναι από τη φύση τους χρονικά μεταβαλλόμενα. Αυτά τα προβλήματα τυπικά οδηγούν σε υποβάθμιση της ποιότητας της ομιλίας η οποία γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη. Από την άλλη πλευρά το VoIP διαθέτει και κάποια πλεονεκτήματα με το σημαντικότερο από αυτά να είναι ότι λόγω της ευελιξίας του, όσον αφορά την κωδικοποίηση και το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης, μπορεί να γίνει δυνατή η μετάδοση υψηλής ποιότητας ομιλίας ευρείας ζώνης (wideband speech).

Ποιότητα ομιλίας ουσιαστικά είναι το αποτέλεσμα της εκτίμησης του σήματος ομιλίας που ακούει ένας χρήστης σε σχέση με κάποιο σήμα που αυτός θεωρεί από την εμπειρία του ως σημείο αναφοράς. Η ποιότητα ομιλίας που σχετίζεται με μια τηλεφωνική υπηρεσία είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την αποδοχή της υπηρεσίας. Καθώς η απόφαση του χρήστη για το κατά πόσο είναι αποδεκτή μια υπηρεσία βασίζεται στην προσωπική του αντίληψη, η καλύτερη λύση για την εκτίμηση της ποιότητας είναι να χρησιμοποιηθούν ακουστικές δοκιμές που θα αποτυπώσουν πλήρως την εμπειρία του χρήστη. Ιδανικά οι δοκιμές θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε επίπεδο συνομιλίας καθώς αυτό αντανακλά την πραγματική χρήση του συστήματος.

Από μια άλλη πλευρά ο σχεδιαστής κάθε δικτύου χρειάζεται να έχει μια ιδέα της ποιότητας των υπηρεσιών που θα μπορεί να παρέχει το δίκτυο του πριν ακόμα αυτό υλοποιηθεί. Μια πηγή πληροφορίας για την καταλληλότητα των πιθανών υλοποιήσεων θα μπορούσαν να είναι οι αναμενόμενες τιμές κάποιων συγκεκριμένων μετρήσιμων παραμέτρων ή χαρακτηριστικών του δικτύου όπως το απαιτούμενο φάσμα, τα επίπεδα του θορύβου ή το Signal-to-Noise Ratio. Οι αποφάσεις όμως για το σχεδιασμό δικτύων τηλεφωνίας δεν είναι δυνατόν να παρθούν χωρίς τη γνώση των επιπτώσεων που θα έχουν αυτές οι παράμετροι στην ποιότητα ομιλίας που θα αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Επιπλέον η συμπεριφορά κάποιων συγκεκριμένων στοιχείων μετάδοσης όπως οι κωδικοποιητές δεν μπορεί να περιγραφεί στη βάση κάποιων μετρήσιμων χαρακτηριστικών. Έτσι έχουν αναπτυχθεί σύγχρονες μέθοδοι για την εκτίμηση της ποιότητας που βασίζονται στη μέτρηση σημάτων, όπως η μέθοδος PESQ. Αυτές δεν περιλαμβάνουν κλασικές φυσικές μετρήσεις όπως του SNR αλλά βασίζονται σε μοντέλα της ανθρώπινης λειτουργίας της ακοής. Χρησιμοποιείται η γνώση που υπάρχει για την επεξεργασία σήματος που πραγματοποιείται από το ακουστικό σύστημα για την εκτίμηση της ποιότητας κάποιου σήματος ομιλίας που μεταδίδεται στο σύστημα που εξετάζεται.

Για χρήση κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός δικτύου μετάδοσης έχουν δημιουργηθεί τα αποκαλούμενα μοντέλα σχεδιασμού τα οποία αντιστοιχούν μετρήσιμα χαρακτηριστικά του δικτύου σε μια εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από ένα μέσο χρήστη του συστήματος. Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου και της προκύπτουσας εκτίμησης ποιότητας έχει καθοριστεί κατά την ανάπτυξη του μοντέλου μέσω δοκιμών αντίληψης της ποιότητας. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το αποκαλούμενο E-model το οποίο προτείνεται τόσο από την ITU όσο και από το ETSI ως το πλέον κατάλληλο και με το οποίο θα ασχοληθούμε ειδικότερα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η εργασία εστιάζει στη μελέτη του VoIP σε επίπεδο ζεύξης και έχει δυο βασικούς στόχους. Ο πρώτος στόχος είναι να καταγράψει τη μεταβολή στην ποιότητα της ομιλίας που εισάγει η μετάδοση της φωνής πάνω από δίκτυα IP, σε σύγκριση με την ποιότητα που παρέχεται στους χρήστες από τα υφιστάμενα PSTN δίκτυα. Ειδικότερα, σκοπός είναι να εντοπιστούν ποιό παράγοντες προκαλούν αυτή την υποβάθμιση και σε ποιο βαθμό. Ο δεύτερος στόχος πάντα όσον αφορά την ποιότητα ομιλίας που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης, είναι να διερευνηθεί η συμπεριφορά μιας γραμμής που μεταφέρει πακετοποιημένη ομιλία ως προς το φορτίο. Σκοπός είναι να αποκτήσουμε μια εικόνα σε αυτόν τον τομέα για για κάποιες πιθανές συμπεριφορές που μπορούμε να περιμένουμε από τα δίκτυα VoIP σε πραγματικές συνθήκες υψηλού φόρτου όταν αυτά σε βάθος χρόνου αντικαταστήσουν τα δίκτυα PSTN.

Με τη βοήθεια του E-model μελετάται η ποιότητα ομιλίας όπως την αντιλαμβάνονται οι χρήστες των δικτύων PSTN καθώς η τεχνολογία VoIP σταδιακά ενσωματώνεται στο δίκτυο κορμού των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Η κύρια συνεισφορά της εργασίας είναι ότι οι μετρήσεις γίνονται σε πραγματικά δίκτυα τηλεπικοινωνιακού παρόχου τα οποία βρισκονται σε πλήρη λειτουργία

Στο πρώτο στάδιο γίνονται μετρήσεις της ποιότητας ομιλίας στο υφιστάμενο PSTN τηλεφωνικό δίκτυο και οι οποίες αποτελούν το σημείο αναφοράς για την ποιότητα ομιλίας στην υπόλοιπη εργασία καθώς αντικατοπτρίζουν την παρούσα κατάσταση.

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται καταρχήν εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας όταν στο δίκτυο PSTN εισάγεται μια γραμμή VoIP στη διαδρομή των κλήσεων. Σε επόμενη φάση καταγράφεται η ποιότητα της ομιλίας όταν οι κλήσεις κατά τη διαδρομή τους περνούν τόσο από το δίκτυο PSTN -από τερματικό άκρο του οποίου ξεκινούν- όσο και από το IP δίκτυο κορμού του παρόχου. Και στις δύο τοπολογίες, ελέγχονται οι πιθανές επιπτώσεις της κωδικοποίησης στην ποιότητα της ομιλίας με τη δοκιμή στα άκρα της γραμμής VoIP του δημοφιλούς σε τέτοια συστήματα κωδικοποιητή G.729.

Στο τρίτο στάδιο και με βάση την τοπολογία του προηγούμενου σταδίου, μελετώνται οι επιπτώσεις που έχει στην ποιότητα ομιλίας και τις παραμέτρους της μετάδοσης η αύξηση του φορτίου σε μια γραμμή VoIP της διαδρομής των κλήσεων. Το φορτίο της γραμμής αυξάνεται σταδιακά μέχρι το σημείο που το απαιτούμενο εύρος ζώνης υπερβαίνει την χωρητικότητα της γραμμής ώστε οριακά η συμπεριφορά της γραμμής να αναδείξει τις πιθανές ομοιότητες και διαφορές των δυο τεχνολογιών. Τέλος η συμπεριφορά της γραμμής κατά τη φόρτιση εξετάζεται και από την πλευρά του δικτύου IP ώστε να γίνει σύγκριση με τις μετρήσεις στο δίκτυο PSTN και να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης.

Δίκτυα Μεταγωγής και Τεχνολογίες Μετάδοσης Φωνής

1.1 Δίκτυα Μεταγωγής Κυκλώματος

Τα δίκτυα Μεταγωγής Κυκλώματος (Circuit Switching) κατασκευάστηκαν για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των απλών τηλεφωνικών συνομιλιών, οι οποίες απαιτούσαν μετάδοση αναλογικής φωνής και όχι δεδομένων. Έτσι, το πλέον διαδεδομένο δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος είναι το Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο με Μεταγωγή (Public Switched Telephone Network, PSTN) που, αν και ξεκίνησε ως αναλογικό δίκτυο μεταφοράς φωνής, με την πάροδο του χρόνου εξελίχθηκε σε ψηφιακό, με δυνατότητες μετάδοσης και πληροφορίας από υπολογιστές.

Βασικό χαρακτηριστικό ενός τέτοιου δικτύου ότι για την επικοινωνία δύο χρηστών όπου δημιουργείται μια σταθερή ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα τους, η οποία διαρκεί τόσο χρόνο ακριβώς, όσος είναι και ο χρόνος της συνδιάλεξης. Το ηλεκτρικό αυτό κύκλωμα καθ' όλη τη διάρκεια της συνομιλίας είναι εκμεταλλεύσιμο μόνο από τους συγκεκριμένους συνδρομητές. Με το πέρας της συνομιλίας, το κύκλωμα απελευθερώνεται και οι τηλεφωνικές γραμμές που ήταν απασχολημένες τίθενται στη διάθεση άλλων συνδρομητών. Οι τρεις κυριότερες φάσεις της επικοινωνίας στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος είναι:

- Εγκατάσταση του κυκλώματος, όπου εξετάζεται η διαθεσιμότητα των κυκλωμάτων καθώς και αν ο δέκτης είναι απασχολημένος
- Μεταφορά των δεδομένων, όπου πραγματοποιείται η συνομιλία
- Αποσύνδεση του κυκλώματος, όπου το κύκλωμα που συνδέει τις δύο πλευρές απελευθερώνεται.

Ας δούμε τα παραπάνω πιο αναλυτικά. Τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια μιας τηλεφωνικής συνδιάλεξης είναι :

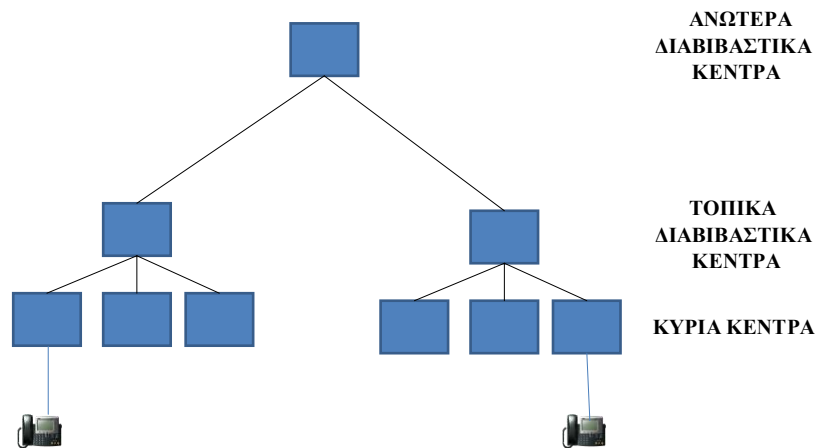
1. Ο χρήστης που επιθυμεί να εκτελέσει την κλήση σηκώνει το ακουστικό και ακούει το χαρακτηριστικό ήχο (dial tone). Αυτό σημαίνει πως υπάρχει διαθέσιμη σύνδεση με το τοπικό τηλεφωνικό κέντρο (exchange/switch).
2. Ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό που αντιστοιχεί στο τηλέφωνο του συνδρομητή με τον οποίο επιθυμεί να συνομιλήσει.
3. Η κλήση δρομολογείται μέσω των τηλεφωνικών κέντρων του δικτύου προς το μέρος του τηλεφώνου του συνδρομητή που πρόκειται να δεχθεί την κλήση.
4. Πραγματοποιείται σύνδεση ανάμεσα στα τηλέφωνα των δύο συνδρομητών, με τη χρήση ενός μεγάλου πλήθους αλληλοσυνδεδεμένων κέντρων.
5. Το τηλέφωνο του κληθέντος συνδρομητή χτυπά και κάποιος απαντάει στην κλήση.
6. Η σύνδεση ενεργοποιεί το κύκλωμα.
7. Πραγματοποιείται η συνομιλία για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα (αμφίδρομη επικοινωνία – full duplex), μετά το πέρας του οποίου κλείνει το ακουστικό του συνδρομητή που πραγματοποιεί την κλήση.

- Μετά το κλείσιμο του ακουστικού, αποσυνδέεται το ηλεκτρικό κύκλωμα και απελευθερώνονται όλες οι γραμμές που χρησιμοποιήθηκαν για το σχηματισμό του.

1.1.1 Υποδομή

Η τηλεφωνική υποδομή ξεκινάει με ένα απλό ζεύγος χαλκού που φθάνει στο χώρο του συνδρομητή και είναι γνωστό σαν τοπικός βρόχος (local loop). Ο τοπικός βρόχος συνδέει φυσικά την τηλεφωνική συσκευή με το κέντρο μεταγωγής. Το μονοπάτι αυτό επικοινωνίας από το τηλέφωνο στο κέντρο μεταγωγής ονομάζεται τηλεφωνική γραμμή και συνήθως είναι πάνω σε χαλκό.

Τα κέντρα μεταγωγής συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές (trunks). Κάποια συνδέονται απ' ευθείας μεταξύ τους, αλλά γενικά για τη διασύνδεση τους χρησιμοποιείται το ιεραρχικό μοντέλο. Η τοπολογία του δικτύου αποφασίζεται με βάση τα πιθανά σενάρια κλήσεων.



Σχήμα 1 : Η ιεραρχία του τηλεφωνικού δικτύου

1.1.2 Σηματοδοσία

Για να επιτευχθεί η πραγματοποίηση των κλήσεων στο τηλεφωνικό δίκτυο απαιτείται η προετοιμασία των στοιχείων του δικτύου που συμμετέχουν στην διαδικασία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σηματοδοσίας που είναι μηνύματα/εντολές που μεταφέρονται μέσω των κυκλωμάτων του δικτύου.

Γενικά υπάρχουν δύο είδη σηματοδοσίας για την επικοινωνία πάνω από τα διάφορα μέσα μετάδοσης :

- Σηματοδοσία χρήστη – δικτύου (User-to-Network)
Είναι ο τρόπος επικοινωνίας του χρήστη με το δίκτυο PSTN
- Σηματοδοσία εντός δικτύου (Network -to-Network)
Είναι ο τρόπος επικοινωνίας των κέντρων μεταγωγής μεταξύ τους

1.1.2.1 Σηματοδοσία χρήστη – δικτύου

Η πιο κοινή μέθοδος σηματοδοσίας είναι η Dual Tone Multi-Frequency (DTMF). Πρόκειται για σηματοδοσία εντός ζώνης (in-band signalling) γιατί οι τόνοι μεταφέρονται

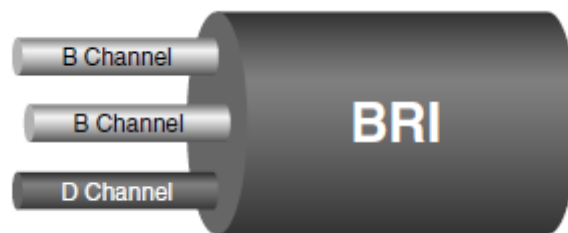
μέσα από το κανάλι της φωνής. Όταν σηκώνουμε το ακουστικό και πατάμε τα πλήκτρα ο τόνος που φθάνει από το τηλέφωνο στο κέντρο μεταγωγής δηλώνει ποιόν αριθμό επιθυμούμε να καλέσουμε.

Dual Tone Multi-Frequency				
	1209	1336	1477	1633
697	1	2	3	A
770	4	5	6	B
852	7	8	9	C
941	*	0	#	D

Σχήμα 2 : Το σύστημα DTMF για την επικοινωνία του χρήστη με το δίκτυο

Γενικά όταν το μέσο επικοινωνίας είναι ο χαλκός, ο χρήστης συνδέεται με το τηλεφωνικό δίκτυο μέσω του ISDN (Integrated Services Digital Network). Το ISDN χρησιμοποιεί άλλη μέθοδο που είναι η σηματοδοσία εκτός ζώνης (out-of-band). Με αυτή τη μέθοδο η σηματοδοσία μεταφέρεται σε ξεχωριστό κανάλι από τη φωνή. Το κανάλι στο οποίο μεταφέρεται η φωνή ονομάζεται κανάλι B (bearer ή B channel) και είναι 64 kbps. Το κανάλι στο οποίο μεταφέρεται η σηματοδοσία ονομάζεται κανάλι D (data ή D channel) και είναι 16 kbps.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διεπαφή Basic Rate Interface (BRI) που αποτελείται από δύο κανάλια B και ένα κανάλι D.



Σχήμα 3 : Η διεπαφή BRI του δικτύου ISDN

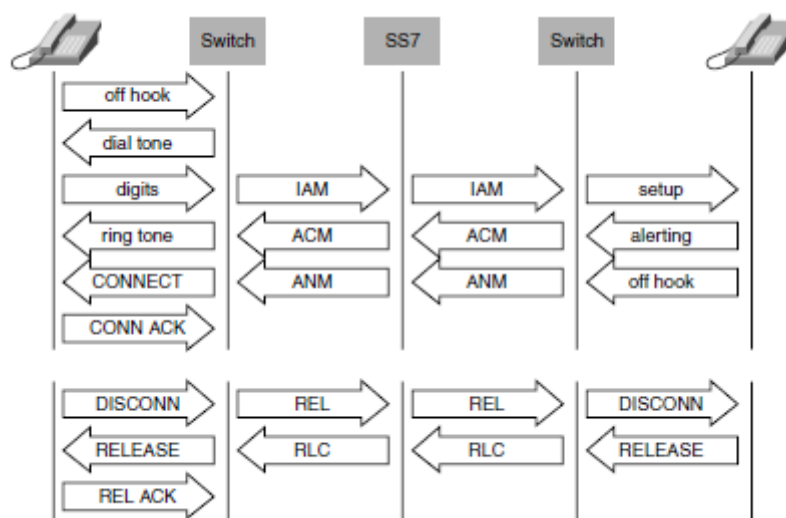
1.1.2.2 Σηματοδοσία μεταξύ των στοιχείων του δικτύου

Η επικοινωνία των τηλεφωνικών κέντρων γίνεται κυρίως πάνω από τα παρακάτω μέσα μετάδοσης :

- T1/E1 γραμμή πάνω από συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού
 Η T1 είναι μια γραμμή ψηφιακής μετάδοσης 1.544-Mbps που χρησιμοποιείται κυρίως στη Β. Αμερική και την Ιαπωνία.
 Η E1 είναι μια γραμμή ψηφιακής μετάδοσης 2.048-Mbps που χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη.

- T3/E3, T4 γραμμή πάνω από ομοαξονικό καλώδιο
H T3 μεταφέρει 28 T1 ή 672 64-kbps συνδέσεις και είναι 44.736 Mbps.
H E3 μεταφέρει 16 E1 ή 512 64-kbps συνδέσεις και είναι 34.368 Mbps.
H T4 μεταφέρει 168 T1 ή 4032 4-kbps συνδέσεις και είναι 274.176 Mbps.
- T3, T4 γραμμή πάνω από μικροκυματικό κανάλι
- Synchronous Optical Network (SONET) πάνω από οπτική ίνα
Το SONET συνήθως υλοποιείται σε ρυθμούς OC-3, OC-12 και OC-48, που είναι 155.52 Mbps, 622.08 Mbps, και 2.488 Gbps, αντίστοιχα.

Στη σηματοδότηση μεταξύ των στοιχείων του δικτύου έχουμε σηματοδότηση εντός ζώνης (in-band) όπως οι μέθοδοι Multi-Frequency (MF) και Robbed Bit Signaling (RBS) αλλά και σηματοδότηση εκτός ζώνης (out-of-band). Στα σύγχρονα ψηφιακά δίκτυα PSTN έχει επικρατήσει η εκτός ζώνης μέθοδος σηματοδότησης που είναι γνωστή ως Σύστημα Σηματοδότησης No7 (Signaling System 7).



Σχήμα 4 : Η σηματοδότηση μιας κλήσης στο δίκτυο PSTN

1.2 Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτου

Η τεχνολογία μεταγωγής πακέτου (packet switching) χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τα δίκτυα δεδομένων καθώς δεν χρειάζεται να απασχολούν ένα συγκεκριμένο κύκλωμα για μια δεδομένη χρονική περίοδο. Απλώς στέλνουν και λαμβάνουν δεδομένα όσο υπάρχει ανάγκη. Αντί τα δεδομένα αυτά να δρομολογούνται σε ένα συγκεκριμένο κύκλωμα, τα πακέτα με την πληροφορία διατρέχουν ένα δίκτυο, αποτελούμενο από πολλούς συνδυασμούς διαδρομών, αναλόγως με την κίνηση και την κατάσταση του δικτύου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Η διαδικασία έχει ως εξής:

1. Ο υπολογιστής που επιθυμεί να στείλει πληροφορία την τεμαχίζει σε μικρά τμήματα, με κάθε ένα από τα οποία να περιέχει μια διεύθυνση ώστε να πληροφορούνται οι ενδιάμεσες δικτυακές συσκευές για τον προορισμό τους.
2. Μέσα σε κάθε πακέτο υπάρχει η χρήσιμη πληροφορία (payload), η οποία μπορεί να είναι ένα τμήμα e-mail, τμήμα μουσικού αρχείου κλπ.

3. Ο αποστολέας στέλνει το πακέτο στον πιο κοντινό δρομολογητή (router) και προχωράει στην προετοιμασία του επόμενου πακέτου. Ο δρομολογητής αυτός στέλνει με τη σειρά του το πακέτο σε έναν άλλο δρομολογητή έως ότου το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του.
4. Όταν τελικά ο παραλήπτης λάβει τα πακέτα, τα οποία μπορεί να έχουν ακολουθήσει εντελώς διαφορετική διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους, χρησιμοποιεί συγκεκριμένες διαδικασίες για να τα συναρμολογήσει και να ανακατασκευάσει την αρχική πληροφορία.

Στα σύγχρονα δίκτυα χρησιμοποιούνται δύο κυρίως τεχνικές μεταγωγής πακέτων. Αυτές είναι:

- *Τεχνική Αυτοτελών Πακέτων*

Κάθε πακέτο αποτελεί ανεξάρτητη οντότητα από τα υπόλοιπα. Αυτό σημαίνει ότι τα πακέτα μπορούν να οδεύουν προς τον προορισμό τους μέσω διαφορετικών διαδρομών. Με τη διαδικασία αυτή είναι πολύ πιθανό τα πακέτα να φτάσουν με διαφορετική σειρά από αυτή με την οποία ξεκίνησαν. Επιπλέον, ορισμένα πακέτα μπορεί να καταστραφούν κατά τη διάρκεια της διαδρομής από την αφετηρία προς τον προορισμό. Κατά συνέπεια, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να υπάρχουν διατάξεις που να εξασφαλίζουν την επιτυχή ανασύνθεση των πακέτων και την τοποθέτησή τους στη σωστή σειρά.

- *Τεχνική Εικονικού Κυκλώματος (Virtual Circuit)*

Πριν την αποστολή των πακέτων αποφασίζεται από το δίκτυο μια συγκεκριμένη διαδρομή που θα ακολουθηθεί. Έτσι, ο αποστολέας στέλνει αρχικά ένα πακέτο (Call-Request packet), με στόχο τη λογική σύνδεση με τον παραλήπτη. Σε περίπτωση που η αίτηση κλήσης γίνει αποδεκτή από τον παραλήπτη, ο τελευταίος στέλνει με τη σειρά του στον αποστολέα ένα πακέτο, ως ένδειξη της αποδοχής (Call-Accept packet). Στο σημείο αυτό, έχει δημιουργηθεί η λογική σύνδεση ανάμεσα στους δύο κόμβους, οι οποίοι έχουν πλέον τη δυνατότητα να ανταλλάξουν πακέτα. Η μέθοδος του εικονικού κυκλώματος μοιάζει πολύ με τη λειτουργία των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος, αφού και στις δύο περιπτώσεις τα δεδομένα ακολουθούν μια προκαθορισμένη διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, τα δεδομένα μεταφέρονται ενιαία, και όχι σε μορφή πακέτων. Επίσης στα δίκτυα εικονικών κυκλωμάτων λόγω της προκαθορισμένης διαδρομής, δεν υπάρχει η ανάγκη της λήψης απόφασης σε κάθε κόμβο για την πορεία που θα ακολουθήσουν τα επερχόμενα πακέτα. Κάθε κόμβος μπορεί να αποθηκεύει πακέτα, καθώς επίσης και να αποτελεί τμήμα πολλών εικονικών κυκλωμάτων ταυτόχρονα. Μετά το πέρας της ανταλλαγής των πληροφοριών ακολουθεί η απελευθέρωση του εικονικού κυκλώματος με την αποστολή ενός κατάλληλου πακέτου (Clear-Request packet).

1.3 Τεχνολογίες Μετάδοσης Φωνής στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων

Εκτός από το τηλεφωνικό δίκτυο που βασίζεται στην τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που βασίζονται στην μεταγωγή πακέτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση φωνής. Το Frame Relay, το ATM και το IP εισάγουν τα δεδομένα της φωνής σε μεταβλητού μήκους πλαίσια, κελιά ή πακέτα για τη γρήγορη δρομολόγησή τους στο δίκτυο. Τα δίκτυα αυτά ουσιαστικά κάνουν στατιστική πολυπλεξία, δηλαδή αναθέτουν το εύρος ζώνης στα διάφορα κανάλια δυναμικά με βάση τις ανάγκες της μετάδοσης. Έτσι δεν υπάρχει εύρος ζώνης δεσμευμένο για κάποια συγκεκριμένη διαδρομή. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης διατίθεται ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

1.3.1 Τεχνολογία Frame Relay

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε εταιρικά δίκτυα δεδομένων, χάρη στο ευέλικτο εύρος ζώνης, τη δεδομένη προσβασιμότητα και την δυνατότητα υποστήριξης μεγάλου όγκου τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Οι υπηρεσίες Frame Relay βασίζονται στην τεχνολογία των Μόνιμων Εικονικών Συνδέσεων (Permanent Virtual Connections - PVCs), είναι ιδανικές για κλειστές ομάδες χρηστών και συνιστώνται για δικτυακές τοπολογίες αστέρα.

Τα δεδομένα που είναι προς μετάδοση τοποθετούνται σε ομάδες μεταβλητού μήκους (συνήθως 1600 bytes), τα πλαίσια (frames), ενώ δεν υπάρχει κανένα μέτρο για τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων κατά τη μετάδοση. Η διαδικασία διόρθωσης (όπως για παράδειγμα η επαναμετάδοση της πληροφορίας) αφήνεται στη δικαιοδοσία των τερματικών σημείων (end points).

Τα διάφορα frames μπορούν να χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς συντελεστές προτεραιότητας, ανάλογα με το πόσο σημαντικά είναι. Κάθε πλαίσιο μεταφέρει μια διεύθυνση 10-bit (Data Link Connection Identifier). Αυτή προσδιορίζει το εικονικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται. Ο μηχανισμός επικοινωνίας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια εικονική μισθωμένη γραμμή. Η κλασσική ταχύτητα για το Frame Relay είναι γύρω στα 1.5Mbps.

1.3.2 Τεχνολογία ATM

Το ATM είναι μια τεχνολογία υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιείται σαν στοιχείο μεταγωγής στα δίκτυα κορμού των τηλεπικοινωνιακών παρόχων καθώς και σε μικρά ή μεγάλα δίκτυα επιχειρήσεων και οργανισμών. Μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης και να μεταδώσει ταυτόχρονα φωνή, δεδομένα, γραφικά και εικόνα σε υψηλές ταχύτητες.

Στο ATM τα δεδομένα προς μετάδοση σε κωδικοποιούνται σε κελιά (cells) σταθερού μεγέθους (53 bytes από τα οποία τα 48 είναι bytes πληροφορίας και τα υπόλοιπα 5 περιέχουν πληροφορίες προθέματος - header). Αυτό βοηθάει να μειωθεί σημαντικά η καθυστέρηση κατά την πακετοποίηση η οποία είναι μια από τις κύριες παραμέτρους της καθυστέρησης. Καθώς το δίκτυο μεταφέρει κελιά πληροφορίας, λέμε ότι στο ATM γίνεται μεταγωγή κελιού (cell switching).

Πρόκειται για connection-oriented τεχνολογία, σύμφωνα με την οποία δημιουργείται μια σύνδεση ανάμεσα στα δύο τερματικά σημεία, προτού ξεκινήσει η ανταλλαγή των δεδομένων. Οι μεταγωγοί ATM (ATM switches) είναι πολύ γρήγοροι και το μεγάλο εύρος ζώνης μειώνει δραματικά τις πιθανότητες συμφόρησης του δικτύου, παρέχοντας έτσι μια αρκετά αξιόπιστη υπηρεσία. Οι δικτυακοί πάροχοι μπορούν έτσι να παρέχουν συγκεκριμένη Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) με την υπογραφή συμφωνιών για το επίπεδο της παρεχόμενης υπηρεσίας (Service Level Agreements - SLAs). Η σύνδεση μεταξύ των ATM switch, καθώς επίσης και μεταξύ switch – χρήστη, γίνεται μέσω ζεύξεων που αποτελούνται είτε από χάλκινα καλώδια, είτε από οπτικές ίνες. Στα ATM δίκτυα κάθε ζεύξη χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να συνδέσει δυο κόμβους του δικτύου, σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες δικτύωσης (π.χ. Ethernet – 802.3), όπου το ίδιο κομμάτι καλωδίου μπορεί να συνδεθούν πάνω του περισσότεροι από δύο κόμβοι.

Η μεταγωγή κελιών είναι αρκετά ευέλικτη και μπορεί να χειρισθεί εύκολα κίνηση τόσο σταθερού ρυθμού (ήχος, εικόνα), όσο και μεταβλητού ρυθμού (δεδομένα). Η εγκατάσταση μιας κλήσης απαιτεί αρχικά την αποστολή μηνύματος για την δημιουργία της σύνδεσης. Στη συνέχεια, τα επόμενα κελιά ακολουθούν την ίδια διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους. Όπως συμβαίνει και με το Frame Relay, η άφιξη των κελιών δεν είναι εξασφαλισμένη. Από την άλλη όμως, η τοποθέτησή τους σε σειρά είναι εγγυημένη.

Οι εξ' ορισμού ταχύτητες για τα δίκτυα του ATM είναι 155.52MB/s (για συμβατότητα με Synchronous Optical Network – SONET που επιτρέπει τη μετάδοση διαφορετικών τύπων δεδομένων σε μια οπτική ίνα) και 622 MB/s (για τέσσερα 155MB/s κανάλια).

Η αρχιτεκτονική του ATM αποτελείται από δύο κύρια επίπεδα :

- το Επίπεδο ATM (ATM Layer) και
- το Επίπεδο Προσαρμογής ATM (ATM Adaptation Layer, AAL).

Ακριβώς πάνω από το φυσικό επίπεδο είναι το Επίπεδο ATM, που σχετίζεται με τα κελλιά καθώς και τη μεταφορά τους. Καθορίζει τη μορφή τους, καθώς και τη σημασία του προθέματος. Ασχολείται ακόμα με τη διαχείριση των εικονικών κυκλωμάτων. Παράλληλα, στο εν λόγω επίπεδο πραγματοποιείται και ο έλεγχος της συμμόρφωσης. Πάνω από το Επίπεδο ATM βρίσκεται το Επίπεδο Προσαρμογής ATM. Υπάρχουν πέντε τύποι του AAL που καθορίζονται για διαφορετικού τύπου υπηρεσίες.

Το ATM Forum έχει καθορίσει τρεις κύριες προσεγγίσεις για τη μεταφορά της φωνής πάνω από ένα ATM δίκτυο :

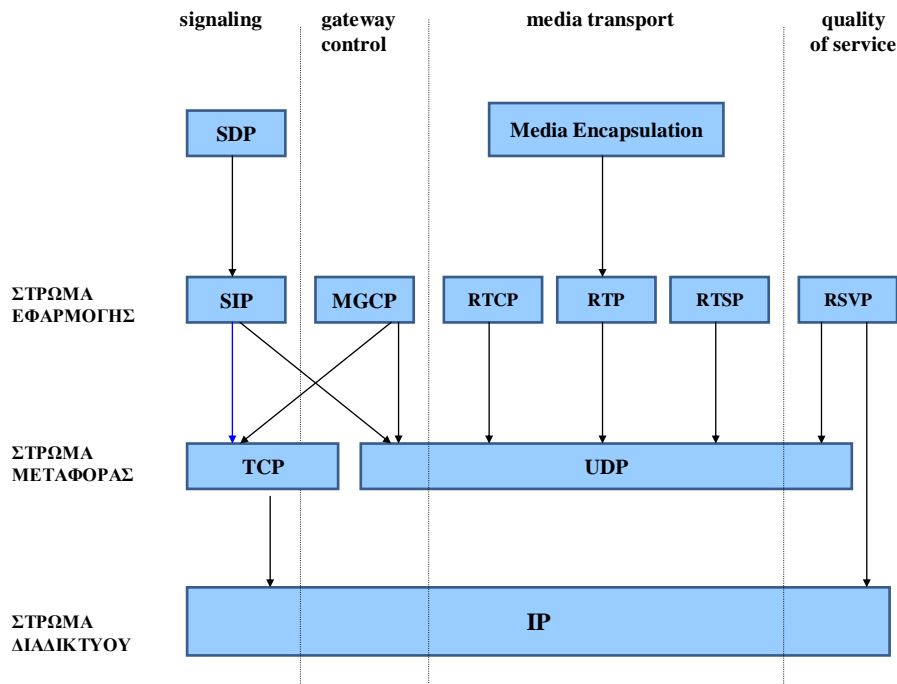
- *Circuit Emulation Services (CES)*
Η απόδοση προτεραιοτήτων για το ATM υλοποιείται μέσω των παραμέτρων QoS. Το ATM σχεδιάστηκε από την αρχή ώστε να μεταφέρει τόσο φωνή, όσο και δεδομένα κάθε είδους. Το πρωτόκολλο ATM Adaptation Layer 1 (AAL1) στην λειτουργία σταθερού ρυθμού CBR (Constant Bit Rate) ήταν το εξ' ορισμού standard για το VoATM. Η μέθοδος CES βασίζεται στο AAL1 και χρησιμοποιεί την κατηγορία υπηρεσίας CBR για να εγγυηθεί την καθυστέρηση από το ένα άκρο στο άλλο. Ουσιαστικά προσομοιώνει ένα point-to-point TDM κύκλωμα. Χρησιμοποιείται για να συνδέσει TDM διεπαφές (όπως τα E1, T1) πάνω από ένα ATM δίκτυο. Με την μέθοδο CES τα δίκτυα ATM ουσιαστικά παρέχουν ένα διαφανή μηχανισμό μεταφοράς για διάφορες υπηρεσίες CBR.
- *Dynamic Bandwidth Circuit Emulation Service - DBCES)*
Είναι μια παραλλαγή της CES και βασίζεται και αυτή στο AAL1. Η λογική της είναι να ανιχνεύει τις κενές χρονοθυρίδες μιας γραμμής TDM και να παραλείπει αυτές τις χρονοθυρίδες από το επόμενο ATM κελλί. Αυτό επιτρέπει το εύρος ζώνης να επαναχρησιμοποιείται για άλλες υπηρεσίες. Παρόλα αυτά, όπως συμβαίνει και στη CES, τμήματα των κελλιών μπορεί να παραμένουν άδεια.
- *ATM Trunking Υπηρεσιών Στενής Ζώνης με τη χρήση του AAL2*
Οι μηχανισμοί CES μεταχειρίζονται την ομιλία σαν μια συνεχή ροή πληροφορίας που κωδικοποιείται σαν μια ροή δεδομένων σταθερού ρυθμού. Αλλά στην πραγματικότητα η ομιλία είναι ένας συνδυασμός ριπών φωνής και σιωπών. Έτσι η μετάδοση των σιωπών οδηγεί σε σπατάλη του εύρους ζώνης. Επίσης αυτοί οι μηχανισμοί ελαχιστοποιούν το πρόβλημα της καθυστέρησης κατά την κατασκευή των κελλιών καθώς μεταδίδουν τα δεδομένα φωνής ασυμπιεστα στα 64 Kbps. Αυτό όμως εμποδίζει την χρήση τεχνολογιών συμπίεσης που θα οδηγούσαν σε κέρδος χρήσιμου εύρους ζώνης. Για να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς το ATM Forum πρότεινε ένα μηχανισμό μεταφοράς της ομιλίας σαν ροή συμπιεσμένων δεδομένων μεταβλητού ρυθμού (VBR). Ο μηχανισμός βασίζεται στο AAL2 το οποίο επιτρέπει το πακετάρισμα μικρών πακέτων (1 με 45/64 bytes), γνωστών και ως μίνι-κελλιών (minicells), σε ένα ή περισσότερα κελιά ATM. Σε αντίθεση με το AAL1, το οποίο έχει ένα σταθερό payload, το AAL2 προσφέρει τη δυνατότητα μεταβλητού payload εντός των κελλιών. Αυτή η λειτουργικότητα προσφέρει δραματική βελτίωση στην απόδοση του εύρους ζώνης σε σχέση τις μεθόδους που χρησιμοποιούν το AAL1. Επίσης, το AAL2 υποστηρίζει συμπίεση φωνής, καταστολή σιγής και επιτρέπει πολλαπλά φωνητικά κανάλια μεταβλητού εύρους ζώνης σε μια απλή ATM σύνδεση.

1.3.3 Τεχνολογία Voice over Internet Protocol (VoIP)

Τα δίκτυα IP υλοποιούνται με βάση το μοντέλο του Internet Protocol (Internet Protocol Suite, RFC 1122). Το μοντέλο αυτό χωρίζει τις μεθόδους του και τα πρωτόκολλα σε τέσσερα ιεραρχικά επίπεδα σε μια απεύθείας αντιστοίχιση με το μοντέλο του OSI. Από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο αυτά είναι

- Στρώμα Ζεύξης (Link layer)
- Στρώμα Δικτύου (Network layer)
- Στρώμα Μεταφοράς (Transport layer)
- Στρώμα Εφαρμογής (Application layer)

Τα επίπεδα καθορίζουν το είδος και τις λειτουργίες των πρωτοκόλλων που ανήκουν στο κάθε επίπεδο. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την «ενθυλάκωση» (encapsulation) για να απαλλάξει τα πρωτόκολλα και τις υπηρεσίες κάθε επιπέδου από τη γνώση των πρωτοκόλλων και των διαδικασιών των άλλων επιπέδων. Έτσι κάθε εφαρμογή (που βρίσκεται στο ανώτερο επίπεδο του μοντέλου) χρησιμοποιεί μια σειρά από πρωτόκολλα για να στείλει τα δεδομένα της στα κατώτερα επίπεδα με τα δεδομένα να υπόκεινται σε διαδοχική ενθυλάκωση σε κάθε επίπεδο. Τα δεδομένα μεταφέρονται από το φυσικό μέσο στον προορισμό όπου εκεί λαμβάνει χώρα η αντιστροφή διαδικασία.



Σχήμα 5 : Τα πρωτόκολλα που συμμετέχουν για την υλοποίηση του VoIP

1.3.3.1 Φυσικό στρώμα / Στρώμα ζεύξης

Τα κατώτερα στρώματα στη στοιβή είναι το φυσικό στρώμα και στρώμα ζεύξης, το οποίο θα μπορούσε να είναι ένα τοπικό δίκτυο Ethernet (LAN), μια τηλεφωνική γραμμή (V.90 ή 56Kbps μόντεμ) που τρέχει Point-to-Point Protocol (PPP), ή μια Digital Subscriber γραμμή (DSL) που τρέχει asynchronous transfer mode (ATM), ή ακόμα και ένα Multi-Protocol Label Switching (MPLS) δίκτυο. Αυτό το στρώμα εκτελεί λειτουργίες όπως την ανταλλαγή συμβόλων, το συγχρονισμό των πλαισίων και τον ορισμό των προδιαγραφών της φυσικής διεπαφής.

1.3.3.2 Στρώμα δικτύου

Το επόμενο στρώμα είναι το στρώμα διαδικτύου. Το Internet Protocol (IP) που χρησιμοποιείται σε αυτό το στρώμα ενσωματώνει τα δεδομένα (Protocol Data Units, PDUs) ανώτερων επιπέδων σε αυτοτελή IP πακέτα. Η αποστολή του είναι να δρομολογεί (routing) κάθε πακέτο μέσω του δικτύου προς την IP διεύθυνση του προορισμού. Η διεύθυνση IP είναι μια εικονική διεύθυνση που δίνεται σε κάθε υπολογιστή και δρομολογητή (router) του δικτύου. Η πραγματική φυσική διεύθυνση της συσκευής λαμβάνεται χρησιμοποιώντας Πρωτόκολλα Προσδιορισμού Διεύθυνσης (Address Resolution Protocol, ARP). Οι διευθύνσεις του IP έχουν μήκος 32 bits (IP version 4) και συνήθως γράφονται στη «στικτή δεκαδική» (dotted decimal) μορφή (για παράδειγμα 207.134.3.5). Μεταξύ δύο στιγμών βρίσκεται ένας δεκαδικός αριθμός ανάμεσα στο 0 και το 255.

Το IP είναι ένα ασύνδετο (connectionless), best-effort πρωτόκολλο παράδοσης πακέτων. Τα πακέτα IP μπορούν να χαθούν, να καθυστερήσουν ή να ληφθούν εκτός σειράς. Κάθε πακέτο δρομολογείται ξεχωριστά, με χρήση της επικεφαλίδας (IP header) που είναι προσαρτημένη στο «ωφέλιμο» πακέτο (payload). Η λήψη των IP πακέτων δεν επιβεβαιώνεται.

Version	Header Length	TOS	Length	
Datagram ID			Flags	Offset
TTL	Protocol	Checksum		
Source IP Address				
Destination IP Address				
IP Options				

Σχήμα 6 : Η δομή της επικεφαλίδας (header) ενός IP πακέτου

Για να εντοπιστεί πιθανή αλλοίωση της επικεφαλίδας, η οποία θα οδηγούσε σε λανθασμένη δρομολόγηση του πακέτου, υπολογίζεται το checksum της επικεφαλίδας. Παρ'όλα αυτά, στο στρώμα αυτό δεν γίνεται έλεγχος για πιθανή αλλοίωση των δεδομένων (payload) και επομένως, αν αυτός ο έλεγχος είναι επιθυμητός, πρέπει να γίνει σε ένα υψηλότερο στρώμα της στοίβας πρωτοκόλλων. Το IP χρησιμοποιεί επίσης στην επικεφαλίδα του πακέτου μια οκτάδα bits όπου αναγράφεται το πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς που πρέπει να παραλάβει το πακέτο.

1.3.3.3 Στρώμα μεταφοράς

Το αμέσως επόμενο στρώμα είναι το στρώμα μεταφοράς. Χρησιμοποιεί ένα port από το στρώμα εφαρμογής, ώστε όταν φθάσει στον προορισμό να παραδώσει το πακέτο στο σωστό πρωτόκολλο του στρώματος εφαρμογής.

Ένα port είναι μια δομή λογισμικού που ταυτοποιείται από τον αριθμό της. Ο αριθμός είναι ένας ακέραιος 16 bit που έτσι επιτρέπει τιμές από 0 έως 65535. Ουσιαστικά μια εφαρμογή αντιστοιχεί ένα socket στο άκρο μετάδοσης των δεδομένων. Το socket είναι ο συνδυασμός ενός port και μιας IP διεύθυνσης. Κάποια ports είναι αποκλειστικά αφιερωμένα σε συγκεκριμένα πρωτόκολλα. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο HTTP χρησιμοποιεί το port με αριθμό 80, ενώ το SIP χρησιμοποιεί το port με αριθμό 5060. Τα υπόλοιπα ports (οι αριθμοί των οποίων βρίσκονται μεταξύ 49152 και 65535) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε πρωτόκολλο, αφού επιλεγθούν δυναμικά από αυτό. Υπάρχουν δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα στρώματος μεταφοράς, το Transmission Control Protocol (TCP) και το User Datagram Protocol (UDP).

1.3.3.3.1 TCP

Λόγω πιθανής συμφόρησης στο δίκτυο, διαμοιρασμού της κίνησης ή άλλης απρόβλεπτης συμπεριφοράς του δικτύου, τα IP πακέτα μπορεί να χαθούν, να φθάσουν διπλά ή εκτός σειράς. Το TCP ανιχνεύει αυτά τα προβλήματα, ζητάει επανεκπομπή των χαμένων δεδομένων και επαναδιατάσσει τα πακέτα που έφθασαν εκτός σειράς. Το TCP στο σημείο προορισμού αφού συλλέξει τα πακέτα τα περνάει στην εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Έτσι απαλλάσσει τις εφαρμογές από τη γνώση των διαδικασιών του υφιστάμενου δικτύου.

Το TCP διαχειρίζεται μπλοκ δεδομένων (segments) στα οποία χωρίζεται μια ροή δεδομένων για την αποτελεσματική δρομολόγηση της στο δίκτυο. Τα TCP segments ουσιαστικά αποτελούνται από τα δεδομένα με την προσθήκη της επικεφαλίδας που περιέχει τις πληροφορίες ελέγχου του TCP.

Το TCP είναι βελτιστοποιημένο κυρίως για την αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων και όχι για την έγκαιρη παράδοση τους γ'αυτό κάποιες φορές προκαλεί σημαντικές καθυστερήσεις (της τάξης των δευτερολέπτων) καθώς περιμένει τα εκτός σειράς μηνύματα ή πιθανές επανεκπομπές χαμένων πακέτων. Έτσι δεν θεωρείται κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως το VoIP.

Για την αξιόπιστη μεταφορά των πακέτων χρησιμοποιείται μια τεχνική που είναι γνωστή ως θετική επιβεβαίωση με επανεκπομπή. Αυτή η τεχνική απαιτεί από τον δέκτη να απαντήσει με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης όταν λάβει τα δεδομένα. Ο αποστολέας καταγράφει κάθε πακέτο που στέλνει και περιμένει επιβεβαίωση πριν στείλει το επόμενο. Επίσης διαθέτει χρονόμετρητή (timer) που μετράει το χρόνο από τη στιγμή που στάλθηκε το πακέτο. Όταν περάσει ο καθορισμένος χρόνος χωρίς να λάβει επιβεβαίωση τότε ξαναστέλνει το πακέτο. Αυτό χρειάζεται για τις περιπτώσεις που τα δεδομένα χαθούν ή καταστραφούν.

1.3.3.3.2 UDP

Τα μηνύματα του UDP ονομάζονται datagrams και για την επικοινωνία μεταξύ των UDP πρωτοκόλλων αποστολέα-παραλήπτη δεν απαιτείται καμμία προετοιμασία.

Το UDP δεν παρέχει εγγυήσεις στα πρωτόκολλα των ανώτερων επιπέδων για την παράδοση των δεδομένων και δεν διαθέτει πληροφορία για την κατάσταση των μηνυμάτων που έχουν σταλεί. Έτσι παρέχει μη αξιόπιστη υπηρεσία και τα datagrams μπορεί να φθάσουν εκτός σειράς, να υπάρχουν αντίγραφα ή να χαθούν χωρίς προειδοποίηση. Πρόκειται για μια best-effort υπηρεσία παράδοσης. Το μεγαλύτερο μέρος της πολυπλοκότητας του TCP απουσιάζει, συμπεριλαμβανομένων των σειριακών αριθμών, των επιβεβαιώσεων παραλαβής και των αριθμητικών μηνυμάτων του ελέγχου ροής. Αν η αξιοπιστία της μετάδοσης είναι επιθυμητή από την εφαρμογή τότε θα πρέπει να υλοποιηθεί σε ανώτερο επίπεδο.

Το UDP κάνει μόνο πολυπλεξία σε επίπεδο εφαρμογών (μέσω των ports) και απλά παρέχει βεβαίωση της ακεραιότητας (μέσω checksum) της επικεφαλίδας και των δεδομένων. Οι εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στο χρόνο όπως το VoIP προτιμούν το UDP καθώς η απώλεια πακέτων είναι προτιμότερη από την καθυστερημένη άφιξη τους.

Source Port Number	Destination Port Number
Datagram Length	UDP Checksum
Data	

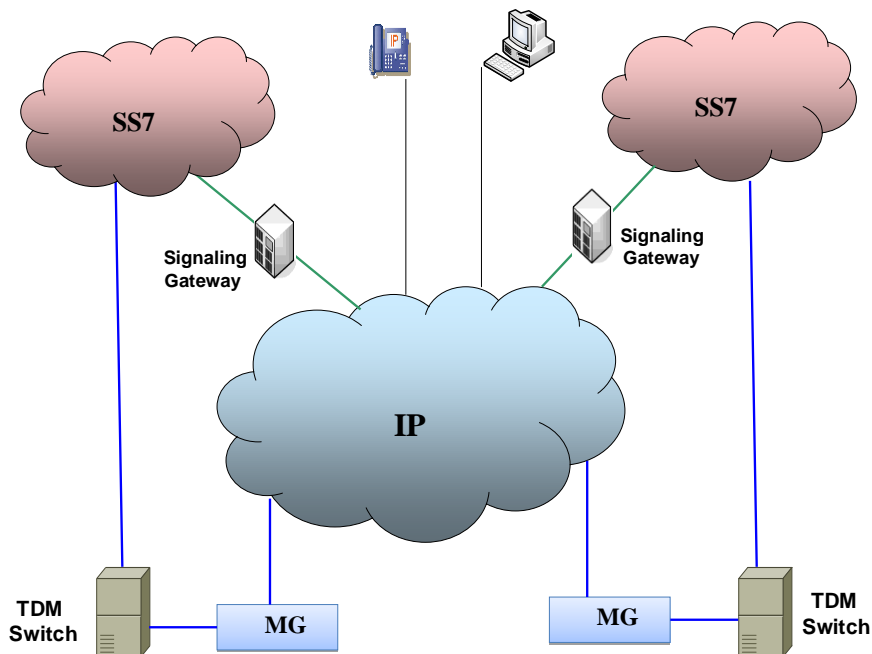
Σχήμα 7 : Η δομή της επικεφαλίδας ενός UDP datagram

Το UDP σε αντίθεση με το TCP υποστηρίζει λειτουργία broadcast (αποστολή σε όλους σε ένα τοπικό δίκτυο) και multicast (αποστολή σε όλους τους συνδρομητές).

1.3.3.4 Στρώμα εφαρμογής

Το ανώτερο στρώμα είναι το στρώμα εφαρμογής. Στην περίπτωση του VoIP περιλαμβάνει πρωτόκολλα σηματοδότησης, όπως το Session Initiation Protocol (SIP) και το H.323, και πρωτόκολλα για τη μεταφορά της ομιλίας, όπως τα Real-time Transport Protocol (RTP) και Real-time Transport Control Protocol (RTCP). Το Session Description Protocol (SDP) ανήκει επίσης στα πρωτόκολλα του VoIP αλλά μεταφέρεται στο σώμα κάθε SIP πακέτου.

1.3.3.4.1 Σηματοδότηση για τη διασύνδεση VoIP με TDM



Σχήμα 8 : Διασύνδεση δικτύων SS7 - IP

Τα στοιχεία δικτύου που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των δικτύων VoIP με τα δίκτυα TDM και ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης για την διεκπεραίωση των κλήσεων είναι :

- *Media Gateway (MG)*
Στις κλήσεις που έρχονται από το PSTN, συμπιέζει και πακετοποιεί τα δεδομένα φωνής και παραδίδει τα συμπιεσμένα πακέτα στο δίκτυο IP. Για τις κλήσεις που ξεκινούν από το δίκτυο IP, το Media Gateway κάνει τις ίδιες εργασίες με την αντίστροφη σειρά. Για κλήσεις ISDN που έρχονται από το δίκτυο PSTN η πληροφορία σηματοδότησης του Q.931 μεταφέρεται για επεξεργασία από το Media Gateway στο Media Gateway Controller.
- *Media Gateway Controller (MGC)*
Η βασική εργασία του είναι η διαχείριση των πόρων του Media Gateway. Επίσης επικοινωνεί με το Signaling Gateway μέσω του οποίου μπορεί να ανταλλάσει πληροφορία σηματοδότησης με τα κέντρα μεταγωγής του δικτύου PSTN. Τα Media Gateway Controller είναι συνήθως υπολογιστές και καλούνται επίσης softswitch.
- *Signaling Gateway (SG)*
Ουσιαστικά παρέχει τη διαφανή (transparent) επικοινωνία μεταξύ των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος και των δικτύων IP σε επίπεδο σηματοδότησης. Το Signaling Gateway μπορεί να τερματίζει σηματοδότηση SS7 ή να μεταφράσει και να στείλει μηνύματα μέσω του δικτύου IP σε κάποιο Media Gateway Controller ή σε κάποιο άλλο Signaling Gateway. Λόγω της κρισιμότητας του ρόλου τους σε δίκτυα όπου υπάρχουν και οι δύο τεχνολογίες (TDM και VoIP) συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα για να εξασφαλιστεί η υψηλή διαθεσιμότητα.

1.3.3.4.1.1 MGCP

Το Media Gateway Control Protocol (RFCs 2805, 3435) είναι ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης για τον έλεγχο από τους Media Gateway Controllers των Media Gateways που χρησιμοποιούνται στη διασύνδεση των μέσων μετάδοσης ανάμεσα σε δίκτυα IP και δίκτυα TDM.

Η πληροφορία σηματοδότησης που μεταφέρεται μέσω του MGCP αφορά τις παρακάτω λειτουργικότητες του Media Gateway :

- Εξασφάλιση των πόρων που απαιτούνται για τη σύνδεση
Δέσμευση των απαιτούμενων πόρων για την πραγματοποίηση της κλήσης και απελευθέρωση τους όταν η κλήση ολοκληρωθεί.
- Διαχείριση των απαιτήσεων της σύνδεσης
Τέτοιες είναι η δυνατότητα επικοινωνίας των μέσων μετάδοσης διαφορετικών τεχνολογιών (TDM, IP), αν θα είναι μονοκατευθυντικές ή όχι, η υποστήριξη διάφορων τύπων δεδομένων πληροφορίας (ήχος, εικόνα κλπ.).
- Μετατροπή των δεδομένων
Μετατροπή ανάλογα με το μέσο μετάδοσης, διαχείριση των DTMF ή άλλων σημάτων της γραμμής κλπ.
- Παρακολούθηση και αναφορές
Παρακολούθηση των συνδέσεων και αναφορά των διάφορων συμβάντων στον MGC.
- Υποστήριξη καθορισμένων δεικτών ποιότητας (QoS)

Δυνατότητα υλοποίησης QoS στα μέσα μετάδοσης, δυνατότητα τροποποίησης των QoS κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης συνολικά ή ανα κατεύθυνση κλπ.

- Διαχείριση των πληροφοριών (accounting)
Ομαδοποίηση των πόρων που σχετίζονται με κάθε ξεχωριστή σύνδεση, συλλογή στοιχείων και δημιουργία αναφορών κλπ.

Το MGCP χρησιμοποιεί το Session Description Protocol (SDP) για να καθορίσει την ροή των δεδομένων που θα μεταδοθούν σε μια τηλεφωνική σύνοδο.

1.3.3.4.2 Σηματοδοσία για τη διαχείριση κλήσεων στο VoIP

Τα κύρια πρωτόκολλα σηματοδοσίας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα VoIP είναι το H.323 και το SIP με τη χρονολογική σειρά με την οποία δημιουργήθηκαν. Πρόκειται για αρκετά διαφορετικές προσεγγίσεις στο ζήτημα της σηματοδοσίας οι οποίες προβλέπουν και διαφορετικές υλοποιήσεις των δικτύων ώστε να είναι σε θέση να διεκπαιριώνουν τηλεφωνικές κλήσεις.

Το δίκτυο VoIP στο οποίο έλαβαν χώρα οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιεί το SIP έτσι στη σύντομη αναφορά που ακολουθεί θα αναφερθούμε περισσότερο σε αυτό.

1.3.3.4.2.1 H.323

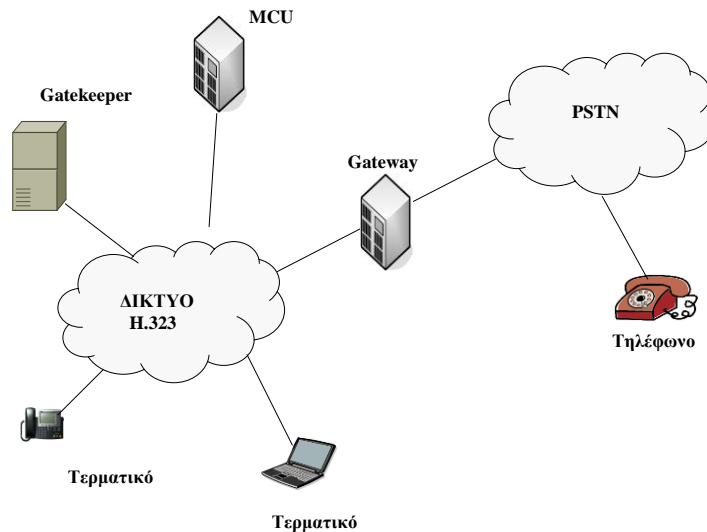
Το H.323 είναι μια σύσταση "ομπρέλα" της ITU που ορίζει τα πρωτόκολλα τα οποία παρέχουν οπτικοακουστικές συνόδους πάνω από οποιοδήποτε δίκτυο. Ο βασικός στόχος για τον οποίο σχεδιάστηκε το H.323 ήταν η μετάδοση φωνής σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων, αργότερα όμως και η μετάδοση εικόνας και δεδομένων αποτέλεσε ακόμη ένα λόγο για την ανάπτυξη του. Επίσης μεγάλη σημασία είχε και η συνεργασία (interoperability) ανάμεσα σε αυτά τα δίκτυα και το H.323 ήρθε να βοηθήσει προς αυτή την κατεύθυνση.

Το H.323 κάνει χρήση ενός πλήθους άλλων πρωτοκόλλων της ITU και της IETF, προκειμένου να προσδιορίσει πλήρως το περιβάλλον του. Τα τερματικά του H.323 είναι συσκευές στα άκρα του δικτύου, οι οποίες ξεκινούν και τερματίζουν ροές πολυμεσικών δεδομένων, μεταξύ αυτών και τηλεφωνικές κλήσεις. Ως ελάχιστη απαίτηση, ένα τερματικό του H.323 πρέπει να υποστηρίζει τη βασική G.711 PCM κωδικοποίηση ήχου. Η υποστήριξη video και απλών δεδομένων είναι προαιρετική.

Ο H.323 gatekeeper είναι ένας server που ελέγχει μια περιοχή (administrative domain) του H.323 δικτύου. Όλα τα τερματικά που ανήκουν στο domain αυτό πρέπει να εγγράφονται σ' αυτό τον gatekeeper και να απευθύνονται σε αυτόν για να δεχθούν ή να εκκινήσουν κλήσεις. Επιπλέον, ο gatekeeper παρέχει πρόσθετες υπηρεσίες στα τερματικά του, όπως εντοπισμό των gateways, μετάφραση των διευθύνσεων και διαχείριση του εύρους ζώνης. Οι gatekeepers δεν είναι απαραίτητα στοιχεία σε ένα H.323 δίκτυο, αλλά χωρίς αυτά οι δυνατότητες των τερματικών περιορίζονται εξαιρετικά.

Τα gateways είναι ένα ακόμα είδος προαιρετικών στοιχείων στο H.323 δίκτυο. Υλοποιούν την διεπαφή μεταξύ του δικτύου H.323 με δίκτυα διαφορετικού πρωτοκόλλου, όπως π.χ. το PSTN.

Τέλος, τα MCUs παρέχουν υπηρεσίες διάσκεψης στα τερματικά, αφού χωρίς αυτά η μεγαλύτερη διάσκεψη που μπορεί να λάβει χώρα αποτελείται από μόλις τρεις πλευρές.



Σχήμα 9 : Τα κύρια στοιχεία του περιβάλλοντος του H.323

1.3.3.4.2.2 SIP

Το SIP (RFC 3261) είναι ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης στο στρώμα εφαρμογής που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία συνόδων (sessions) με έναν ή περισσότερους συμμετέχοντες πάνω από IP δίκτυα.

Το πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, τροποποίηση και τερματισμό unicast αλλά και multicast συνόδων. Μια σύνοδος θα μπορούσε να είναι μια απλή αμφίδρομη τηλεφωνική κλήση, μια συνδιάσκεψη (videoconference) ή ακόμη και ροή πολυμεσικών δεδομένων (multimedia streaming).

Είναι ένα text-based πρωτόκολλο που ενσωματώνει πολλά στοιχεία από τα HTTP και SMTP. Έχει σχεδιαστεί να είναι ανεξάρτητο του υποκείμενου στρώματος μεταφοράς. Οι ροές δεδομένων (data streams), ήχου (audio) και εικόνας (video) μεταφέρονται χρησιμοποιώντας RTP πάνω σε UDP. Επίσης εκμεταλλεύεται το Session Description Protocol (SDP), για τον προσδιορισμό των παραμέτρων μιας συνόδου. Οι χρήστες SIP (clients) χρησιμοποιούν τα ports 5060 και/ή 5061 για τη σύνδεση τους σε SIP servers και τερματικές συσκευές. Το port 5060 χρησιμοποιείται για μη κρυπτογραφημένη κίνηση σηματοδότησης σε αντίθεση με την 5061 που χρησιμοποιείται για κρυπτογραφημένη.

1.3.3.4.2.2.1 Οι λειτουργίες του SIP

Το SIP υποστηρίζει τις παρακάτω λειτουργίες για την εγκαθίδρυση και τον τερματισμό πολυμεσικών επικοινωνιών :

- Η θέση του χρήστη : καθορισμός του άκρσιμου συστήματος (end system) που θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία
- Η διαθεσιμότητα του χρήστη : καθορισμός της επιθυμίας του καλούμενου να συμμετέχει στην επικοινωνία
- Οι δυνατότητες του χρήστη : καθορισμός των τεχνικών δυνατοτήτων του χρήστη από πλευράς μέσων (media) καθώς και των παραμέτρων - όσον αφορά τα μέσα - που θα χρησιμοποιηθούν στην επικοινωνία
- Εγκαθίδρυση της συνόδου : κλήση, επιλογή των παραμέτρων της κλήσης στον καλούντα και στον καλούμενο

- Διαχείριση της συνόδου : περιλαμβάνει τη μεταφορά και τον τερματισμό συνόδων, τροποποίηση των παραμέτρων μιας συνόδου και ενεργοποίηση υπηρεσιών

Το SIP ένα ολοκληρωμένο σύστημα επικοινωνίας αλλά εμπλέκεται μόνο στον τομέα της σηματοδότησης μιας συνόδου επικοινωνίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με άλλα πρωτόκολλα του IETF για την δημιουργία μιας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής επικοινωνίας πολυμέσων. Τυπικά αυτές οι αρχιτεκτονικές περιλαμβάνουν πρωτόκολλα όπως το RTP για τη μεταφορά των δεδομένων πραγματικού χρόνου και τον έλεγχο του QoS, το RTSP για τον έλεγχο της παράδοσης των δεδομένων, το MGCP για τη διαχείριση των Media Gateways προς το PSTN και το SDP για την περιγραφή των συνόδων πολυμέσων. Πάντως η βασική λειτουργικότητα του SIP δεν εξαρτάται από κανένα από αυτά τα πρωτόκολλα.

1.3.3.4.2.2 Τρόπος Διευθυνσιοδότησης

Στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής του SIP πρωτοκόλλου, οι χρήστες προσδιορίζονται με την χρήση του Ενιαίου Προσδιοριστή Πόρων (Uniform Resource Identifier, URI). Τα SIP URIs που χρησιμοποιούνται είναι παρόμοια με Web ή e-mail διευθύνσεις και περιλαμβάνονται μέσα στα SIP μηνύματα, ώστε να καθορίσουν τον αποστολέα και τον τελικό αποδέκτη των μηνυμάτων. Συνεπώς, περιέχουν επαρκή πληροφορία για την αρχικοποίηση και διατήρηση της συνόδου επικοινωνίας με τους διαθέσιμους δικτυακούς πόρους.

1.3.3.4.2.3 Στοιχεία του δικτύου

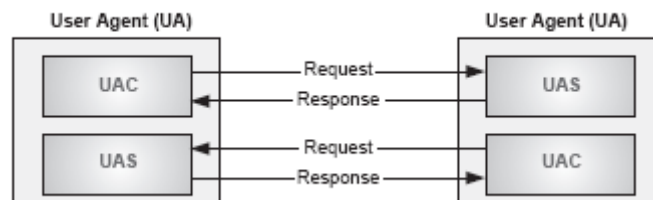
Σε ένα δίκτυο SIP υπάρχουν τρία βασικά δομικά στοιχεία και είναι οι User Agents, οι Servers και η Location Service.

User Agents

Οι User Agents (UA) είναι λογικές οντότητες του SIP στα τερματικά άκρα, οι οποίοι δημιουργούν SIP αιτήσεις για την εγκατάσταση συνόδων και στέλνουν/λαμβάνουν πληροφορία πολυμέσων. Οι τελικοί χρήστες μπορούν να αλληλεπιδρούν μαζί τους μέσω μιας διεπαφής (user interface).

Ένας SIP UA μπορεί να έχει δύο ρόλους :

- UA πελάτη (User Agent Client, UAC)
Είναι υπεύθυνος για την παραγωγή νέων αιτήσεων SIP και την λήψη των συσχετιζόμενων αποκρίσεων
- UA εξυπηρετητή (User Agent Server, UAS)
Είναι υπεύθυνος για την λήψη αιτήσεων SIP και την παραγωγή των αντίστοιχων αποκρίσεων



Σχήμα 10 : Συστατικά στοιχεία ενός User Agent

Οι User Agents αποτελούν σημαντικό κομμάτι οποιασδήποτε εφαρμογής και μπορούν να υλοποιηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ένας SIP UA μπορεί να είναι ένα πρόγραμμα λογισμικού που τρέχει σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης μπορεί να

υλοποιηθεί ως τμήμα ενός desktop τηλεφώνου ή ακόμα μπορεί να τρέχει σαν εφαρμογή σε κινητό τηλέφωνο.

Servers

Οι εξυπηρετητές (Servers) είναι ενδιάμεσες συσκευές που τοποθετούνται μέσα σε ένα SIP δίκτυο και βοηθούν τους User Agents στην εγκατάσταση συνδέσεων καθώς και άλλων λειτουργιών. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες SIP εξυπηρετητών :

Proxy Servers

Ο proxy server είναι μία ενδιάμεση οντότητα που κάνει αιτήσεις εκ' μέρους ενός UA ή άλλων proxy servers. Κυρίως παίζει τον ρόλο του δρομολογητή, πράγμα που σημαίνει ότι η δουλειά του είναι να εξασφαλίζει ότι η αίτηση στέλνεται σε μία άλλη οντότητα που βρίσκεται πιο κοντά στον επιθυμητό χρήστη. Έχουν την δυνατότητα να εφαρμόσουν πολιτικές, όπως για παράδειγμα για το εάν επιτρέπεται σε έναν χρήστη να πραγματοποιήσει μια κλήση. Ένας proxy server μεταφράζει και εάν είναι απαραίτητο ξαναγράφει συγκεκριμένα μέρη ενός μηνύματος αίτησης πριν το προωθήσει. Ανάμεσα σε έναν UA client και έναν UA server μπορεί να υπάρχει ένα σύνολο από servers που βοηθούν στην δρομολόγηση των αιτήσεων. Υπάρχουν δύο τύποι proxy server :

Ο outbound proxy (εξερχόμενος proxy) βοηθάει τους user agents να δρομολογήσουν εξερχόμενες αιτήσεις. Οι user agents συνήθως διαμορφώνονται ώστε να δρομολογούν όλες τις αιτήσεις τους σε έναν outbound proxy, ο οποίος στην συνέχεια θα δρομολογήσει τις αιτήσεις για λογαριασμό τους.

Ο inbound proxy (εισερχόμενος proxy) χειρίζεται εισερχόμενες αιτήσεις για μια τοπική περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, βοηθάει στην δρομολόγηση των εισερχόμενων αιτήσεων στο κατάλληλο UA προορισμού που βρίσκεται στα πλαίσια της περιοχής που είναι υπεύθυνος. Όταν ο inbound proxy λαμβάνει μια αίτηση που απευθύνεται σε έναν χρήστη που ανήκει στην περιοχή του τότε απευθύνεται στην Location Service ώστε να ανακτήσει την διεύθυνση επαφής του χρήστη προορισμού και στην συνέχεια προωθεί την αίτηση σε αυτόν.

Registrar Server

Ο Registrar είναι ένας εξυπηρετητής που λαμβάνει αιτήσεις καταχώρησης από τους UA. Η καταχώρηση είναι η διαδικασία με την οποία ένας SIP UA μεταβιβάζει την τρέχουσα θέση του και τον προσδιοριστή του στον registrar server. Ένας UA πρέπει να είναι καταχωρημένος προκειμένου να μπορεί να λαμβάνει κλήσεις. Όταν ο registrar αποδεχθεί την αίτηση καταχώρησης τότε τοποθετεί την λαμβανόμενη πληροφορία σε μία βάση δεδομένων - που ονομάζεται Location Service - με τα στοιχεία της περιοχής για την οποία είναι υπεύθυνος (domain).

Οι registrar servers είναι λογικές οντότητες και βρίσκονται συνήθως μαζί με τους proxy servers.

Redirect Servers

Ένας redirect server δέχεται αιτήσεις από UA clients ή proxy servers και παράγει συγκεκριμένου τύπου αποκρίσεις (3xx) προς αυτούς. Αυτές οι αποκρίσεις κατευθύνουν τον UA client που παρήγαγε την αίτηση να συνδεθεί με ένα εναλλακτικό σύνολο URIs. Επίσης δίνει τη δυνατότητα στους proxy servers να στείλουν αιτήσεις συνόδων σε εξωτερικά domains.

Location Service

Η Location Service είναι μια βάση δεδομένων η οποία περιέχει μια λίστα αντιστοίχισης των Addresses of Record (AORs) που αναπαριστούν την δημόσια ταυτότητα SIP, και των Διευθύνσεων Επαφής (Contact Addresses), που αναπαριστούν την θέση του χρήστη, για

κάποια συγκεκριμένη περιοχή. Τόσο οι AORs όσο και οι διευθύνσεις επαφής εκφράζονται ως SIP URIs.

Οι user agents συνήθως δεν αλληλεπιδρούν άμεσα με την Location Service, αλλά συνδέονται μέσω κάποιου proxy, registrar ή redirect server. Οι SIP servers χρησιμοποιούν πρωτόκολλα μη βασισμένα στο SIP, όπως το LDAP (Lightweight Directory Access Protocol), για να υποβάλλουν ερωτήσεις, να ενημερώσουν και να ανακτήσουν δεδομένα από την location service κατά την διάρκεια της δρομολόγησης ενός SIP μηνύματος.

Δομή μηνυμάτων

Το SIP είναι πρωτόκολλο που βασίζεται σε κείμενο και συνεπώς η πληροφορία που ανταλλάσσεται στα πλαίσια του πρωτοκόλλου είναι κωδικοποιημένη σε σειρές χαρακτήρων.



Σχήμα 11 : Μορφή SIP μηνυμάτων

Υπάρχουν δύο είδη SIP μηνυμάτων : οι αιτήσεις και οι αποκρίσεις. Η πρώτη σειρά μιας αίτησης έχει μία μέθοδο (method) που δηλώνει τον τύπο της αίτησης και ένα Request-URI που καθορίζει που θα σταλεί η αίτηση. Η πρώτη γραμμή μιας απόκρισης έχει ένα κωδικό απόκρισης.

Οι μέθοδοι που έχουν οριστεί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Μέθοδοι	Περιγραφή
INVITE	Εγκατάσταση συνόδου
ACK	Επιβεβαίωση ή τελική απόκριση στην INVITE
BYE	Τερματισμός συνόδου
CANCEL	Ακύρωση συνόδου που εκκρεμεί
REGISTER	Καταχώρηση του URI του χρήστη
OPTIONS	Ερώτηση επιλογών και δυνατοτήτων
INFO	Μεταφορά σηματοδosis στην διάρκεια κλήσεων
PRACK	Προσωρινή επιβεβαίωση απόκρισης
UPDATE	Ενημέρωση πληροφοριών της συνόδου
REFER	Μεταφορά χρήστη σε URI
SUBSCRIBE	Αίτηση ειδοποίησης ενός γεγονότος
NOTIFY	Μεταφορά ειδοποίησης ενός εγγραμμένου γεγονότος
MESSAGE	Μεταφορά σώματος ενός στιγμιαίου μηνύματος
PUBLISH	Ανέβασμα της κατάστασης παρουσίας σε ένα server

Πίνακας 1 : Οι τύποι αίτησης του SIP

Στο SIP μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από μία αποκρίσεις σε μία αίτηση. Κάθε αίτηση πρέπει να έχει τουλάχιστον μία τελική απόκριση, και μπορεί ακόμα να έχει έναν αριθμό προσωρινών αποκρίσεων. Οι αποκρίσεις είναι αριθμητικές και μάλιστα τριών ψηφίων η καθεμιά. Οι κώδικες αποκρίσεων είναι χωρίζονται σε έξι κλάσεις, που αναγνωρίζονται από το πρώτο ψηφίο του κώδικα. Οι κλάσεις των κωδικών για SIP αποκρίσεις φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

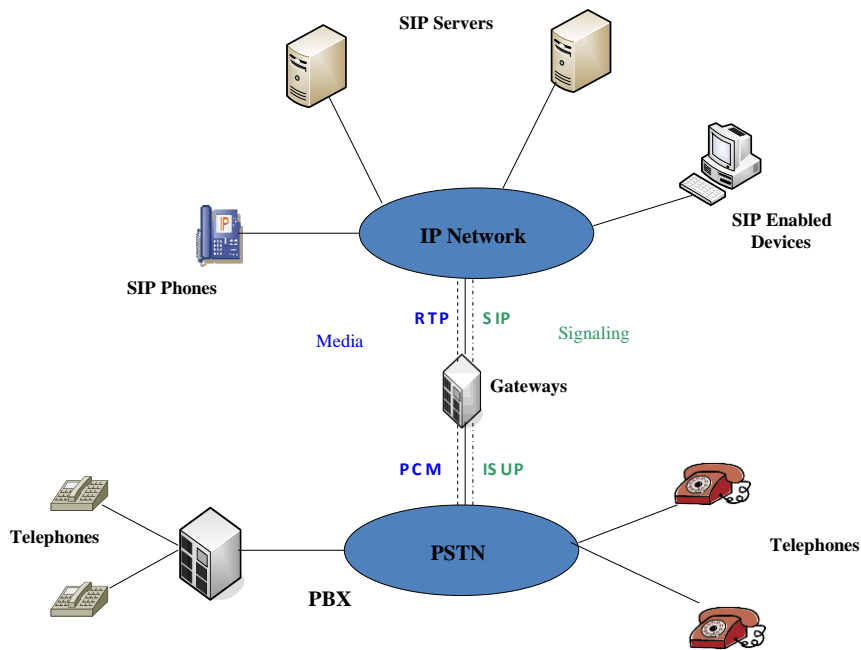
Κλάση	Λειτουργία	Περιγραφή
1xx	Προσωρινή	Η αίτηση βρίσκεται σε εξέλιξη, δεν έχει ολοκληρωθεί.
2xx	Επιτυχία	Η αίτηση ολοκληρώθηκε επιτυχώς.
3xx	Ανακατεύθυνση	Η αίτηση θα δοκιμαστεί σε άλλη τοποθεσία.
4xx	Λάθος στον Client	Η αίτηση δεν ολοκληρώθηκε εξαιτίας λάθους στην αίτηση, μπορεί να ξαναδοκιμαστεί μετά από διόρθωση.
5xx	Λάθος στον Server	Η αίτηση δεν ολοκληρώθηκε εξαιτίας λάθους στον αποδέκτη, μπορεί να δοκιμαστεί σε άλλη τοποθεσία.
6xx	Γενική Αποτυχία	Η αίτηση απέτυχε και δεν μπορεί να διεκπεραιωθεί σε κανέναν εξυπηρετητή.

Πίνακας 2 : Οι τύποι αποκρίσεων του SIP

Συνεργασία του SIP με το δίκτυο PSTN

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο SIP και στο PSTN προκύπτει κάθε φορά που μια κλήση κατά τη διαδρομή της προς τον προορισμό θα πρέπει να περάσει και από τα δύο δίκτυα. Για να γίνει εφικτό ένα τέτοιο γεγονός απαιτείται η αντιστοίχιση και συνεργασία τόσο ανάμεσα στα πρωτόκολλα σηματοδότησης όσο και στα μέσα μεταφοράς των δύο τεχνολογιών/δικτύων.

Οι πύλες (gateways) είναι τα στοιχεία του δικτύου που ενώνουν τα δύο διαφορετικά δίκτυα και αποτελούν τμήμα τόσο του SIP όσο και PSTN δικτύου. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για την υλοποίηση των πυλών : η πλήρης αλληλεπίδραση πρωτοκόλλων και η ενθυλάκωση πρωτοκόλλων. Η ενθυλάκωση πρωτοκόλλων είναι γνωστή και ως SIP Telephony (SIP-T) και δεν αποτελεί διαφορετικό πρωτόκολλο, αλλά είναι το βασικό πρωτόκολλο SIP με έναν αριθμό επεκτάσεων. Οι πύλες ουσιαστικά έχουν διπλό ρόλο καθώς στο SIP δίκτυο εμφανίζονται ως User Agents για τους διαφορους χρήστες και στο PSTN δίκτυο ως τερματικοί μεταγωγείς (exchanges).



Σχήμα 12 : Οι πύλες (gateways) ως μέσο διασύνδεσης SIP και PSTN δικτύων

Το SS7 είναι ένα κεντροποιημένο σύστημα πρωτοκόλλων που χαρακτηρίζεται από σύνθετη αρχιτεκτονική του κεντρικού δικτύου και άκρα χωρίς ιδιαίτερη λειτουργικότητα. Αντίθετα η αρχιτεκτονική του SIP είναι ενός ομότιμου (peer-to-peer) δικτύου. Η λογική του απαιτεί ένα απλό - και άρα εύκολα αναβαθμίσιμο - κύριο δίκτυο (core network), με την «εξυπνάδα» κατανεμημένη στα άκρα του δικτύου και ενσωματωμένη στα τερματικά σημεία (είτε αυτά είναι συσκευές είτε λογισμικό), καθώς και στα στοιχεία του δικτύου που επικοινωνούν με δίκτυα άλλων τεχνολογιών.

1.3.3.4.3 Πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων

1.3.3.4.3.1 RTP/RTCP

Το πρωτόκολλα RTP / RTCP (Real-time Transport Protocol / Real-time Transport Control Protocol) δημιουργήθηκαν για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου όπως τα πολυμεσικά δεδομένα βίντεο και ήχου. Αρχικά σχεδιάστηκαν για επικοινωνία πολλαπλής διανομής (multicast) αλλά στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και για επικοινωνία απλής διανομής (unicast). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μονόδρομη επικοινωνία όπως εφαρμογές video-on-demand, αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία όπως το VoIP και η τηλεδιάσκεψη (videoconference). Το RTP είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συνεργασία με το RTCP το οποίο αποτελεί το πρωτόκολλο ελέγχου.

Η σύσταση του RTP καθορίζει ένα ζεύγος πρωτοκόλλων :

- Το Real-Time Transport Protocol (RTP), για μεταφορά δεδομένων με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου
- Το Real-Time Transport Control Protocol (RTCP), για έλεγχο της ποιότητας της υπηρεσίας και καταγραφή πληροφοριών σχετικών με τα μέλη κάποιας ενεργού συνόδου.

Το RTP (RFC 3550, 2003) , είναι ένα πρωτόκολλο που προσφέρει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων από άκρο σε άκρο (end-to-end) με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου (real-

time characteristics), σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου, όπως τα δίκτυα IP. Τέτοιες υπηρεσίες είναι ο καθορισμός και η αναγνώριση του τύπου των δεδομένων που μεταδίδονται (payload type), σειριακή αρίθμηση των πακέτων (sequence numbering), χρονοσήμανση πακέτων (time-stamping) και έλεγχος των διαδικασιών μεταφοράς.

Το RTP παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς από άκρο σε άκρο, αλλά δεν παρέχει όλη την λειτουργικότητα που παρέχεται από ένα τυπικό πρωτόκολλο μεταφοράς. Για παράδειγμα, το RTP συνήθως λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο UDP για να χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες πολυπλεξίας και checksum του πρωτοκόλλου αυτού. Μπορεί όμως να λειτουργεί και πάνω από άλλες τεχνολογίες όπως τα ATM δίκτυα. Το RTP δεν γνωρίζει την έννοια της σύνδεσης και γι' αυτό μπορεί να λειτουργεί είτε πάνω από connection-oriented είτε πάνω από connectionless δίκτυα.

Πρέπει να τονιστεί ότι το RTP δεν παρέχει κανένα μηχανισμό που να εξασφαλίζει μεταφορά των δεδομένων σε συγκεκριμένα χρονικά όρια, ούτε παρέχει εγγύηση για την ποιότητα της μετάδοσης (Quality of Service - QoS). Αυτό είναι κάτι που αφορά τα πιο κάτω επίπεδα του δικτύου. Δηλαδή, το RTP δεν παρέχει μηχανισμούς για την εξασφάλιση έγκαιρης παράδοσης ούτε για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσιών. Επίσης το RTP δεν εγγυάται την παράδοση ούτε αποτρέπει την παράδοση με λανθασμένη σειρά ενώ επίσης δεν θεωρεί ότι το υποκείμενο δίκτυο είναι αξιόπιστο. Η αρίθμηση που παρέχεται στα πακέτα επιτρέπει στον παραλήπτη να διατάξει τα πακέτα στη σειρά που αυτά μεταδόθηκαν από τον αποστολέα. Μερικές εφαρμογές που μπορούν να προσαρμόζονται σε αλλαγές στην παράδοση των δεδομένων, δεν απαιτούν τέτοιες εγγυήσεις, αλλά για αυτές που τις απαιτούν, το RTP πρέπει να συνοδεύεται από άλλους μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα το πρωτόκολλο Resource ReSerVation Protocol (RSVP) προκειμένου να υποστηρίξει την δέσμευση πόρων και να παρέχει αξιόπιστες υπηρεσίες.

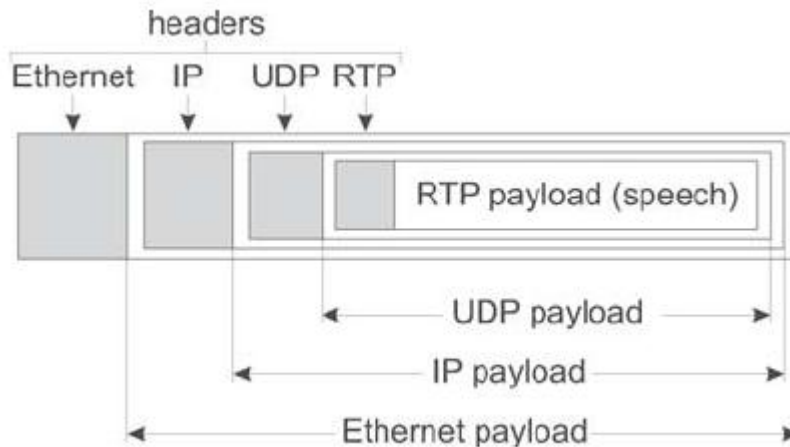
Εκτός από τους συνηθισμένους ρόλους του αποστολέα και του παραλήπτη, το RTP ορίζει δύο νέους ρόλους, του μεταφραστή και του μείκτη. Οι μεταφραστές και οι μείκτες βρίσκονται στο δίκτυο ανάμεσα στους αποστολείς και τους παραλήπτες και επεξεργάζονται τα RTP πακέτα που περνούν από αυτούς. Οι μεταφραστές απλώς μεταφράζουν μια μορφή ωφέλιμου φορτίου σε μια άλλη. Για παράδειγμα, αυτό μπορεί να απαιτείται όταν ένα αρχείο βίντεο πρέπει να κωδικοποιηθεί με ένα διαφορετικό τρόπο προκειμένου να συμβιβαστεί με τυχόν περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κάποιο μέρος του δικτύου. Οι μείκτες είναι παρόμοιοι με τους μεταφραστές αλλά, αντί να μεταφράζουν ξεχωριστές ροές δεδομένων σε διαφορετικές κωδικοποιήσεις, συνδυάζουν πολλαπλές ροές δεδομένων σε μια ροή δεδομένων διατηρώντας την αρχική τους μορφή. Δεν μπορούν όλες οι εφαρμογές να υποστηρίξουν μείκτες. Για παράδειγμα η προσέγγιση αυτή λειτουργεί καλά για συνδιασκέψεις που περιλαμβάνουν μόνο ήχο, αλλά πολλαπλές πηγές βίντεο δεν μπορούν να συνδυαστούν σε μία ροή δεδομένων.

Πως Λειτουργούν τα RTP/RTCP

Οι πολυμεσικές εφαρμογές χαρακτηρίζονται από αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς στη μετάδοση των δεδομένων. Το RTP παρέχει κάποιους μηχανισμούς που λαμβάνουν υπόψη τα θέματα αυτά. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι η χρονοσήμανση (timestamping) και η σειριακή αρίθμηση των πακέτων (sequence numbering).

Η χρονοσήμανση παρέχει σημαντικές πληροφορίες στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο αποστολέας βάζει σε κάθε πακέτο μια χρονοσήμανση (timestamp), την οποία χρησιμοποιεί ο παραλήπτης για να βρει τη χρονική στιγμή που πρέπει να παρουσιάσει τα δεδομένα στον χρήστη. Η χρονοσήμανση χρησιμοποιείται επίσης για το συγχρονισμό διαφορετικών ροών δεδομένων, όπως ροές δεδομένων βίντεο και ήχου (τα RTP/RTCP μεταδίδουν σε διαφορετικές ροές δεδομένων βίντεο και ήχο). Το RTP όμως δεν είναι υπεύθυνο για το συγχρονισμό αυτό, τον οποίο πραγματοποιούν οι εφαρμογές.

Το UDP, το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται για την μετάδοση των RTP/RTCP πακέτων, δεν παραδίδει τα πακέτα με τη σειρά με την οποία στάλθηκαν για αυτό τα RTP πακέτα αριθμούνται, τη στιγμή που στέλνονται, έτσι ώστε να μπορεί ο παραλήπτης να τα βάλει στη σωστή σειρά. Οι αριθμοί αυτοί χρησιμοποιούνται επίσης για να ανιχνεύονται απώλειες στη μετάδοση των πακέτων.



Σχήμα 13 : Η πληροφορία μαζί με τις επικεφαλίδες που προσθέτουν τα διάφορα πρωτόκολλα

Παρόλο που το RTP μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για unicast επικοινωνία, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για multicast επικοινωνία. Για το λόγο αυτό το RTP πακέτο δεδομένων περιέχει την ταυτότητα του αποστολέα της πληροφορίας, ώστε να είναι δυνατόν στην ομάδα της συνόδου να διαπιστώσει κανείς, ποιο μέλος αποστέλλει δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του αναγνωριστικού αποστολέα (source identification), που επιτρέπει στον παραλήπτη να αναγνωρίσει από ποιόν προέρχονται τα δεδομένα που λαμβάνει. Οι παραπάνω μηχανισμοί παρέχονται μέσω της επικεφαλίδας του RTP.

Συνήθως το RTP βρίσκεται πάνω από το UDP στην στοίβα των πρωτοκόλλων. Το UDP έχει επιλεγεί ως το πρωτόκολλο μεταφοράς του RTP για δύο λόγους. Πρώτον, το RTP είναι κυρίως σχεδιασμένο για multicast επικοινωνία κάτι το οποίο δε συμβαδίζει με το προσανατολισμένο σε σύνδεση TCP. Δεύτερον, συνήθως για πολυμεσικά δεδομένα όπως η ομιλία, η αξιοπιστία δεν είναι τόσο σημαντική όσο η έγκαιρη μετάδοση. Η αξιοπιστή μετάδοση η οποία επιτυγχάνεται μέσω της επαναμετάδοσης των χαμένων πακέτων, μπορεί να μην είναι επιθυμητή διαδικασία, αφού μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτωση του δικτύου, και έτσι προβλήματα στη συνεχή μετάδοση των δεδομένων.

Στο RTCP, οι εφαρμογές που έχουν πρόσφατα μεταδώσει πολυμεσικά δεδομένα παράγουν μία αναφορά αποστολέα η οποία στέλνεται σε όλα τα μέλη της συνόδου. Η αναφορά αυτή περιέχει μετρητές πληροφοριών των πακέτων και των bytes που έχουν σταλεί και οι παραλήπτες μπορούν να εκτιμήσουν τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Για την εγκαθίδρυση μιας RTP συνόδου (session), η εφαρμογή που χρησιμοποιεί το RTP καθορίζει ένα ζευγάρι διευθύνσεων προορισμού (δηλαδή μια IP διεύθυνση δικτύου και δύο θύρες (ports), μια για το RTP και μια για το RTCP). Η διεύθυνση μπορεί να είναι είτε μια unicast είτε μια multicast διεύθυνση δικτύου. Σε μια σύνοδο πολυμέσων, το κάθε μέσο μεταφέρεται σε μια ξεχωριστή RTP σύνοδο, και τα RTCP πακέτα αναφέρουν την ποιότητα λήψης για κάθε σύνοδο ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι ο ήχος και το βίντεο θα μεταδίδονται σε διαφορετικές RTP συνόδους κατά την διάρκεια μια τηλεδιάσκεψης.

Μια RTP σύνοδος ορίζεται από τα παρακάτω στοιχεία :

- IP διεύθυνση συμμετεχόντων: Αυτή μπορεί να είναι είτε μια multicast IP διεύθυνση, που αντιστοιχεί στην multicast σύνοδο της ομάδας των συμμετεχόντων είτε ένα σύνολο από unicast διευθύνσεις.
- RTP θύρα (port number): πρόκειται για τον αριθμό θύρας που χρησιμοποιούν όλα τα μέλη της συνόδου για την αποστολή δεδομένων.
- RTCP θύρα (port number): ο αριθμός της θύρας που χρησιμοποιούν τα μέλη της συνόδου για την αποστολή μηνυμάτων ελέγχου RTCP μηνυμάτων.

Η επικεφαλίδα (header) του RTP παρέχει την πληροφορία συγχρονισμού που είναι απαραίτητη για να συγχρονίζονται και να παρουσιάζονται τα δεδομένα ήχου, καθώς και για να προσδιορίζεται το αν τα πακέτα έχουν χαθεί ή έχουν φτάσει εκτός σειράς. Επιπροσθέτως, η επικεφαλίδα καθορίζει τον τύπο ωφέλιμου φορτίου, επιτρέποντας έτσι πολλαπλούς τύπους δεδομένων και συμπίεσης. Το RTP έρχεται στα μέτρα μιας συγκεκριμένης εφαρμογής μέσω βοηθητικών προδιαγραφών δομής και σχήματος ωφέλιμου φορτίου.

Version	Padding	Extension	Marker	Payload Type	Sequence Number
Timestamp					
Synchronization Source (SSRC) Identifier					
Payload					

Σχήμα 14 : Η δομή ενός RTP πακέτου

Για να επιτρέπεται ένα υψηλότερο επίπεδο συγχρονισμού ή για να συγχρονίζονται μη περιοδικά μεταδιδόμενες ροές δεδομένων, το RTP χρησιμοποιεί ένα μονοτονικό ρολόι. Το ρολόι αυτό συνήθως αυξάνεται σε χρονικές μονάδες που είναι μικρότερες από το μικρότερο μέγεθος μπλοκ της ροής δεδομένων. Η αρχική τιμή του ρολογιού είναι τυχαία. Μια εφαρμογή δεν χρησιμοποιεί τις χρονοσημάνσεις του RTP απευθείας, αντίθετα χρησιμοποιεί τις χρονοσημάνσεις του NTP (Network Time Protocol - Πρωτόκολλο Χρόνου Δικτύου) και τις χρονοσημάνσεις του RTP από τα μεταδιδόμενα RTCP πακέτα για κάθε ροή που θέλει να συγχρονίσει.

Τα μέλη της συνόδου παράγουν αναφορές παραλήπτη για όλους τους αποστολείς - πηγές ήχου από τις οποίες έχουν λάβει δεδομένα πρόσφατα. Οι αναφορές περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας που έχει ληφθεί, τον αριθμό των πακέτων που έχουν χαθεί, την διακύμανση καθυστέρησης (jitter), και τις χρονοσημάνσεις τις οποίες χρειάζονται για να υπολογιστεί μια εκτίμηση της καθυστέρησης μετάδοσης μετά επιστροφής (RTT - Round Trip Time).

Ένα σύστημα VoIP

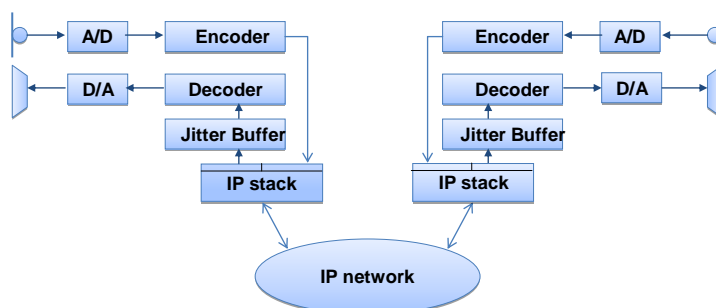
2.1 Εφαρμογές του VoIP

Οι κυριότερες διάφορες εφαρμογές του VoIP σήμερα είναι :

- Εταιρείες και οργανισμοί χρησιμοποιούν το VoIP στα εταιρικά τους δίκτυα. Το πλεονέκτημα που έχει το VoIP μεταξύ άλλων της επαναχρησιμοποίησης της υπάρχουσας δικτυακής υποδομής δίνει τη δυνατότητα αποφυγής της εγκατάστασης και συντήρησης παράλληλης τηλεφωνικής υποδομής με το όποιο κόστος αυτό εμπεριέχει.
- Πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών χρησιμοποιούν το VoIP εκμεταλλευόμενοι την σύγκλιση των δικτύων έτσι καθώς τα διαφορετικά δίκτυα μπορούν να συνεργαστούν με τη χρήση δικτυακών πυλών (network gateways). Έτσι πάροχοι τηλεφωνικών υπηρεσιών μπορούν να αναπτύξουν ένα συνδυασμό VoIP και PSTN στο δίκτυο κορμού (backbone network).
- Χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο (internet) χρησιμοποιούν κατάλληλα εργαλεία λογισμικού για την επικοινωνία με άλλους αντίστοιχους χρήστες που διαθέτουν το αντίστοιχο λογισμικό.

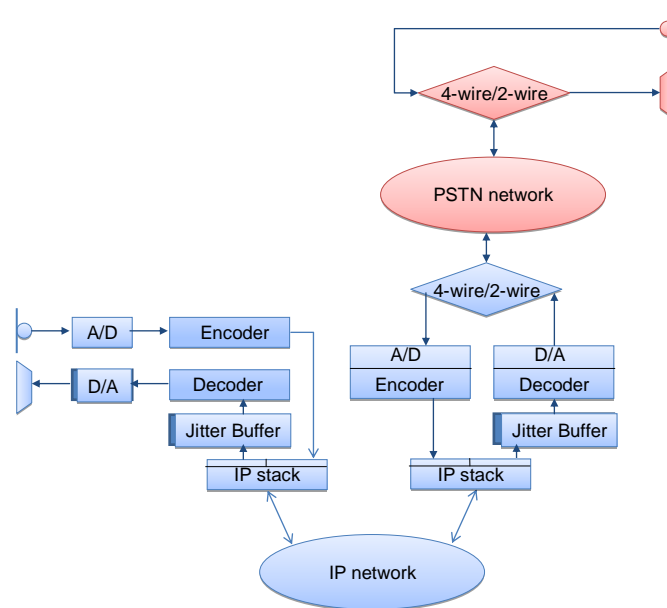
2.2 Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος VoIP

Η διαδρομή που κάνει η φωνή σε μια κλήση VoIP εξαρτάται από τα δίκτυα που εμπλέκονται στην επικοινωνία των δύο χρηστών που βρίσκονται στα τερματικά άκρα (καλών/καλούμενος). Έτσι και οι δύο χρήστες μπορεί να είναι χρήστες VoIP οπότε επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός ή περισσότερων συνδεδεμένων IP δικτύων. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μονοπάτι της φωνής σε αυτή την περίπτωση.



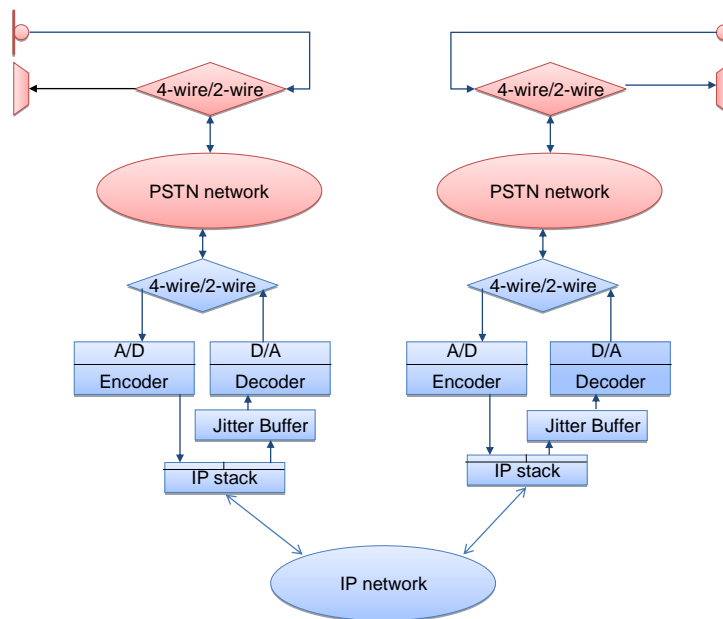
Σχήμα 15 : Το block διάγραμμα ενός αμιγούς συστήματος VoIP

Μια άλλη περίπτωση είναι όταν ένας χρήστης VoIP επικοινωνεί με ένα χρήστη δικτύου PSTN. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το μονοπάτι της φωνής σε αυτή την περίπτωση.



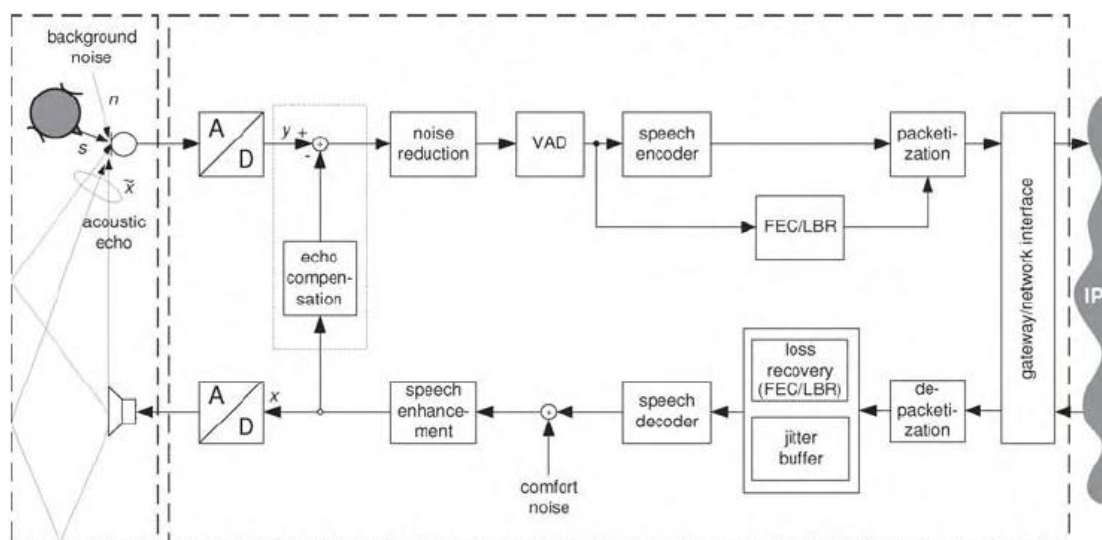
Σχήμα 16 : Το block διάγραμμα ενός υβριδικού συστήματος VoIP - PSTN

Μια ακόμα περίπτωση είναι όταν κατά την επικοινωνία δυο συνδρομητών VoIP η φωνή περνάει από ένα δίκτυο PSTN που πιθανά διασυνδέει τα δίκτυα IP στα οποία ανήκουν. Τέλος υπάρχει το σενάριο οι δύο συνδρομητές να ανήκουν σε δίκτυα PSTN αλλά η διαδρομή της κλήσης να περνάει από ένα δίκτυο ή γραμμή όπου για τη μετάδοση της ομιλίας χρησιμοποιείται η μεταγωγή πακέτων. Αυτή είναι και η τοπολογία η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 17 : Το block διάγραμμα ενός υβριδικού συστήματος VoIP - PSTN

2.3 Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος VoIP



Σχήμα 18 : Τα στάδια επεξεργασίας της ομιλίας σε μια VoIP διεπαφή χρήστη¹

Ένα τυπικό σύστημα VoIP αποτελείται από κάποια συγκεκριμένα στοιχεία στα τερματικά του σημείου. Το πρώτο στοιχείο είναι ο κωδικοποιητής ο οποίος περιοδικά δειγματοληπτεί το αρχικό σήμα της ομιλίας και αντιστοιχεί ένα – συνήθως σταθερό - αριθμό bits σε κάθε δείγμα, δημιουργώντας μια σταθερή ροή από bits. Ο παραδοσιακός κωδικοποιητής δείγματος G.711 χρησιμοποιεί παλμοκωδική διαμόρφωση (Pulse Code Modulation, PCM) για να παράξει δείγματα των 8bits ανά 125 ms, δημιουργώντας έτσι μια ροή δεδομένων της τάξης των 64 Kbps.

Επιπλέον μείωση στο ρυθμό των δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί εάν κατά τη διάρκεια των περιόδων σιωπής δεν κωδικοποιείται κανένα σήμα, μια τεχνική που είναι γνωστή ως Voice Activity Detection (VAD). Είναι γνωστό ότι η ομιλία μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια διαδικασία όπου εναλλάσσονται ριπές ομιλίας (talkspurts) και περίοδοι σιωπής που ακολουθούν εκθετικές κατανομές με μέσους όρους 1.2 και 1.8 αντίστοιχα.

Ο κωδικοποιητής ακολουθείται από τον πακετοποιητή (packetizer) ο οποίος συγκεντρώνει σε ένα πακέτο ένα συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων (για τον G.711) ή ένα συγκεκριμένο αριθμό πλαισίων (για τους G.723, G.729). Στα πακέτα (τα οποία έχουν ίδιο μέγεθος) προστίθενται οι επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων όλων των επιπέδων που εμπλέκονται στη διαδικασία.

Καθώς τα πακέτα φωνής στέλνονται πάνω από ένα δίκτυο IP υπόκεινται σε διάφορες καθυστερήσεις και απώλειες λόγω του δικτύου. Ένα σημαντικό στοιχείο του δικτύου στο άκρο της λήψης είναι ο jitter buffer, σκοπός του οποίου είναι να απορροφάει τις διακυμάνσεις στην καθυστέρηση και να εξασφαλίζει την ομαλή αναπαραγωγή της ομιλίας. Ο jitter buffer παραδίδει μια συνεχή ροή πακέτων στον αποπακετοποιητή (depaketizer) και τελικά στον αποκωδικοποιητή ο οποίος επανακατασκευάζει το σήμα της ομιλίας.

¹ A. Raake, Speech Quality of VoIP – Assessment and Prediction, (2006),

Ποιότητα υπηρεσίας

Με βάση τον ορισμό που παρέχεται από την ITU, τα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς (Next Generation Networks) όπως το VoIP, δομούνται συνήθως πάνω από τεχνολογία μεταγωγής πακέτου (όπως το πρωτόκολλο IP) και είναι σε θέση να παρέχουν Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) στο στρώμα μεταφοράς (transport layer) διατηρώντας το ανεξάρτητο από το στρώμα εφαρμογής (application layer) και συνεισφέροντας στη γενικευμένη κινητικότητα χρηστών και υπηρεσιών.

Συνεπώς, η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας θεωρείται ιδιαίτερης σημασίας σε ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς, δεδομένου ότι η κίνηση είναι πιθανό να διασχίζει πολλά δίκτυα. Με τις προσδοκίες των πελατών να κατευθύνονται ολοένα και περισσότερο προς προηγμένες ευρυζωνικές (broadband) υπηρεσίες πολυμέσων και μεγάλου όγκου πληροφοριών, οι τελικοί χρήστες πρέπει να είναι σε θέση να επιλέξουν το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας.

Η ποιότητας υπηρεσίας ορίζεται με βάση δυο διαφορετικές προσεγγίσεις: την αντικειμενική και την υποκειμενική. Η αντικειμενική προσέγγιση αφορά στην αποτίμηση της ποιότητας μιας υπηρεσίας εστιάζοντας σε δικτυακά ζητήματα και λαμβάνοντας υπόψη ποσοτικές μετρήσεις. Αντιθέτως, η υποκειμενική προσέγγιση εστιάζει στην εμπειρία χρηστών, και αξιολογεί πόσο καλά μια υπηρεσία ικανοποιεί τις προσδοκίες των πελατών, λαμβάνοντας υπόψη ποιοτικά κριτήρια. Στην περίπτωση αυτή, εισάγεται η έννοια της Ποιότητας Εμπειρίας (Quality of Experience - QoE), η οποία αναφέρεται στην ποιότητας υπηρεσίας που γίνεται αντιληπτή από διαφορετικούς χρήστες.

Η παροχή δικτυακών πόρων για ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας αποτελεί το βασικό ζήτημα στα πολυ-υπηρεσιακά (multiservice) Δίκτυα Επόμενης Γενιάς. Η παροχή πόρων μπορεί να διασφαλιστεί από ένα πλήθος μηχανισμών ελέγχου της ποιότητας υπηρεσίας.

Στην περιοχή των δικτύων μεταγωγής πακέτου, ο όρος «Ποιότητα Υπηρεσίας» αναφέρεται στους μηχανισμούς ελέγχου που μπορούν να παρέχουν διαφορετική προτεραιότητα σε διαφορετικούς χρήστες ή/και διαφορετικές ροές δεδομένων, ή να εγγυηθούν ένα ορισμένο επίπεδο απόδοσης σε μια ροή δεδομένων σύμφωνα με ανάλογα αιτήματα από χρήστες και εφαρμογές. Οι εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας θεωρούνται σημαντικές εάν η χωρητικότητα του δικτύου είναι περιορισμένη, ειδικά για τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως το VoIP δεδομένου ότι αυτές απαιτούν συχνά σταθερό ρυθμό bit και είναι πιθανό να είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση.

Η ποιότητας υπηρεσίας ορίζεται από την ITU-T ως «η συλλογική επίδραση της απόδοσης μιας υπηρεσίας, η οποία καθορίζει το βαθμό ικανοποίησης ενός χρήστη της υπηρεσίας». Από αυτή την άποψη, η ποιότητας υπηρεσίας καθορίζεται από την προοπτική των τελικών χρηστών, και το πρόβλημα παροχής ποιότητας υπηρεσίας συνίσταται τελικά στην ικανοποίηση των χρηστών. Οι χρήστες είναι ικανοποιημένοι όταν η αντίληψή τους για την υπηρεσία ευθυγραμμίζεται με τις προηγούμενες προσδοκίες τους. Το πρόβλημα είναι ότι η αντίληψή τους αυτή βασίζεται σε αντικειμενικές και υποκειμενικές απόψεις, με το υποκειμενικό μέρος να είναι δύσκολο για τους παρόχους να ελεγχθεί. Στο πλαίσιο αυτό, το QoS μπορεί να περιγραφεί με όρους ποσοτικούς και ποιοτικούς, αντίστοιχα. Στην περίπτωση

της ποσοτικής προσέγγισης, καθορίζονται όρια σε στατιστικές ή ντετερμινιστικές παραμέτρους, τα οποία συμφωνούνται σε μία Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement - SLA). Το πρόβλημα καταλήγει σε πρόβλημα παρακολούθησης των SLAs, ώστε να αποδειχτεί εάν αυτά τα όρια ικανοποιούνται ή όχι. Στην περίπτωση αυτή, συνήθως χρησιμοποιούνται παράμετροι του καναλιού ή της απόδοσης του συστήματος, όπως για παράδειγμα ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (signal-to-noise ratio, SNR), ο ρυθμός εσφαλμένων bit (bit error rate, BER), ο ρυθμός διεκπεραιωτικότητας μηνυμάτων (message throughput rate), η πιθανότητα φραγής κλήσης (call blocking probability), η καθυστέρηση (delay) και η διακύμανση καθυστέρησης (jitter). Αντίθετα, η ποιοτική προσέγγιση είναι γενικά απλούστερη, και συνήθως συνδέεται με σχετικό (σε αντιδιαστολή με τον απόλυτο) χειρισμό της κίνησης. Τυπικά, δεν έχει καμία σχετιζόμενη παράμετρο, αλλά θα πρέπει να παρέχει ικανοποιητική εμπειρία χρήστη, ώστε να δικαιολογήσει τη χρησιμοποίηση QoS.

3.1 Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που ποσοτικοποιούν και καταμετρούν την ποιότητας υπηρεσίας με αντικειμενικά κριτήρια (QoS metrics), αφορούν κυρίως στην απόδοση του δικτύου και είναι :

- *Πιθανότητα φραγής (Blocking probability)*
Περιγράφει την αποτυχία ενός δικτύου να εγκαταστήσει μια σύνδεση εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμων πόρων (συνεπώς, ολόκληρο το μονοπάτι μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών δεν είναι διαθέσιμο). Δίνεται ως ο λόγος μεταξύ των περιπτώσεων φραγής και των προσπαθειών.
- *Διαθεσιμότητα δικτύου (Network availability)*
Αυτή η παράμετρος περιγράφει την απαίτηση για παροχή υπηρεσιών χωρίς διακοπή και με την αποδεκτή ποιότητα. Συνεπώς, αναφέρεται στη διαθεσιμότητα του δικτύου συνολικά, που εγγυάται την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών. Δίνεται ως ο λόγος μεταξύ του χρόνου που το δίκτυο είναι διαθέσιμο και του συνολικού χρόνου.
- *Χρόνος αποκατάστασης εφαρμογής (Application set-up time)*
Αντιστοιχεί στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του αιτήματος του χρήστη και της απόκρισης του δικτύου.
- *Χρόνος αποκατάστασης σύνδεσης (Connection set-up time)*
Αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης ή συνόδου μεταξύ δυο συμβαλλόμενων μερών. Ο χρόνος μετράται από το πρώτο μήνυμα που στέλνει το ένα μέρος, έως ότου το δίκτυο είναι έτοιμο για μετάδοση των δεδομένων και το άλλο μέρος είναι έτοιμο να λάβει τα δεδομένα.
- *Ευρωστία δικτύου (Network robustness)*
Αναφέρεται στο βαθμό στον οποίο ένα δίκτυο ή ένα μέρος του μπορεί να λειτουργήσει σωστά σε περιόδους ακραίων συνθηκών (π.χ. συμφόρηση δικτύου ή διακοπή λειτουργίας στοιχείων του δικτύου).
- *Διεκπεραιωτικότητα (Throughput)*
Περιγράφει την ποσότητα δεδομένων που μεταφέρονται από το ένα μέρος στο άλλο ή που υποβάλλονται σε επεξεργασία σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων για τα δίκτυα μετρώνται σε όρους διεκπεραιωτικότητας. Τυπικά, η διεκπεραιωτικότητα μετράται σε kbps, Mbps και Gbps.
- *Καθυστέρηση (Delay)*

Η καθυστέρηση δικτύου αντιστοιχεί στο χρόνο που χρειάζεται για τη μεταφορά δεδομένων από ένα σημείο του δικτύου σε ένα άλλο. Η καθυστέρηση δικτύου προκαλείται από το συνδυασμό της καθυστέρησης επεξεργασίας (processing delay), της καθυστέρησης μετάδοσης (transmission delay), της καθυστέρησης διάδοσης (propagation delay), και της καθυστέρησης δρομολόγησης και αναμονής (routing and queuing delay) στους ενδιάμεσους δρομολογητές στο μονοπάτι προς τον κόμβο προορισμού. Η καθυστέρηση μετράται σε msec.

- *Μεταβολή καθυστέρησης (Jitter)*
Προκαλείται συνήθως από τους ενδιάμεσους καταχωρητές (buffers) που «τοποθετούνται» στους δρομολογητές κατά τη διάρκεια των περιόδων αυξανόμενης κίνησης, και λιγότερο συχνά από αλλαγές στη δρομολόγηση, που οφείλονται σε αποτυχίες ή αναπροσαρμογές στους πίνακες δρομολόγησης. Η μεταβολή καθυστέρησης που μια εφαρμογή μπορεί να «ανεχτεί» εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ο σημαντικότερος από τους οποίους είναι η φύση της εφαρμογής. Εξαρτάται επίσης από τη μεταβολή καθυστέρησης που εισάγεται από άλλα συστήματα στο διατεματικό μονοπάτι της εφαρμογής. Οι εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης μπορούν να «αντέξουν» την ελάχιστη μεταβολή καθυστέρησης. Η μεταβολή καθυστέρησης μετράται σε msec.
- *Ρυθμός εσφαλμένων bit (Bit Error Rate - BER)*
Σε μια ψηφιακή μετάδοση, το BER είναι το ποσοστό των bits με λάθη προς το συνολικό αριθμό bits που έχουν μεταδοθεί, ληφθεί ή επεξεργαστεί κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Συνήθως εκφράζεται σε αρνητική δύναμη του 10. Το BER είναι το ψηφιακό ισοδύναμο του λόγου σήματος-προς-θόρυβο σε ένα αναλογικό σύστημα.
- *Ρυθμός απώλειας πακέτων (Packet loss rate)*
Η απώλεια πακέτων είναι συνήθως το αποτέλεσμα συμφόρησης στο δίκτυο. Ο ρυθμός απώλειας πακέτων ορίζεται ως το ποσοστό των πακέτων που χάνονται κατά μήκος του μονοπατιού από την πηγή στον προορισμό, από το συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων πακέτων. Δίνεται συνήθως ως ο λόγος μεταξύ των χαμένων και των μεταδιδόμενων πακέτων.

3.2 Μηχανισμοί Ελέγχου Ποιότητας Υπηρεσίας

Οι κυριότεροι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών στα σύγχρονα δίκτυα μεταγωγής πακέτων είναι :

- *Έλεγχος Πρόσβασης (Admission Control)*
Μερικές εφαρμογές, όπως η τηλεδιάσκεψη, παράγουν κίνηση στο δίκτυο που απαιτεί ένα εγγυημένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας για τη σωστή λειτουργία τους. Αυτές οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να σχετίζονται είτε με ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης, είτε με περιορισμένες καθυστερήσεις είτε με κάποιους μέγιστους ρυθμούς απώλειας πακέτων που μπορεί να υφίσταται μια ροή δεδομένων. Τα στοιχεία δικτύου που πρέπει να είναι σε θέση να διαθέσουν και να διατηρήσουν τους – πεπερασμένους - δικτυακούς πόρους τους για να τηρήσουν τις εγγυήσεις τους. Συνεπώς, αυτά τα στοιχεία δικτύου ενδέχεται επίσης να πρέπει να απορρίψουν νέες ροές δεδομένων που θα οδηγούσαν σε αδυναμία τήρησης των υποσχέσεών τους.
Η διαδικασία της απόφασης σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη μιας νέας ροής δεδομένων καλείται Έλεγχος Πρόσβασης. Συνεισφέρει δε στην πρόληψη

εμφάνισης συμφόρησης, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

- *Μορφοποίηση/Αστυνόμευση Κίνησης (Traffic Shaping/Policing)*
Αφότου ένα ρεύμα κίνησης γίνει αποδεκτό με μια δεδομένη απαίτηση QoS και με δεδομένη περιγραφή κίνησης, αποτελεί δέσμευση για την πηγή να διατηρήσει το συγκεκριμένο προφίλ. Εάν μια πηγή παραβιάσει τη συμφωνία της και στείλει περισσότερη κίνηση από όση είχε διαπραγματευτεί, θα υπάρξει πρόβλημα στη λειτουργία του μοντέλου υπηρεσίας (Service Model). Για την αποτροπή αυτού του ενδεχομένου, η μορφοποίηση και η αστυνόμευση κίνησης αποτελούν σημαντικές λύσεις.
- *Ταξινόμηση Πακέτων (Packet Classification)*
Κάθε πακέτο, ανεξάρτητα από το εάν είναι πραγματικού χρόνου ή μη, αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους δρομολογητές στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων καθώς ο μηχανισμός που ισχύει είναι αυτός της βέλτιστης προσπάθειας (best-effort). Ωστόσο, η κίνηση πραγματικού χρόνου απαιτεί διαφορετικό χειρισμό στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, τα νεότερα μοντέλα υπηρεσιών χρησιμοποιούν κάποιους μηχανισμούς που να ξεχωρίζουν τα πακέτα πραγματικού χρόνου από υπόλοιπα.
Στην πράξη, αυτό γίνεται συνήθως με τη σήμανση πακέτων (packet marking). Το πεδίο Είδος Υπηρεσίας (Type of Service - ToS) στην IP επικεφαλίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το λόγο αυτό. Κάποιες νεότερες αρχιτεκτονικές όπως το πρωτόκολλο MPLS, χρησιμοποιούν τις σύντομες ετικέτες (short labels), οι οποίες επισυνάπτονται στην αρχή των IP πακέτων για τον ίδιο λόγο.
- *Χρονοπρογραμματισμός Πακέτων (Packet Scheduling)*
Οι διαφορετικές απαιτήσεις των υπηρεσιών που μπορεί να παρέχονται ταυτόχρονα στα σύγχρονα δίκτυα απαιτούν και διαφορετικό χειρισμό των πακέτων. Ο χρονοπρογραμματισμός FIFO που χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά στους δρομολογητές έχει αντικατασταθεί από πιά σύνθετες μεθόδους για τη διαχείριση των ουρών.
Η Ουροποίηση Προτεραιότητας (Priority Queuing) παρέχει διαφορετικές ουρές για διαφορετικούς τύπους κίνησης. Κάθε ουρά έχει μια σχετική προτεραιότητα, σύμφωνα με την οποία εξυπηρετείται. Οι ουρές με τη χαμηλότερη προτεραιότητα εξυπηρετούνται μόνο όταν δεν υπάρχει κανένα πακέτο σε όλες τις ουρές υψηλότερης προτεραιότητας.
Η Σταθμισμένη Δίκαιη Ουροποίηση (Weighted Fair Queuing) επίσης έχει διαφορετικές ουρές για διαφορετικές κλάσεις κίνησης. Ωστόσο, για κάθε ουρά ορίζεται ένα συγκεκριμένο βάρος w , και τα πακέτα μιας συγκεκριμένης ουράς παίρνουν πάντα ένα μέρος w/C του εύρους ζώνης, όπου C είναι η συνολική χωρητικότητα της ζεύξης.
- *Απόρριψη Πακέτων (Packet Dropping)*
Υπό συνθήκες συμφόρησης, μερικά πακέτα θα πρέπει να απορρίπτονται από τους δρομολογητές. Εάν αυτό γίνει τυχαία, μπορεί να οδηγήσει σε μη επαρκή απόδοση κάποιες κατηγορίες υπηρεσιών.
Αρα κάποια πακέτα μπορεί να είναι σημαντικότερα από κάποια άλλα. Όταν λοιπόν, πρόκειται να πραγματοποιηθεί απόρριψη πακέτων, το δίκτυο θα πρέπει να δώσει υψηλότερη προτεραιότητα απόρριψης στα λιγότερο σημαντικά πακέτα.
- *Δρομολόγηση με βάση την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS-based Routing)*
Με αυτό το μηχανισμό καθορίζονται διαφορετικές διαδρομές για τις διαφορετικές ροές δεδομένων. Αυτό γίνεται βάσει της γνώσης που υπάρχει στο

δίκτυο για τη διαθεσιμότητα των πόρων σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις QoS των εκάστοτε ροών δεδομένων.

- *Δέσμευση Πόρων (Resource Reservation)*
Η δέσμευση πόρων έχει μελετηθεί περισσότερο στο κομμάτι που αφορά στο χρόνο εγκατάστασης μιας σύνδεσης. Το πιο γνωστό πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων αποτελεί το RSVP (RFC 2205). Εισήχθη ως μηχανισμός της αρχιτεκτονικής QoS ενοποιημένων υπηρεσιών (IntServ) για την υλοποίηση QoS από το ένα άκρο στο άλλο (end-to-end) στο δίκτυο δεδομένων. Το RSVP παρέχει συνολικά εγγυημένη ποιότητας υπηρεσίας και βασίζεται σε μηχανισμούς σήμανσης που μεταδίδονται από την πηγή στον προορισμό, έχοντας ενημέρωση για την τοπολογία του δικτύου.

3.3 Παροχή Εγγυήσεων Ποιότητας Υπηρεσίας στα Δίκτυα IP

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας στα δίκτυα IP όπως το Διαδίκτυο (Internet) είναι ένα σημαντικό αλλά και πολυσύνθετο ζήτημα που αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια.

Ένας τυπικός ορισμός για την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας στο επίπεδο των επιμέρους στοιχείων του δικτύου είναι η ικανότητα ενός στοιχείου του δικτύου να παρέχει σε ένα υποσύνολο κίνησης ένα επίπεδο εγγύησης ότι οι απαιτήσεις υπηρεσίας της μπορεί να επιτευχθούν με συγκεκριμένη (πολύ μεγάλη) πιθανότητα.

Ουσιαστικά οι μηχανισμοί της ποιότητας υπηρεσίας δεν παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα στο δίκτυο ή κάτι παρόμοιο, αλλά απλώς κάνουν καλύτερη διαχείριση του δικτύου ώστε να χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά και σύμφωνα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Έχουν προταθεί δύο αρχιτεκτονικές για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας στα δίκτυα IP :

- Η αρχιτεκτονική Integrated Service (IntServ)
Η λογική της αρχιτεκτονικής αυτής (RFC 1633) είναι η δέσμευση πόρων, όπου οι πόροι του δικτύου διατίθενται με βάση τις ανάγκες των εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα για κάθε εφαρμογή που επιθυμεί κάποιο επίπεδο ποιότητας εξυπηρέτησης γίνεται στο δίκτυο κράτηση πόρων ώστε να εξυπηρετούνται οι εφαρμογές του.
- Η αρχιτεκτονική Differentiated Service (DiffServ)
Η αρχιτεκτονική αυτή (RFC 2474) βασίζεται στη διαδικασία παροχής προτεραιότητας σε ορισμένα πακέτα (differentiated service). Η κίνηση του δικτύου διαχωρίζεται και οι πόροι διανέμονται δίκαια με βάση τα κριτήρια αστυνόμευσης και διαχείρισης του εύρους ζώνης. Προκείμενου να επιτευχθεί ποιότητα στην υπηρεσία, οι κατηγορίες (classifications) που έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις απολαμβάνουν προνομιακή μεταχείριση από το δίκτυο.

Ποιότητα ομιλίας

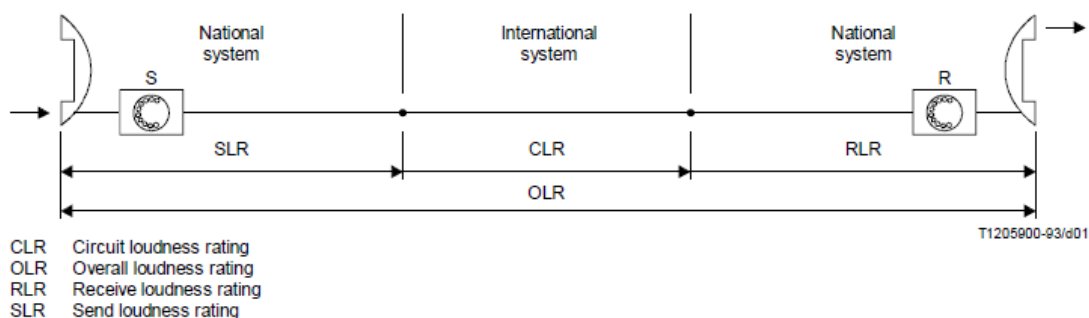
4.1 Ποιότητα ομιλίας στην τηλεφωνία

Η ποιότητα της ομιλίας στην τυπική τηλεφωνία των 3.1 KHz εξαρτάται άμεσα και καθοριστικά από τις παραμέτρους της μετάδοσης. Έτσι η υποβάθμιση της ποιότητας της ομιλίας είναι το αποτέλεσμα επιμέρους προβλημάτων σε μια ή περισσότερες από τις παραμέτρους μετάδοσης. Η ITU έχει καθορίσει αυτές τις συγκεκριμένες παραμέτρους της μετάδοσης που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα μετάδοσης ομιλίας στις τηλεφωνικές συνδέσεις (ITU-T Rec. P.11, 1993).

Γενικά η ποιότητα της μετάδοσης ομιλίας είναι μια πολύ σημαντική πλευρά της συνολικής ποιότητας υπηρεσίας για πολλές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

4.1.1 Απώλεια έντασης

Ο βασικός σκοπός της τηλεφωνικής σύνδεσης είναι να δημιουργήσει ένα μονοπάτι για τη μετάδοση της ομιλίας από το στόμα ενός ομιλητή στο αυτί ενός ακροατή. Η ένταση του σήματος της ομιλίας (loudness) εξαρτάται από την ακουστική πίεση που δημιουργείται από τον ομιλητή και την απώλεια έντασης στο ακουστικό μονοπάτι από την είσοδο στο μικρόφωνο του τηλεφώνου στο ένα άκρο, έως την έξοδο του μεγαφώνου του τηλεφώνου στο άλλο άκρο της σύνδεσης. Η αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας και η ικανοποίηση του χρήστη εξαρτώνται σε ένα μεγάλο βαθμό από την απώλεια έντασης (loudness loss) που δημιουργείται. Όσο η απώλεια έντασης αυξάνεται πέρα από ένα επιθυμητό εύρος, η ακουστική προσπάθεια αυξάνεται και η ικανοποίηση του χρήστη μειώνεται. Σε ακόμα υψηλότερα επίπεδα απώλειας έντασης η κατανόηση μειώνεται και απαιτείται περισσότερος χρόνος για να μεταβιβαστεί ένας συγκεκριμένος όγκος πληροφορίας. Από την άλλη, αν υπάρχει μικρή απώλεια έντασης η ικανοποίηση του χρήστη μειώνεται καθώς το σήμα της ομιλίας είναι περισσότερο δυνατό από το επιθυμητό.



Σχήμα 19 : Καθορισμός των στοιχείων της έντασης σε μια τηλεφωνική σύνδεση

4.1.2 Θόρυβος κυκλώματος

Ο θόρυβος κυκλώματος (circuit noise) μπορεί να περιλαμβάνει το λευκό θόρυβο και το θόρυβο ενδοδιαμόρφωσης για τα συστήματα μετάδοσης καθώς και άλλους τύπους παρεμβολών όπως ο κρουστικός θόρυβος. Η ικανοποίηση του χρήστη εξαρτάται από την ισχύ καθώς και την κατανομή των συχνοτήτων και του πλάτους του σήματος του θορύβου. Για ένα συγκεκριμένο τύπο θορύβου, η ικανοποίηση γενικά μειώνεται γραμμικά καθώς η ισχύς του θορύβου αυξάνεται.

Ο θόρυβος κυκλώματος γενικά εκφράζεται μέσω των ενδείξεων ενός ψοφόμετρου (psophometer) που καθορίστηκε στην CCITT Rec. O.41. Με αυτή τη συσκευή μετρήσεις της ισχύος του θορύβου ανά συχνότητα μπορεί να γίνουν σε διάφορα σημεία μιας τηλεφωνικής σύνδεσης.

4.1.3 Πλάγιος ήχος

Πλάγιος ήχος (sidetone) μιας τηλεφωνικής συσκευής είναι η μετάδοση ήχου από το μικρόφωνο της συσκευής στο δέκτη της ίδιας της συσκευής. Το μονοπάτι αυτό σε μια τηλεφωνική συσκευή είναι ένα από αυτά μέσω των οποίων ο ομιλητής ακούει τη φωνή του καθώς μιλάει. Άλλα τέτοια μονοπάτια είναι η επαφή του ακουστικού με το αυτί και το ακουστικό μονοπάτι από το στόμα στο αυτί. Η παρουσία αυτών των μονοπατιών επηρεάζει την αντίληψη του χρήστη για τον πλάγιο ήχο και συνεπώς την αντίδραση του σε αυτόν.

Ο πλάγιος ήχος επηρεάζει την ποιότητα μετάδοσης με πολλούς τρόπους. Πολύ χαμηλή απώλεια πλάγιου ήχου έχει σαν αποτέλεσμα το επίπεδο ισχύος της φωνής που επιστρέφει να είναι πολύ υψηλό και αυτό μειώνει την ικανοποίηση του χρήστη. Μια άλλη πλευρά της χαμηλής απώλειας πλάγιου ήχου είναι ότι οι ομιλητές προσπαθούν να μειώνουν την ένταση της φωνής τους και/ή να απομακρύνουν το ακουστικό από το στόμα τους μειώνοντας έτσι την ισχύ του σήματος της ομιλίας που φθάνει στο άλλο άκρο της σύνδεσης. Υψηλή απώλεια πλάγιου ήχου μπορεί να κάνει το τηλέφωνο να δείχνει «νεκρό» και η πλήρης απώλεια πλάγιου ήχου είναι γενικά ανεπιθύμητη.

Για τον υπολογισμό του πλάγιου ήχου χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος Sidetone Masking Rating (STMR) η οποία λαμβάνει υπ' όψη την επαφή της συσκευής με το κεφάλι του χρήστη και τα ακουστικά μονοπάτια σαν κατώφλι για τη μέτρηση. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι λόγω της αυξανόμενης χρήσης των γραμμικών μικροφώνων στις τηλεφωνικές συσκευές, χρειάζεται μια μέθοδος βαθμολόγησης για τον έλεγχο της έντασης του θορύβου δωματίου που ακούγεται μέσα από το μονοπάτι του πλάγιου ήχου (Listener Sidetone Rating - LSTR). Η LSTR (ITU-T Rec. P.76 και P.79) χρησιμοποιεί την ίδια ιδέα και τον ίδιο αλγόριθμο υπολογισμού όπως η STMR, μόνο που χρησιμοποιεί μια πηγή θορύβου δωματίου αντί ενός τεχνητού «στόματος».

Ο πλάγιος ήχος επηρεάζεται τέλος από το σχεδιασμό της τηλεφωνικής συσκευής και από την προσαρμογή των αντιστάσεων της συσκευής και της τηλεφωνικής γραμμής.

4.1.4 Θόρυβος δωματίου

Θόρυβος δωματίου (room noise) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον θόρυβο που υπάρχει στο χώρο που βρίσκεται η τηλεφωνική συσκευή. Ο θόρυβος αυτός έχει ένα μεγάλο εύρος διακύμανσης καθώς η συσκευή μπορεί να βρίσκεται σε κατοικία, επαγγελματικό χώρο, δημόσιο χώρο κλπ. Στην τελευταία αυτή περίπτωση μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην διεξαγωγή μιας συνομιλίας ή ακόμα και στη δυνατότητα του ακροατή να ακούει το συνομιλητή του και να καταλαβαίνει τι του λέει.

Ο θόρυβος δωματίου παρουσιάζεται με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι μέσω διαρροής από το καπάκι του ακουστικού του δέκτη. Ένας δεύτερος τρόπος είναι από το μονοπάτι του πλάγιου ήχου της συσκευής εάν ο πλάγιος τόνος είναι σημαντικά μικρότερος.

Ένας τρίτος τρόπος είναι μέσω του άλλου αυτιού και ένας τελευταίος από τον πομπό του άλλου άκρου της σύνδεσης.

4.1.5 Παραμόρφωση εξασθένησης

Η παραμόρφωση εξασθένησης (attenuation distortion) χαρακτηρίζεται από τις απώλειες κατά τη μετάδοση σε άλλες συχνότητες σε σχέση με τις απώλειες στα 800 και τα 1000 Hz. Η απώλεια έντασης και καθαρότητας του λόγου είναι συνάρτηση της παραμόρφωσης εξασθένησης με την επίδραση της παραμόρφωσης εξασθένησης να είναι μεγαλύτερη στις χαμηλότερες συχνότητες στην πρώτη περίπτωση και στις υψηλότερες στη δεύτερη περίπτωση. Η επίδραση μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνει η απώλεια έντασης σε μια σύνδεση ειδικά όταν υπάρχει παράλληλα και θόρυβος κυκλώματος.

Οι επιπτώσεις του φαινομένου όπως καταγράφονται στις μετρήσεις είναι τυπικά μικρότερες από αυτές της απώλειας έντασης αλλά είναι συγκρίσιμες με αυτές του θορύβου όταν οι τιμές της της απώλειας έντασης και του θορύβου είναι ταυτόχρονα χαμηλές.

4.1.6 Παραμόρφωση ομαδικής καθυστέρησης

Η παραμόρφωση ομαδικής καθυστέρησης (group delay distortion) χαρακτηρίζεται από την ομαδική καθυστέρηση σε άλλες συχνότητες σε σχέση με την ομαδική καθυστέρηση στην συχνότητα που η ομαδική καθυστέρηση έχει την χαμηλότερη τιμή. Αν και το φαινόμενο είναι πολύ περισσότερο σημαντικό στη μετάδοση δεδομένων παρά ομιλίας παρ' όλα αυτά μεγάλες καθυστερήσεις μπορεί να προκαλέσουν σημαντική παραμόρφωση στα σήματα ομιλίας. Το αποτέλεσμα του φαινομένου στο άνω άκρο του μεταδιδόμενου φάσματος περιγράφεται ως «κουδούνισμα» της φωνής και στο κάτω άκρο ως «θόλωμα».

Στην τυπική τηλεφωνική σύνδεση το φαινόμενο συνοδεύεται σχεδόν πάντα από το φαινόμενο της παραμόρφωσης εξασθένησης το οποίο μειώνει τις επιπτώσεις του στην ποιότητα της σύνδεσης.

4.1.7 Ηχώ του ομιλητή

Η ηχώ του ομιλητή (talker echo) προκύπτει όταν κάποιο τμήμα του σήματος ομιλίας του ομιλητή, επιστρέφει με αρκετή καθυστέρηση (τυπικά περισσότερο από 30 ms) ώστε το σήμα να είναι διακριτό από τον τυπικό πλάγιο ήχο. Προκαλείται από ανακλάσεις όταν δεν υπάρχει προσαρμογή αντιστάσεων αλλά και από διαφωνία (crosstalk). Κατά το παρελθόν όπου χρησιμοποιούνταν μόνο ενσύρματες τηλεφωνικές συσκευές οι ανακλάσεις συνέβαιναν σε επίπεδο δικτύου λόγω της μη τέλει προσαρμογής μεταξύ της γραμμής της τηλεφωνικής συσκευής και της γραμμής του τηλεφωνικού κέντρου (από 2 σε 4 καλώδια). Σήμερα οι ανακλάσεις είναι κυρίως ακουστικές λόγω του μικροφώνου που συλλέγει τους ήχους της ομιλίας που ακούγονται σε αυτό το άκρο (χαρακτηριστικό παράδειγμα τα hands-free τερματικά).

4.1.8 Ηχώ του ακροατή

Η ηχώ του ακροατή (listener echo) αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο το κύριο σήμα ομιλίας φθάνει στην πλευρά του ακροατή συνοδευόμενο από μία ή περισσότερες καθυστερημένες εκδοχές του ίδιου σήματος. Αυτό μπορεί να προκύψει σαν αποτέλεσμα πολλαπλών ανακλάσεων στο μονοπάτι της μετάδοσης.

4.1.9 Μη γραμμική παραμόρφωση

Μη γραμμική παραμόρφωση (non-linear distortion) γενικά συναντάται σε συστήματα στα οποία η έξοδος δεν είναι γραμμικά συσχετισμένη με την είσοδο. Στα σημερινά συστήματα πιθανές πηγές μη γραμμικής παραμόρφωσης είναι κυρίως οι κωδικοποιητές χαμηλού ρυθμού οι οποίοι εισάγουν την παραμόρφωση κβάντισης που είναι μια μορφή μη γραμμικής παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση κβάντισης υπάρχει στα ψηφιακά συστήματα και προκύπτει

λόγω της διαφοράς του αναλογικού σήματος από το σήμα το οποίο ανακτάται μετά την κβάντιση.

4.1.10 Κατανοητή διαφωνία

Η κατανοητή διαφωνία (intelligible crosstalk) συμβαίνει όταν το σήμα της ομιλίας από μια τηλεφωνική σύνδεση περνάει σε μια άλλη σύνδεση σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι να μπορεί να ακουστεί και να είναι κατανοητό από τον ένα ή και από τους δύο συμμετέχοντες στη δεύτερη σύνδεση. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό κατανόησης του σήματος διαφωνίας όπως ο θόρυβος κυκλώματος, δωματίου, οι απώλειες κατά την διείσδυση, η ένταση της φωνής των συνομιλητών της πρώτης σύνδεσης κλπ.

Κατά τη σχεδίαση των συστημάτων μετάδοσης έχει οριστεί κάποιο κατώφλι όσον αφορά το πόσο κατανοητό πρέπει να είναι το σήμα της διαφωνίας καθώς και μέθοδοι για τον υπολογισμό της πιθανότητας να είναι κατανοητό (τυπικός στόχος να είναι <1%).

4.2 Μέθοδοι μέτρησης της ποιότητας ομιλίας

Οι μέθοδοι μέτρησης της ποιότητας της ομιλίας διακρίνονται κατ'αρχήν με βάση το είδος του μηχανισμού μέτρησης που εφαρμόζεται σε *ακουστικές* και σε *μετρήσεις με τη χρήση μετρητικών διατάξεων*. Καθώς η λαμβανόμενη ποιότητα είναι υποκειμενική όσον αφορά το χρήστη οι ακουστικές μετρήσεις είναι ουσιαστικά ο μόνος τρόπος για την έγκυρη και αξιόπιστη μέτρηση της ποιότητας.

Καθώς όμως οι ακουστικές δοκιμές είναι χρονοβόρες αλλά απαιτούν και υψηλό κόστος, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μέτρησης που βασίζονται σε μετρητικές διατάξεις. Οι δοκιμές αυτές έχουν αποδειχτεί αξιόπιστες σε μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών και τοπολογιών δικτύων. Μπορούν δε είτε να αντικαταστήσουν τις ακουστικές δοκιμές, είτε να λειτουργήσουν συμπληρωματικά ως προς αυτές.

Να σημειώσουμε εδώ ότι στη βιβλιογραφία οι δοκιμές μέσω μετρητικών διατάξεων χαρακτηρίζονται ως *αντικειμενικές* ενώ οι ακουστικές δοκιμές ως *υποκειμενικές*. Η κατηγοριοποίηση αυτή έχει πολύ συχνά αμφισβητηθεί.

4.2.1 Ακουστικές μέθοδοι

Στις ακουστικές (υποκειμενικές) μεθόδους κατά τη διαδικασία αξιολόγησης εμπλέκεται ο ανθρώπινος παράγοντας καθώς χρησιμοποιούνται ακροατές για να ακούσουν κάποια δείγματα φωνής και να παράσχουν τη γνώμη τους σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένη κλίμακα που αντιστοιχεί σε κάποιο αριθμητικό αποτέλεσμα. Το MOS (Mean Opinion Score) συλλέγεται από όλους τους ακροατές και χρησιμοποιείται σαν το μέτρο της ποιότητας που προκύπτει από την υποκειμενική εκτίμηση.

Οι μέθοδοι αξιολόγησης μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε μεθόδους αναφοράς (reference) και μη-αναφοράς (non-reference) ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται σήμα αναφοράς για τη σύγκριση με το υπό εκτίμηση σήμα. Όταν η τιμή του MOS αναφέρεται στην ακουστική ποιότητα τότε συνήθως αναφέρεται σαν MOS_{LQSI} (ITU-T, 2006). Αν η τιμή εξάγεται σε περιβάλλον συζήτησης, όπου οι καθυστερήσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση, τότε αναφέρεται σαν $MOSC_{QS2}$. Αν και σύμφωνα με την ITU θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας σημαντικός αριθμός συμμετεχόντων στις ακουστικές δοκιμές, κάθε φορά που ένας συγκεκριμένος αριθμός δοκιμών επαναλαμβάνεται, δεν οδηγεί απαραίτητα σε ακριβώς ίδια αποτελέσματα.

4.2.1.1 Η μέθοδος ACR

Στις τηλεπικοινωνίες, για κωδικοποιητές φωνής χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (ανάμεσα στα 4 kbps και στα 32 kbps) η μέθοδος Absolute Category Rating (ACR) είναι η πιο κοινά διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της ποιότητας (ITU-T Rec. P.800, 1996).

Με την ACR ζητείται απο ακροατές να βαθμολογήσουν την «απόλυτη» ποιότητα κάποιων δειγμάτων φωνής χωρίς να γνωρίζουν το δείγμα αναφοράς. Αφού συγκεντρωθούν οι ατομικές βαθμολογήσεις υπολογίζεται η μέση άποψη για κάθε δείγμα. Για να υπαρξουν αξιόπιστα αποτελέσματα η δοκιμή γίνεται σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό ακροατών και κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Διάφορες κλίμακες έχουν προταθεί και οι οποίες εξαρτώνται από τα στοιχεία στα οποία εστιάζει η συγκεκριμένη δοκιμή (π.χ. ακουστική ποιότητα, ακουστική προσπάθεια κλπ.). Η κλίμακα που χρησιμοποιείται περισσότερο για την εκτίμηση της συνολικής ποιότητας της ομιλίας είναι η κλίμακα των 5 επιπέδων ποιότητας που τυπικά αναφέρεται σαν κλίμακα MOS (Mean Opinion Score).

Quality of the speech	Score
Excellent	5
Good	4
Fair	3
Poor	2
Bad	1

Πίνακας 3 : Πίνακας βαθμολόγησης στην κλίμακα MOS¹

4.2.1.2 Η μέθοδος DCR

Στις δοκιμές της Degradation Category Rating (DCR), οι ακροατες ακούν διαδοχικά κάποιο σήμα αναφοράς (reference signal) και κατόπιν το σήμα δοκιμής (test signal) και τους ζητείται να τα συγκρίνουν και να βαθμολογήσουν την υποβάθμιση. Η μέθοδος DCR παράγει ως αποτέλεσμα το Degradation MOS (DMOS). Το DMOS είναι μια κλίμακα βαθμολόγησης για να περιγραφεί πως η παραμόρφωση της ομιλίας γίνεται αντιληπτή.

Very annoying	1
Annoying	2
Annoying	3
Audible, but not annoying	4
Inaudible	5

Πίνακας 4 : Πίνακας βαθμολόγησης στην κλίμακα DMOS

Η μέθοδος είναι παρόμοια με την ACR εκτός από το ότι το σήμα αναφοράς είναι γνωστό στον ακροατή και παρουσιάζεται πρώτο.

4.2.1.3 Η μέθοδος CCR

Μια παραλλαγή της μεθόδου DCR είναι η Comparison Category Rating (CCR). Οι ακροατες βαθμολογούν την ποιότητα του σήματος δοκιμής όπως την αντιλαμβάνονται σε σχέση με κάποιο άλλο σήμα δοκιμής. Τα σήματα επιλέγονται τυχαία από ένα σύνολο σημάτων δοκιμής. Η μέθοδος CCR παράγει ως αποτέλεσμα το Comparison MOS (CMOS).

¹ Πηγή: ITU-T Rec. P.800, 1996

Much better	3
Better	2
Slightly better	1
About the same	0
Slightly worse	-1
Worse	-2
Much worse	-3

Πίνακας 5 : Πίνακας βαθμολόγησης στην κλίμακα CMOS

Η βασική διαφορά της σε σχέση με την DCR είναι ότι στη CCR ακόμα και το αρχικό σήμα μπορεί να πάρει χαμηλή βαθμολογία.

4.2.2 Μέθοδοι με τη χρήση μετρητικών διατάξεων

4.2.2.1 Μοντέλα μέτρησης σήματος

Τα μοντέλα μέτρησης σήματος (signal based models) αναπτύχθηκαν αρχικά για την εκτίμηση της ποιότητας συγκεκριμένων στοιχείων του δικτύου όπως οι κωδικοποιητές (codecs). Σήμερα τα διαθέσιμα μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή σε μεγαλύτερα τμήματα του δικτύου και περιλαμβάνουν διάφορους τύπους υποβάθμισης της ποιότητας όπως ο θόρυβος υποβάθρου (background noise) ή λάθη στη μετάδοση όπως η απώλεια πακέτων.

Αν τα μοντέλα αυτά εφαρμοστούν εντός του πλαισίου των εφαρμογών για τα οποία σχεδιάστηκαν τότε παρέχουν αξιόπιστη εκτίμηση της ποιότητας. Αλλά καθώς το αποτέλεσμα που εξάγεται από αυτά τα μοντέλα είναι συνήθως ένας μονοδιάστατος δείκτης ποιότητας που προκύπτει από την εκτίμηση ενός σήματος δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί διαγνωστική πληροφορία για τις αιτίες της χαμηλής ποιότητας.

Για τις μετρήσεις που βασίζονται στην εκτίμηση κάποιου σήματος σε σχέση με κάποιο σήμα αναφοράς το μοντέλο που προτείνεται από την ITU είναι το Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ, ITU-T Rec. P.862, 2001). Πρόκειται για ένα βελτιστοποιημένο συνδυασμό δύο αλγορίθμων : του Perceptual Speech Quality Measure (PSQM, ITU-T Rec. P.861, 1996) και του Perceptual Analysis Measurement System (PAMS, Rix and Hollier, 2000). Μία εκδοχή του PESQ για σήματα ευρείας ζώνης (wideband) έχει επίσης προταθεί (ITU-T Rec. P.862.2, 2005) για χρήση στα δίκτυα VoIP.

4.2.2.1.1 Η μέθοδος PSQM

Η μέθοδος PSQM είναι μια αντικειμενική μέθοδος για την εκτίμηση της υποκειμενικής ποιότητας κυρίως των κωδικοποιητών ομιλίας. Η ουσία του αλγόριθμου PSQM είναι να μετρήσει την παραμόρφωση που υφίσταται ένα σήμα ομιλίας όταν μεταδιδόμενο περνάει διαδοχικά από διαφορετικούς κωδικοποιητές και μέσα μετάδοσης. Διαφέρει από τα είδη μετρήσεων του τύπου σήμα προς θόρυβο στο ότι η παραμόρφωση δεν μετριέται στο φυσικό επίπεδο (π.χ. στο επίπεδο του χρόνου ή της συχνότητας). Αντίθετα μετριέται σε ένα «εσωτερικό ψυχοακουστικό επίπεδο» ώστε να μιμηθεί την ηχητική αντίληψη των χρηστών σε πραγματικές καταστάσεις, έτσι ώστε η μετρούμενη παραμόρφωση να μπορεί να συσχετιστεί με την ανθρώπινη αντίληψη. Αυτό γίνεται μετατρέποντας το σήμα από το φυσικό επίπεδο στο ψυχοακουστικό μέσω μιας σειράς μη γραμμικών επεξεργασιών της συχνότητας, του πλάτους, της έντασης (loudness) κλπ.

Το σήμα που χρησιμοποιείται για το τεστ του PSQM είναι καθορισμένο (ITU-T Rec. P.50) και έχει σαν σκοπό να αναπαράγει τα βασικά χαρακτηριστικά της ανθρώπινης ομιλίας όπως το μακροπρόθεσμο και βραχυπρόθεσμο μέσο φάσμα, την κατανομή του στιγμιαίου

πλάτους, και τη δομή της κυματομορφής της ομιλίας όσον αφορά τα διαστήματα ομιλίας και σιωπής.

Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου καλείται τιμή PSQM και δείχνει τον βαθμό της υποκειμενικής υποβάθμισης της ποιότητας από το τηλεπικοινωνιακό σύστημα που ελέγχεται. Η τιμή κυμαίνεται από 0 έως 6.5. Το 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει υποβάθμιση ενώ το 6.5 δείχνει τη μέγιστη υποβάθμιση. Η τιμή PSQM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη μιας αντικειμενικής τιμής για το MOS με υψηλή στατιστική συσχέτιση ως προς την τιμή του MOS που προκύπτει από τις ακουστικές δοκιμές. Η τιμή του MOS είναι αντιστρόφως ανάλογη με αυτήν του PSQM.

Η μέθοδος αυτή θεωρείται από την ITU ότι έχει ξεπεραστεί από την PESQ και η σχετική σύσταση έχει αποσυρθεί.

4.2.2.1.2 Η μέθοδος PESQ

Τα πραγματικά συστήματα περιλαμβάνουν διάφορα φίλτρα και παρουσιάζουν κυμαινόμενη καθυστέρηση καθώς και παραμόρφώσεις λόγω των λαθών στα κανάλια και της χρήσης κωδικοποιητών χαμηλού ρυθμού. Το PSQM σχεδιάστηκε για την αξιολόγηση των κωδικοποιητών ομιλίας και δεν μπορεί να λάβει υπ' όψην του αυτά τα χαρακτηριστικά των πραγματικών δικτύων. Το PESQ αναπτύχθηκε για να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της ποιότητας της ομιλίας από το ένα άκρο στο άλλο σε πραγματικά δίκτυα (VoIP, ISDN κλπ.).

Από την ITU συστήνεται η μέθοδος να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας στην ζώνη των 3.1 kHz στην τηλεφωνία αλλά και για κωδικοποιητές ομιλίας στενής ζώνης (narrowband). Τα αποτελέσματα έχουν βρεθεί να έχουν υψηλή συσχέτιση με τις υποκειμενικές μετρήσεις ποιότητας κατά ένα παράγοντα 0.935 σε μετρήσεις της ITU που καλύπτουν εννέα γλώσσες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος PESQ δεν παρέχει μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης. Απλώς μετρά τις επιπτώσεις της παραμόρφωσης της ομιλίας και του θορύβου στην ποιότητα της ομιλίας σε μια κατεύθυνση. Τα φαινόμενα της έντασης, της καθυστέρησης, της ηχούς καθώς και των υπόλοιπων φαινομένων που σχετίζονται με την αμφίδρομη επικοινωνία δεν αποτυπώνονται στα αποτελέσματα του PESQ. Έτσι είναι πιθανό να έχουμε υψηλές τιμές του PESQ αλλά παρ' όλα αυτά χαμηλή ποιότητα σύνδεσης συνολικά.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται διάφοροι παράγοντες, τεχνολογίες και εφαρμογές για τους οποίους το PESQ επιδεικνύει αποδεκτή ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά υπάρχει ένας αριθμός παραγόντων για τους οποίους αποδεδειγμένα το PESQ δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα.

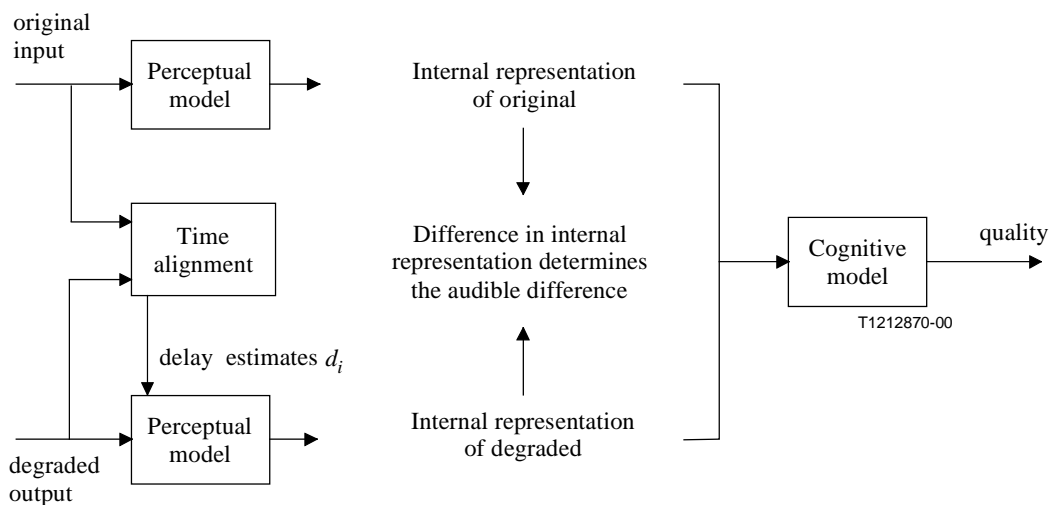
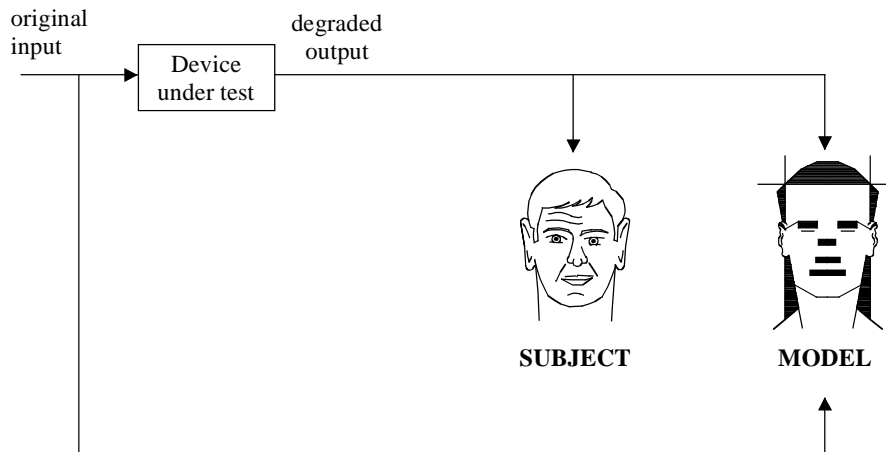
Test factors
Speech input levels to a codec
Transmission channel errors
Packet loss and packet loss concealment with CELP codecs
Bit rates if a codec has more than one bit-rate mode
Transcodings
Environmental noise at the sending side (See Note.)
Effect of varying delay in listening only tests
Short-term time warping of audio signal
Long-term time warping of audio signal
Coding technologies
Waveform codecs, e.g. G.711; G.726; G.727
CELP and hybrid codecs ≥ 4 kbit/s, e.g. G.728, G.729, G.723.1

Other codecs: GSM-FR, GSM-HR, GSM-EFR, GSM-AMR, CDMA-EVRC, TDMA-ACELP, TDMA-VSELP, TETRA
Applications
Codec evaluation
Codec selection
Live network testing using digital or analogue connection to the network
Testing of emulated and prototype networks
NOTE – When environmental noise is present the quality can be measured by passing PESQ the clean original without noise, and the degraded signal with noise.

Πίνακας 6 : Παράγοντες για τους οποίους το PESQ έχει επιδείξει αποδεκτή ακρίβεια¹

Στο PESQ το αρχικό σήμα και το υποβαθμισμένο ευθυγραμμίζονται χρονικά και κατόπιν μετατρέπονται σε μια εσωτερική απεικόνιση που είναι ανάλογη με την ψυχοφυσική απεικόνιση των ηχητικών σημάτων στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα, λαμβάνοντας υπ' όψη την αντιλαμβανόμενη συχνότητα και την ένταση (loudness). Μετά από αυτή τη μετατροπή το αρχικό σήμα συγκρίνεται με το υποβαθμισμένο χρησιμοποιώντας ένα αντιληπτικό μοντέλο. Αυτό γίνεται σε διάφορα στάδια όπως, χρονική ευθυγράμμιση, εξίσωση του επιπέδου ισχύος σε επίπεδο αποδεκτό ακουστικά, αντιστοίχιση συχνότητας (frequency mapping) κλπ.

¹ Πηγή : ITU-T Recommendation P.862



NOTE – A computer model of the subject, consisting of a perceptual and a cognitive model, is used to compare the output of the device under test with the input, using alignment information as derived from the time signals in the time alignment module.

Σχήμα 20 : Το αντιληπτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για το PESQ¹

Το αποτέλεσμα του PESQ είναι στην κλίμακα -0.5 έως 4.5. Είναι βέβαια επιθυμητό να παρέχεται μια τιμή MOS (ITU-T Rec. P.800.1) ώστε να είναι συγκρίσιμη με το MOS της μεθόδου ACR. Η αντιστοίχιση της τιμής PESQ στο λεγόμενο MOS-LQO περιγράφεται στην σύσταση P.862.1 της ITU. Το 2005 η ITU δημιούργησε τη σύσταση P.862.2 για συστήματα ευρείας ζώνης (50-7000 Hz).

4.2.2.2 Μοντέλα που βασίζονται σε παραμέτρους

Για το σχεδιασμό ενός δικτύου είναι επιθυμητό να υπάρχει εκ των προτέρων μία εκτίμηση της ποιότητας πριν ακόμα το δίκτυο δημιουργηθεί. Τέτοιες προβλέψεις για την ποιότητα, χρησιμεύουν για να υποστηρίξουν τις όποιες επιλογές σχετικά με τη διάρθρωση του δικτύου και τα κατάλληλα στοιχεία δικτύου που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Για αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα (parameter based models) που εκτιμούν την ποιότητα από μετρήσιμα χαρακτηριστικά του συστήματος. Τέτοια μοντέλα είναι το Submod και το E-

¹ Πηγή : ITU-T Recommendation P.862

model. Στην παρούσα εργασία για τις μετρήσεις ποιότητας της ομιλίας έχει χρησιμοποιηθεί το E-model οπότε θα εστιάσουμε σε αυτό.

4.2.2.2.1 E-model

Το μοντέλο που προτείνεται από την ITU για την εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας κατά το σχεδιασμό των δικτύων μετάδοσης (transmission planning) είναι το αποκαλούμενο E-model (ITU-T Rec. G.107, 2005). Είναι από τη φύση του κυρίως εμπειρικό και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της ποιότητας τόσο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των δικτύων όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Έχει γίνει αντικείμενο εκτεταμένων δοκιμών και έχει αποδειχθεί ότι προσφέρει ρεαλιστικές εκτιμήσεις ποιότητας. Αναπτύχθηκε σαν συνδυασμός διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης της ποιότητας στα πλαίσια του ETSI (ETSI Technical Report ETR 250, 1996; Johannesson, 1997).

Το E-model είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιεί παραμέτρους της μετάδοσης για να προβλέψει την υποκειμενική ποιότητα της ομιλίας. Είναι χρήσιμο καθώς η πολυπλοκότητα των σύγχρονων δικτύων απαιτεί οι πολλές και διαφορετικές παράμετροι της μετάδοσης να μην λαμβάνονται μόνο υπ' όψη ξεχωριστά η μια από την άλλη, αλλά να μελετάται και η συνδυασμένη επίδραση τους στη διαδικασία.

Η έξοδος του μοντέλου είναι ένα βαθμωτό μέγεθος, το R, που εκφράζει την ποιότητα και το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τη συνολική ποιότητα της συνομιλίας. Επιπλέον το μοντέλο μπορεί να δώσει και ονομαστικές εκτιμήσεις των αντιδράσεων του χρήστη, για παράδειγμα με τη μορφή ποσοστών που αξιολογούν τη συνομιλία ως «καλή ή καλύτερη» (good or better) ή «κακή ή χειρότερη» (poor or worse).

Στον πίνακα παρακάτω δίνεται ο ορισμός των διαφόρων κατηγοριών ποιότητας ομιλίας σε σχέση με τις τιμές του δείκτη R. Για κάθε κατηγορία παρέχεται επίσης η περιγραφή της «ικανοποίησης του χρήστη».

Table 1/G.109 – Definition of categories of speech transmission quality

R-value range	Speech transmission quality category	User satisfaction
$90 \leq R < 100$	Best	Very satisfied
$80 \leq R < 90$	High	Satisfied
$70 \leq R < 80$	Medium	Some users dissatisfied
$60 \leq R < 70$	Low	Many users dissatisfied
$50 \leq R < 60$	Poor	Nearly all users dissatisfied

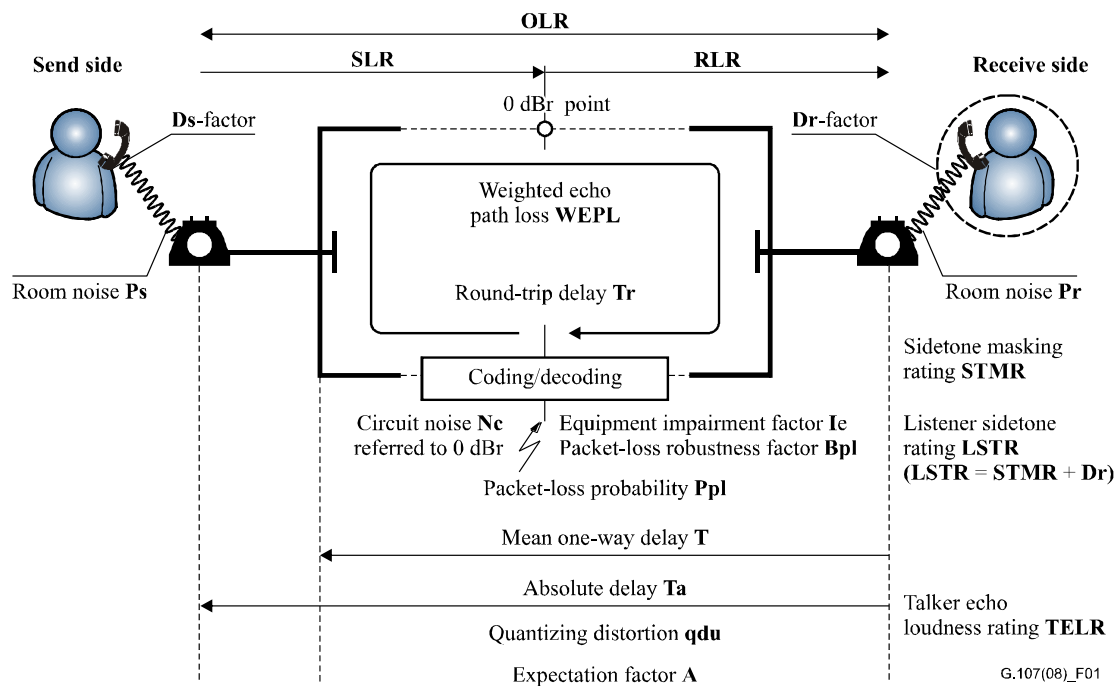
NOTE 1 – Connections with R-values below 50 are not recommended.
NOTE 2 – Although the trend in transmission planning is to use R-values, equations to convert R-values into other metrics e.g. MOS, %GoB, %PoW, can be found in Annex B/G.107.

Πίνακας 7 : Οι κατηγορίες ποιότητας μετάδοσης ομιλίας¹

Η σύνδεση αναφοράς του E-model όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, είναι χωρισμένη σε μια πλευρά λήψης και μια πλευρά εκπομπής. Το μοντέλο εκτιμά την ποιότητα της συνομιλίας από το στόμα στο αυτί (mouth-to-ear, m2e) όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το χρήστη στην πλευρά της λήψης έχοντας το διπλό ρόλο του ομιλητή και του ακροατή.

¹ Πηγή: ITU-T Rec. G.109, 1999

Στο σχήμα επίσης φαίνονται οι παράμετροι μετάδοσης που χρησιμοποιούνται σαν είσοδοι στο μοντέλο.



Σχήμα 21 : Η σύνδεση αναφοράς του E-model¹

4.2.2.2.1.1 Παράμετροι εισόδου

Κάποιες από τις παραμέτρους όπως η ένταση μετρώνται σε σχέση με ένα ιδεατό σημείο αναφοράς στη μέση της σύνδεσης, το σημείο 0 dBr.

SLR, RLR, OLR [dB]

Η ένταση αντίστοιχα για τον πομπό, το δέκτη και η συνολική της διαδρομής μετάδοσης της ομιλίας αντίστοιχα. Η ένταση εκφράζει την εξασθένηση - ανάλογα με τη συχνότητα - του σήματος ομιλίας σε σχέση με κάποιο κανάλι αναφοράς (ITU-T Rec. P.79, 1999).

- *SLR* : Η εξασθένηση μεταξύ του στόματος του χρήστη-ομιλητή και μιας ηλεκτρικής διεπαφής στο δίκτυο.
- *RLR* : Η εξασθένηση μεταξύ μιας ηλεκτρικής διεπαφής στο δίκτυο και του αυτιού του χρήστη-ακροατή.
- *OLR* : $OLR = SLR + RLR$

Ta [ms]

Η μέση απόλυτη καθυστέρηση του μονοπατιού μετάδοσης (ITU-T Rec. G.114, 2000).

T [ms], TELR [dB]

¹ Πηγή : ITU-T Recommendation G.107

Η μέση καθυστέρηση στη μία κατεύθυνση T είναι η καθυστέρηση που είναι υπεύθυνη για την ηχώ του ομιλητή σε περίπτωση ανακλάσεων του σήματος στο άλλο άκρο.

Η ένταση της ηχούς του ομιλητή (talker echo loudness rating, TELR) περιγράφει την εξασθένηση που υφίσταται το σήμα της ηχούς στη διαδρομή από το στόμα του ομιλητή στο στόμα του ακροατή. Υπολογίζεται από τον τύπο $TELR = SLR + RLR + EL$, όπου EL είναι η αποκαλούμενη απώλεια ηχούς και μπορεί να υπολογιστεί σαν ο μέσος όρος (ανά συχνότητα) της απώλειας της ηχούς που επιστρέφει σύμφωνα με μια διαδικασία που περιγράφεται στην σύσταση ITU-T Rec. G.122 (1993).

Tr [ms], $WEPL$ [dB]

Η καθυστέρηση πλήρους διαδρομής (round trip delay) Tr δημιουργεί ηχώ στον ακροατή η οποία εξασθενεί από το Weighted Echo Path Loss ($WEPL$) το οποίο είναι μια παραμετρική περιγραφή της σταθμισμένης ανά συχνότητα απώλειας που υφίσταται η ηχώ του ακροατή (ITU-T Rec. G.126, 1993).

Nc [dBm0p], Nf or [dBmp]

Ο θόρυβος κυκλώματος (Circuit noise, Nc) και ο θόρυβος δαπέδου (noise floor, Nf or) είναι οι θόρυβοι της γραμμής του συνδρομητή. Ο θόρυβος κυκλώματος μετρείται σαν το απόλυτο επίπεδο θορύβου σε σχέση με το σημείο 0 dBm του δικτύου (μετρούμενο ψοφομετρικά, ITU-T Rec. O.41, 1994), και εκφράζει το θόρυβο που συνεισφέρουν τα διαφορα διαδοχικά κυκλώματα που αποτελούν τη γραμμή από όπου περνάει η ομιλία. Αντίστοιχα ο θόρυβος δαπέδου είναι ο θόρυβος στην πλευρά του δέκτη που προκαλείται από τη γραμμή του συνδρομητή.

Ps , Pr [dBA]

Ο θόρυβος δωματίου στις πλευρές του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα

Dr , Ds

Η ευαισθησία της διεπαφής του χρήστη (user interface) στις πλευρές του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα ως προς το σήμα της ομιλίας σε σχέση με την ευαισθησία ως προς τυχαίους θορύβους (ETSI Technical Report ETR 250, 1996).

$STMR$ [dB]

Το Sidetone Masking Rating ($STMR$) ποσοτικοποιεί την εξασθένηση της φωνής του ομιλητή που επιστρέφει στο ακουστικό του της τηλεφωνικής συσκευής. Η διαρροή θορύβου σε αυτό το μονοπάτι το Listener Sidetone Rating ($LSTR$), μπορεί να οριστεί σαν $LSTR = STMR + Dr$.

Ppl [%]

Ο μέσος όρος του ποσοστού απώλειας πακέτων..

Bpl [%]

Το Packet Loss Robustness Factor εκφράζει την ευρωστία (robustness) του χρησιμοποιούμενου κωδικοποιητή και του αλγορίθμου PLC (packet loss concealment) ως προς την απώλεια πακέτων.

BurstR

Η παράμετρος Burst Ratio εκφράζει τη σχέση μεταξύ του μέσου αριθμού πακέτων που χάνονται διαδοχικά σε μια απώλεια ριπής (bursty packet loss), με τον μέσο αριθμό των πακέτων που χάνονται διαδοχικά σε μια τυχαία απώλεια (random packet loss) του ίδιου συνολικά ρυθμού.

Οι εξ'ορισμού τιμές (default values) για όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο του E-model φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η ITU συνιστά να

χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές για όλες τις παραμέτρους που δεν μεταβάλλονται κατά τον σχεδιασμό. Αν όλες οι παράμετροι πάρουν τις προεπιλεγμένες τιμές, τότε ο υπολογισμός θα δώσει σαν αποτέλεσμα μια πολύ υψηλή ποιότητα της τάξης του R=93.2

Parameter	Abbr.	Unit	Default value	Permitted range
Send loudness rating ¹	SLR	dB	+8	0 ... +18
Receive loudness rating ¹	RLR	dB	+2	-5 ... +14
Sidetone masking rating ^{2,4}	STMR	dB	15	10 ... 20
Listener sidetone rating ²	LSTR	dB	18	13 ... 23
D-Value of telephone, send side ²	Ds	-	3	-3 ... +3
D-Value of telephone, receive side ²	Dr	-	3	-3 ... +3
Talker echo loudness rating	TELRL	dB	65	5 ... 65
Weighted echo path loss	WEPL	dB	110	5 ... 110
Mean one-way delay of the echo path	T	ms	0	0 ... 500
Round-trip delay in a 4-wire loop	Tr	ms	0	0 ... 1000
Absolute delay in echo-free connections	Ta	ms	0	0 ... 500
Number of quantization distortion units	qdu	-	1	1 ... 14
Equipment impairment factor ⁵	Ie	-	0	0 ... 40
Packet-loss robustness factor ^{3,5}	Bpl	-	4.3	4.3 ... 40
Random packet-loss probability ^{3,5}	Ppl	%	0	0 ... 20
Burst ratio ^{3,6}	BurstR	-	1	1 ... 8
Circuit noise referred to 0 dBr-point	Nc	dBm0p	-70	-80 ... -40
Noise floor at the receive side ³	Nfor	dBmp	-64	-
Room noise at the send side	Ps	dB(A)	35	35 ... 85
Room noise at the receive side	Pr	dB(A)	35	35 ... 85
Advantage factor	A	-	0	0 ... 20

NOTE 1 – Total values between microphone or receiver and 0 dBr-point.

NOTE 2 – Fixed relation: LSTR = STMR + D.

NOTE 3 – Currently under study.

NOTE 4 – Equation 3-24 provides also predictions for STMR > 20 dB. However, such values can hardly be measured in a reliable way because the measurement device will mainly cover the acoustic coupling, and not the electrical one.

NOTE 5 – If Ppl > 0%, then the Bpl must match the codec, packet size, and PLC assumed.

NOTE 6 – E-model predictions for values of BurstR > 2 are only valid if the packet loss percentage is Ppl < 2%.

Πίνακας 8 : Εξ'ορισμού τιμές και επιτρεπόμενη διακύμανση των παραμέτρων εισόδου του E-model¹

4.2.2.2.1.2 Υπολογισμός του δείκτη R

Το E-model βασίζεται στην υπόθεση ότι διαφορετικοί μεμονωμένοι παράγοντες υποβάθμισης μπορούν να εκφραστούν σε μια συγκεκριμένη κλίμακα και στο πλαίσιο αυτής της κλίμακας δρούν προσθετικά. Ο παράγοντας R χρησιμοποιείται για να εκφράσει ποιότητα. Οι βαθμωτές παράμετροι εισόδου που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα ομαδοποιούνται σε διαφορετικές κατηγορίες υποβάθμισης και μετατρέπονται στην κλίμακα του R σαν προσθετικοί παράγοντες υποβάθμισης.

¹ Πηγή: ITU-T Recommendation G.107

Ο υπολογισμός του δείκτη R γίνεται από την εξίσωση :

$$R = R_o - I_s - I_d - I_{e-eff} + A$$

Το R_o αντιπροσωπεύει το βασικό Signal-to-Noise ratio (SNR), που περιλαμβάνει πηγές θορύβου όπως ο θόρυβος κυκλωμάτων ή ο θόρυβος δωματίου.

Ο παράγοντας I_s είναι ένας συνδυασμός όλων των υποβαθμίσεων που συμβαίνουν λίγο ως πολύ ταυτόχρονα με τη μετάδοση του σήματος της φωνής.

Ο παράγοντας I_d αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση λόγω καθυστέρησης.

Ο παράγοντας I_{e-eff} την υποβάθμιση που προκαλεί η χρήση κωδικοποιητών χαμηλού ρυθμού bit και η τυχαία κατανομή της απώλειας πακέτων.

Ο θετικός παράγοντας A αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι οι χρήστες θα μπορούσαν να δεχτούν κάποια υποβάθμιση στην ποιότητα σε αντάλλαγμα για την εύκολη πρόσβαση (π.χ. κινητό ή δορυφορικό τηλέφωνο).

Γενικά οι παράγοντες R_o και I_s είναι εγγενείς του ίδιου του σήματος της φωνής και δεν εξαρτώνται από τη μετάδοση στο δίκτυο. Έτσι δεν έχει νόημα να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση της ποιότητας κλήσεων VoIP με αυτές του PSTN. Επίσης όταν πρόκειται για σταθερή τηλεφωνία ο παράγοντας A θα μπορούσε να τεθεί 0.

Ο παργοντας του θορύβου R_o

Ο βασικός λόγος του σήματος προς τον θόρυβο R_o ορίζεται από τη σχέση :

$$R_o = 15 - 1.5(SLR + N_o)$$

Ο όρος N_o (στο σημείο dBm0p) προκύπτει από τις διαφορετικές πηγές θορύβου :

$$N_o = 10 \log \left[10^{\frac{N_c}{10}} + 10^{\frac{N_{os}}{10}} + 10^{\frac{N_{or}}{10}} + 10^{\frac{N_{fo}}{10}} \right]$$

N_c είναι το άθροισμα όλων των θορύβων από τα κυκλώματα.

N_{os} είναι ο ισοδύναμος θόρυβος κυκλώματος στο σημείο dBm0 που προκαλείται από τον θόρυβο δωματίου στο σημείο εκπομπής

N_{or} είναι ο ισοδύναμος θόρυβος κυκλώματος στο σημείο dBm0 που προκαλείται από τον θόρυβο δωματίου στο σημείο λήψης

N_{fo} είναι ο «θόρυβος δαπέδου» (noise floor) στο σημείο της λήψης.

Όλες οι τιμές αναφέρονται ως προς το σημείο dBm0.

Ο παργοντας ταυτόχρονης υποβάθμισης I_s

Ο παράγοντας I_s είναι το άθροισμα όλων των υποβαθμίσεων που μπορούν να συμβούν λίγο ως πολύ ταυτόχρονα με τη μετάδοση της φωνής. Χωρίζεται δέ σε τρεις επιμέρους παράγοντες υποβάθμισης:

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q$$

Ο παράγοντας I_{olr} αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση στην ποιότητα που μπορούν να επιφέρουν πολύ χαμηλές τιμές του OLR

Ο παράγοντας I_{st} αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση που προκαλείται από μη ιδανικό πλάγιο ήχο (sidetone).

Ο παράγοντας I_q αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση που προκαλείται από την παραμόρφωση λόγω της κβάντισης του σήματος ομιλίας

Ο παράγοντας υποβάθμισης λόγω καθυστέρησης I_d

Ο παράγοντας I_d μοντελοποιεί την υποβάθμιση της ποιότητας λόγω της καθυστέρησης κατά τη μία κατεύθυνση της μετάδοσης (mouth to ear, m2e) και αποτελείται από τρεις όρους:

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd}$$

Ο παράγοντας I_{dte} δίνει μια εκτίμηση της υποβάθμισης λόγω της ηχούς του ομιλητή ενώ ο παράγοντας I_{dle} λόγω της ηχούς του ακροατή. Ο παράγοντας I_{dd} αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση που προκαλείται από πολύ μεγάλη καθυστέρηση. Τα ακόμα και σε περίπτωση τέλει ακύρωσης της ηχούς (echo cancellation). Η μεγάλη καθυστέρηση μπορεί να προκαλέσει «συγκρούσεις» όταν οι συνομιλητές μιλούν την ίδια στιγμή ή μπορεί να τους αναγκάσει να μιλούν εκ περιτροπής με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερος χρόνος για την ολοκλήρωση της συνομιλίας.

Ο παράγοντας υποβάθμισης λόγω συσκευών I_e

Ο παράγοντας I_e αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση του αρχικού σήματος της ομιλίας λόγω της χρήσης κωδικοποιητών χαμηλού ρυθμού bit και της απώλειας πακέτων στο δίκτυο και στους jitter buffers. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται η εγγενής ποιότητα, και άρα οι τιμές του παράγοντα I_e , για τους διάφορους κωδικοποιητές όταν δεν υπάρχει απώλεια πακέτων. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συμπίεση τόσο χαμηλότερη είναι η εγγενής ποιότητα πράγμα που καθιστά λιγότερο ανεκτή την απώλεια των πακέτων κατά τη μετάδοση.

Standard	Codec	Rate (Kbps)	I_e (loss=0)
G.711	PCM	64	0
G.726	ADPCM	32	7
G.729	CS-ACELP	8	10
G.723.1	MP-MLQ	6.3	15
G.723.1	ACELP	5.3	19

Πίνακας 9 : Ο παράγοντας I_e σε διάφορους γνωστούς κωδικοποιητές

Μετρήσεις ποιότητας που προκύπτουν από τον δείκτη R

Ο δείκτης ποιότητας R παίρνει τιμές στην κλίμακα από 0 έως 100, όπου R=0 αντιπροσωπεύει την εξαιρετικά χαμηλή ποιότητα και R=100 αντιπροσωπεύει την εξαιρετικά υψηλή. Το E-model παρέχει μια στατιστική εκτίμηση του μέτρου της ποιότητας. Τα ποσοστά για μια αξιολόγηση του τύπου good or better (GoB) ή poor or worse (PoW) εξάγονται από τον δείκτη R μέσω της Gaussian συνάρτησης λάθους:

$$E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Οι εξισώσεις είναι :

$$GoB = 100E\left(\frac{R-60}{16}\right)\%$$

$$PoW = 100E\left(\frac{45-R}{16}\right)\%$$

Μια μέση εκτίμηση (Mean Opinion Score, MOS_{CQE}) για την κατάσταση της συνομιλίας στην κλίμακα 1-5 μπορεί να προκύψει από το δείκτη R μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

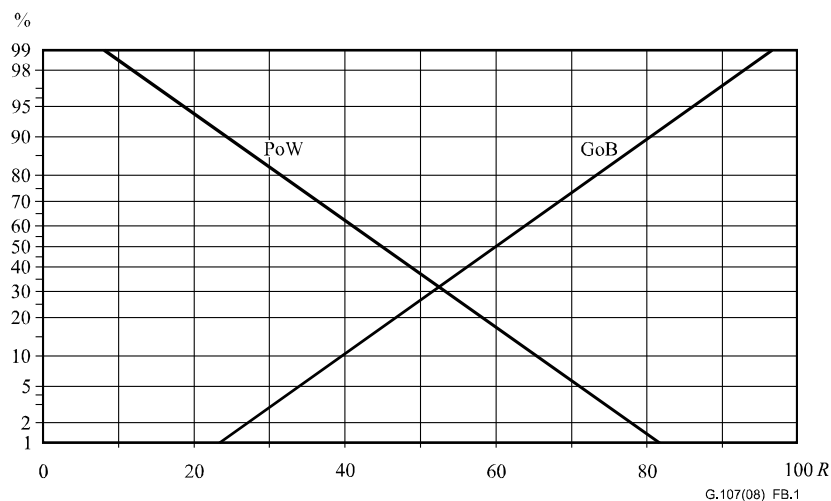
Για $R < 0$: $MOS_{CQE} = 1$

Για $0 < R < 100$: $MOS_{CQE} = 1 + 0.035R + R(R-60)(100-R)7 \cdot 10^{-6}$

Για $R > 100$: $MOS_{CQE} = 4.5$

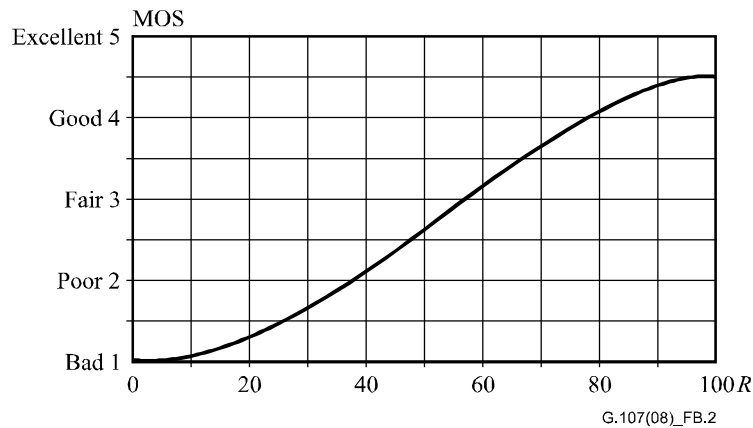
Οι εξισώσεις μπορούν να αντιστραφούν στην κλίμακα $6.5 \leq R \leq 100$ έτσι ώστε να υπολογιστεί το R από το MOS_{CQE}.

Οι δείκτες GoB, PoW and MOS_{CQE} σαν συνάρτηση του R φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 22 : “Good or Better” (GoB) και “Poor or Worse” (PoW) σαν συνάρτηση του δείκτη R¹

¹ Πηγή: ITU-T Rec. G.107



Σχήμα 23 : Το MOS_{CQE} σαν συνάρτηση του δείκτη R

Σε κάποιες περιπτώσεις οι σχεδιαστές του δικτύου μπορεί να μην είναι εξοικειωμένοι με τη χρήση μετρικών ποιότητας - όπως ο δείκτης R - που προκύπτουν από υπολογισμούς κατά το σχεδιασμό. Έτσι παρέχονται οδηγίες για την αντιστοίχιση του δείκτη όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

R -value (lower limit)	MOS_{CQE} (lower limit)	GoB (%) (lower limit)	PoW (%) (upper limit)	User satisfaction
90	4.34	97	~0	Very satisfied
80	4.03	89	~0	Satisfied
70	3.60	73	6	Some users dissatisfied
60	3.10	50	17	Many users dissatisfied
50	2.58	27	38	Nearly all users dissatisfied

Πίνακας 10 : Οδηγός για τη σχέση μεταξύ του δείκτη R και της ικανοποίησης του χρήστη

Υπολογισμός του δείκτη R από το MOS_{CQE}

Στην κλίμακα $6.5 \leq R \leq 100$, ο δείκτης R μπορεί να υπολογιστεί από το MOS_{CQE} χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{20}{3} \left(8 - \sqrt{226} \cos \left(h + \frac{\pi}{3} \right) \right)$$

οπου :

$$h = \frac{1}{3} \arctan 2 \left(18566 - 6750MOS_{CQE}, 15 \sqrt{-903522 + 1113960MOS_{CQE} - 202500MOS_{CQE}^2} \right)$$

και :

$$\arctan 2(x, y) = \begin{cases} \arctan \left(\frac{y}{x} \right) & \text{for } x \geq 0 \\ \pi - \arctan \left(\frac{y}{-x} \right) & \text{for } x < 0 \end{cases}$$

4.2.2.3 Μοντέλα παρακολούθησης

Για να ελεγχθούν οι επιδόσεις ενός δικτύου και έτσι να ταυτοποιηθούν πιθανά προβλήματα ώστε να αποφευχθεί η πιθανή δυσaréσκεια των χρηστών χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα μοντέλα παρακολούθησης (monitoring). Η παρακολούθηση μπορεί να γίνει είτε παρεισφρητικά (intrusive) είτε μη παρεισφρητικά (non-intrusive) του δικτύου.

Μη παρεισφρητικές μετρήσεις (offline)

Σε αυτά τα test γίνονται δοκιμαστικές κλήσεις και κάποια καθορισμένα σήματα μέτρησης όπως ομιλία ή θόρυβος μεταδίδονται στο δίκτυο. Από τη σύγκριση των σημάτων στην εκπομπή και στη λήψη προκύπτει είτε μία άμεση εκτίμηση της ποιότητας είτε κάποιες παράμετροι που σχετίζονται με την ποιότητα του δικτύου.

Παρεισφρητικές μετρήσεις (online)

Σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του δικτύου εξάγεται ένα σήμα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και σε αυτό γίνονται μετρήσεις για την εξαγωγή των παραμέτρων που σχετίζονται με την ποιότητα.

Όσον αφορά το E-model το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι κατά βάση intrusive μοντέλο αλλά υπάρχει και η non-intrusive εκδοχή του (ITU-T Rec. G.107, 2005; ITU-T Suppl. 3 to P-Series Rec., 1993).

Ποιότητα ομιλίας στα συστήματα VoIP

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των στοιχείων ποιότητας στα δίκτυα Voice over IP και μια σύντομη αναφορά της υπάρχουσας γνώσης για το πώς τα στοιχεία αυτά επηρεάζουν την ποιότητα ομιλίας. Τα σημαντικότερα στοιχεία που επηρεάζουν την ποιότητα στα συστήματα VoIP είναι τα bit errors, η ηχώ και οι echo cancellers, ο θόρυβος και η καταστολή του, η διεπαφή του χρήστη (user interface), τα συστήματα ανίχνευσης φωνής, η κωδικοποίηση, η καθυστέρηση, η διακύμανση της καθυστέρησης και η απώλεια πακέτων. Από αυτά θα εστιάσουμε στα τέσσερα τελευταία καθώς είναι αυτά που διαχωρίζουν τα συστήματα VoIP από συστήματα μεταγωγής κυκλώματος όπως το TDM.

5.1 Ανίχνευση φωνής

Για να μειώσουν την ποσότητα των δεδομένων που στέλνονται στο δίκτυο τα περισσότερα συστήματα IP διαθέτουν ένα προαιρετικό μηχανισμό που ανιχνεύει αν κάποιο συγκεκριμένο πλαίσιο περιέχει φωνή (Voice Activity Detection, VAD). Εάν περιέχει, τότε κωδικοποιείται και στέλνεται στο δίκτυο. Στην περίπτωση που δεν περιέχει φωνή, ένα τεχνητός θόρυβος (comfort noise) εισάγεται στα διαστήματα της σιωπής στην πλευρά της λήψης έτσι ώστε το κανάλι να μην είναι εντελώς «ήσυχος» και ο χρήστης να έχει την βεβαιότητα ότι η κλήση είναι ακόμα ενεργή.

Τόσο η ανίχνευση της φωνής όσο και η εισαγωγή του comfort noise μπορεί να οδηγήσουν σε μια υποβάθμιση της ποιότητας της ομιλίας που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το χρήστη. Για παράδειγμα η ανίχνευση φωνής μπορεί να προκαλέσει ψαλλίδιση (clipping) και συνεπώς απώλεια πληροφορίας.

5.2 Κωδικοποιητές

Για τη εξοικονόμηση εύρους ζώνης κατά τη μετάδοση ομιλίας χρησιμοποιούνται διάφοροι κωδικοποιητές (codecs) με κύριο σκοπό τη μείωση των δεδομένων ομιλίας που χρειάζεται να μεταδοθούν. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό από την εκμετάλλευση κάποιων συγκεκριμένων ιδιοτήτων της παραγωγής λόγου και σε μικρότερο βαθμό από την ακουστική αντίληψη.

Οι κωδικοποιητές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον αλγόριθμο κωδικοποίησης σε κωδικοποιητές κυματομορφής (waveform coders) όπου γίνεται κβάντιση της πραγματικής κυματομορφής του σήματος, παραμετρικούς κωδικοποιητές (parametric coders) που βασίζονται σε κάποιο μοντέλο παραγωγής λόγου και υβριδικούς (hybrid) που είναι συνδυασμός των δύο προηγούμενων.

Η κωδικοποίηση συχνά προκαλεί υποβάθμιση της ποιότητας ομιλίας που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τον χρήστη. Ένα σήμα ομιλίας μπορεί επίσης να κωδικοποιηθεί περισσότερες από μια φορές π.χ. όταν κατά τη διαδρομή από τον πομπό προς τον δέκτη μεσολαβούν διαφορετικά δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές συμπίεσης.

5.2.1 Μετατροπή του σήματος της ομιλίας σε ψηφιακό

Το αναλογικό σήμα της φωνής θα πρέπει να ψηφιοποιηθεί. Η μετατροπή βέβαια θα έχει σαν αποτέλεσμα απώλεια πληροφορίας η οποία δεν θα μπορέσει ποτέ να ανακτηθεί.

Η διαδικασία αποτελείται από δύο διαδοχικά στάδια: τη δειγματοληψία και την κβάντιση. Η συχνότητα δειγματοληψίας όχι μόνο καθορίζει το εύρος ζώνης του σήματος που θα μεταδοθεί αλλά επηρεάζει και τον όγκο της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Για παράδειγμα τα ευρείας ζώνης, υψηλής ποιότητας ηχητικά σήματα πρέπει να δειγματοληφτούνται σε υψηλές συχνότητες αλλά αυτό παράγει πολύ μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας από την τυπική συχνότητα δειγματοληψίας των 8KHz που χρησιμοποιείται στο τηλεφωνικό δίκτυο. Από τη δειγματοληψία προκύπτει απώλεια πληροφορίας λόγω της περικοπής των συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων.

Το αποτέλεσμα της δειγματοληψίας είναι το σήμα PAM το οποίο ουσιαστικά είναι ένα αναλογικό σήμα καθώς το πλάτος του κάθε παλμού είναι συνεχής τιμή. Το σήμα κατόπιν θα πρέπει να κωδικοποιηθεί έτσι ώστε κάθε αναλογικό δείγμα του σήματος PAM να αντιστοιχιστεί σε μια δυαδική κωδική λέξη (PCM). Η διαδικασία αυτή καλείται κβάντιση και εισάγει θόρυβο (θόρυβος κβάντισης).

Η κβάντιση μπορεί να είναι είτε γραμμική (το εύρος του βήματος είναι σταθερό) είτε μη γραμμική. Ένας γραμμικός κβαντιστής δεν είναι συνήθως η καλύτερη λύση. Έχει αποδειχτεί μαθηματικά ότι αν η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) ενός σήματος εισόδου είναι γνωστή, μπορεί να υπολογιστεί μια ιδανική κβάντιση που θα οδηγήσει στο μέγιστο σήμα προς θόρυβο (SNR) για το συγκεκριμένο σήμα. Αυτό προϋποθέτει να γνωρίζουμε την PDF του σήματος κάτι το οποίο είναι πολύ δύσκολο για ένα τυχαίο σήμα ομιλίας καθώς αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (τη γλώσσα, τον τύπο του ομιλητή κλπ.).

Μια άλλη προσέγγιση για την εύρεση του ιδανικού κβαντιστή είναι να βρεθεί μια κλίμακα κβάντισης που να οδηγεί σε SNR ανεξάρτητο από την ισχύ του σήματος. Έχει αποδειχτεί ότι αυτό απαιτεί λογαριθμική κλίμακα όπου το βήμα του κβαντιστή διπλασιάζεται κάθε φορά που διπλασιάζεται η ισχύς του σήματος. Αυτή η τεχνική ονομάζεται companding (από τις λέξεις compress και expanding).

5.2.2 Κωδικοποιητές φωνής στενής ζώνης

Στα ψηφιακά PSTN συστήματα ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται είναι ο G.711. Για να μοιραστεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ των χρηστών σε περιόδους υψηλής κίνησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί DCME (Digital Circuit Multiplication Equipment).

Στα συστήματα μετάδοσης πακέτων χρησιμοποιούνται συνήθως είτε ο G.711 είτε οι επίσης προτεινόμενοι από την ITU κωδικοποιητές G.723.1 και G.729. Στην παρούσα εργασία οι codecs που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις ποιότητας είναι ο G.711 και ο G.729.

5.2.2.1 Ο κωδικοποιητής G.711

Ο G.711 (ITU-T Rec. G.711, 1988) είναι ένας λογαριθμικός κωδικοποιητής φωνής που χρησιμοποιεί την τεχνική του companding με μια κλίμακα κβάντισης για αδύναμα σήματα που είναι ισοδύναμη με γραμμική κλίμακα των 12-bit. Δύο κλίμακες έχουν οριστεί: η the A-law (που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και σε όλα τα διεθνή κυκλώματα (links) και η μ-law (που χρησιμοποιείται την Β. Αμερική και την Ιαπωνία). Οι διαφορές μεταξύ τους είναι απειροελάχιστες με το A-law να προσφέρει μεγαλύτερη δυναμική περιοχή ενώ το μ-law ελάχιστα καλύτερο SNR για σήματα χαμηλής ισχύος.

Ο G.711 κωδικοποιεί ένα ψηφιακό, γραμμικό, κβαντισμένο σήμα σε 12 bits. Από κάθε δείγμα των 12-bit ο μετατροπέας (A/D converter) θα δημιουργήσει ένα κωδικοποιημένο σήμα των 8-bit. Αν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8kHz (που είναι το standard στα

τηλεπικοινωνιακά δίκτυα) ο προκύπτων ρυθμός μετάδοσης είναι 64 kbit/s με το μήκος πλαισίου να είναι 125 μs.

Είναι προφανές ότι το κέρδος από τη χρήση του G.711 δεν είναι στην ποιότητα αλλά στο ρυθμό μετάδοσης (bitrate) που προκύπτει. Το μόνο μειονέκτημα του G.711 σε σύγκριση με την γραμμική κβάντιση είναι η μείωση του SNR για σήματα εισόδου υψηλής ισχύος. Όμως η εμπειρία έχει δείξει ότι συνολικά η λαμβανόμενη υποκειμενική ποιότητα δεν είναι δραματικά επηρεασμένη από αυτή τη μείωση του SNR. Στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας χάνεται κατά τη διάρκεια της αρχικής δειγματοληψίας και της κβάντισης. Η μείωση της κβάντισης από 16 σε 12 bits εισάγει επίσης κάποιο θόρυβο. Η λογαριθμική συμπίεση σε A-law ή μ-law είναι σχετικά με τους άλλους παράγοντες υποβάθμισης μη σημαντική παρ' ότι είναι από τη φύση της απωλεστική συμπίεση.

5.2.2.2 Ο κωδικοποιητής G.723.1

Ο G.723.1 (ITU-T Rec. G.723.1, 1996) έχει δύο τρόπους λειτουργίας : ένα στα 5.3 kbits/s όταν χρησιμοποιεί την τεχνική κωδικοποίησης με γραμμική πρόβλεψη αλγεβρικού κώδικα (Algebraic Code Excited Linear Prediction) και ένα άλλο στα 6.4 kbits/s όταν χρησιμοποιεί την τεχνική κωδικοποίησης πολυπαλμικής κβάντισης μέγιστης πιθανότητας (Multipulse Maximum Likelihood Quantization). Ο τρόπος λειτουργίας μπορεί να αλλάξει δυναμικά σε κάθε πλαίσιο αλλά και οι δύο τρόποι είναι υποχρεωτικό να υπάρχουν σε κάθε υλοποίηση.

Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8 kHz και χρησιμοποιεί πλαίσια μήκους 30 ms. Το ωφέλιμο φορτίο κάθε πακέτου (κάθε πακέτο περιέχει ένα πλαίσιο) είναι 20 bytes με το ρυθμό 5.3 kbits/s και 24 bytes με το ρυθμό 6.4 kbits/s

Επειδή ο G.723.1 δεν μεταδίδει τόνους DTMF με αξιοπιστία θα πρέπει αυτοί να μεταδίδονται εκτός ζώνης (out of band).

5.2.2.3 Ο κωδικοποιητής G.729

Ο G.729 (ITU-T Rec. G.729, 1996) χρησιμοποιεί την τεχνική CS-ACELP (Conjugate Structure, Algebraic Code-Excited Linear Prediction).

Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8 kHz και η αναπαράσταση του δείγματος γίνεται με 1 bit. Παράγει έτσι πλαίσια των 80 bits κωδικοποιώντας 10 ms φωνής με ρυθμό 8 kbits/s. Υπάρχει επίσης μια εκδοχή του, η G.729a που είναι μειωμένης πολυπλοκότητας

Επειδή ούτε ο G.729 δεν μεταδίδει τόνους DTMF με αξιοπιστία θα πρέπει αυτοί να μεταδίδονται εκτός ζώνης (out of band).

Codec	Type	Bitrate (kbps)	Frame (ms)	Payload (bytes)	Packets/sec	MOS
G.711	PCM	64	20	160	50	4.2
G.723.1	MP-MLQ/ CS- ACELP	6.3/5.3	30	20/24	33	3.9/3.7
G.726	ADPCM	32	20	80	50	4.0
G.729	CS- ACELP	8	10	20	50	4.0

Πίνακας 11 : Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των πιο γνωστών κωδικοποιητών στα συστήματα VoIP

5.2.3 Οι παράγοντες ποιότητας από τη χρήση των codecs

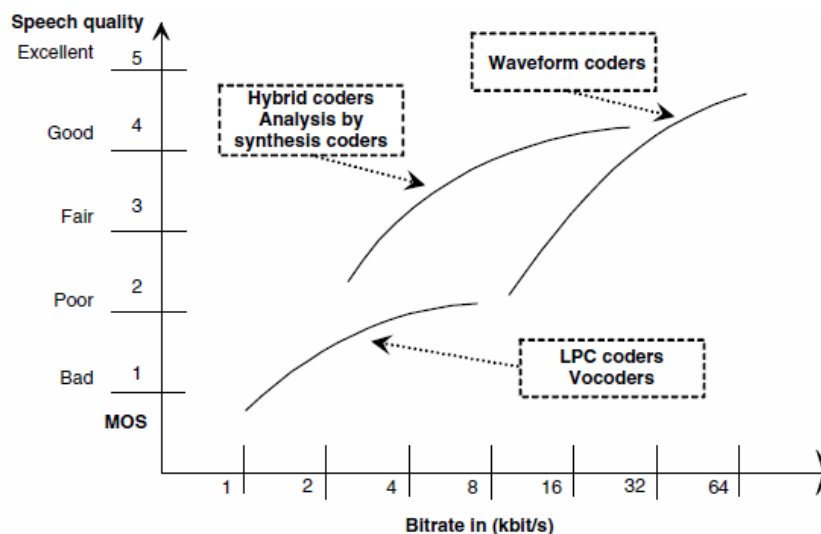
Οι κωδικοποιητές εισάγουν δύο τύπους παραμορφώσεων κατά τη διαδρομή της ομιλίας από τον πομπό στον δέκτη : γραμμικές και μη γραμμικές που θεωρούνται ασυσχέτιστες με τις γραμμικές.

Στην τηλεφωνία, οι επιπτώσεις των αλγορίθμων της κωδικοποίησης τυπικά ποσοτικοποιούνται με τη χρήση των Equipment Impairment Factors (I_e) όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του E-model. Τιμές για τους διάφορους codecs υπάρχουν στη σύσταση της ITU-T Rec. G.113, 2002. Για την εξαγωγή των τιμών του I_e έχει προταθεί από την ITU μια συγκεκριμένη διαδικασία ακουστικών δοκιμών (ITU-T Rec. P.833, 2001). Μία παρόμοια διαδικασία με τη χρήση μετρικών ποιότητας του σήματος έχει επίσης καθοριστεί (ITU-T Rec. P.834, 2002).

Η υπέρθεση διαφορετικών αλγορίθμων κωδικοποίησης καθώς το σήμα σε πολλές περιπτώσεις μεταδίδεται πάνω από διαφορετικά δίκτυα παίζει ένα κρίσιμο ρόλο στην διαμόρφωση της τελικής ποιότητας της ομιλίας. Το αποτέλεσμα μπορεί να παρουσιάσει διαφορετικούς βαθμούς ποιότητας ανάλογα με τη σειρά με την οποία οι αλγορίθμοι κωδικοποίησης επιδρούν στην πληροφορία (ITU-T Contribution COM 12-69, 1998).

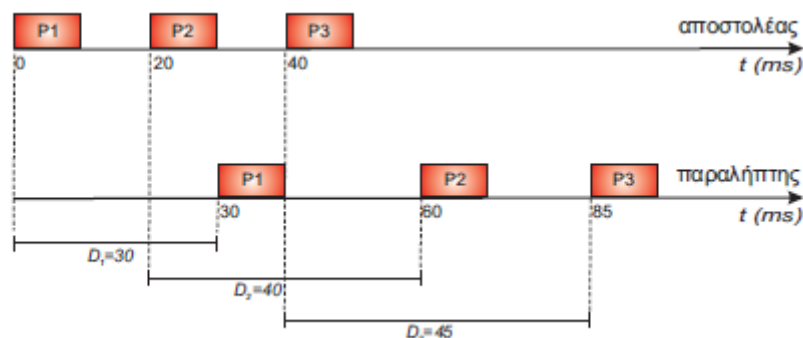
Η εκτίμηση της ποιότητας ενός κωδικοποιητή είναι μια σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους :

- Την απόλυτη ποιότητα του αναπαραγόμενου σήματος ομιλίας.
- Την καθυστέρηση που εισάγεται από τον αλγόριθμο του κωδικοποιητή. Αυτή εξαρτάται από το μέγεθος των πλαισίων του σήματος ομιλίας που κωδικοποιούνται καθώς και από τα επιπλέον δείγματα σήματος που ο κωδικοποιητής χρειάζεται να συσσωρεύσει πριν ξεκινήσει την κωδικοποίηση του τρέχοντος πλαισίου (look-ahead).
- Την πολυπλοκότητα του κωδικοποιητή που έχει σαν αποτέλεσμα πρόσθετη καθυστέρηση στην επεξεργασία
- Τις ιδιότητες/δυνατότητες υπέρθεσης (δηλ. πόσες φορές η φωνή μπορεί να κωδικοποιηθεί και να αποκωδικοποιηθεί μέχρι η ποιότητα της φωνής να γίνει μη αποδεκτή)
- Την ευαισθησία στα λάθη (π.χ. πιθανό σβήσιμο πλαισίων VoIP)
- Την ευελιξία του κωδικοποιητή να προσαρμόζεται δυναμικά στη συμφόρηση και την υποβάθμιση του καναλιού μετάδοσης. Κάποιοι κωδικοποιητές παρέχουν μόνο ένα σταθερό ρυθμό bit, ενώ άλλοι έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν δυναμικά το ρυθμό τους.



Σχήμα 24 : Το MOS σαν συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης

5.3 Διακύμανση της καθυστέρησης



Σχήμα 25 : Το φαινόμενο του jitter στα συστήματα μεταγωγής πακέτων

Λόγω της δρομολόγησης των πακέτων από διαφορετικές διαδρομές καθώς και των ασύγχρονων χαρακτηριστικών του δικτύου τα πακέτα μιας ριπής ομιλίας (talkspurt) μπορεί να φθάσουν στον προορισμό με διαφορετικές καθυστερήσεις. Το φαινόμενο αυτό που αποκαλείται jitter, υποβαθμίζει σημαντικά την ποιότητα της ομιλίας και θα πρέπει να αντισταθμιστεί. Αυτό γίνεται στα δίκτυα δημιουργώντας στην πλευρά της λήψης jitter buffers στους οποίους αποθηκεύονται τα πακέτα για κάποιο χρονικό διάστημα πριν την αναπαραγωγή της ομιλίας. Το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να είναι στατικό είτε δυναμικό μέγεθος ανάλογα με την τεχνολογία και την συγκεκριμένη υλοποίηση. Το μέτρο αυτό εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση και πιθανή απώλεια πακέτων αν για παράδειγμα κάποια πακέτα φθάσουν πολύ αργά για την έγκαιρη αναπαραγωγή της ομιλίας. Τα μειονεκτήματα αυτά όμως είναι περισσότερο αποδεκτά σε σχέση με την υποβάθμιση της ποιότητας που εισάγει το φαινόμενο του jitter.

Το jitter χαρακτηρίζεται υψηλής συχνότητας όταν συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας ριπής ομιλίας και χαμηλής συχνότητας όταν οι διακυμάνσεις της καθυστέρησης δεν επηρεάζουν τον συγχρονισμό για την σωστή αναπαραγωγή μιας ριπής ομιλίας.

Στα σημερινά δίκτυα το φαινόμενο του jitter υψηλής συχνότητας μπορεί γενικά να αγνοηθεί καθώς αντιμετωπίζεται από το ίδιο το δίκτυο. Αυτό γίνεται για παράδειγμα είτε στους δρομολογητές (routers) καθυστερώντας τα πακέτα που φθάνουν νωρίτερα από τον προγραμματισμένο χρόνο και δίνοντας προτεραιότητα στη διαχείριση των πακέτων που έχουν καθυστερήσει, είτε στη λήψη με τη χρήση των jitter buffers.

Το jitter χαμηλής συχνότητας δημιουργείται για παράδειγμα από την ολίσθηση του χρονισμού σε κάποιους από τους δρομολογητές του δικτύου είτε από προσαρμοστικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στους jitter buffers. Αυτό οδηγεί σε μια απόλυτη χρονική καθυστέρηση T η οποία δεν είναι απαραίτητα σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια μιας κλήσης και έχει σαν αποτέλεσμα κάποιες «στατικές» υποβαθμίσεις της ποιότητας, όπως η ηχώ (echo), να παρουσιάζουν διακυμάνσεις στην πορεία του χρόνου.

Πολλές διαφορετικές προτάσεις έχουν γίνει ώστε να ποσοτικοποιηθεί η σχέση μεταξύ jitter και jitter buffers από τη μια μεριά και η προκύπτουσα απώλεια πακέτων και η συνολική καθυστέρηση στη μετάδοση από την άλλη. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι αν χρησιμοποιηθεί ένας σταθερός jitter buffer τότε η καθυστέρηση που εισάγεται είναι σταθερή. Σε περίπτωση που η καθυστέρηση κάποιων από τα μεταδιδόμενα πακέτα υπερβεί το κατώφλι του σταθερού buffer τότε ένας σημαντικός αριθμός πακέτων μπορεί να χαθεί. Εκτεταμένες απώλειες

μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση προσαρμοστικών υλοποιήσεων που ρυθμίζουν το μέγεθος του buffer σύμφωνα με την συμφόρηση που μπορεί να υπάρχει στο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μικρή απώλεια πακέτων σε βάρος όμως μιας πιθανά σημαντικής καθυστέρησης μετάδοσης της πληροφορίας, παραδείγματος χάρη σε περιόδους συμφόρησης. Στις πραγματικές υλοποιήσεις γίνεται μια προσπάθεια να επιτευχθεί η ιδανική ισορροπία ανάμεσα στην απώλεια πακέτων και την καθυστέρηση.

5.4 Καθυστέρηση

Η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης προκύπτει κατ' αρχήν από την καθυστέρηση που εισάγει ο αλγόριθμος του κωδικοποιητή και το σύστημα ανίχνευσης λαθών που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη υλοποίηση. Στη συνολική καθυστέρηση συμβάλλουν επίσης οι καθυστερήσεις που εισάγει το δίκτυο, οι jitter buffers και ο αποκωδικοποιητής ή άλλα πρόσθετα στοιχεία του δικτύου που σχετίζονται με την επεξεργασία σήματος όπως οι EC (Echo Cancellers).

Delay Source	Typical Range (ms)
Recording	10-40
Coder	10-20
Network delivery	70-120
Jitter buffer	50-200
Decoder	10-20
Total	150-400

Πίνακας 12 : Συνεισφορά των σταδίων επεξεργασίας του VoIP στη συνολική καθυστέρηση¹

Οι μεγάλες καθυστερήσεις μειώνουν τις δυνατότητες επικοινωνίας των στοιχείων ενός δικτύου και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και την υποβάθμιση της ποιότητας της ομιλίας. Παρ' όλα αυτά οι χρήστες μπορεί να αποδώσουν το φαινόμενο της καθυστέρησης σε καθυστερημένη ανταπόκριση του συνομιλητή τους και όχι στο ίδιο το δίκτυο, π.χ. στην έλλειψη προσοχής από την πλευρά του συνομιλητή (ITU-T Contribution COM 12-62, 1990). Λόγω αυτού του φαινομένου και με δεδομένο ότι η καθυστέρηση δεν είναι πάντα ανιχνεύσιμη, πολλές μελέτες έχουν καταδείξει ότι η επίπτωση της καθυστέρησης είναι λιγότερο σημαντική στην ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης απ' ότι αρχικά είχε υπολογιστεί.

Είναι προφανές ότι η επίδραση της καθυστέρησης εξαρτάται σημαντικά από τη φύση της συνομιλίας και το σενάριο. Εάν το θέμα περιλαμβάνει υψηλή αλληλεπίδραση των συνομιλητών, καθώς αυξάνεται η καθυστέρηση αυξάνεται και η δυσκολία του συνομιλητή να μπορέσει *ηθελήμενα* να διακόψει τον άλλο. Επιπλέον με την αύξηση της καθυστέρησης αυξάνονται και οι μη ηθελημένες διακοπές. Αυτό σε συνδυασμό με την αυξανόμενη δυσκολία ηθελημένης διακοπής του συνομιλητή αυξάνει την πιθανότητα λάθους ερμηνείας των λεγομένων (misunderstanding).

¹ Πηγή: Thomsen και Jani, 2000

Σε μια τηλεφωνική συνομιλία, οι χρήστες έχουν ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο στην διάρκεια του οποίου περιμένουν μία αντίδραση από το συνομιλητή τους. Η καθυστέρηση γίνεται εμφανής όταν η πραγματική αντίδραση υπερβαίνει τη διάρκεια αυτού του χρονικού παραθύρου. Το εύρος του παραθύρου εξαρτάται από την ταχύτητα έκφρασης του συνομιλητή αλλά και τη διάρκεια της ριπής ομιλίας που προηγήθηκε. Το παράθυρο μεγαλώνει με την μείωση της ταχύτητας έκφρασης και την αύξηση της διάρκειας της ριπής. Όσο το παράθυρο μεγαλώνει τόσο η καθυστέρηση γίνεται πιο ανεκτή από τους συνομιλητές.

Έχει επιβεβαιωθεί από εκτεταμένες μελέτες ότι οι περισσότερο διαδραστικές συνομιλίες παρουσιάζουν υψηλότερη ευαισθησία στην καθυστέρηση όσον αφορά την ποιότητα. Παρουσιάζουν δε μικρότερες ριπές ομιλίας. Αποτελέσματα όσον αφορά την αλληλοεξάρτηση μεταξύ της καθυστέρησης και του φαινομένου της αλληλοεπικάλυψης της ομιλίας (double talk) έδειξαν μία σχεδόν γραμμική αύξηση του ποσοστού της αλληλοεπικάλυψης από 6% για καθυστέρηση 0 ms έως 9% αντίστοιχα για καθυστέρηση 1000 ms (ITU-T Delayed Contribution D.214, 2004).

Τέλος εκτός από το θέμα της συζήτησης ή το βαθμό αλληλοεπίδρασης που δημιουργεί, η επίπτωση της καθυστέρησης στην ποιότητα εξαρτάται επίσης από την εμπειρία που έχουν οι χρήστες σε τέτοιου τύπου υποβαθμίσεις της ποιότητας.

End-to-End Delay (ms)	Quality
0-150	Acceptable for most users
150-400	Acceptable but has impact
>400	Unacceptable

Πίνακας 13 : Όρια για την ποιότητα επικοινωνίας σε σχέση με τη συνολική καθυστέρηση¹

5.5 Απώλεια πακέτων

Από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της ομιλίας η απώλεια πακέτων είναι ο παράγοντας υποβάθμισης που κάνει το VoIP διαφορετικό σε σχέση με τα ενσύρματα TDM δίκτυα.

Απώλεια πακέτων μπορεί να συμβεί είτε σε κάποιο σημείο του δικτύου είτε πιο συγκεκριμένα στο σημείο λήψης της ακουστικής πληροφορίας, για παράδειγμα, λόγω υπερβολικής καθυστέρησης σε περίπτωση συμφόρησης. Οι επιπτώσεις της απώλειας πακέτων σε επίπεδο δικτύου εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

5.5.1 Κατανομή της απώλειας πακέτων

Λόγω της δυναμικής και χρονικά μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς των δικτύων μεταγωγής πακέτων, η απώλεια πακέτων παρουσιάζει μια ποικιλία από κατανομές. Η κατανομή που έχει μελετηθεί περισσότερο στις δοκιμές όσον αφορά την ποιότητα της ομιλίας είναι η τυχαία (random) ή έχει την μορφή της Bernoulli.

¹ Πηγή: ITU-T G.114

«Τυχαία απώλεια» εδώ σημαίνει ανεξάρτητη απώλεια, εννοώντας ότι η απώλεια ενός συγκεκριμένου πακέτου είναι ανεξάρτητη από το εάν προηγούμενα πακέτα έχουν χαθεί. Φυσικά η τυχαιότητα είναι μια ιδιότητα που εμπεριέχεται σε όλα τα γεγονότα που περιγράφονται από ένα στοχαστικό μοντέλο.

Η τυχαία απώλεια δεν αντιπροσωπεύει τις κατανομές απώλειας που τυπικά συναντάμε στα πραγματικά δίκτυα. Για παράδειγμα οι απώλειες πολύ συχνά σχετίζονται με περιόδους συμφόρησης. Έτσι μπορεί να αφορούν σημαντικό αριθμό πακέτων, δείχνοντας έτσι μία εξάρτηση μεταξύ γεγονότων (όπου ένα γεγονός μπορεί να θεωρηθεί η απώλεια ενός και μόνο πακέτου).

Διάφορες προσεγγίσεις που έχουν γίνει για την περιγραφή των κατανομών απώλειας πακέτων έχουν δείξει την ύπαρξη εξάρτησης μεταξύ των γεγονότων που σχετίζονται με απώλεια πακέτων. Στη βιβλιογραφία η «εξαρτημένη» απώλεια πακέτων συχνά αναφέρεται ως απώλεια κατά ριπές (bursty).

5.5.2 Ανάκτηση χαμένων πακέτων

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ανάκτηση των δεδομένων ομιλίας που χάνονται όταν χαθεί κάποιο πακέτο. Αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε τεχνικές που εφαρμόζονται αποκλειστικά στο σημείο της λήψης και τεχνικές που βασίζονται στην αποστολή επιπλέον δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στη λήψη για την ανάκτηση της πληροφορίας. Στα πραγματικά δίκτυα VoIP χρησιμοποιείται είτε κάποιος συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών είτε εφαρμόζονται υβριδικές προσεγγίσεις.

- *Packet Loss Concealment (PLC)* : Δεν στέλνονται επιπλέον δεδομένα και τα χαμένα πακέτα αναδημιουργούνται στη λήψη. Αυτό μπορεί να γίνει για παράδειγμα με βάση πληροφορία κωδικοποίησης από τα πακέτα που προηγήθηκαν. Το ελάχιστο μέτρο που παίρνεται είναι η εισαγωγή ενός διαστήματος σιωπής που αντιστοιχεί στο διάστημα κατά το οποίο χάθηκαν διαδοχικά πακέτα έτσι ώστε να προλάβει ο δέκτης να αναπαραγάγει την ομιλία. Ανεξάρτητα από τον τύπο της πληροφορίας που χάθηκε (π.χ. φωνή ή σιωπή) και τον θόρυβο, έχει διαπιστωθεί ότι το φαινόμενο οδηγεί στην εντύπωση ενός συνεχούς σήματος με παρουσία θορύβου. Υποθέτοντας ότι ένα χαμένο πακέτο όπως και το προηγούμενο είναι μέρος του ίδιου φθόγγου, μία απλή επανάληψη του πακέτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη της απώλειας. Αν και η κατανόηση του λόγου μπορεί να βελτιωθεί με μια τέτοια απλή προσέγγιση, η ποιότητα της ομιλίας είναι υποβαθμισμένη σε σχέση με ένα σήμα χωρίς λάθη. Περισσότερο πολύπλοκες προσεγγίσεις όπως η εισαγωγή πλαισίων που δημιουργούνται από την πληροφορία κωδικοποίησης που υπάρχει σε προηγούμενα πλαίσια (interpolation) εφαρμόζονται στους κωδικοποιητές που χρησιμοποιούνται περισσότερο στο VoIP (π.χ. ITU-T Rec. G.723.1, 1996, ITU-T Rec.729, 1996). Καθώς η συγκεκριμένη τεχνική δεν απαιτεί την αποστολή επιπλέον δεδομένων δεν προσθέτει σημαντική καθυστέρηση στην επεξεργασία.
- *Forward Error Correction (FEC)* : Σε αυτή την τεχνική τα κωδικοποιημένα δεδομένα που περιέχουν ομιλία στέλνονται από τον αποστολέα εις διπλούν. Στην λήψη τα περιτά αυτά επιπλέον δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση της χαμένης πληροφορίας (RFC 2733, 1999). Εάν η χαμένη πληροφορία μπορεί να ανακτηθεί τότε η ανάκτηση γίνεται με ακρίβεια bit. Αυτή η μέθοδος αποφέρει σχετικά υψηλή ποιότητα, ακόμα και στην περίπτωση της απώλειας κατά ριπές ή σε περίπτωση απώλειας μεγάλου αριθμού πακέτων. Κατά την πακετοποίηση που λαμβάνει χώρα πριν την αποστολή χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για την κατανομή των επιπλέον δεδομένων σε σχέση με τα πραγματικά (π.χ. κώδικες Reed-Solomon).

- *Low-Bitrate Redundancy (LBR)* : Μια εκδοχή του σήματος ομιλίας κωδικοποιημένη σε χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης (bitrate) στέλνεται επιπρόσθετα με τα πραγματικά δεδομένα της ομιλίας και χρησιμοποιείται στη λήψη για την αντικατάσταση των χαμένων πακέτων (RFC 2198, 1997). Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε βελτιωμένη ποιότητα σε σύγκριση με την PLC αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματική από την FEC λόγω του γεγονότος ότι δεν μπορεί να γίνει ανάκτηση με ακρίβεια bit.

Οι τεχνικές FEC και LBR οδηγούν στην παραγωγή επιπλέον δεδομένων που πρέπει να επεξεργαστούν με αποτέλεσμα την αύξηση της καθυστέρησης και την επιβάρυνση του δικτύου με επιπλέον φορτίο.

5.5.3 Το μέγεθος των πακέτων

Το μέγεθος των πακέτων αναφέρεται στην πληροφορία που περιέχεται στο πακέτο (payload) και μετριέται συνήθως είτε σε διάρκεια (ms) είτε σε μέγεθος (bytes). Στα δεδομένα της ομιλίας προστίθενται κατά τη διάρκεια της πακετοποίησης επιπλέον πληροφορία από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα (header). Για να μειωθεί ο όγκος της επιπλέον πληροφορίας που μεταδίδεται μαζί με τα δεδομένα της ομιλίας, είναι επιθυμητό να περιοριστεί ο αριθμός των πακέτων που στέλνονται π.χ. με την αποστολή αρκετών πλαισίων (frames) κωδικοποιημένης πληροφορίας σε ένα πακέτο. Αυτό βέβαια έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερα πακέτα τα οποία οδηγούν σε αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης και δυνητικά σε χαμηλότερη ποιότητα ομιλίας σε περίπτωση απώλειας πακέτων. Ως συμβιβασμό οι υπηρεσίες VoIP στα σύγχρονα δίκτυα χρησιμοποιούν πακέτα που περιέχουν μικρό αριθμό πλαισίων με το μέγεθος των πακέτων να κυμαίνεται από 10ms έως 60ms.

Πειραματικό μέρος

Το πειραματικό μέρος της εργασίας εστιάζει στην μέτρηση της ποιότητας ομιλίας τηλεφωνικών συνδέσεων και την εξαγωγή των σχετικών δεικτών ποιότητας με τη χρήση του E-model. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει υιοθετηθεί από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή (ΕΕΤΤ) ως το πλέον κατάλληλο για την μέτρηση της ποιότητας ομιλίας σε τηλεφωνικές υπηρεσίες και δημοσιεύει στην ιστοσελίδα της τους αντίστοιχους δείκτες για όλους τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών που δραστηριοποιούνται στην ελληνική επικράτεια.

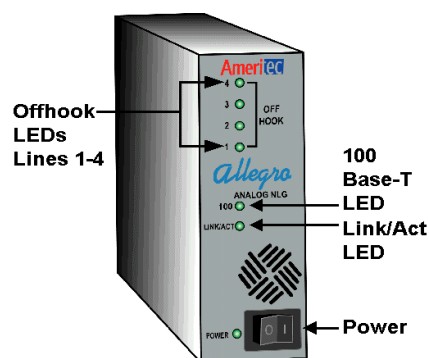
Σκοπός των μετρήσεων είναι να γίνει μια εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας και πως αυτή επηρεάζεται σε τηλεφωνικά δίκτυα PSTN όταν αυτά ενσωματώνουν σταδιακά την τεχνολογία VoIP. Οι μετρήσεις γίνονται σε τερματικά άκρα του δικτύου PSTN καθώς αντιπροσωπεύουν ακόμα σήμερα την πλειονότητα των συνδέσεων τοπικού βρόχου για ιδιώτες συνδρομητές.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε πραγματικά δίκτυα τηλεπικοινωνιακού παρόχου τα οποία βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία και λαμβάνουν χώρα τις πρωινές ώρες της ημέρας όπου τα δίκτυα συνήθως δέχονται την μεγαλύτερη κίνηση.

6.1 Μετρητικές διατάξεις

Οι μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων είναι δύο γεννήτριες κλήσεων (call generators) που βρίσκονται σε τερματικά άκρα του δικτύου PSTN και μια γεννήτρια κλήσεων που βρίσκεται σε τερματικό σημείο του IP δικτύου.

6.1.1 Γεννήτρια κλήσεων του δικτύου PSTN



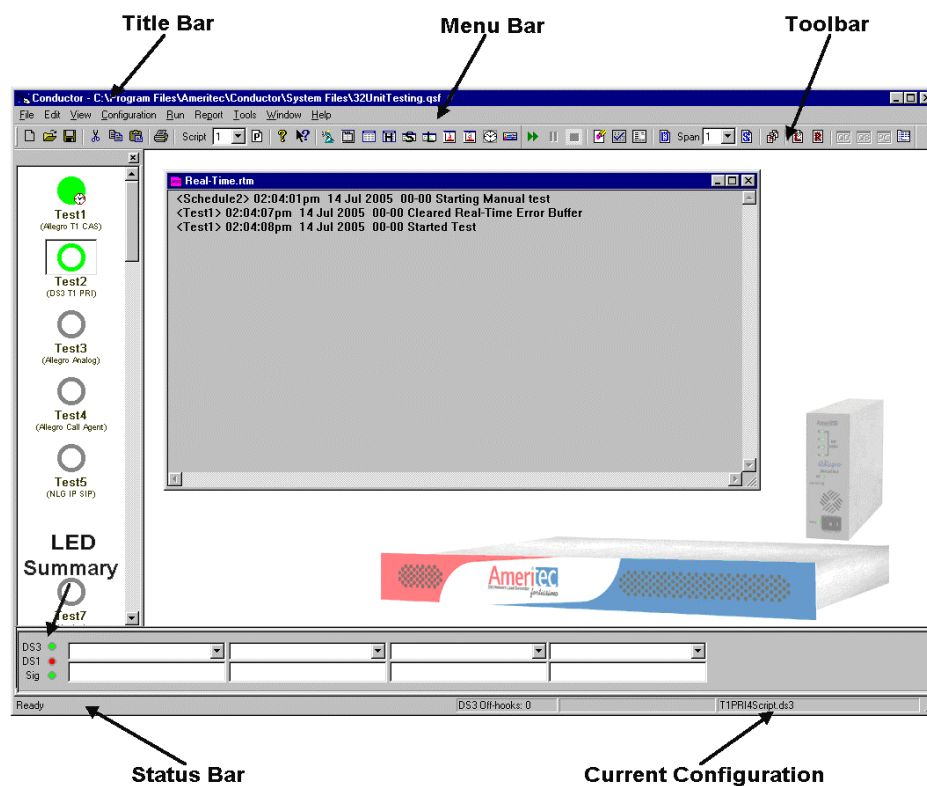
Σχήμα 26 : Η γεννήτρια κλήσεων Allegro

Η βασική μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των δεικτών ποιότητας είναι η γεννήτρια κλήσεων *Allegro* της εταιρείας *Ameritec*. Ο ρόλος της συσκευής αυτής είναι διπλός :

- Να εκκινεί κλήσεις προς το δίκτυο
- Να δέχεται κλήσεις και να μετράει τους δείκτες ποιότητας

Για τις ανάγκες των μετρήσεων της παρούσας εργασίας, η μια γεννήτρια χρησιμοποιείται στο ένα άκρο του δικτύου για την δημιουργία των απαιτούμενων κλήσεων και η δεύτερη στο άλλο άκρο για την μέτρηση της ποιότητας των κλήσεων που παράγει η πρώτη.

Η συσκευή έχει δυνατότητα να συνδεθεί και να εκκινήσει κλήσεις σε τέσσερις τηλεφωνικές γραμμές ταυτόχρονα. Μπορεί να συνδεθεί με υπολογιστή με χρήση του πρωτοκόλλου TCP/IP μέσω μιας θύρας Ethernet. Έτσι ελέγχεται και παραμετροποιείται μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος (Graphical User Interface, GUI) που διατίθεται σε λειτουργικό Windows.



Σχήμα 27 : Το γραφικό περιβάλλον Conductor της γεννήτριας κλήσεων Allegro

Έχει τη δυνατότητα χρονοπρογραμματισμού των κλήσεων και οι ενέργειες που μπορεί να εκτελέσει ρυθμίζονται μέσω παραμέτρων (parameter fields) που καθορίζονται σε scripts προγραμματιζόμενα από το χρήστη. Οι δυνατότητες της περιλαμβάνουν την διεξαγωγή δοκιμών για κλήσεις, σηματοδότηση, την αποστολή τόνων, τον έλεγχο μονοπατιού και κυρίως μετρήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Οι δείκτες ποιότητας που μπορεί να μετρήσει είναι τα PSQM, PESQ, R-factor και MOS.

6.1.1.1 Λειτουργία της γεννήτριας

Η καρδιά της εφαρμογής που τρέχει στη γεννήτρια είναι ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα (script) που έχει γραφτεί από την Ameritec για να συλλέξει και να παρουσιάσει τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την βασική εξίσωση του E-Model. Βασίζεται σε μια σύνθετη ακολουθία τόνων που προσομειώνει το φασματικό εύρος και τη δυναμική της ανθρώπινης ομιλίας.

Η εξίσωση του E-Model περιλαμβάνει τις καθυστερήσεις ανά κατεύθυνση, το ποσοστό απώλειας πακέτων, το Signal-to-Noise Ratio (SNR), το θόρυβο κυκλώματος και το επίπεδο ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Επιπλέον δεδομένα απαιτούνται για τον ορισμό του κωδικοποιητή που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και το μέγεθος των πακέτων.

1. Καθυστερήσεις

Για τον υπολογισμό του E-model απαιτούνται μετρήσεις για την μονοκατευθυντική (1-way delay) όσο και για την διπλοκατευθυντική (round trip) καθυστέρηση. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης χρησιμοποιείται χρονοσήμανση (timing mark) κατανεμημένη και στις δύο γεννήτριες. Ο συγχρονισμός παρέχεται από ένα εσωτερικό ρολόι. Η μονοκατευθυντική καθυστέρηση πραγματοποιείται με την εκπομπή ενός τόνου διάρκειας 100ms στο timing mark και στη λήψη υπολογίζεται η απόκλιση μεταξύ της άφιξης του τόνου και του timing mark. Η διπλοκατευθυντική καθυστέρηση μετριέται με την αποστολή του ίδιου τόνου των 100ms από το τερματικό άκρο (ακροατής) προς το αρχικό άκρο (ομιλητής). Ο τόνος αναγνωρίζεται από το αρχικό άκρο, κρατείται για ένα χρονικό διάστημα και στέλνεται πίσω στο τερματικό άκρο. Η καθυστέρηση υπολογίζεται με τη μέτρηση του συνολικού χρόνου που διαρκεί η διαδικασία αν αφαιρεθεί το διάστημα διακράτησης το οποίο είναι μια σταθερά στο script.

2. Ποσοστό χαμένων πακέτων φωνής

Η απώλεια πακέτων (Drop Count) μετριέται στέλνοντας έναν παλμό καθορισμένης διάρκειας από το αρχικό άκρο προς το τερματικό άκρο και «ακούγοντας» για μια απώλεια σήματος μεγαλύτερη από ένα κατάφλι που αντιπροσωπεύει το μέγεθος του πακέτου. Καθώς η μέτρηση λαμβάνει χώρα για ένα σταθερό χρονικό διάστημα και το μέγεθος του πακέτου είναι συγκεκριμένο και ορισμένο στο script, μετριέται ο συνολικός αριθμός των πακέτων και χρησιμοποιώντας τον αριθμό των χαμένων πακέτων υπολογίζεται το ποσοστό.

3. Signal-to-Noise Ratio

Ένας ειδικός τόνος έχει δημιουργηθεί για τη μέτρηση του Signal-to-Noise Ratio (SNR) με φασματικό εύρος γύρω από τα 1000 Hz. Σε ένα αναλογικό PCM κύκλωμα των 8000 Hz η IEEE ορίζει για το SNR ένα εύρος διακύμανσης 0-35 dB.

4. Ισχύς του σήματος λήψης

Το επίπεδο ισχύος του σήματος λήψης (Received Signal Level) είναι παράγωγο της μέτρησης του SNR. Ένα σήμα στέλνεται από το αρχικό άκρο στα -9 dBm. Το script συγκρίνει το επίπεδο ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με το δεδομένο επίπεδο ισχύος του σήματος που στάλθηκε και υπολογίζει το OLR.

Για τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου του E-model χρησιμοποιούνται οι εξ'ορισμού τιμές όπως έχουν αναφερθεί στον πίνακα 4.

6.1.1.2 Ο αλγόριθμος λειτουργίας

Στις γεννήτριες κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων εκτελούνται εσωτερικά κάποια προγράμματα (scripts) που έχουν σαν αποστολή τον προγραμματισμό της διαδικασίας η

οποία περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Ανάλογα με το ρόλο που έχει η κάθε γεννήτρια εκτελείται και το αντίστοιχο πρόγραμμα.

Ο αλγόριθμος στο σημείο εκπομπής (Originating Script)

Η τηλεφωνική γραμμή γίνεται διαθέσιμη (off-hook), επιλέγεται ο προκαθορισμένος τηλεφωνικός αριθμός της κλήσης και η γεννήτρια κλήσεων περιμένει την ένδειξη απάντησης από το άλλο άκρο της γραμμής. Όταν η ένδειξη ληφθεί, τότε πραγματοποιεί τον έλεγχο ποιότητας του μονοπατιού της φωνής (VoP Quality of Service) και ακολούθως η γραμμή κλείνει (on-hook).

Για τον έλεγχο του μονοπατιού ψάχνει για μια ακολουθία τεσσάρων συγκεκριμένων τόνων και όταν αυτοί ληφθούν και ταυτοποιηθούν τότε στέλνει μια επιβεβαίωση. Εάν δεν ληφθούν εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος τότε εκδίδει μια αναφορά (Received ID Fail). Κατόπιν κοιτάζει για έναν εισερχόμενο τόνο διάρκειας 100ms (RoundTrip Delay Tone). Όταν αυτός ανιχνευθεί τότε στέλνει ένα πανομοιότυπο τόνο προς την άλλη πλευρά. Αν αυτός δεν ληφθεί εντός του καθορισμένου ορίου θα δημιουργηθεί και πάλι μια αναφορά (Received Round Trip Fail). Κατόπιν στέλνει έναν παλμό διάρκειας 100ms (1-way Delay Tone) ακολουθούμενο από έναν άλλο τόνο συγκεκριμένης διάρκειας για τη μέτρηση του SNR (Packet Loss / SNR Tone).

Ο αλγόριθμος στο σημείο λήξης (Terminating Script)

Η γεννήτρια ειδοποιείται για εισερχόμενη κλήση από το κουδούνισμα που παράγεται. Τότε περιμένει και μετά από κάποιο συγκεκριμένο αριθμό κουδουνισμάτων απαντάει την κλήση. Ακολουθεί ο έλεγχος ποιότητας του μονοπατιού της φωνής (VoP Quality of Service) και η γραμμή κλείνει (on-hook).

Για τον έλεγχο του μονοπατιού στέλνει μια σειρά τεσσάρων τόνων και περιμένει την επιβεβαίωση. Εάν δεν ληφθεί εντός του καθορισμένου χρονικού διαστήματος τότε εκδίδεται μια αναφορά (Received ID Fail). Ακολούθως στέλνει στην άλλη πλευρά έναν παλμό διάρκειας 100ms (Round Trip Delay Tone). Κατόπιν κοιτάζει για έναν ίδιο εισερχόμενο δοκιμαστικό τόνο. Όταν αυτός ανιχνευθεί τότε υπολογίζει το round trip transmission delay. Εάν δεν ληφθεί εντός του καθορισμένου χρονικού διαστήματος τότε παράγεται μια ανάλογη αναφορά (Send Round Trip Fail). Τότε κοιτάζει για το εισερχόμενο σήμα αναφοράς. Όταν αυτό ληφθεί τότε αναλύεται για audio dropout στην περίπτωση του δικτύου PSTN και για απώλεια πακέτων στην περίπτωση του VoIP. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης περιλαμβάνεται στην τελική αναφορά για την ποιότητα ενώ μια άλλη αναφορά (1-way Delay Fail) θα δημιουργηθεί σε περίπτωση που το σήμα δεν ληφθεί εντός του καθορισμένου χρονικού ορίου ή η απώλεια των πακέτων είναι τόσο μεγάλη κατά τη διάρκεια της δοκιμής που καθιστά αδύνατη την πραγματοποίηση της μέτρησης.

Κατόπιν κοιτάει για τον τόνο που έχει στείλει η άλλη πλευρά για τη μέτρηση του SNR. Όταν το σήμα ληφθεί τότε αυτό αναλύεται και μετράται το επίπεδο ισχύος του, το επίπεδο ισχύος του θορύβου, οι συχνότητες του θορύβου και η συνολική ενέργεια του σήματος. Υπολογίζεται έτσι το SNR, ενώ αν δεν ληφθεί εντός του καθορισμένου χρονικού διαστήματος (200ms), εκδίδεται μια αντίστοιχη αναφορά (Drop Sig not Detected ή Drop Sig Lost).

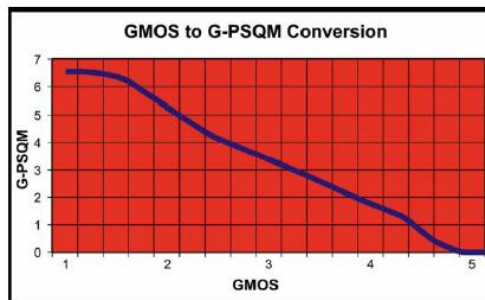
Γενικά αν η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος πέσει περίπου στα -24db έως -25db τότε βρίσκεται στο όριο ανίχνευσής του συστήματος και είναι πολύ πιθανό να εκδίδονται οι αναφορές λάθους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών των MOS, PSQM και PESQ.

Report	Originating		Terminating	Report
RecvID Fail		<-----	Send VOP ID Tones	
	Send VOP ID Response Tone	----->		RecvID Fail
Recv Rnd Trip Fail		<-----	RT Delay Tone	
	RT Delay Tone	----->		Send Rnd Trip Fail
	1-way Delay Tone	----->		1-way Dly Fail
	Packet Loss / SNR Tone	----->		Drop Sig not Detected/ Drop Sig Lost

Σχήμα 28 : Ο αλγόριθμος λειτουργίας της γεννήτριας κλήσεων

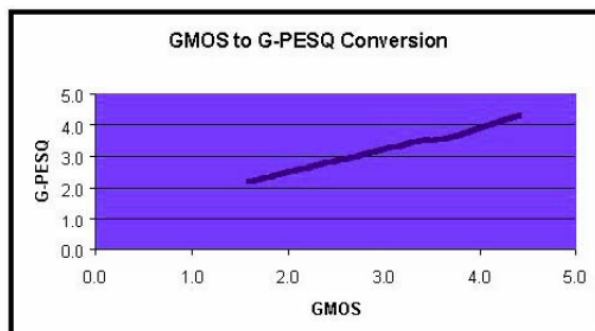
6.1.1.3 Υπολογισμοί των δεικτών ποιότητας

Αρχικά η γεννήτρια χρησιμοποιεί τις παραμέτρους εισόδου του E-model και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις που εκτελεί όταν ολοκληρωθεί μια κλήση, υπολογίζει τον δείκτη R. Από τον δείκτη R υπολογίζεται το MOS με βάση την γνωστή εξίσωση που συνδέει τα δύο μεγέθη και έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η σχέση τους φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 24. Αφού έχει υπολογιστεί το MOS είναι δυνατόν να συσχετιστεί η τιμή του με την τιμή PSQM χρησιμοποιώντας την παρακάτω καμπύλη.



Σχήμα 29 : Το PSQM σαν συνάρτηση του δείκτη MOS

Από την τιμή του MOS υπολογίζεται επίσης η τιμή του PESQ χρησιμοποιώντας την παρακάτω καμπύλη.



Σχήμα 30 : Το PESQ σαν συνάρτηση του δείκτη MOS

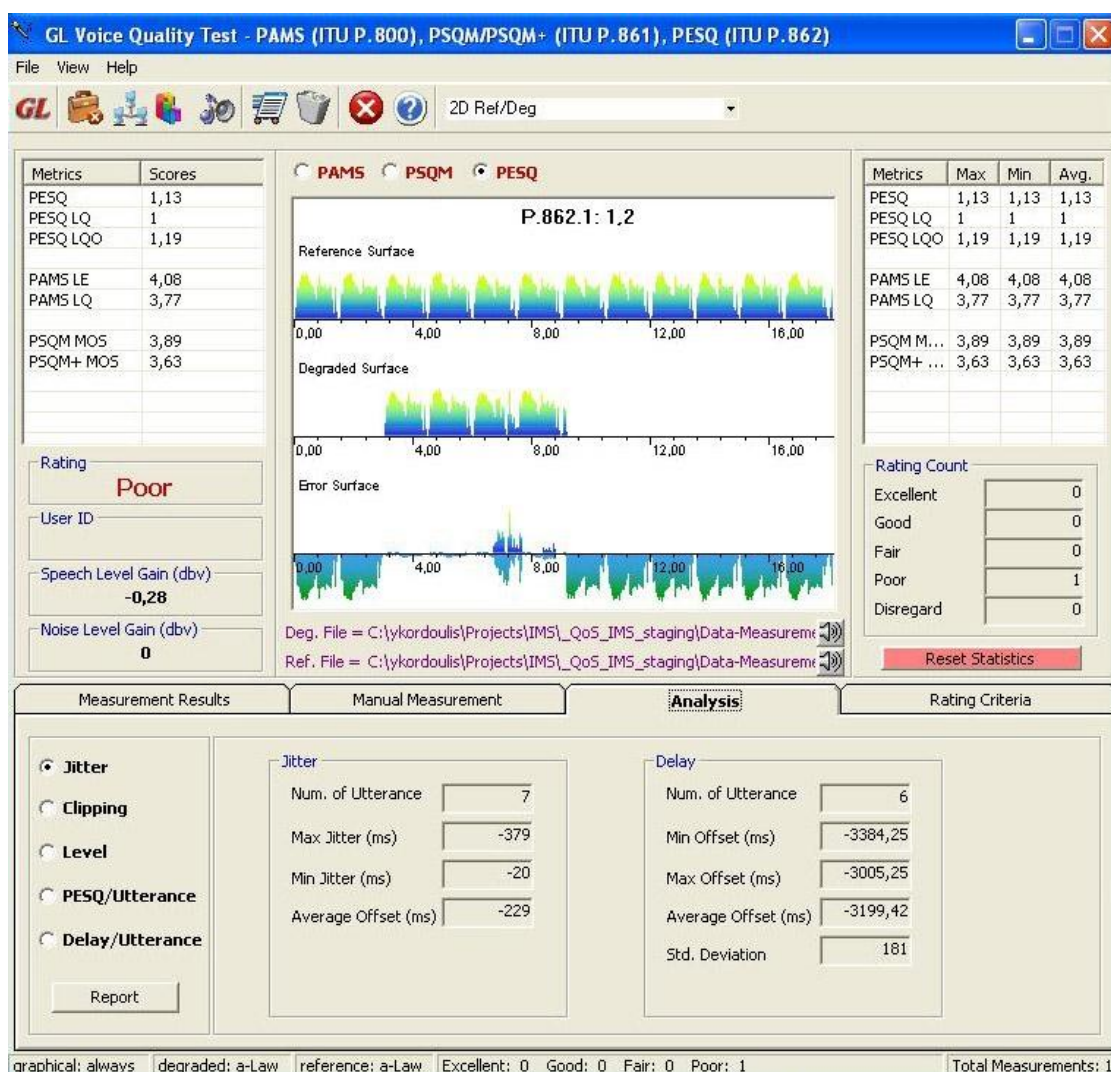
6.1.2 Γεννήτρια κλήσεων του δικτύου IP

Για την φόρτιση της γραμμής E1 2Mbps χρησιμοποιείται η γεννήτρια κλήσεων PacketGen (version 3.0g) της εταιρείας GL Communications Inc. Είναι ένα εργαλείο λογισμικού το οποίο έχει τη δυνατότητα μαζικών VoIP κλήσεων σηματοδοσίας SIP (SIP Bulk Call Generation) και αποστολής RTP κίνησης φωνής (RTP Traffic Generation).

Το interface της γεννήτριας είναι Ethernet και η γεννήτρια καταχωρείται (registration) στην πλατφόρμα του IMS ώστε να διαθέτει τηλεφωνικό αριθμό κλήσης.

Χρησιμοποιείται επίσης συσκευή ATA της εταιρείας Linksys (SPA 1001) για δημιουργία της υπό μέτρησης τηλεφωνικής κλήσης. Το interface της συσκευής είναι Ethernet.

Στο σημείο τερματισμού των τηλεφωνικών κλήσεων VoIP υπάρχει αυτόματο σύστημα απάντησης τηλεφωνικών κλήσεων, ενσωματωμένο σε IP-PBX τύπου Asterisk, με δυνατότητες αυτόματης απάντησης μέχρι και 10 ταυτόχρονων τηλεφωνικών κλήσεων και αποστολής/λήψης δειγμάτων φωνής σε κάθε μια από αυτές. Η αποστολή και λήψη των δειγμάτων φωνής τερματίζεται μετά από χρόνο 10 περίπου δευτερολέπτων αφού μεταδοθεί το προς μέτρηση δείγμα στο δίκτυο. Το interface του συστήματος είναι Ethernet.



Σχήμα 31: Το γραφικό περιβάλλον VQT της γεννήτριας κλήσεων PacketGen

Τέλος υπάρχει το λογισμικό μέτρησης της ποιότητας δειγμάτων φωνής Voice Quality Test (version 4.3.9) επίσης της εταιρείας GL Communications Inc.. Η εφαρμογή αυτή παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης των δύο δειγμάτων φωνής της υπό μέτρησης τηλεφωνικής κλήσης (στο σημείο έναρξής της και στο σημείο τερματισμού της αντίστοιχα) και εξαγωγής των σχετικών δεικτών ποιότητας.

6.2 Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας

6.2.1 Αντικείμενο των μετρήσεων

Σκοπός είναι η μέτρηση της ποιότητας ομιλίας καθώς και των παραμέτρων της σύνδεσης που την επηρεάζουν στις περιπτώσεις που τα δεδομένα της ομιλίας μεταδίδονται σε δίκτυα με αρχιτεκτονικές PSTN και VoIP.

Σε πρώτη φάση γίνονται μετρήσεις με σκοπό να καθοριστεί το επίπεδο της ποιότητας ομιλίας στο υπό εξέταση PSTN δίκτυο που θα αποτελέσει και το σημείο αναφοράς.

Σε δεύτερη φάση ακολουθεί η εισαγωγή της τεχνολογίας VoIP και γίνονται μετρήσεις της ποιότητας ομιλίας όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης του ίδιου PSTN δικτύου. Η εισαγωγή της τεχνολογίας VoIP και οι επιπτώσεις που αυτή έχει στην ποιότητα ομιλίας εξετάζεται με δύο τοπολογίες.

Στην πρώτη περίπτωση εισάγεται μια ζεύξη που συνδέει δυο τμήματα του δικτύου PSTN από όπου περνούν οι δοκιμαστικές κλήσεις. Στη ζεύξη αυτή για τη μετάδοση της ομιλίας χρησιμοποιείται μεταγωγή πακέτων με την τεχνική Voice over IP. Η γραμμή αυτή δεν δέχεται άλλη κίνηση παρά μόνο τις δοκιμαστικές κλήσεις για τις ανάγκες της μέτρησης.

Στη δεύτερη περίπτωση το δίκτυο αναφοράς PSTN συνδέεται με το δίκτυο IP κορμού το οποίο επίσης βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία. Οι δοκιμαστικές κλήσεις ξεκινούν από άκρο του δικτύου PSTN, μετατρέπονται σε πακέτα για να μεταδοθούν στο δίκτυο IP και κατόπιν μετατρέπονται και πάλι σε κλήσεις μεταγωγής κυκλώματος TDM για να καταλήξουν μέσω του δικτύου PSTN στο τερματικό άκρο που γίνονται οι μετρήσεις. Η ζεύξη της προηγούμενης περίπτωσης παραμένει αλλά αποτελεί τώρα τμήμα του δικτύου IP.

Και οι δύο περιπτώσεις εξετάζονται με κωδικοποιητή στα άκρα της γραμμής είτε τον G.711 όπως στο PSTN, είτε τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο G.729.

Στην τρίτη φάση μελετάται η ποιότητα της ομιλίας όταν οι δοκιμαστικές κλήσεις περνούν από μια γραμμή του δικτύου IP το φορτίο της οποίας αυξάνεται σταδιακά μέχρι το σημείο υπερφόρτωσης. Η γραμμή αυτή απομονώνεται σε περιβάλλον εργαστηρίου και δεν συμμετέχει στις δρομολογήσεις του δικτύου. Το φορτίο της αυξάνεται με ελεγχόμενο τρόπο και σε διαδοχικά επίπεδα φόρτισης της γραμμής πραγματοποιούνται μετρήσεις της ποιότητας ομιλίας στο τερματικό άκρο του δικτύου PSTN που καταλήγουν οι δοκιμαστικές κλήσεις.

Στην τελευταία φάση επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις φόρτισης αλλά εντός του δικτύου IP μέσω μετρητικών διατάξεων στα άκρα της γραμμής για να υπάρξει ολοκληρωμένη εικόνα και για τις δύο τεχνολογίες.

6.2.2 Περιγραφή των μετρήσεων

Οι κλήσεις εκκινούν από τερματικό άκρο του δικτύου PSTN όπου βρίσκεται η γεννήτρια κλήσεων. Η γεννήτρια είναι προγραμματισμένη να παράγει κλήσεις ανά 90 sec. Η μέτρηση γίνεται σε ένα άλλο τερματικό άκρο του δικτύου PSTN όπου βρίσκεται η δεύτερη γεννήτρια που δέχεται τις κλήσεις. Με την ολοκλήρωση κάθε κλήσης η γεννήτρια πραγματοποιεί τη μέτρηση. Η μέτρηση γίνεται με βάση το E-model και οι δείκτες ποιότητας που προκύπτουν είναι :

- MOS
- R-Factor
- PESQ
- PSQM

Παράλληλα πραγματοποιούνται και μετρήσεις στο κανάλι της φωνής (voice path) όπου για κάθε κλήση καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων :

- Καθυστέρηση μιας κατεύθυνσης (1-way delay)
- Καθυστέρηση διπλής κατεύθυνσης (Round trip delay)
- Απώλεια πακέτων (Dropout count)
- Επίπεδο ισχύος του σήματος (Received Level)
- Λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio)

6.2.3 Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας στα δίκτυα PSTN και VoIP

6.2.3.1 Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας σε δίκτυο PSTN



Σχήμα 32 : Η τοπολογία του δικτύου PSTN

Στο αυτό το πρώτο στάδιο των μετρήσεων πραγματοποιούνται μετρήσεις ποιότητας ομιλίας σε δίκτυο PSTN που καλύπτει γεωγραφικά όλη την Ελλάδα και το οποίο βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε δύο τερματικά σημεία του δικτύου τα οποία εξυπηρετούνται από διαφορετικά τηλεφωνικά κέντρα (exchanges). Η διαδικασία διαρκεί 12 ώρες και συλλέγονται 480 δείγματα.

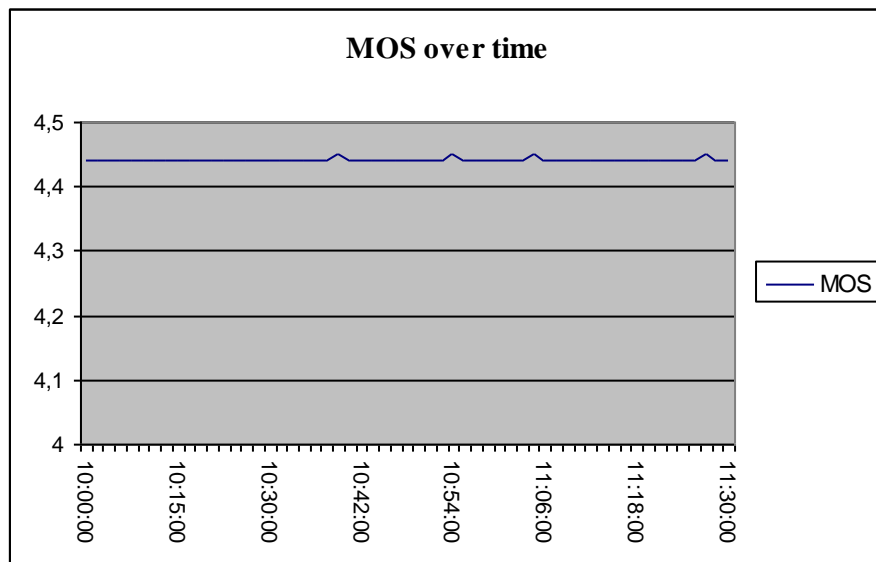
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών θα τις θεωρήσουμε ως σημείο αναφοράς για τις περαιτέρω μετρήσεις καθώς αντιπροσωπεύουν την ποιότητα ομιλίας που απολαμβάνουν οι χρήστες του συγκεκριμένου δικτύου. Με βάση αυτή τους την αντίληψη οι χρήστες θα κρίνουν και τη μεταβολή της ποιότητας που θα προκύψει όταν η τεχνολογία VoIP ενσωματωθεί στο TDM τηλεφωνικό δίκτυο.

Μέγεθος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος
MOS	4,44	4,45	0,002	4.44
R-Factor	94,63	95,31	0,083	95.08
PESQ	4,34	4,35	0,002	4.34
PSQM	0,54	0,57	0,005	0.55
1-way Delay	4	13	1,567	8.79
Round Trip Delay	8	26	3,068	18.1
Drop Count	0	0	0	0

Received Signal Level	-19	-18	0,172	-18.03
SNR	34	39	0,743	38.83

Πίνακας 14 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης του δικτύου PSTN

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση του MOS στη διάρκεια του χρόνου.

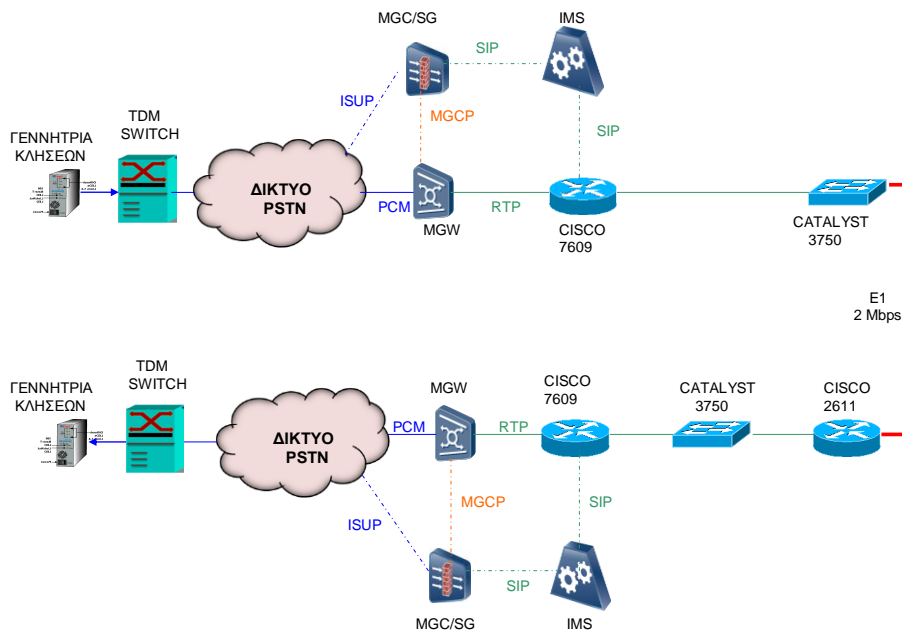


Σχήμα 33 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το συγκεκριμένο τηλεφωνικό δίκτυο (με την προϋπόθεση της συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, του φορτίου των κέντρων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κλπ.) δείχνουν ποιότητα ομιλίας που ανήκει στο ανώτατο επίπεδο σύμφωνα με τις συστάσεις της ITU. Πιο συγκεκριμένα, η ποιότητα μετάδοσης ομιλίας με βάση το μέσο όρο της μέτρησης του δείκτη R όπως προκύπτει από την εφαρμογή του E-model είναι «Ανώτατη» (Best) και ο βαθμός ικανοποίησης χρήστη είναι «Πολύ Ικανοποιημένος» (Very Satisfied).

6.2.3.2 Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας υβριδικού δικτύου PSTN -VoIP

Γραμμή VoIP σε δίκτυο PSTN



Σχήμα 34 : Η τοπολογία δικτύου PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP

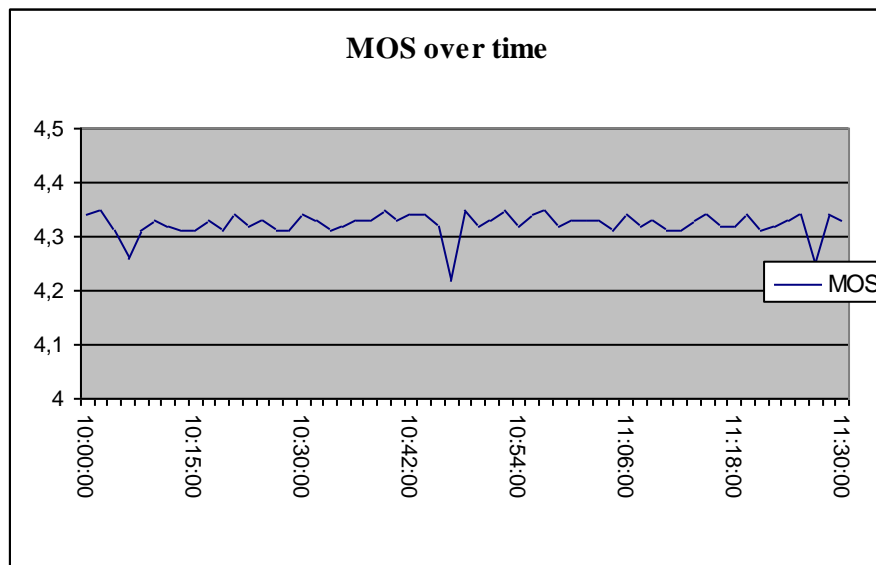
Σε αυτό το στάδιο γίνονται μετρήσεις ποιότητας της ομιλίας στην περίπτωση που μια γραμμή VoIP διασυνδέει δύο τμήματα του ίδιου PSTN δικτύου. Η γραμμή δεν μεταφέρει άλλη κίνηση παρά μονον τις κλήσεις της δοκιμής. Οι δοκιμαστικές κλήσεις εκκινούν από ένα τερματικό άκρο του δικτύου PSTN. Η διαδρομή μιας κλήσης στο PSTN παραμένει η ίδια με αυτήν των κλήσεων αναφοράς. Σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διαδρομής η κλήση μετατρέπεται σε VoIP, διασχίζει τη γραμμή E1 χωρητικότητας 2 Mbps και κατόπιν συναντά και πάλι το δίκτυο PSTN. Τότε μετατρέπεται και πάλι σε κλήση TDM για να φθάσει στο τερματικό σημείο του δικτύου PSTN όπου πραγματοποιείται η μέτρηση. Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται στο VoIP είναι ο γνωστός G.711 του PSTN.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των βασικών δεικτών ποιότητας όπως προκύπτουν με βάση το E-model καθώς και των παραμέτρων της σύνδεσης στο διάστημα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Μέγεθος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος
MOS	4,19	4,36	0,017	4.33
R-Factor	84,81	90,94	0,641	89.51
PESQ	4,09	4,26	0,017	4.23
PSQM	0,78	1,24	0,048	0.89
1-way Delay	145	184	6,314	170.29
Round Trip Delay	291	369	12,632	341.04
Drop Count	0	0	0	0
Received Signal Level	-17	-17	0	-17
SNR	22	39	2,381	36.83

Πίνακας 15 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση του MOS στη διάρκεια του χρόνου.

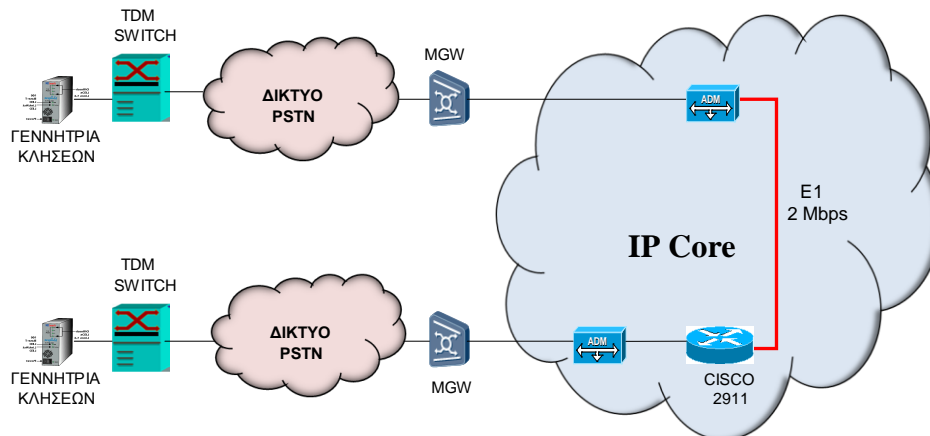


Σχήμα 35 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP

Από τις μετρήσεις είναι σαφές ότι η ποιότητα ομιλίας κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς του δικτύου PSTN. Σύμφωνα με τους αντίστοιχους πίνακες της ITU η ποιότητα μετάδοσης ομιλίας με βάση τον δείκτη R του E-model οριακά πέφτει από «Ανώτατη» (Best) σε «Υψηλή» (High) και ο βαθμός ικανοποίησης του χρήστη πέφτει από «Πολύ Ικανοποιημένος» (Very Satisfied) σε «Ικανοποιημένος» (Satisfied). Η διακύμανση της ποιότητας στη διάρκεια του χρόνου όπως αποτυπώνεται από το MOS είναι επίσης μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν του PSTN που είναι σχεδόν μηδενική. Η μεγαλύτερη διαφορά όμως σε σχέση με τα αποτελέσματα του δικτύου PSTN είναι στον τομέα της καθυστέρησης όπου εδώ είναι σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερη. Πιθανές αιτίες δεν μπορεί παρά να είναι η καθυστέρηση που εισάγουν τα στοιχεία του δικτύου IP και η διαδικασία πακετοποίησης της ομιλίας. Η καθυστέρηση από τον κωδικοποιητή -λόγω του ότι είναι ο ίδιος με το PSTN- δεν δικαιολογεί καθυστερήσεις τέτοιας τάξης μεγέθους.

Σύνδεση του δικτύου PSTN με δίκτυο VoIP

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιούνται μετρήσεις ποιότητας ομιλίας όταν το δίκτυο PSTN συνδέεται με το IP δίκτυο κορμού (IP core). Η γραμμή E1 που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο στάδιο για την διασύνδεση τμημάτων του PSTN αποτελεί εδώ τμήμα του IP δικτύου. Οι δοκιμαστικές κλήσεις εκκινούν από ένα τερματικό άκρο του PSTN και διασχίζουν τόσο το δίκτυο PSTN όσο και το δίκτυο IP που ανήκουν στον ίδιο τηλεπικοινωνιακό πάροχο τα οποία βρίσκονται σε πραγματική λειτουργία. Οι κλήσεις τελικά καταλήγουν σε ένα άλλο τερματικό άκρο του PSTN όπου πραγματοποιείται η μέτρηση.



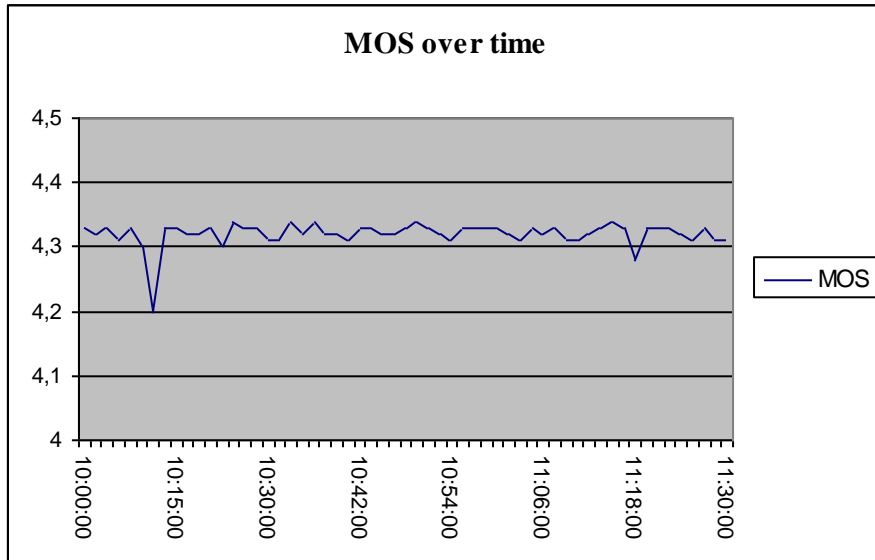
Σχήμα 36 : Η τοπολογία δικτύου PSTN συνδεδεμένου με δίκτυο VoIP

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των βασικών δεικτών ποιότητας όπως προκύπτουν με βάση το E-model καθώς και των παραμέτρων της σύνδεσης στο διάστημα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Μέγεθος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος
MOS	4,2	4,36	0,165	4.33
R-Factor	84,96	90,78	0,622	89.6
PESQ	4,1	4,26	0,165	4.23
PSQM	0,8	1,23	0,047	0.88
1-way Delay	149	182	3,41	164.26
Round Trip Delay	299	364	6,813	329.02
Drop Count	0	1	0,103	0.01
Received Signal Level	-22	-17	0,316	-18.04
SNR	20	34	1,721	29.82

Πίνακας 16 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP

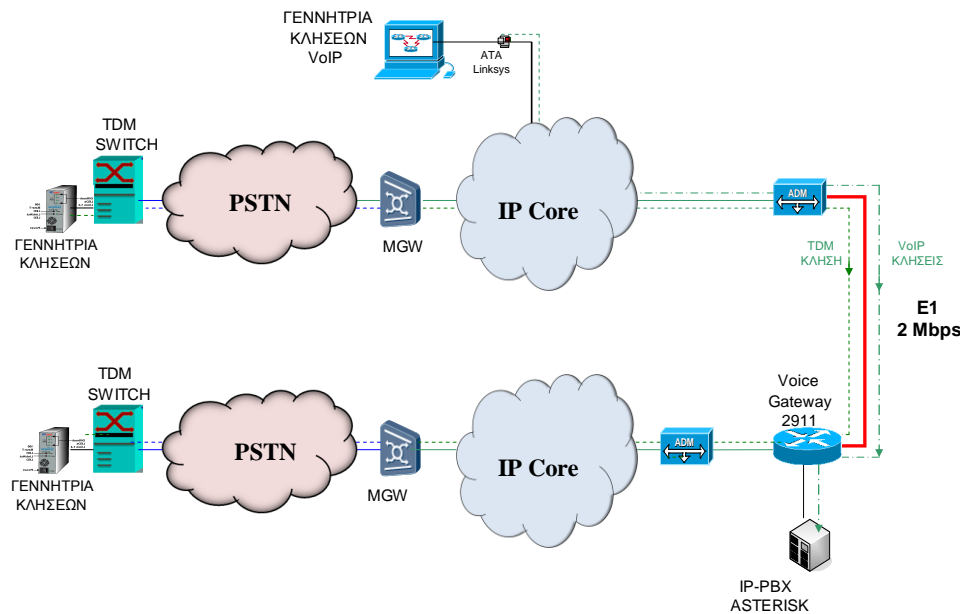
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση του MOS στη διάρκεια του χρόνου.



Σχήμα 37 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν προκύπτει διαφορά στην ποιότητα ομιλίας μεταξύ των δύο τελευταίων περιπτώσεων πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το IP δίκτυο που εμπλέκεται στην διαδρομή των κλήσεων στη δεύτερη περίπτωση δεν επηρεάζει τις βασικές παραμέτρους της σύνδεσης.

6.2.4 Μελέτη συμπεριφοράς ως προς το φορτίο μιας γραμμής VoIP



Σχήμα 38 : Τοπολογία δικτύου για τη φόρτιση γραμμής VoIP

Οι μετρήσεις έχουν σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς - ως προς την ποιότητα ομιλίας - μιας γραμμής VoIP καθώς δέχεται προοδευτικά όλο και μεγαλύτερο φορτίο. Η γραμμή αποτελεί μέρος του δικτύου κορμού IP το οποίο βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία και είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο PSTN στα τερματικά άκρα του οποίου γίνονται οι μετρήσεις. Πρόκειται για γραμμή χαλκού E1 χωρητικότητας 2 Mbps όπου το πρωτόκολλο του επιπέδου ζεύξης είναι το HDLC.

Η γραμμή απομονώνεται για τους σκοπούς του πειράματος σε ελεγχόμενο περιβάλλον εργαστηρίου ώστε να μην δέχεται κίνηση από το υπόλοιπο δίκτυο. Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται είναι ο G.711 του δικτύου PSTN. Η γραμμή δέχεται κλήσεις VoIP που εκκινούν από το δίκτυο IP όπου βρίσκεται η γεννήτρια κλήσεων *PacketGen*. Οι κλήσεις αυτές παραμένουν ενεργές σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων με την αποστολή RTP πληροφορίας. Καθώς ο αριθμός των κλήσεων αυξάνεται, σταδιακά αυξάνεται αντίστοιχα και το εύρος ζώνης της γραμμής που καταλαμβάνεται. Σε κάποια καθορισμένα από πριν επίπεδα κατάληψης της γραμμής (11 επίπεδα), εκτελούνται οι μετρήσεις ποιότητας ομιλίας με τη δημιουργία δοκιμαστικών κλήσεων τόσο στο δίκτυο PSTN με τη διαδικασία που έχει ήδη περιγραφεί, όσο και εντός του δικτύου IP στα άκρα της γραμμής με χρήση των αντίστοιχων μετρητικών διατάξεων.

Υπολογισμός του απαιτούμενου εύρους ζώνης μιας κλήσης VoIP

Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για μια απλή κλήση VoIP στη μια κατεύθυνση με χρήση του κωδικοποιητή G.711 είναι 64 Kbps. Καθώς ο κωδικοποιητής δειγματοληπτεί 20ms φωνής ανά πακέτο, άρα χρειάζονται να μεταδοθούν 50 τέτοια πακέτα ανά δευτερόλεπτο. Κάθε πακέτο περιέχει 160 δείγματα φωνής που σημαίνει 8000 δείγματα το δευτερόλεπτο. Κάθε πακέτο στέλνεται σε ένα πλαίσιο HDLC. Σε κάθε πακέτο πληροφορίας των 160 bytes προστίθενται οι επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων των υπόλοιπων επιπέδων. Άρα έχουμε :

- RTP (12 bytes)
- UDP (8 bytes)
- IP (20 bytes)
- HDLC (7 bytes)

που μας δίνει ένα συνολικό μήκος πακέτου 207 bytes.

Επειδή αυτό μεταδίδεται 50 φορές το δευτερόλεπτο άρα το απαιτούμενο εύρος ζώνης για μια κλήση VoIP είναι 82.8 Kbps.

6.2.4.1 Μετρήσεις στο δίκτυο PSTN

Οι μετρήσεις στο δίκτυο PSTN γίνονται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Από τη μια γεννήτρια ξεκινούν κλήσεις οι οποίες διασχίζουν τα δίκτυα PSTN και IP, περνούν από τη γραμμή και καταλήγουν στο άλλο άκρο του PSTN δικτύου όπου βρίσκεται η δεύτερη γεννήτρια που πραγματοποιεί τη μέτρηση.

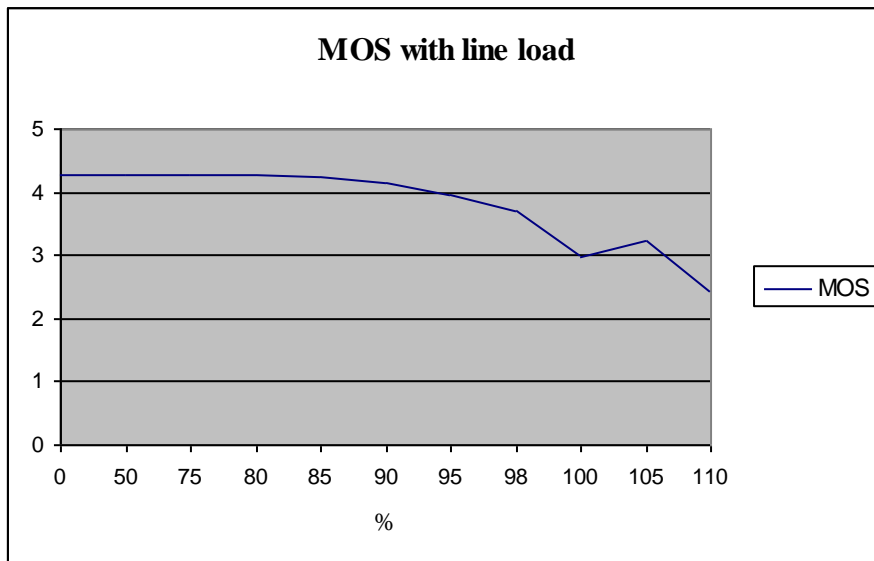
Η πρώτη γεννήτρια είναι προγραμματισμένη να παράγει κλήσεις ανά 90 sec. Η διαδικασία διαρκεί 1,5 ώρες από τις 10:00-11:30 και συλλέγονται 60 δείγματα για κάθε επίπεδο φόρτισης.

Οι μετρήσεις εστιάζουν σε δύο διαστάσεις. Στην πρώτη διάσταση παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων όρων των δεικτών ποιότητας ομιλίας και των παραμέτρων της σύνδεσης με την αύξηση του φορτίου της γραμμής. Σε μια δεύτερη διάσταση παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση τους σε κάθε επίπεδο φορτίου της γραμμής.

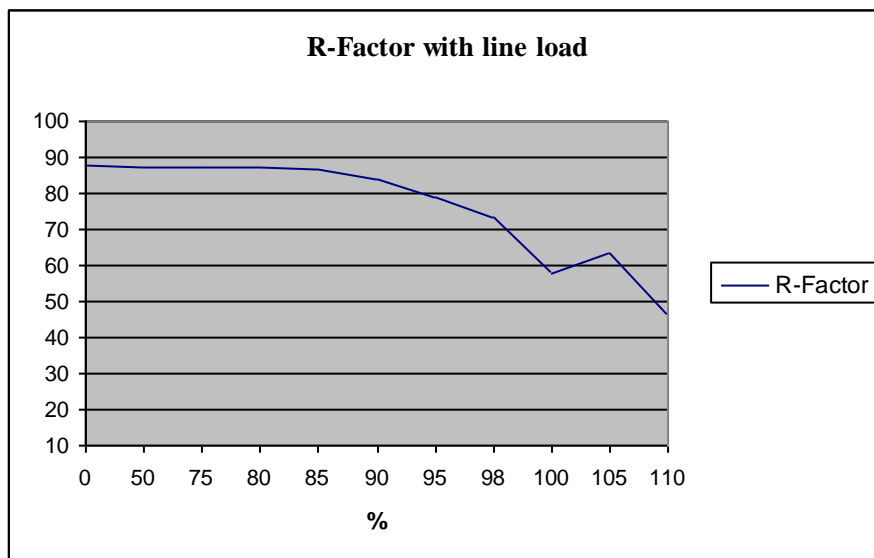
Διακύμανση των δεικτών ποιότητας με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Η διακύμανση της ποιότητας της ομιλίας καθώς μεταβάλλεται το φορτίο της γραμμής φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Παρουσιάζεται ο δείκτης R όπως προκύπτει από την

εφαρμογή του E-model και ο δείκτης MOS για την εκτίμηση της ποιότητας. Οι τιμές των δεικτών που παρουσιάζονται προκύπτουν από τους μέσους όρους των 60 δειγμάτων της κάθε μέτρησης.

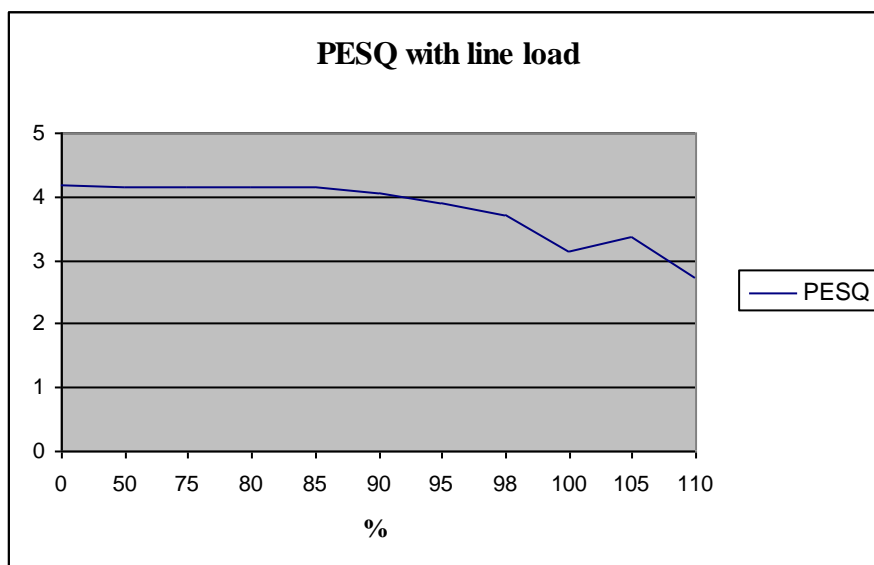


Σχήμα 39 : Η μεταβολή του MOS σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP



Σχήμα 40 : Η μεταβολή του δείκτη R σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Για την σύγκριση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο δίκτυο IP που περιγράφονται σε επόμενο στάδιο παρατίθεται και η μεταβολή του δείκτη ποιότητας PESQ ο οποίος έχει υπολογιστεί μέσω του E-model με την κατάλληλη συσχέτιση.



Σχήμα 41 : Η μεταβολή του PESQ σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Παρατηρούμε ότι η ποιότητα της ομιλίας παραμένει πρακτικά αμετάβλητη μέχρι το φορτίο της γραμμής να φθάσει περίπου το 85% της χωρητικότητας της. Από το σημείο αυτό και μετά έχουμε μια βαθμιαία πτώση της ποιότητας που είναι περίπου γραμμική μέχρι το ποσοστό κατάληψης να φθάσει το 100%. Όταν το εύρος ζώνης των κλήσεων που είναι ενεργές στη γραμμή υπερβεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης των 2 Mbps και φθάσει περίπου το 105%, παρατηρείται μια μικρή βελτίωση κατά μέσο όρο στην ποιότητα ομιλίας των κλήσεων που πραγματοποιούνται σε αυτό επίπεδο φόρτισης. Από το σημείο αυτό και μετά όμως, περαιτέρω φόρτιση της γραμμής (μέχρι ένα ποσοστό λίγο πάνω από 110%) οδηγεί και πάλι σε χειροτέρευση της ποιότητας ομιλίας των πραγματοποιούμενων κλήσεων.

Η ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας με βάση τις προδιαγραφές που θέτει το E-model παραμένει «Υψηλή» (High) μέχρι και το επίπεδο φόρτισης 90% και ο αντίστοιχος βαθμός ικανοποίησης των χρηστών παραμένει «Ικανοποιημένος» (Satisfied). Από το επίπεδο φόρτισης της γραμμής 90% έως 98% η ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας θεωρείται «Μέση» (Medium) και ο αντίστοιχος βαθμός ικανοποίησης των χρηστών είναι «Μερικοί Χρήστες Είναι Δυσανεστημένοι» (Some users dissatisfied). Όταν το σύνολο του διαθέσιμου εύρους ζώνης της γραμμής έχει καταληφθεί (100%) η ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας γίνεται πλέον «Κακή» (Poor) και ο αντίστοιχος βαθμός ικανοποίησης των χρηστών «Σχεδόν Όλοι οι Χρήστες Είναι Δυσανεστημένοι» (Nearly all users dissatisfied). Σε επίπεδο φόρτισης περίπου 105% όπως αναφέρθηκε πριν παρατηρείται μια βελτίωση κατά μέσο όρο της ποιότητας ομιλίας και έχουμε ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας «Χαμηλή» (Low) και βαθμό ικανοποίησης των χρηστών που χαρακτηρίζεται «Πολλοί Χρήστες Είναι Δυσανεστημένοι». (Many users dissatisfied). Σε ακόμα μεγαλύτερα επίπεδα φόρτισης ο δείκτης R του E-model πέφτει κάτω από 50 όπου σύμφωνα με την ITU συνδέσεις τέτοιας ποιότητας πρέπει να αποφεύγονται (Not Recommended).

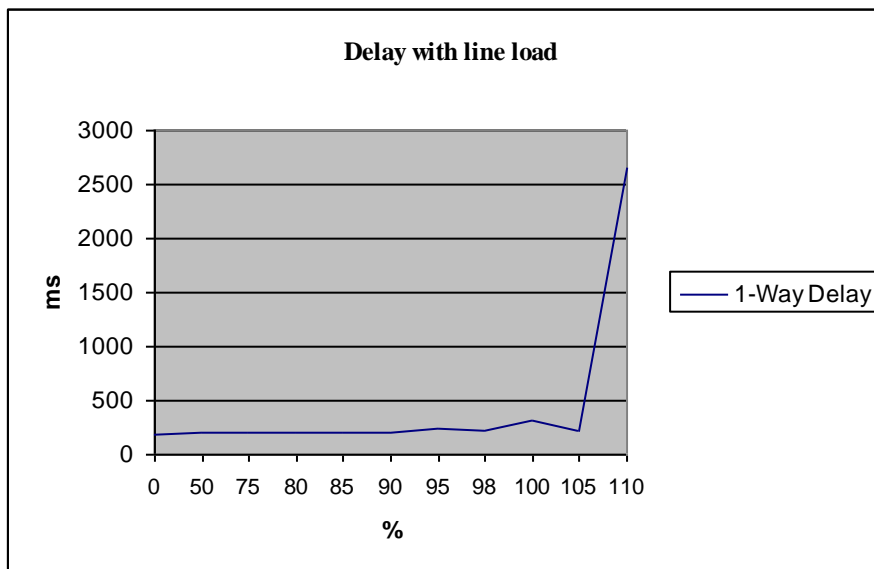
Διακύμανση των βασικών παραμέτρων της σύνδεσης με το φορτίο

Οι τιμές (μ.ο.) των βασικών παραμέτρων της σύνδεσης καθώς μεταβάλλεται το φορτίο της γραμμής φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Load (%)	1-way delay (ms)	Drop Count	SNR
0	191,38	0	35,6
50	194,7	0	35,53
75	195,33	0	35,93
80	195,07	0	36,67
85	197,86	0,07	37,52
90	206,77	1,57	36,9
95	240,88	4,4	34,97
98	223,62	9,07	34,28
100	310,6	22,03	29,3
105	231,03	13,24	29,1
110	2664,25	34,58	27,98

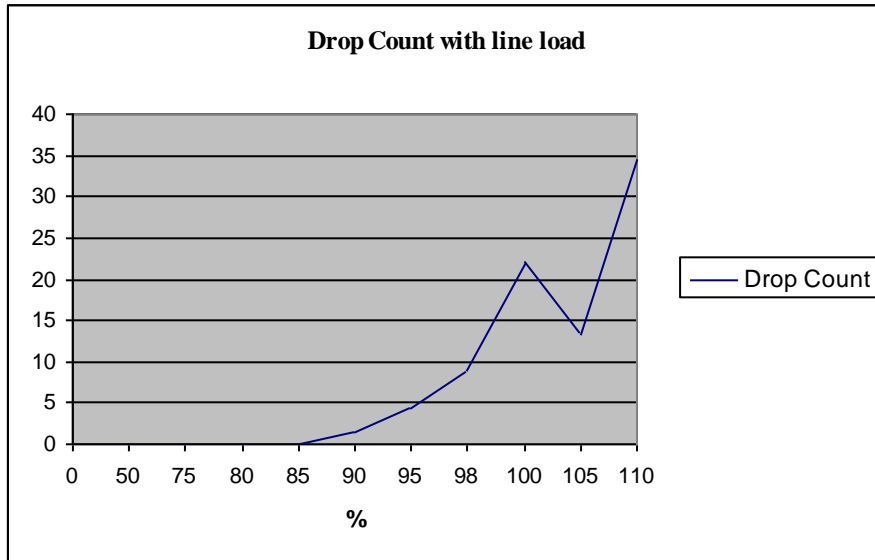
Πίνακας 17 : Οι τιμές των παραμέτρων της σύνδεσης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Ακολουθούν αναλυτικότερα τα διαγράμματα μεταβολής τους :



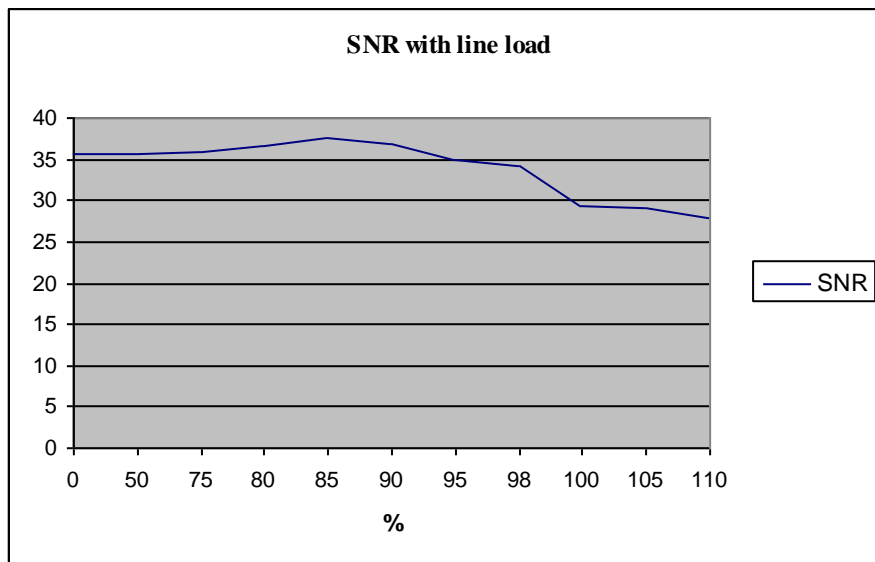
Σχήμα 42 : Η μεταβολή της καθυστέρησης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Παρατηρούμε ότι καθυστέρηση μέχρι και φορτίο γραμμής 85% είναι πρακτικά ίδια με αυτήν που έχει μια κλήση όταν η γραμμή είναι ακόμα άδεια. Σε μεγαλύτερα φορτία και μέχρι το επίπεδο του 98% όπου η γραμμή είναι σχεδόν πλήρως κατειλημμένη, η καθυστέρηση παρουσιάζει μια αύξηση της τάξης του 10-15%. Στο επίπεδο πλήρους κατάληψης της γραμμής (100%) έχουμε μια απότομη αύξηση της καθυστέρησης της τάξης του 50%. Η καθυστέρηση μειώνεται στο επίπεδο φορτίου 105% για να έχουμε μια πολύ μεγάλη πλέον αύξηση (μιας τάξης μεγέθους) μετά τα 110%.



Σχήμα 43 : Η μεταβολή της απώλειας πακέτων σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Οι απώλειες πακέτων ουσιαστικά παρουσιάζονται όταν το επίπεδο φόρτισης φθάσει το 95%. Μέχρι τότε έχουμε μόνο κάποια τυχαία απώλεια πακέτου σε μεμονωμένες κλήσεις που μετακινεί το μέσο όρο λίγο πάνω από το μηδέν αλλά μπορούν να αποδοθούν σε τυχαία σφάλματα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Από αυτό το επίπεδο και μετά παρατηρείται αύξηση της απώλειας πακέτων όπου η μεταβολή είναι παρόμοια με αυτήν της καθυστέρησης.

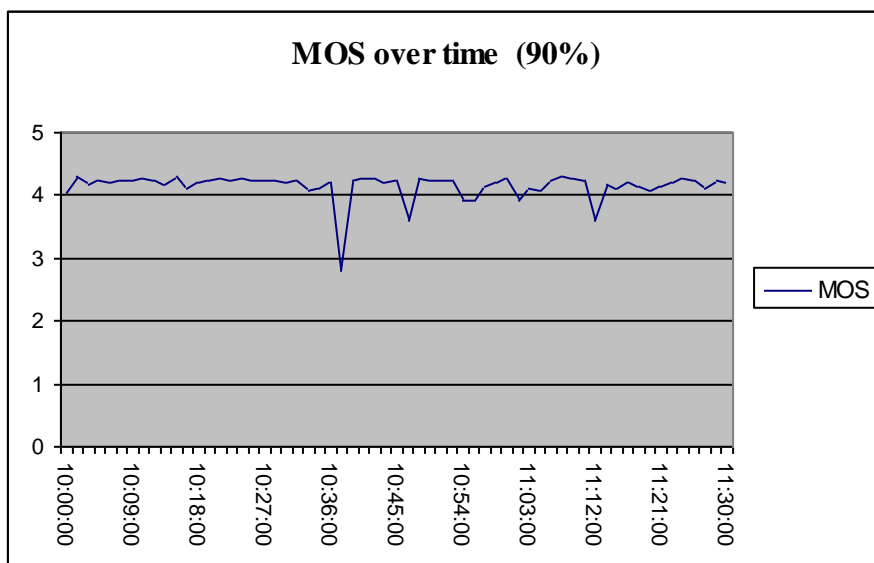
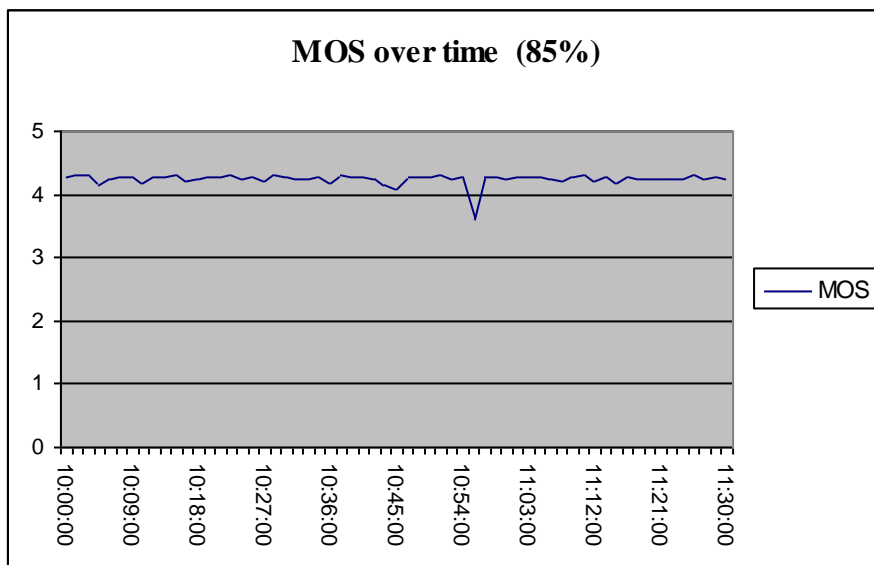


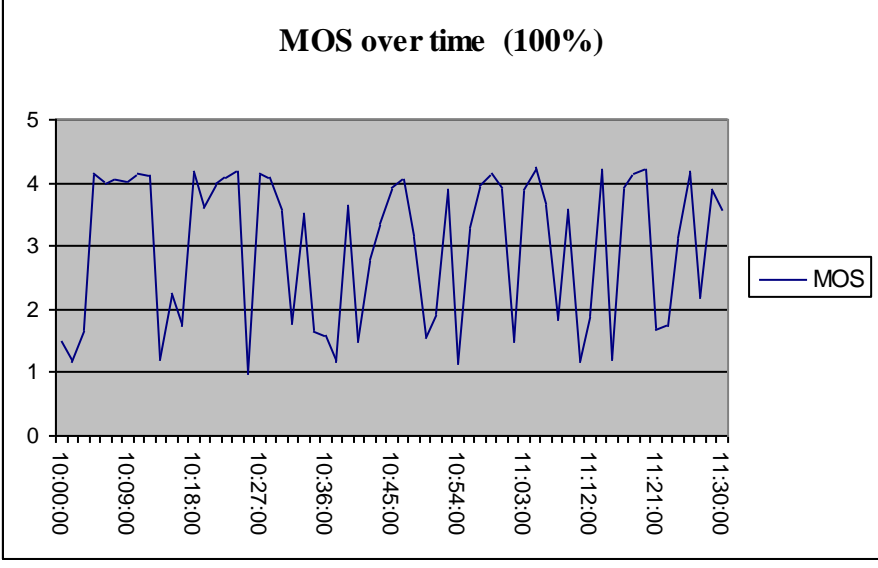
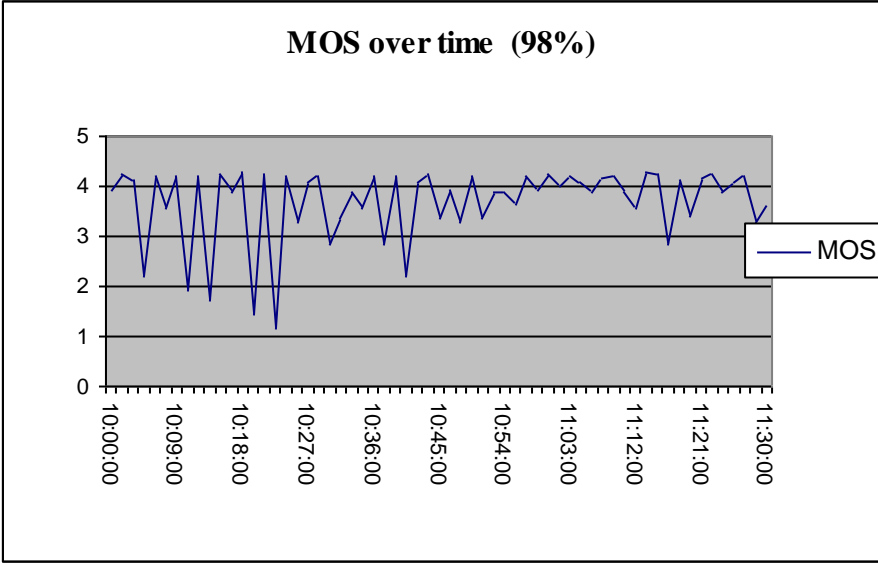
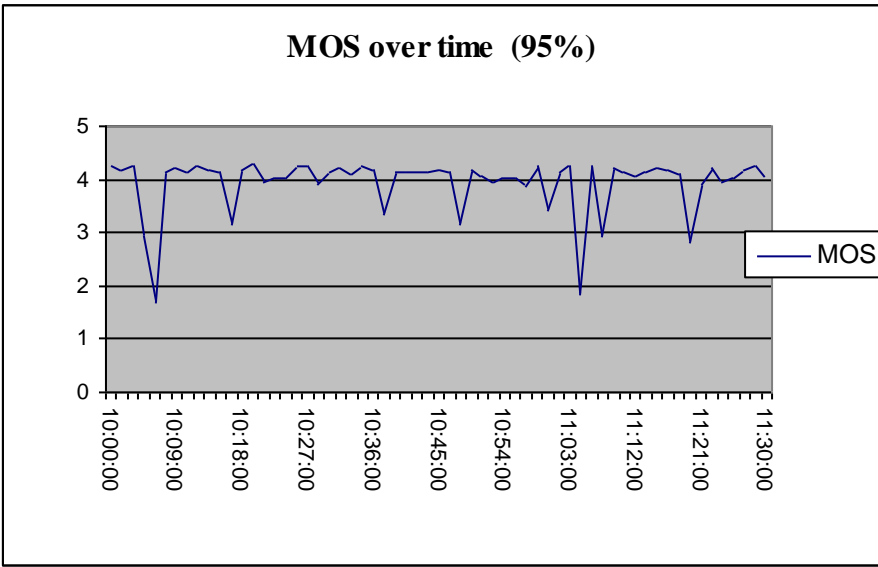
Σχήμα 44 : Η μεταβολή του SNR σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

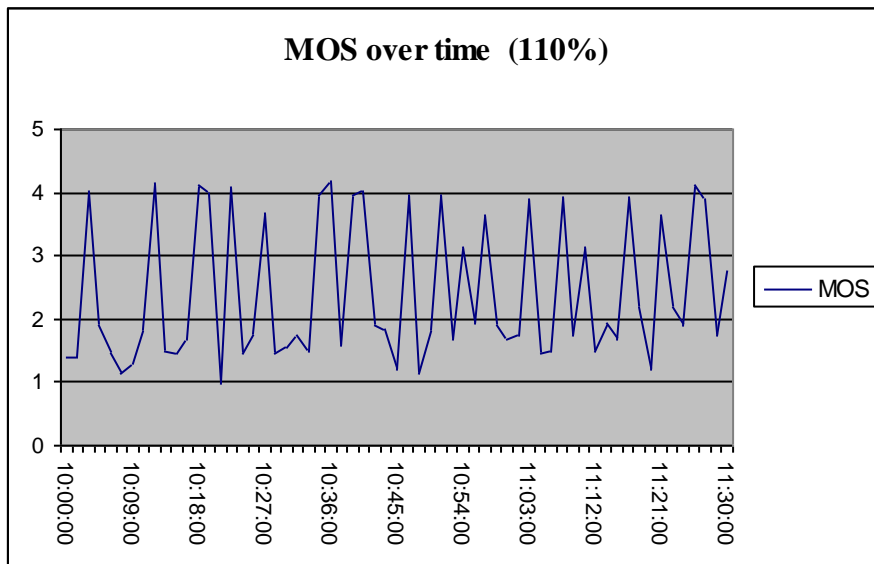
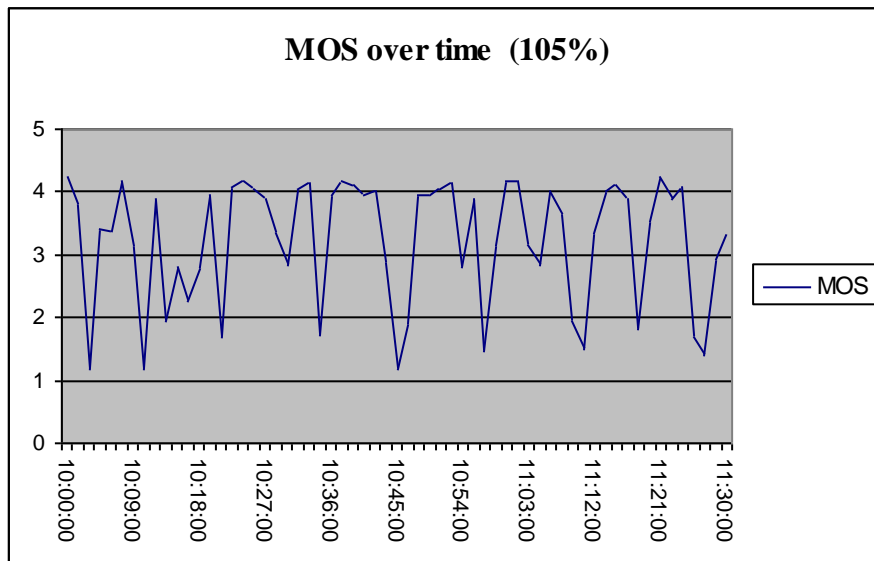
Η μέση τιμή του Signal-to-Noise Ratio της κλήσης είναι περίπου σταθερή μέχρι την σχεδόν πλήρη κατάληψη της γραμμής (98%) και κυμαίνεται στην περιοχή του 35. Στο ποσοστό κατάληψης 100% παρατηρείται μια απότομη πτώση στα επίπεδα των 28-29 που παραμένει μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Να αναφέρουμε εδώ ότι η ITU για την φωνητική τηλεφωνία συστήνει για το SNR τιμές μεγαλύτερες από 35.

Διακύμανση της ποιότητας μιας γραμμής VoIP στο χρόνο

Ακολουθούν διαδοχικά τα διαγράμματα με τη χρονική διακύμανση της ποιότητας ομιλίας στην κλίμακα MOS. Τα διαγράμματα ξεκινούν από το επίπεδο φόρτισης της γραμμής 85% όπου και αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτες αξιόλογες μεταβολές στις παραμέτρους της σύνδεσης όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα.







Σχήμα 45 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

Από τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι η διακύμανση της ποιότητας ομιλίας μέσα στο χρόνο των 90 λεπτών που διαρκεί η μέτρηση, αυξάνει σταδιακά καθώς αυξάνει το επίπεδο φόρτισης της γραμμής. Το φαινόμενο αρχίζει να γίνεται έντονο όταν το φορτίο της γραμμής πλησιάζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης (>98%). Αυτό που παρατηρείται δηλαδή είναι ότι η ποιότητα ομιλίας δεν πέφτει το ίδιο για όλες οι κλήσεις αλλά αντίθετα υπάρχουν κλήσεις με σχετικά καλή ποιότητα (MOS > 4) ενώ στο ίδιο διάστημα υπάρχουν κλήσεις που η ποιότητα τους δεν θεωρείται αποδεκτή (MOS < 2).

Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί το γεγονός ότι υπάρχουν κλήσεις με καλή ποιότητα ομιλίας (MOS > 4) ακόμα και όταν το εύρος ζώνης των κλήσεων που ήδη χρησιμοποιούν τη γραμμή είναι μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα της γραμμής (φορτίο >100%). Αυτό έρχεται σε αντιδιαστολή με τα δίκτυα TDM όπου αν η γραμμή είναι πλήρης η κλήση απορρίπτεται.

6.2.4.2 Μετρήσεις στο δίκτυο VoIP

Οι μετρήσεις στο δίκτυο VoIP γίνονται στα άκρα της ίδιας γραμμής E1 που χρησιμοποιήθηκε και για τις μετρήσεις φόρτισης από το δίκτυο PSTN. Μια κλήση VoIP

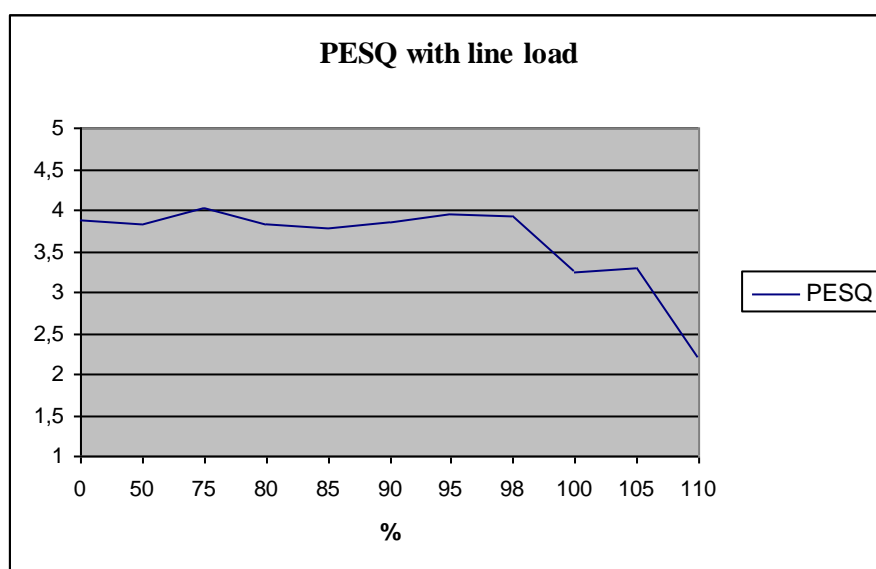
ξεκινάει από τη γεννήτρια κλήσεων *PacketGen* και έχει δρομολογηθεί να καταλήγει σε ένα PBX στο άλλο άκρο της γραμμής. Η υπό μέτρηση κλήση «συλλαμβάνεται» (capture) στο σημείο έναρξης της (συσκευή ATA) και στο σημείο τερματισμού της (TDM-PBX τύπου Asterisk) και η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται από το λογισμικό για την εξαγωγή του δείκτη ποιότητας PESQ και των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα ομιλίας στα δίκτυα VoIP.

Οι μετρήσεις παίρνονται στα ίδια έντεκα (11) προεπιλεγμένα επίπεδα φόρτισης της γραμμής όπως και στην περίπτωση του PSTN. Σε κάθε επίπεδο φόρτισης της γραμμής συλλέγονται 5 δείγματα και οι μετρήσεις ποιότητας αφορούν τις τρεις βασικές παραμέτρους:

- Latency (round trip delay)
- Jitter
- Packet Loss

Ο αριθμός των δειγμάτων θεωρείται μικρός για να θεωρηθεί το δείγμα των μετρήσεων επαρκές για στατιστική ανάλυση. Με τόσο μικρό δείγμα δεν είναι δυνατόν να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα τουλάχιστον ως προς την χρονική εξέλιξη των μετρήσιμων μεγεθών, για αυτό το λόγο θα εστιάσουμε μόνο στη μεταβολή των μέσων όρων με την αύξηση του φορτίου της γραμμής

Η διακύμανση της ποιότητας της ομιλίας -όπως εκφράζεται από το δείκτη PESQ- όταν μεταβάλλεται το φορτίο της γραμμής φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 46 : Η μεταβολή του PESQ (μέτρηση εντός του δικτύου IP) σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP

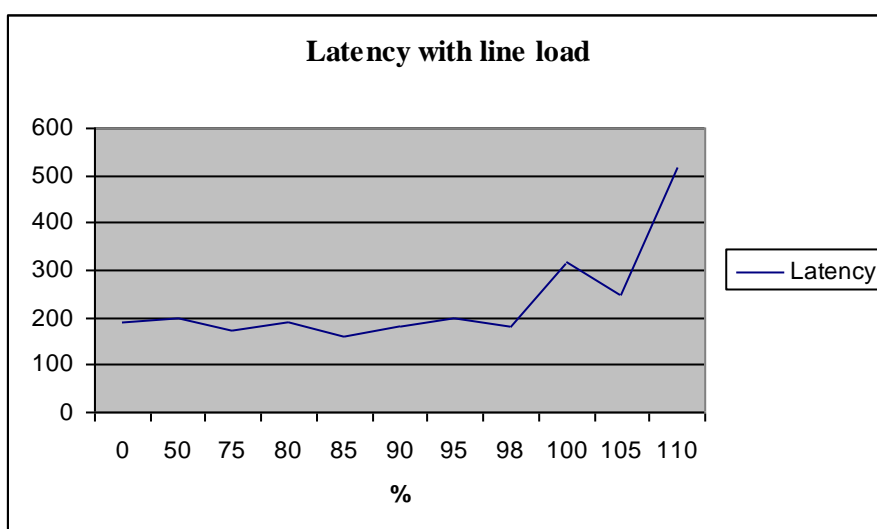
Η καμπύλη μεταβολής του δείκτη PESQ με το φορτίο προσομοιάζει αρκετά τη μέτρηση του δείκτη από το δίκτυο PSTN. Οι όποιες αποκλίσεις θα πρέπει μάλλον να αποδοθούν στο μικρό αριθμό των δειγμάτων στην περίπτωση της μέτρησης στο VoIP αλλά και στη διαφορετική μεθοδολογία των μετρήσεων στις δύο τεχνολογίες.

Η διακύμανση των παραμέτρων της σύνδεσης όταν μεταβάλλεται το φορτίο της γραμμής φαίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα :

Load (%)	Latency (ms)	Jitter	Packet Loss
0	188,8	1,43	0
50	198,4	0,864	0
75	173,8	1,016	0
80	191,2	1,14	0
85	160,2	1,176	0
90	181	1,84	0
95	198	5,738	0
98	179,8	4,83	0,392
100	318,6	2,77	3,824
105	250,2	3,76	2,44
110	521,4	3,882	9,472

Πίνακας 18 : Οι τιμές των παραμέτρων της σύνδεσης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (μέτρηση εντός του δικτύου IP)

Ακολουθούν πιο αναλυτικά τα διαγράμματα μεταβολής τους :



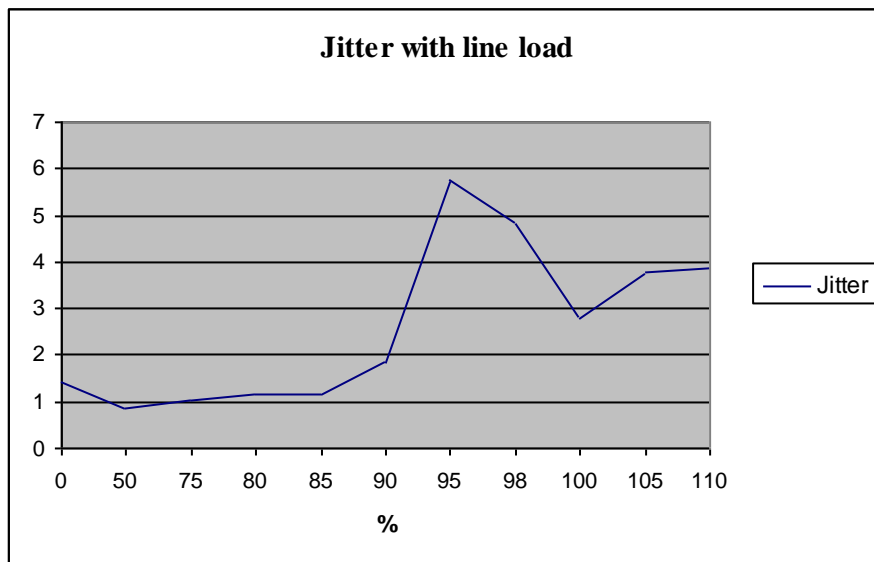
Σχήμα 47 : Η μεταβολή της καθυστέρησης σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (IP)

Η καθυστέρηση παραμένει στα επίπεδα των 190-200 msec μέχρι η γραμμή να φθάσει σε επίπεδα κατάληψης 98%. Υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις οι οποίες προφανώς οφείλονται στο μικρό αριθμό των δειγμάτων. Στο επίπεδο των 100% υπάρχει μια εμφανής αύξηση της καθυστέρησης ενώ στο επίπεδο φόρτισης 105% εμφανίζεται μια προσωρινή βελτίωση όπως ακριβώς και στην περίπτωση των μετρήσεων στο PSTN πράγμα που επιβεβαιώνει το φαινόμενο.

Παράγοντας καθυστέρησης	Καθυστέρηση (ms)
Δίκτυο PSTN	8,79
Γραμμή VoIP	94,40
Γραμμή VoIP σε δίκτυο PSTN και VoIP	191,38

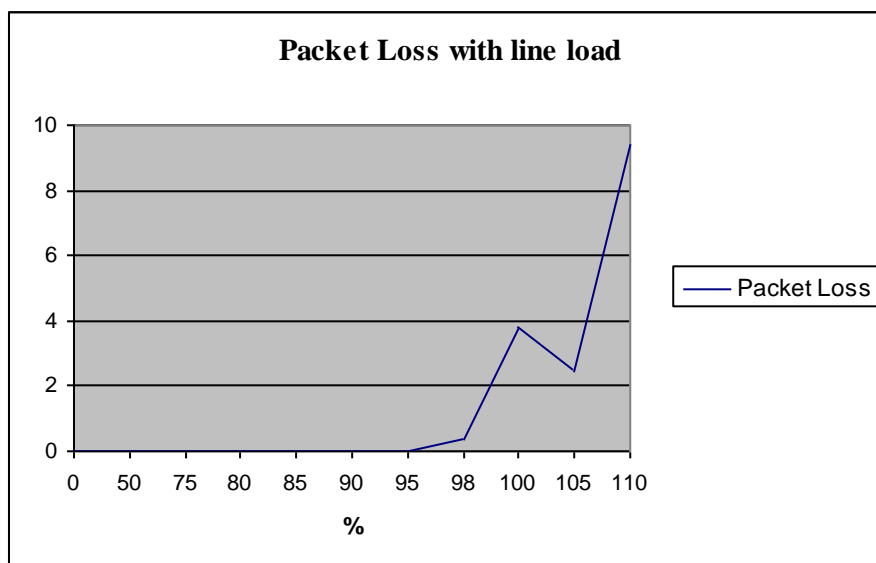
Πίνακας 19 : Συνοπτικός πίνακας των επιμέρους καθυστερήσεων σε μια σύνδεση VoIP

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι καθυστερήσεις μονής κατεύθυνσης όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις στα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν. Όπως φαίνεται η καθυστέρηση που εισάγει το δίκτυο PSTN μαζί με την καθυστέρηση στη γραμμή αποτελούν λίγο πάνω από το 50% της συνολικής. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υπόλοιπη καθυστέρηση προκύπτει από τη μετατροπή της ομιλίας από την τεχνολογία TDM του δικτύου PSTN σε IP για τη μετάδοση της στο δίκτυο VoIP.



Σχήμα 48 : Η μεταβολή του jitter σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (IP)

Το jitter αυξάνεται απότομα μόλις το φορτίο της γραμμής φθάσει το 95%. Μετά πέφτει μέχρι το φορτίο να φθάσει το 100% για να αρχίσει να ανεβαίνει και πάλι όταν το εύρος ζώνης της γραμμής έχει ξεπεραστεί. Η συμπεριφορά αυτή του jitter δεν οδηγεί σε κάποιο λογικό συμπέρασμα καθώς δεν δικαιολογείται και από τις μετρήσεις ποιότητας. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται μάλλον στο μικρό δείγμα των μετρήσεων. Καθώς δεν υπάρχει αντίστοιχη μέτρηση στο PSTN, δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις του φαινομένου στην ποιότητα της ομιλίας από αυτή τη διαδικασία των μετρήσεων.



Σχήμα 49 : Η μεταβολή της απώλειας πακέτων σε σχέση με το φορτίο μιας γραμμής VoIP (IP)

Απώλεια πακέτων αρχίζει να εμφανίζεται σε επίπεδο φορτίου 98% ενώ στις μετρήσεις στο PSTN αρχίζει λίγο χαμηλότερα στο 90%. Η διαφορά αυτή καθώς και η διαφορά που υπάρχει στις απόλυτες τιμές της απώλειας πακέτων, κατά πάσα πιθανότητα οφείλονται στη διαφορετική τεχνική των μετρήσεων στις δύο τεχνολογίες. Γενικά η συμπεριφορά της παραμέτρου αυτής όπως προκύπτει από την καμπύλη μεταβολής της, επαληθεύει τις αντίστοιχες μετρήσεις στο δίκτυο PSTN όπως για παράδειγμα στην προσωρινή βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης που παρουσιάζεται στο επίπεδο φόρτισης 105%.

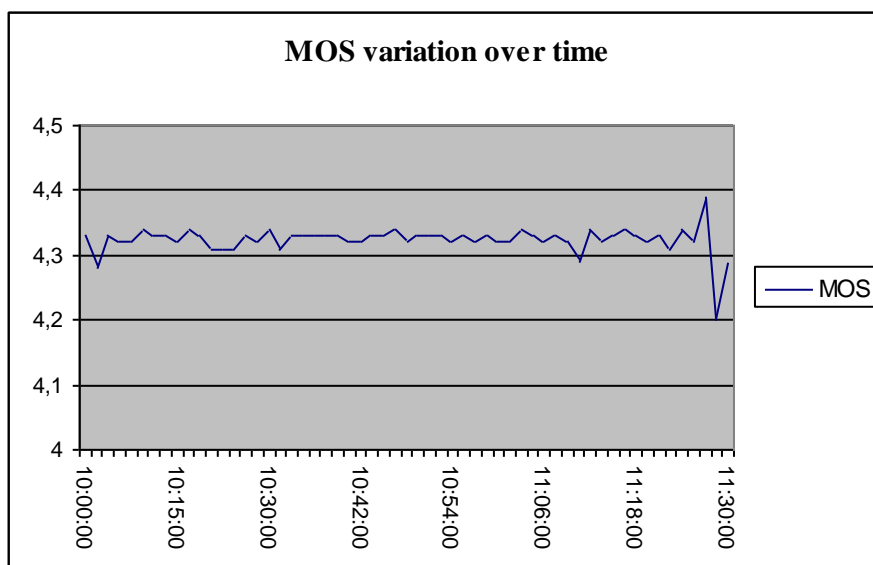
6.2.5 Μετρήσεις ποιότητας ομιλίας με τον G.729

Τα σενάρια των μετρήσεων και η αρχιτεκτονική των δικτύων PSTN και VoIP είναι η ίδια με τη διαφορά ότι στο VoIP τμήμα της κλήσης χρησιμοποιείται ο ευρύτατα διαδεδομένος codec G.729.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην περίπτωση που μια γραμμή VoIP διασυνδέει δυο τμήματα ενός PSTN δικτύου.

Μέγεθος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος
MOS	4,16	4,39	0,018	4.33
R-Factor	83,9	92,46	0,675	89.78
PESQ	4,06	4,29	0,018	4.23
PSQM	0,69	1,31	0,050	0.87
1-way Delay	48	174	5,314	162.07
Round Trip Delay	96	349	10,638	324.63
Drop Count	0	4	0,178	0.01
Received Signal Level	-21	-17	0,355	-18.05
SNR	20	36	1,895	30.29

Πίνακας 20 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP (G.729)



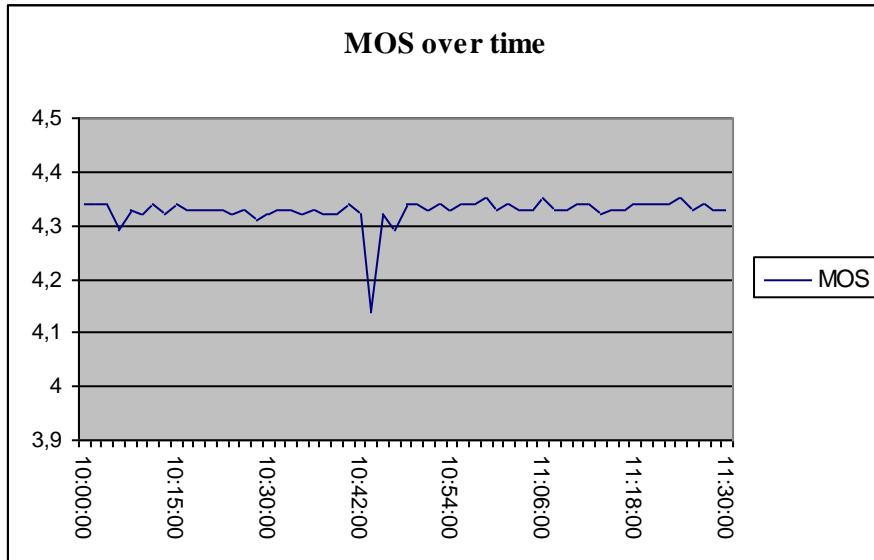
Σχήμα 50 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που ενσωματώνει γραμμή VoIP (G.729)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αν συγκριθούν με τα αποτελέσματα όταν στη γραμμή VoIP χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής G.711 βλέπουμε ότι είναι εντελώς παρόμοια.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα με τον G.729 όταν το δίκτυο PSTN συνδέεται με το IP δίκτυο κορμού.

Μέγεθος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος
MOS	4,08	4,36	0,020	4.33
R-Factor	81,49	90,74	0,741	89.65
PESQ	3,98	4,26	0,020	4.23
PSQM	0,8	1,49	0,055	0.88
1-way Delay	154	176	2,412	163.23
Round Trip Delay	308	352	4,783	326.94
Drop Count	0	5	0,263	0.02
Received Signal Level	-23	-17	0,458	-18.17
SNR	18	35	1,820	30.41

Πίνακας 21 : Οι τιμές των δεικτών ποιότητας και των παραμέτρων σύνδεσης σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP (G.729)



Σχήμα 51 : Η μεταβολή του MOS στο χρόνο σε δίκτυο PSTN που συνδέεται με δίκτυο VoIP (G.729)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης αλλά και με τις αντίστοιχες μετρήσεις με τον G.711. Άρα η μετάδοση ομιλίας κωδικοποιημένης με τον G.729 μέσα από το IP δίκτυο κορμού δεν αλλοίωσε περαιτέρω την ποιότητα της.

Συνολικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τον G.729 δείχνουν ότι δεν υπάρχει διαφορά στην ποιότητα ομιλίας σε σύγκριση με τον G.711 πράγμα που καταδεικνύει τις καλές επιδόσεις του κωδικοποιητή τουλάχιστον στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Κατ' αρχήν οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν την ήδη γνωστή υψηλή ποιότητα ομιλίας στα δίκτυα PSTN. Η φιλοσοφία σχεδιασμού των δικτύων TDM που είναι προσανατολισμένη στη μετάδοση φωνής με την ύπαρξη αποκλειστικού καναλιού με διαθέσιμο εύρος ζώνης για κάθε κλήση σε αντίθεση με τη best-effort λογική για την παράδοση των πακέτων στα δίκτυα IP κάνουν τη διαπίστωση αυτή αναμενόμενη.

Η εισαγωγή σε ένα δίκτυο PSTN μιας γραμμής VoIP όπου η ομιλία μεταδίδεται σε πακέτα προκαλεί αυτόματα μια πτώση της ποιότητας της ομιλίας κατά ένα σκαλοπάτι στην κλίμακα MOS όπως προκύπτει από την εφαρμογή του E-model. Η ποιότητα ομιλίας παραμένει στα ίδια επίπεδα ακόμα και όταν η κλήση κατά τη διαδρομή της από ένα τερματικό σημείο του δικτύου PSTN προς κάποιο άλλο άκρο του ίδιου δικτύου διασχίζει ένα ολοκληρωμένο IP δίκτυο κορμού που βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα στοιχεία και οι ζεύξεις του IP δικτύου δεν εισάγουν καμμία επιπλέον επιβάρυνση στην ποιότητα της σύνδεσης. Εδώ θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψη ότι τα δίκτυα στα οποία έγιναν οι μετρήσεις πιθανά δεν λειτουργούσαν σε συνθήκες πολύ υψηλού φόρτου, παρότι οι μετρήσεις έλαβαν χώρα πολύ κοντά στην «ώρα μεγίστης κίνησης» όπου τα δίκτυα δέχονται και το μεγαλύτερο φορτίο.

Η αλλαγή στην κωδικοποίηση της ομιλίας με τη χρήση του χαμηλού ρυθμού κωδικοποιητή G.729 στο δίκτυο VoIP, δεν επέφερε επίσης καμμία αλλαγή στην ποιότητα της ομιλίας πράγμα που αποδεικνύει τις πολύ καλές επιδόσεις του κωδικοποιητή και την καταλληλότητα του για χρήση σε συστήματα VoIP. Από την άλλη πλευρά το γεγονός αυτό μας οδηγεί να στραφούμε σε άλλους λόγους που προκαλούν πτώση της ποιότητας ομιλίας .

Η αύξηση του φορτίου μιας γραμμής VoIP και οι επιπτώσεις που αυτό έχει στην ποιότητα ομιλίας που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης μπορεί να οδηγήσει σε κάποιες χρήσιμες παρατηρήσεις. Το γενικό αλλά και αναμενόμενο βέβαια συμπέρασμα είναι ότι κατά μέσο όρο η ποιότητα της ομιλίας πέφτει όσο αυξάνει το φορτίο της γραμμής,

Όταν το φορτίο της γραμμής φθάνει περίπου στο 95% της χωρητικότητας της, παρουσιάζεται μια πτώση κατά ένα επιπλέον σκαλοπάτι στην κλίμακα MOS. Σε αυτό το επίπεδο, η ποιότητα ομιλίας θεωρείται «Μέση» και θα μπορούσε υπο συνθήκες να γίνει αποδεκτή από το χρήστη.

Η μέση ποιότητα ομιλίας πέφτει ένα ακόμα σκαλοπάτι μόλις το φορτίο φθάσει και ξεπεράσει το 100% της χωρητικότητας της γραμμής αλλά εκεί η επικοινωνία αρχίζει πλέον να γίνεται προβληματική.

Με την αύξηση του φορτίου της γραμμής όμως αυξάνεται και η διακύμανση της ποιότητας των κλήσεων, με το φαινόμενο να γίνεται ιδιαίτερα έντονο όταν το φορτίο της γραμμής αρχίζει να πλησιάζει τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα να υπάρχουν κλήσεις με σχετικά καλή ποιότητα ομιλίας αλλά και κλήσεις που η ποιότητα τους θεωρείται μη αποδεκτή. Η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση όμως είναι ότι το φαινόμενο αυτό συνεχίζει ακόμα και όταν το απαιτούμενο εύρος ζώνης των κλήσεων είναι πλέον μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα της γραμμής

(φορτίο > 100%). Αυτό έρχεται να καταδείξει την βασική διαφορά στη συμπεριφορά των συστημάτων VoIP ως προς το φορτίο, σε σχέση με τα συστήματα TDM των δικτύων PSTN όπου αν η γραμμή είναι πλήρης οι επιπλέον κλήσεις απορρίπτονται.

Η συμπεριφορά της γραμμής VoIP ως προς το φορτίο σε γενικές γραμμές επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις εντός του δικτύου IP. Καταρχήν είναι αδιαμφισβήτητος ο ρόλος της απώλειας πακέτων στην υποβάθμιση της ποιότητας καθώς αυξάνει σχεδόν εκθετικά όταν το φορτίο της γραμμής πλησιάζει τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Εστιάζοντας περισσότερο στο φαινόμενο της συνολικής καθυστέρησης και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις στο δίκτυο PSTN, διαπιστώνεται ότι τελικά τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην καθυστέρηση έχουν οι διαδικασίες μετατροπής της ομιλίας από TDM σε VoIP και αντίστροφα. Μικρότερη συνεισφορά έχει η καθυστέρηση στη γραμμή ενώ σχεδόν ασήμαντη είναι η καθυστέρηση που εισάγει το δίκτυο PSTN.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δεν μπορούν να παρέχουν ασφαλή πρόβλεψη για την ποιότητα ομιλίας σε επίπεδο δικτύου όταν τα δίκτυα VoIP βρίσκονται σε συνθήκες υψηλού φόρτου καθώς υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση της κίνησης. Όμως μετρώντας σε πραγματικές συνθήκες και αποκλείοντας την συνεισφορά της κωδικοποίησης και των στοιχείων του δικτύου IP, φαίνεται ότι όπως τουλάχιστον έδειξαν οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας, οι μετατροπές της πληροφορίας της ομιλίας από TDM σε VoIP και αντίστροφα είναι ο κύριος λόγος υποβάθμισης της ποιότητας ομιλίας που προκύπτει από την εισαγωγή του VoIP στα σύγχρονα τηλεφωνικά δίκτυα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] RFC 768, “*User Datagram Protocol*”, IETF, August 1980
- [2] RFC 3261, “*SIP: Session Initiation Protocol*”, IETF, June 2002
- [3] RFC 3435, “*Media Gateway Control Protocol (MGCP)*”, IETF, January 2003
- [4] RFC 3550, “*RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*” IETF, July 2003.
- [5] Recommendation ITU-T H.323, *Packet-based multimedia communications systems*. December (2009).
- [6] Recommendation ITU-T G.107 (2009), *The E-model: a computational model for use in transmission planning*
- [7] Recommendation ITU-T G.108 (1999), *Application of the E-model: A planning guide*
- [8] Recommendation ITU-T G.109 (1999), *Definition of categories of speech transmission quality*.
- [9] Recommendation ITU-T G.113 (2009), *Transmission impairments due to speech processing*.
- [10] ITU-T Recommendation P.11 (1993), *Effect of transmission impairments*
- [11] Recommendation ITU-T G.711 (1988), *Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies*
- [12] Recommendation ITU-T G.723.1 (1996), *Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s*.
- [13] Recommendation ITU-T G.729 (2007), *Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP)*.
- [14] Recommendation ITU-T P.800 (1996), *Methods for subjective determination of transmission quality*.
- [15] Recommendation ITU-T P.862 (2001), *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs*.
- [16] A. Tanenbaum, “*Computer Networks, 4th Edition*”, Prentice Hall, 2003.
- [17] Möller, S. (2000), *Assessment and Prediction of Speech Quality in Telecommunications*, Springer
- [18] Raake, A. (2006), *Speech Quality of VoIP – Assessment and Prediction*, Chichester, UK, Wiley.
- [19] Takahashi, A., Kurashima, A., and Yoshino, H. (2005), *Subjective Quality Index for Compatibly Evaluating Narrowband and Wideband Speech*, Prague, Czech Republic, MESAQIN.
- [20] Athina P. Markopoulou, Fouad A. Tobagi, Mansour J. Karam, *Assessment of VoIP Quality over Internet Backbones*
- [21] Bur Goode, *Voice over Internet Protocol (VoIP)*, Proceedings of IEEE, 2002

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

A	Advantage Factor
ACR	Absolute Category Rating
ADM	Add Drop Multiplexer
ADPCM	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
ATA	Analog Terminal Adapter
BRI	Basic Rate Interface
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
CCR	Comparison Category Rating
CS-ACELP	Conjugate Structure Algebraic Code-Excited Linear Prediction
DCME	Digital Circuit Multiplexing Equipment
DCR	Degradation Category Rating
EC	Echo canceller
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FEC	Forward Error Correction
GUI	Graphical User Interface
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LBR	Low Bitrate Redundancy
MGW	Media GateWay
MOS	Mean Opinion Score
OSI	Open Systems Interconnection
PAMS	Perceptual Analysis Measurement System
PBX	Private Branch eXchange
PCM	Pulse Code Modulation
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
PLC	Packet Loss concealment
PSQM	Perceptual Speech Quality Measurement
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RTCP	RTP Control Protocol
RTP	Real-Time Transport Protocol
SIP	Session Initiation Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SS7	Signaling System No7
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time Division Multiplexing
UDP	User Datagram Protocol
VAD	Voice Activity Detection
VoIP	Voice over Internet Protocol