

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή στα Πληροφοριακά Συστήματα



**Αξιολόγηση και Εφαρμογή Μετρικών Ποιότητας Εμπειρίας
(QoE) και Υπηρεσίας (QoS) σε Τηλεφωνικό Κέντρο VoIP**

Μερκούριος Γώγος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Ξενοφών Δημητρόπουλος**

Μάιος 2012

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Αξιολόγηση και Εφαρμογή Μετρικών Ποιότητας Εμπειρίας
(QoE) και Υπηρεσίας (QoS) σε Τηλεφωνικό Κέντρο VoIP**

Μερκούριος Γώγος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Ξενοφών Δημητρόπουλος**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Πληροφοριακά Συστήματα

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2012

στην μνήμη της αγαπημένης μου θείας Μερόπης

Περίληψη

Στην σημερινή εποχή της κινητικότητας, οι επικοινωνίες που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών, καθώς δεν εξαρτώνται από την εκάστοτε θέση του χρήστη. Προσφέρουν επίσης, ενοποιημένες υπηρεσίες φωνής, εικόνας και δεδομένων, εύκολη αναβάθμιση και διαχείριση και επί πλέον έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Έτσι, η τηλεφωνία VoIP έχει εξελιχθεί, από μια αναδυόμενη, σε μια ευρέως αναγνωρισμένη τεχνολογία.

Όμως, η μεταφορά της τηλεφωνικής υπηρεσίας σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων έχει επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής που αντιλαμβάνονται οι χρήστες. Καθοριστικοί παράγοντες είναι η καθυστέρηση, η διακύμανση της καθυστέρησης και οι απώλειες πακέτων. Επομένως, είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα QoS, όπως τα εικονικά δίκτυα VLAN και οι διαφοροποιημένες υπηρεσίες DiffServ, που βελτιώνουν την απόδοση της υπηρεσίας η οποία καθορίζει τον βαθμό ικανοποίησης του χρήστη QoE. Για την μέτρηση της QoE υπάρχουν υποκειμενικές και αντικειμενικές τυποποιημένες μέθοδοι. Οι υποκειμενικές βασίζονται στην εκτίμηση από ανθρώπους ενώ οι αντικειμενικές, οι οποίες διακρίνονται σε παρεμβατικές και μη παρεμβατικές, βασίζονται σε αλγόριθμους που προσομοιώνουν την ανθρώπινη αντίληψη. Οι μη παρεμβατικές χρησιμοποιούν τον τυποποιημένο αλγόριθμο αξιολόγησης ποιότητας E-model.

Με στόχο την βελτίωση της ποιότητας των κλήσεων ενός ιδιωτικού τηλεφωνικού κέντρου VoIP, έγινε αξιολόγηση και βελτίωση της λειτουργίας του τοπικού δικτύου με την εγκατάσταση QoS και την ανάλυση μετρικών ποιότητας πραγματικών κλήσεων VoIP με μη παρεμβατική μέθοδο μέσω λογισμικού βασισμένου στο E-model. Καταγράφηκαν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης, ο λόγος επιβάρυνσης προς ωφέλιμο φορτίο και ο ρυθμός μετάδοσης πακέτων των codec G.711, G.722, GSM, Speex, iLBC και αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής παραμέτρων όπως η διακύμανση της καθυστέρησης, η απώλεια πακέτων και τα σφάλματα ακολουθίας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης εργαστηριακές μετρήσεις ποιότητας VoIP με προσομοίωση της λειτουργίας του Internet σε επίπεδο τοπικού δικτύου χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες που προσφέρει ο προσομοιωτής δικτύου netem του λειτουργικού συστήματος Linux.

Οι μετρήσεις αφ' ενός κατέγραψαν τις επιπτώσεις που έχουν στην ποιότητα της φωνής οι επιλεχθείσες παράμετροι και αφ' ετέρου ανέδειξαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου, του εξοπλισμού και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν.

Summary

As we live in an expanding mobility era, IP based communications have shown a great advantage over conventional telephony, as they do not depend on the current user location. They also offer integrated voice, video and data services, easy upgrading and management as well as lower operating cost. Thus, VoIP has evolved, from an emerging technology, to an established and recognized one.

However, the transfer of telephone services to packet switched networks affects the perceived by the user voice quality. Determinant factors are delay, jitter and packet loss. Therefore, the implementation of QoS, such as VLAN and DiffServ, is necessary, in order to improve the performance of the service, the decisive factor in the user's QoE. Both subjective and objective standard methods are available for QoE assessment. Subjective methods are based on human perception while objective methods, which are divided into intrusive and non intrusive methods, are based on algorithms simulating the human perception. In general, non intrusive quality assessment methods are based on the ITU-T standard E-model algorithm.

In order to improve the voice quality of an already installed software based IP PBX, after thorough assessment of the network topology, QoS was installed. Then, quality assessment of real VoIP calls took place, by means of a non intrusive E-model based software tool. Measurements of bandwidth, overhead to payload ratio and packet transmission rate were recorded using the codecs G.711, G.722, GSM, Speex and iLBC. The impact of parameters, such as, jitter, packet loss and sequence errors, on voice quality was also assessed. Moreover, extra VoIP quality measurements were carried out, by simulating the Internet characteristics on the local area network, by means of netem, the Linux network emulator.

The results showed the impact on VoIP quality of the selected parameters that were tested and highlighted the advantages and disadvantages of the method, the equipment and the software tools that were used.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες

στον Καθηγητή Ξενοφώντα Δημητρόπουλο για την παροχή των επιστημονικών συμβουλών του και την ενθάρρυνση προς το πρόσωπό μου κατά την επίβλεψη της μεταπτυχιακής διατριβής, και

στην οικογένεια μου για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου προσέφερε για την επιτυχή ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Μερκούρης Γώγος

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2012

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Summary	iv
Ευχαριστίες.....	v
Αρктиκόλεξα και συντομογραφίες.....	xi
Κατάλογος εικόνων.....	xv
Κατάλογος πινάκων	xviii
1 Εισαγωγή.....	1
2 Η εξέλιξη της τηλεφωνίας	5
2.1 Εξέλιξη τηλεφωνικών συστημάτων και δικτύων τηλεπικοινωνιών	5
2.2 Μετάδοση φωνής μέσω δικτύων μεταγωγής πακέτων.....	8
2.2.1 Δίκτυα μεταγωγής πακέτων έναντι δικτύων μεταγωγής κυκλώματος.....	8
2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα VoIP έναντι PSTN.....	9
2.3 Ιδιωτικά τηλεφωνικά κέντρα και συσκευές VoIP	11
3 Το Πρωτόκολλο SIP	13
3.1 Οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου SIP	13
3.2 Η εξέλιξη του πρωτοκόλλου SIP	16
3.3 Αιτήσεις SIP	17
3.4 Αποκρίσεις SIP	18
3.4.1 Κωδικοί απόκρισης πρωτοκόλλου SIP	18
3.5 Πεδία επικεφαλίδας	21
3.6 Εξυπηρετητές και πράκτορες χρηστών SIP.....	22
3.6.1 Proxy server	23
3.6.2 Registrar server	23
3.6.3 Redirect server.....	23
3.7 Ακολουθία μηνυμάτων SIP	23
3.7.1 Εγκαθίδρυση απλής συνόδου SIP	23
3.7.2 Κλήση SIP με την χρήση Proxy server.....	25
4 Άλλα πρωτόκολλα.....	28
4.1 Το πρωτόκολλο STUN	28
4.1.1 Σκοπός πρωτοκόλλου STUN.....	29
4.1.2 Λειτουργία πρωτοκόλλου STUN	29

4.1.3	Παράδειγμα χρήσης πρωτοκόλλου STUN	30
4.2	Το πρωτόκολλο SDP	32
4.2.1	Περιγραφή του πρωτοκόλλου SDP	32
4.2.2	Λειτουργία του πρωτοκόλλου SDP	34
4.3	Το πρωτόκολλο RTP	35
4.3.1	Επικεφαλίδα RTP	35
4.3.2	Ωφέλιμο φορτίο πρωτοκόλλου RTP.....	36
4.3.3	Συνοπτική περιγραφή εφαρμογής του RTP	37
4.4	Το πρωτόκολλο RTCP.....	38
4.5	Τα πρωτόκολλα CRTP και ROHC	39
4.6	Τα πρωτόκολλα SRTP και SRTCP	39
5	Επικοινωνίες VoIP και ιδιωτικότητα	42
5.1	Η ιδιωτικότητα στην τηλεφωνία VoIP	43
5.2	Θέματα ιδιωτικότητας πρωτοκόλλου SIP	44
5.3	Θέματα ιδιωτικότητας πρωτοκόλλου RTP.....	46
5.4	Θέματα ιδιωτικότητας πρωτοκόλλου RTCP.....	47
5.5	Η εφαρμογή Zfone™ και το πρωτόκολλο ZRTP	48
5.6	Η υπηρεσία Skype.....	49
5.6.1	Το κενό ασφαλείας του Skype.....	50
5.6.2	Η εκμετάλλευση του κενού ασφαλείας και η απάντηση της Skype	51
5.7	VoIP Spam	53
5.8	Μέτρα Προστασίας.....	53
6	Η Ποιότητα Υπηρεσίας QoS	55
6.1	Ορισμός QoS.....	56
6.2	Απαιτήσεις QoS.....	56
6.3	Επιφυλάξεις χρηστών.....	57
6.3.1	Ερωτήματα σχετικά με την ποιότητα της φωνής.....	57
6.3.2	Ερωτήματα μη σχετικά με την ποιότητα της φωνής.....	58
6.4	Λειτουργία υπηρεσίας VoIP	59
6.5	Στοιχεία ποιότητας υπηρεσίας.....	61
6.5.1	Διακύμανση καθυστέρησης (jitter).....	61
6.5.2	Καθυστέρηση.....	62
6.5.3	Απώλειες πακέτων.....	62
6.5.4	Ανάκτηση απολεσθέντων πακέτων	63

6.5.5	Μέγεθος πακέτου.....	63
6.5.6	Παράδοση πακέτων εκτός σειράς.....	64
6.5.7	Σφάλματα bit	64
6.5.8	Ηχώ	65
6.5.9	Ανίχνευση φωνητικής δραστηριότητας.....	66
6.5.10	Αποκοπή φωνής.....	67
6.5.11	Εύρος ζώνης.....	67
6.6	Codecs	68
6.6.1	Κύρια χαρακτηριστικά διαδεδομένων codec	69
6.7	Τεχνικές και πρότυπα QoS.....	71
6.7.1	Εικονικά δίκτυα IEEE 802.1Q.....	72
6.7.2	Διαφοροποιημένες υπηρεσίες (DiffServ).....	74
6.7.3	RSVP	76
6.7.4	MPLS	76
7	Η Ποιότητα Εμπειρίας QoE.....	78
7.1	Ορισμός της ποιότητας εμπειρίας	78
7.2	Παράγοντες ποιότητας εμπειρίας (QoE) VoIP.....	81
7.3	Μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας.....	82
7.3.1	Σύγκριση υποκειμενικών και αντικειμενικών μεθόδων	82
7.4	Μέθοδοι υποκειμενικού προσδιορισμού ποιότητας.....	83
7.4.1	Δοκιμές αξιολόγησης συνομιλίας.....	83
7.4.2	Δοκιμές αξιολόγησης ακρόασης.....	84
7.4.3	Δημοσκοπικές έρευνες.....	85
7.4.4	Άλλες μέθοδοι αξιολόγησης	85
7.5	Αντικειμενικός προσδιορισμός ποιότητας.....	85
7.6	Παρεμβατικές αντικειμενικές μέθοδοι.....	86
7.6.1	Οι μέθοδοι PSQM (ITU-T Rec P.861) και PESQ (ITU-T Rec. P.862).....	87
7.6.2	Η μέθοδος PSQM+	88
7.6.3	Η μέθοδος PAMS.....	89
7.6.4	Η μέθοδος PEAQ.....	90
7.6.5	Η μέθοδος POLQA.....	92
7.7	Μη Παρεμβατικές αντικειμενικές μέθοδοι.....	94
7.7.1	Η μέθοδος ITU-T Rec. P.563	95
7.8	Ο αλγόριθμος αξιολόγησης της ποιότητας μετάδοσης E-model.....	96

7.8.1	Υπολογισμός του παράγοντα αξιολόγησης της μετάδοσης R	97
7.8.2	Μέτρα ποιότητας που απορρέουν από τον παράγοντα R	104
7.9	Η Σύσταση ITU-T Rec. G.114.....	106
7.10	Δείκτης MOS (Mean Opinion Score).....	108
7.11	Απλοποιημένο E-model για χρήση σε VoIP.....	109
8	Αξιολόγηση ποιότητας πραγματικών κλήσεων.....	112
8.1	Εξοπλισμός και τοπολογία δικτύου.....	112
8.1.1	Το τηλεφωνικό κέντρο 3CX.....	113
8.2	Βελτίωση τοπολογίας δικτύου VoIP.....	115
8.3	Μεθοδολογία μετρήσεων.....	116
8.3.1	Λογισμικό Commview.....	117
8.3.2	Επιλογή κλήσεων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.....	118
8.3.3	3CX Media Server.....	119
8.3.4	Επιλογή Codecs.....	121
8.3.5	Πλήθος και διάρκεια μετρήσεων.....	122
8.3.6	Καταγραφείσες παράμετροι ποιότητας.....	123
8.3.7	Διαδικασία ανάλυσης δεδομένων.....	123
8.3.8	Άλλες προληπτικές ενέργειες.....	124
8.4	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	125
8.4.1	Δρομολόγηση και καθυστέρηση των κλήσεων.....	125
8.4.2	Απαιτήσεις σε bandwidth.....	126
8.4.3	Λόγος επιβάρυνσης προς ωφέλιμο φορτίο.....	127
8.4.4	Ρυθμός μετάδοσης πακέτων.....	130
8.4.5	Μέτρηση διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter).....	131
8.4.6	Επίδραση των απωλειών πακέτων στην ποιότητα.....	132
8.4.7	Σφάλματα ακολουθίας (sequence errors).....	136
8.4.8	R-Factor και Mean Opinion Score.....	137
8.4.9	Στατιστικά στοιχεία ποιότητας των κλήσεων.....	138
8.5	Συμπεράσματα μετρήσεων πραγματικών κλήσεων.....	139
9	Προσομοίωση WAN.....	143
9.1	Netem Network Emulator.....	143
9.2	Ρύθμιση δρομολογητή Linux.....	145
9.3	Παράμετροι προσομοίωσης WAN της εντολής netem.....	146
9.3.1	Καθυστέρηση (delay).....	147

9.3.2	Κατανομή της καθυστέρησης	147
9.3.3	Απώλεια πακέτων (packet loss)	148
9.3.4	Απώλεια συνεχόμενων πακέτων (burst packet loss)	148
9.3.5	Διπλά πακέτα (packet duplication)	151
9.3.6	Αλλοίωση πακέτων (packet corruption)	151
9.3.7	Αναδιάταξη πακέτων (Packet re-ordering).....	152
9.4	Εργαστηριακή εγκατάσταση δικτύου VoIP	153
9.5	Μετρήσεις παραμέτρων ποιότητας VoIP	154
9.5.1	Σταθερή καθυστέρηση.....	154
9.5.2	Μεταβαλλόμενη καθυστέρηση	155
9.5.3	Τυχαία Απώλεια πακέτων	160
9.5.4	Συσχετισμένη απώλεια πακέτων.....	163
9.5.5	Επίδραση στην ποιότητα των διπλών πακέτων.....	166
9.5.6	Επίδραση αλλοιωμένων πακέτων	166
9.5.7	Επίδραση αναδιάταξης πακέτων.....	167
9.6	Συμπεράσματα εργαστηριακών μετρήσεων.....	167
9.6.1	Συμπεράσματα για το χρησιμοποιηθέν λογισμικό	168
9.6.2	Συμπεράσματα μετρήσεων παραμέτρων ποιότητας.....	168
10	Στατιστικά στοιχεία.....	170
10.1	Διαθεσιμότητα τηλεφωνικού κέντρου	170
10.2	Επιθέσεις στο τηλεφωνικό κέντρο	171
11	Επίλογος.....	175
11.1.1	Αποτελέσματα και συμπεράσματα μεθοδολογίας.....	178
11.1.2	Αποτελέσματα και συμπεράσματα μετρήσεων παραμέτρων ποιότητας	178
11.1.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	180
	Βιβλιογραφία.....	181
A	Παράδειγμα συνόδου SIP	A-1
A.1	Σύνοδος SIP με χρήση proxy server	A-1
B	Μετρήσεις netem loss.....	B-1
B.1	Μέτρηση απωλειών 10%.....	B-1
B.2	Μέτρηση απωλειών 50%.....	B-2

Αρκτικόλεξα και συντομογραφίες

3SQM™	Single Sided Speech Quality Measure
ACR	Absolute Category Rating
AMR	Adaptive Multi-Rate
ATM	Asynchronous Transfer Multiplex
BCP	Best current practice
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network
CCITT	Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique
CCR	Comparison Category Rating
CDMA	Code division multiple access
CNG	Comfort Noise Generation
codec	Coder/decoder και compressor/decompressor
CoS	Class of Service
CRTP	Compressed Real-time Transport Protocol
DCR	Degradation Category Rating
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DiffServ	Differential Services
DNS	Domain Name System
DSL	Digital Subscriber Line
DTMF	Dual Tone Multi Frequency signaling
DTX	Discontinuous transmission
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVRC	Enhanced Variable Rate Codec
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First in - First Out
GSM	Global System for Mobile communications
HTTP	Hyper Text Transport Protocol
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
iLBC	Internet Low Bit Rate
IM	Instant Messaging

INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISP	Internet Service Provider
IP	Internet Protocol
IPSec	Internet Protocol Security
ITU	International Telecommunications Union
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
LAN	Local Area Network
LBR	Low Bit-rate Redundancy
LPC	Linear Predictive Coding
MMUSIC	Multiparty Multimedia Session Control (IETF working group)
MNB	Measuring Normalizing Blocks
MOS	Mean Opinion Score
MOS-CQE	Mean Opinion Score – Conversational Quality, Estimated
MOS-CQS	Mean Opinion Score – Conversational Quality, Subjective
MOS-CQO	Mean Opinion Score – Conversational Quality, Objective
MOS-LQE	Mean Opinion Score – Listening Quality, Estimated
MOS-LQS	Mean Opinion Score – Listening Quality, Subjective
MOS-LQO	Mean Opinion Score – Listening Quality, Objective
MOS-TQE	Mean Opinion Score – Talking Quality, Estimated
MOS-TQS	Mean Opinion Score – Talking Quality, Subjective
MOS-TQO	Mean Opinion Score – Talking Quality, Objective
MOV	Model Output Variable
MPEG	Moving Picture Experts Group
MPLS	Multiprotocol Label Switching
NAT	Network Address Translation
NB	Narrowband
ODG	Objective Difference Grade
OSI	Open System Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
P2P	Peer-to-Peer
PABX	Private Automatic Branch Exchange
PAMS	Perceptual Analysis Measurement System

PBX	Private Branch Exchange
PCM	Pulse-Code modulation
PCP	Priority Code Point
PEAQ	Perceptual Evaluation of Audio Quality
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
PGP	Pretty Good Privacy
PINT	PSTN and Internet Internetworking (IETF working group)
PLC	Packet Loss Concealment
POLQA	Perceptual Objective Listening Quality Analysis
pps	Packets per second
PSQM	Perceptual Speech Quality Measure
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoE	Quality of Experience
QoP	Quality of Perception
QoS	Quality of Service
QoS _D	Quality of Service Delivered
QoS _E	QoS Experienced
RFC	Request for Comments
ROHC	Robust Header Compression
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTCP	Real-Time Transport Control Protocol
RTP	Real-Time Transport Protocol
SDES	Session Description Protocol Security
SDG	Subjective Difference Grade
SDP	Session Description Protocol
SEAC	System for the Evaluation of Audio Quality
SIMPLE	SIP for Instant Messaging and Presence Leveraging Extensions (IETF working group)
SIP	Session Initiation Protocol
SIPPING	Session Initiation Protocol Project Investigation (IETF working group)
SMTP	Simple Mail Transport Protocol
SNR	Signal to Noise Ratio
SPIRITS	Service in the PSTN/IN requesting Internet Services
SPIT	Spam over Internet Telephony

S RTP	Secure Real-Time Transport Protocol
S RTCP	Secure Real-Time Transport Control Protocol
STM	Synchronous Transfer Mode
STUN	Session Traversal Utilities for NAT
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time Division Management
TFIFO	Transmit FIFO
TLS	Transport Layer Security
UDP	User Datagram Protocol
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
VAD	Voice Activity Detection
VLAN	Virtual LAN
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Network
VSP	Voice Service Provider
WAN	Wide Area Network
WB	Wideband
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Κατάλογος εικόνων

Εικ. 2.1:	Η εξέλιξη των τηλεφωνικών κέντρων	12
Εικ. 3.1:	Επικοινωνίες πολυμέσων	15
Εικ. 3.2:	Ανταλλαγή μηνυμάτων απλής συνόδου SIP	24
Εικ. 3.3:	Κλήση SIP μέσω Proxy server.....	26
Εικ. 4.1:	Διάγραμμα αιτήματος STUN	30
Εικ. 4.2:	Πρωτόκολλα αρχιτεκτονικής επικοινωνιών πολυμέσων του Internet.....	35
Εικ. 4.3:	Επικεφαλίδα πρωτοκόλλου RTP.....	36
Εικ. 4.4:	Block διάγραμμα αποστολέα RTP	37
Εικ. 4.5:	Block διάγραμμα δέκτη RTP.....	38
Εικ. 4.6:	Κρυπτογράφηση SRTP πακέτου δεδομένων RTP	40
Εικ. 4.7:	Κρυπτογράφηση SRTCP πακέτου ελέγχου RTCP	40
Εικ. 5.1:	Ακολουθία μηνυμάτων πρωτοκόλλου ZRTP	49
Εικ. 5.2:	Ακολουθία μηνυμάτων του Skype :.....	51
Εικ. 6.1:	Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδων επεξεργασίας φωνής τηλεφωνίας VoIP	60
Εικ. 6.2:	Καμπύλες ανοχής echo	65
Εικ. 6.3:	Απόκριση συχνότητας narrowband και wideband codec.....	68
Εικ. 6.4:	Πλαίσιο Ethernet 802.1Q.....	73
Εικ. 6.5:	Πεδίο διαφοροποιημένων υπηρεσιών DS	75
Εικ. 6.6:	Λογικό διάγραμμα ταξινόμησης πακέτων και ρύθμισης της κυκλοφορίας DiffServ	76
Εικ. 7.1:	Η ποιότητα εμπειρίας επικεντρώνεται στον χρήστη, ενώ η ποιότητα υπηρεσίας στην τεχνολογία	79
Εικ. 7.2:	Παρεμβατικές και μη παρεμβατικές μέθοδοι	86
Εικ. 7.3:	Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου PESQ	87
Εικ. 7.4:	Σχηματικό διάγραμμα διεργασιών μεθόδου PAMS.....	89
Εικ. 7.5:	Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου PEAQ.....	91
Εικ. 7.6:	Αρχή λειτουργίας μοντέλου PEAQ.....	91
Εικ. 7.7:	Αρχιτεκτονική αλγορίθμου PEAQ.....	93
Εικ. 7.8:	Εξέλιξη συστάσεων ITU-T P.86x για δοκιμές ποιότητας φωνής.....	94
Εικ. 7.9:	Σύνδεση αναφοράς του E-model	96
Εικ. 7.10:	Βαθμός R του E-model συναρτήσσει της καθυστέρησης	107
Εικ. 7.11:	Το απλοποιημένο E-model για χρήση σε συστήματα VoIP	109
Εικ. 7.12:	Απαιτούμενες καθυστερήσεις για τον υπολογισμό του E-model.....	110

Εικ. 7.13:	Προσαρμογή καμπύλης υπολογισμού <i>Id</i>	111
Εικ. 8.1:	Διάγραμμα του προϋπάρχοντος δικτύου χωρίς QoS.....	113
Εικ. 8.2:	Η οθόνη Server Activity Log του 3CX Phone System.....	114
Εικ. 8.3:	Διάγραμμα του δικτύου μετά την εγκατάσταση QoS	116
Εικ. 8.4:	Χαρακτηριστική οθόνη του προγράμματος CommView	117
Εικ. 8.5:	Η οθόνη Registrations του CommView	118
Εικ. 8.6:	RTP stream από 192.168.1.4 προς 3CX PBX: Χρήση G.711	120
Εικ. 8.7:	RTP stream από 3CX PBX προς OmniVoice: Χρήση iLBC	121
Εικ. 8.8:	Μέτρηση RTT προς OmniVoice από την οικία μου	125
Εικ. 8.9:	Μέτρηση RTT προς OmniVoice διάρκειας μιας εβδομάδας ανά 5 min	126
Εικ. 8.10:	Ethernet bandwidth.....	127
Εικ. 8.11:	Κατανάλωση bandwidth επικεφαλίδων πρωτοκόλλων UDP και IP	128
Εικ. 8.12:	Κατανάλωση bandwidth της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου RTP	129
Εικ. 8.13:	Κατανάλωση bandwidth από το ωφέλιμο φορτίο του πρωτοκόλλου RTP ..	129
Εικ. 8.14:	Σύγκριση ποσοστών overhead και payload για κάθε codec.....	130
Εικ. 8.15:	Απαιτούμενο bandwidth και ποσοστά overhead και payload.....	130
Εικ. 8.16:	Ρυθμός μετάδοσης πακέτων	131
Εικ. 8.17:	Μέσος όρος μέγιστου jitter των κλήσεων για κάθε codec.....	132
Εικ. 8.18:	Ανοχή όλων των codecs σε διακύμανση καθυστέρησης < 50 ms.....	132
Εικ. 8.19:	Απώλειες εισερχόμενων πακέτων	133
Εικ. 8.20:	Επίδραση ποσοστού απώλειας πακέτων στον συντελεστή R-factor	134
Εικ. 8.21:	Επίδραση απώλειας πακέτων στους δείκτες MOSτων iLBC και G.711.....	134
Εικ. 8.22:	Σύγκριση της μεταβολής ποιότητας του codec iLBC με τους G.729A και G.723.1 λόγω απωλειών πακέτων.....	135
Εικ. 8.23:	Σύγκριση της μεταβολής ποιότητας των codec iLBC (αριστερά) και G.711 (δεξιά) λόγω απωλειών πακέτων.....	135
Εικ. 8.24:	Σφάλματα ακολουθίας	136
Εικ. 8.25:	Απώλειες πακέτων και σφάλματα ακολουθίας.....	136
Εικ. 8.26:	Συντελεστής R-factor	137
Εικ. 8.27:	Mean Opinion Score	138
Εικ. 8.28:	Ποιοτική κατανομή εξερχομένων κλήσεων.....	139
Εικ. 9.1:	Τοπολογία τοπικού δικτύου προσομοίωσης WAN	144
Εικ. 9.2:	Διαχείριση πακέτων εντός του Linux router	144
Εικ. 9.3:	Πειραματική εγκατάσταση δικτύου VoIP	153
Εικ. 9.4:	Επίδραση του ποσοστού σφαλμάτων ακολουθίας πακέτων στο MOS	155

Εικ. 9.5:	Συσχέτιση MOS με Jitter	156
Εικ. 9.6:	Συσχέτιση R-factor με Jitter.....	156
Εικ. 9.7:	Συσχέτιση του μετρηθέντος max jitter με την ορισθείσα διακύμανση μέσω netem.....	157
Εικ. 9.8:	Συσχέτιση του μετρηθέντος max jitter με την ορισθείσα διακύμανση μέσω netem.....	157
Εικ. 9.9:	Επίδραση της ορισθείσης στο netem διακύμανσης της καθυστέρησης στο MOS και στο R-factor.....	158
Εικ. 9.10:	Επίδραση της ορισθείσης στο netem διακύμανσης της καθυστέρησης στο MOS και στο R-factor.....	158
Εικ. 9.11:	Σύγκριση καμπυλών μεταβολής MOS βάσει της διακύμανσης της καθυστέρησης για καθυστερήσεις βάσης 10 ms και 20 ms	159
Εικ. 9.12:	Επίδραση της διακύμανσης της καθυστέρησης στο MOS Βασική καθυστέρηση 100 ms και κανονική κατανομή διακύμανσης	159
Εικ. 9.13:	Συσχέτιση Mean Opinion Score και R-factor.....	160
Εικ. 9.14:	Επίδραση της απώλειας πακέτων στον δείκτη MOS.....	161
Εικ. 9.15:	Επίδραση της απώλειας πακέτων στο R-factor	161
Εικ. 9.16:	Επίδραση της απώλειας πακέτων στο Jitter (1)	162
Εικ. 9.17:	Επίδραση της απώλειας πακέτων στο Jitter (2)	162
Εικ. 9.18:	Καταγραφέντα ποσοστά απωλειών σε σχέση με τα αναμενόμενα προκαθορισθέντα μέσω της εντολής netem με συσχέτιση 25%	163
Εικ. 9.19:	Σύγκριση της επίδρασης στον δείκτη MOS των συσχετισμένων κατά 30% και 50% απωλειών με τις τυχαίες απώλειες πακέτων.....	163
Εικ. 9.20:	Καταγραφείσα επίδραση των συσχετισμένων απωλειών πακέτων στον δείκτη MOS και σύγκριση με τις τυχαίες απώλειες.....	164
Εικ. 9.21:	Ο υπολογισμός του R-factor από το πρόγραμμα CommView δεν λαμβάνει υπ' όψη την συσχέτιση των απωλειών	165
Εικ. 9.22:	Η μη σωστή λειτουργία του netem στον καθορισμό συσχετισμένων απωλειών μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα.....	165
Εικ. 9.23:	Επίδραση αλλοιωμένων πακέτων στον δείκτη MOS.....	166
Εικ. 9.24:	Απώλειες πακέτων λόγω αλλοίωσης	167
Εικ. 10.1:	Απεικόνιση της προέλευσης των επιθέσεων σε χάρτη	172
Εικ. 10.2:	Κατανομή επιθέσεων ανά χώρα προέλευσης.....	173
Εικ. 10.3:	Αριθμός επιθέσεων ανά ημέρα της εβδομάδος.....	173

Κατάλογος πινάκων

Πίν. 2.1	Διαφορές μεταγωγής κυκλώματος και μεταγωγής πακέτων	8
Πίν. 3.1:	Επικεφαλίδες πρωτοκόλλου SIP	22
Πίν. 4.1:	Μερικοί τύποι ωφέλιμου φορτίου ήχου του πρωτοκόλλου RTP.....	37
Πίν. 5.1:	Πεδία επικεφαλίδας SIP που περιέχουν ευαίσθητες πληροφορίες του χρήστη (u) και του παρόχου της υπηρεσίας (p).....	45
Πίν. 5.2:	Τύποι και παραδείγματα χρήσης SDES	47
Πίν. 6.1:	Απαιτήσεις εφαρμογών για QoS.....	57
Πίν. 6.2:	Πηγές και τυπικές τιμές καθυστέρησης.....	62
Πίν. 6.3:	Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις εύρους ζώνης διαφόρων codec	71
Πίν. 6.4:	Τύποι κυκλοφορίας και προτεραιότητες IEEE 802.1Q	74
Πίν. 7.1:	Αντικειμενικές μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας	86
Πίν. 7.2:	Σύγκριση μεθόδων PAMS, PSQM, PSQM+ και MNB.....	90
Πίν. 7.3:	Κλίμακα υποβαθμίσεων ποιότητας ITU-R Rec. BS.562.....	92
Πίν. 7.4:	Default τιμές σχεδιασμού για τον συντελεστή I_e	102
Πίν. 7.5:	Προκαθορισμένες τιμές και επιτρεπτά εύρη τιμών των παραμέτρων του E-model.....	103
Πίν. 7.6:	Ενδεικτικές μέγιστες τιμές συντελεστή A	104
Πίν. 7.7:	E-model Calculation Tool.....	105
Πίν. 7.8:	Ορισμός κατηγοριών ποιότητας μετάδοσης ομιλίας	106
Πίν. 7.9:	Παραδείγματα ποιότητας μετάδοσης τυπικών συνδέσεων	107
Πίν. 7.10:	Προτεινόμενοι δείκτες MOS.....	108
Πίν. 7.11:	Mean Opinion Score	109
Πίν. 8.1:	Codecs υποστηριζόμενοι από τον πάροχο VoIP, το τηλεφωνικό κέντρο 3CX και τις τηλεφωνικές συσκευές της Linksys.....	122
Πίν. 8.2:	Μέγεθος IP πακέτου G.711	127
Πίν. 8.3:	Κατανομή των εισερχόμενων streams σύμφωνα το R-factor.....	138
Πίν. 8.4:	Κατανομή των εξερχόμενων streams σύμφωνα το R-factor	139
Πίν. 8.5:	Απόσπασμα από το log file της OmniVoice	141
Πίν. 9.1:	Τιμές καθυστέρησης και διακύμανσης αυτής	155
Πίν. 10.1:	Αριθμός επιθέσεων ανά χώρα προέλευσης.....	171

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σήμερα, όλο και περισσότερες επιχειρήσεις λαμβάνουν τις τηλεφωνικές υπηρεσίες τους μέσω του διαδικτύου, αντί της τοπικής τηλεφωνικής εταιρείας. Επίσης, πολλές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν την υφιστάμενη δικτυακή τους υποδομή, είτε πρόκειται για τοπικά δίκτυα LAN, είτε για δίκτυα ευρείας περιοχής WAN, για την αντικατάσταση του συμβατικού τηλεφωνικού τους δικτύου. Η μετάβαση σε ένα ενιαίο δίκτυο που μεταφέρει φωνή και δεδομένα έχει φέρει επανάσταση στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών μειώνοντας θεαματικά το κόστος. Η οικογένεια των τεχνολογιών που οδήγησαν σ' αυτή τη σύγκλιση ονομάζεται Voice over Internet Protocol ή εν συντομία VoIP.

Η τεχνολογία VoIP έχει εξελιχθεί σε μια βιώσιμη λύση προς όφελος των μεμονωμένων χρηστών αλλά και των κάθε μεγέθους εταιρειών. Ο πρωταρχικός λόγος για τη μετάβαση στην τηλεφωνία VoIP είναι η σημαντική μείωση του κόστους, δεδομένου ότι εξισώνει το κόστος των υπεραστικών κλήσεων, των τοπικών κλήσεων και της ηλεκτρονικής αλληλογραφίας σε κλάσματα του λεπτού του ευρώ ανά χρήση. Το μεγάλο όμως δέλεαρ για τις επιχειρήσεις είναι το γεγονός ότι η τεχνολογία VoIP τις επιτρέπει να προσαρμόσουν στις απαιτήσεις τους το σύνολο των τηλεπικοινωνιακών τους αναγκών χρησιμοποιώντας μια ενιαία πλατφόρμα δικτύωσης για τηλεφωνία και δεδομένα.

Είναι δε τόσο γρήγορες οι εξελίξεις, που έχουν κάνει τη συμβατική τηλεφωνία να φαίνεται ήδη απαρχαιωμένη και έχουν καταστήσει την τεχνολογία VoIP ως το κυρίαρχο πρότυπο των εταιρικών επικοινωνιών.

Ενώ όμως τα πλεονεκτήματα της τηλεφωνίας VoIP έχουν ήδη αναδειχθεί, η εξασφάλιση της ποιότητας των τηλεφωνικών κλήσεων, η οποία στην συμβατική τηλεφωνία θεωρείται δεδομένη, παραμένει ανοιχτή πρόκληση. Παραδοσιακά, για την αξιολόγηση των διαδικτυακών υπηρεσιών γίνεται χρήση μετρικών ποιότητας υπηρεσίας (QoS, Quality of Service), όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth), η καθυστέρηση μετάδοσης (delay), η διακύμανση αυτής (jitter) και η απώλεια πακέτων (loss). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές νέες μετρικές που έχουν ως σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας εμπειρίας (QoE, Quality of Experience) ενός χρήστη.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας των κλήσεων ενός τηλεφωνικού κέντρου VoIP μέσω καταγραφής και ανάλυσης μετρικών QoS και QoE. Η μέτρηση της απόδοσης της τηλεφωνίας VoIP και ειδικότερα της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) όπως την αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης (QoE) έχει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Σε κάθε περίπτωση, η μέτρηση και η καταγραφή των σχετικών παραμέτρων είναι σημαντική τόσο για τους χρήστες, όσο και για τους διαχειριστές δικτύων και τις εταιρείες ανάπτυξης δικτυακού λογισμικού.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των τηλεφωνικών δικτύων, από την τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος στην τεχνολογία μεταγωγής πακέτων, που είναι η βάση της τηλεφωνίας VoIP, και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της νέας τεχνολογίας.

Η μετάδοση της φωνής μέσω του πρωτοκόλλου του Internet βασίζεται σε πολλά άλλα πρωτόκολλα που αναπτύχθηκαν για τον σκοπό αυτό. Αυτά διακρίνονται σε πρωτόκολλα σηματοδοσίας, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση της συνόδου μεταξύ των δύο ή περισσότερων συνδιαλεγόμενων άκρων, και στα πρωτόκολλα μεταφοράς της φωνής. Το πιο διαδεδομένο σήμερα πρωτόκολλο σηματοδοσίας είναι το SIP, η λειτουργία του οποίου αναλύεται στο κεφάλαιο 3.

Συnergαζόμενο με το SIP είναι το πρωτόκολλο SDP που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων της τηλεφωνικής συνόδου, όπως είναι η κωδικοποίηση και η συμπίεση

της φωνής. Για τη μεταφορά των πακέτων της φωνής υπεύθυνο είναι το πρωτόκολλο RTP, ένα πρωτόκολλο μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο, το οποίο υλοποιείται επάνω στο UDP. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και άλλα, προεκτάσεις και βελτιώσεις του βασικού πρωτοκόλλου μεταφοράς RTP, όπως για παράδειγμα το SRTP, που παρέχει εμπιστευτικότητα, κρυπτογραφώντας τα πακέτα της φωνής. Το κεφάλαιο 4 αναφέρεται στη χρήση όλων αυτών των σχετικών με τη μετάδοση της φωνής πρωτοκόλλων στην τηλεφωνία VoIP.

Η μεταφορά της φωνής μέσω του Internet, το οποίο είναι ένα δημόσιο δίκτυο, ενέχει διαφόρους κινδύνους ασφαλείας, όπως αυτόν της ιδιωτικότητας των κλήσεων. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια σύντομη αναφορά στα θέματα ιδιωτικότητας της τηλεφωνίας VoIP, όπως για παράδειγμα, το κενό ασφαλείας του Skype, το οποίο δεν έχει επιδιορθωθεί μέχρι σήμερα που γράφεται η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή (Μάιος 2012), παρόλο που είναι σε γνώση της εταιρείας από τα τέλη του 2010.

Στα επόμενα δύο κεφάλαια αναπτύσσονται θέματα που αφορούν στην ποιότητα της φωνής στην τηλεφωνία VoIP. Το κεφάλαιο 6 διαπραγματεύεται την ποιότητα υπηρεσίας QoS και τις μεθόδους για την εξασφάλιση αυτής. Γίνεται ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα, όπως είναι η καθυστέρηση και η διακύμανση αυτής, το εύρος ζώνης και η απώλεια πακέτων, εγγενείς παράμετροι των δικτύων IP, αλλά και άλλων, εξειδικευμένων της τηλεφωνίας VoIP, όπως οι αλγόριθμοι κωδικοποίησης και το συχνά παρατηρούμενο φαινόμενο της ηχούς. Γίνεται επίσης αναφορά στα διαθέσιμα πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας.

Η ποιότητα εμπειρίας είναι ένας νέος σχετικά όρος, ο οποίος έχει σχέση με την ποιότητα υπηρεσίας αλλά αφορά στον τελικό χρήστη και στο πως αυτός αντιλαμβάνεται την ποιότητα. Το κεφάλαιο 7 αναφέρεται στους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίληψη του χρήστη και στις συνεχώς εξελισσόμενες μεθόδους αξιολόγησης της ποιότητας εμπειρίας. Εκτενέστερη αναφορά γίνεται για την μέθοδο MOS και τον αλγόριθμο E-model, το προτεινόμενο από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών πρότυπο αξιολόγησης της ποιότητας μετάδοσης της φωνής.

Το ερευνητικό μέρος της μεταπτυχιακής διατριβής αφορά στη βελτιστοποίηση της ποιότητας των κλήσεων VoIP, μέσω της καταγραφής και ανάλυσης παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα της φωνής. Στο κεφάλαιο 8 περιγράφεται το υλικό και το λογισμικό ενός τηλεφωνικού κέντρου VoIP και αναπτύσσεται η μεθοδολογία αξιολόγησης της ποιότητας. Παρουσιάζονται οι σχετικές

παράμετροι και αναλύονται στατιστικά οι επιπτώσεις που αυτές έχουν στην ποιότητα πραγματικών κλήσεων, μέσω παρόχου τηλεφωνίας VoIP, με χρήση διαφόρων κωδικοποιητών.

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων, που έχουν στην ποιότητα της φωνής οι σχετικές με το δίκτυο παράμετροι, μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, μέσω πειραματικής εγκατάστασης VoIP σε επίπεδο τοπικού δικτύου, προσομοιώνοντας τα χαρακτηριστικά των δικτύων ευρείας περιοχής και κατ' επέκταση του Internet. Στο κεφάλαιο 9 περιγράφεται η λειτουργία του συμπεριλαμβανομένου στο λειτουργικό σύστημα Linux προσομοιωτή δικτύου netem και παρουσιάζονται οι δυνατότητές του, αλλά ταυτόχρονα επισημαίνονται και οι αδυναμίες του. Μελετάται η επίδραση στον δείκτη ποιότητας MOS παραγόντων, όπως, η διακύμανση της καθυστέρησης, η απώλεια πακέτων, τα σφάλματα στην ακολουθία των πακέτων και η αλλοίωση των δεδομένων που περιέχουν.

Στο κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία που αφορούν στη λειτουργία του τηλεφωνικού κέντρου κατά το χρονικό διάστημα των τελευταίων 10 μηνών. Τα στοιχεία αφορούν, αφ' ενός στη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας VoIP, η οποία στην παραδοσιακή τηλεφωνία θεωρείται δεδομένη, και αφ' ετέρου στις προσπάθειες παραβίασης του τηλεφωνικού κέντρου μέσω διαδικτυακών επιθέσεων.

Το τελευταίο κεφάλαιο είναι ο επίλογος, όπου γίνεται μια σύντομη καταγραφή των αποκτηθέντων γνώσεων και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Περιλαμβάνονται επίσης προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Η εξέλιξη της τηλεφωνίας

Για περισσότερο από έναν αιώνα, από την εποχή του Graham Bell έως και σήμερα, η τηλεφωνία βασίζονταν στην τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος. Τα τελευταία όμως χρόνια, παρατηρείται μια στροφή προς την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων. Η διαφορά στον τρόπο λειτουργίας των δύο τεχνολογιών είναι ο παράγοντας που συνετέλεσε στην επιτυχία της τηλεφωνίας VoIP. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών και στα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα της τηλεφωνίας VoIP σε σύγκριση με τη συμβατική τηλεφωνία.

2.1 Εξέλιξη τηλεφωνικών συστημάτων και δικτύων τηλεπικοινωνιών

Την τελευταία δεκαετία, η τηλεφωνία VoIP έχει εξελιχθεί από μια αναδυόμενη τεχνολογία, σε μια ήδη αναγνωρισμένη τεχνολογία που θα αντικαταστήσει τα υφιστάμενα τηλεφωνικά συστήματα

που χρησιμοποιούν τη μεταγωγή κυκλωμάτων βασισμένη κυρίως στην πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM, Time division Management).

Ο Σύγχρονος Τρόπος Μεταγωγής STM (Synchronous Transfer Mode) βασίζεται στην μεταγωγή κυκλωμάτων και στη σύγχρονη πολυπλεξία, ενώ ο ATM (Asynchronous Transfer Multiplex) βασίζεται σε μεταγωγή πακέτων και σε ασύγχρονη πολυπλεξία. Στο STM, το εύρος ζώνης της ζεύξης είναι οργανωμένο σε σταθερά πλαίσια συγκεκριμένου πλήθους χρονοθυρίδων. Κάθε χρονοθυρίδα διατίθεται σε μία σύνδεση που εντοπίζεται από τη θέση της στο πλαίσιο. Το STM είναι αποδοτικό για υπηρεσίες σταθερού ρυθμού αλλά πολυδάπανο για υπηρεσίες που εμφανίζουν αυξομειώσεις και ξεσπάσματα του ρυθμού κίνησης.

Επί πλέον, το Διαδίκτυο τείνει να αντικαταστήσει τα καθιερωμένα τηλεπικοινωνιακά πρότυπα όπως το Ψηφιακό Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών (ISDN, Integrated Services Digital Network) αλλά και την προταθείσα από την τότε ονομαζόμενη CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique), την σημερινή δηλαδή Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU (International Telecommunications Union), έκδοση ευρυζωνικότητας B-ISDN (Broadband ISDN) που βασίζεται σε ασύγχρονη πολυπλεξία.

Τα πρότυπα TDM, ATM, ISDN, και B-ISDN αποτελούν πλέον ιστορία καθώς όλες οι ενσύρματες και ασύρματες επικοινωνίες μεταφέρονται σε πρότυπα του Internet που αναπτύχθηκαν από την IETF (Internet Engineering Task Force) [87]. Χαρακτηριστικό είναι το κύριο άρθρο του περιοδικού Economist του Σεπτεμβρίου του 2005 με τίτλο «Πώς το διαδίκτυο σκότωσε την τηλεφωνική αγορά - How the Internet killed the phone business» το οποίο ανέλυε την τότε κινητικότητα στο χώρο της τεχνολογίας VoIP και προέβλεπε με επιτυχία την εξέλιξη των πραγμάτων [14]. Θεωρούσε ως δεδομένο το ότι δεν υφίστατο πλέον το θέμα του κατά πόσον η τηλεφωνία VoIP θα εξαλείψει την παραδοσιακή τηλεφωνία, αλλά η ερώτηση για το πόσο γρήγορα θα το κάνει. Οι άνθρωποι της βιομηχανίας μιλούσαν ήδη από τότε για την ημέρα που η τηλεφωνία θα είναι μια δωρεάν υπηρεσία που θα προσφέρεται ως μέρος μιας δέσμης υπηρεσιών, ως κίνητρο για την αγορά άλλων υπηρεσιών, όπως η ευρυζωνική πρόσβαση και οι υπηρεσίες συνδρομητικής τηλεόρασης. Το άρθρο κατέληγε ότι η τεχνολογία VoIP είχε ήδη (το 2005) αναδιαμορφώσει πλήρως το τοπίο των τηλεπικοινωνιών και ανέφερε χαρακτηριστικά ότι οι συζητήσεις γύρω από την τότε μικρή εταιρεία Skype σηματοδοτούσαν τη μαζική στροφή προς μια βιομηχανία τρισεκατομμυρίων δολαρίων, εννοώντας τη βιομηχανία VoIP.

Το πρωτόκολλο SIP (Session Initiation Protocol), το οποίο αναλύεται λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 2, έχει σχεδιασθεί ειδικά για τηλεφωνία VoIP και επικοινωνίες πολυμέσων και έχει υιοθετηθεί από σχεδόν όλους τους δημόσιους φορείς παροχής υπηρεσιών VoIP ενσύρματης και ασύρματης επικοινωνίας. Ο ανταγωνισμός με το παλαιότερο πρωτόκολλο H.323 [52] που προτάθηκε από την ITU-T το 1996 δεν υφίσταται πλέον, καθώς έχει ήδη επικρατήσει το πρωτόκολλο SIP. Κατά συνέπεια, η εγκατεστημένη βάση του H.323 αργά ή γρήγορα θα αντικατασταθεί.

Λόγω των εξελίξεων αυτών, έχει προκύψει μια παγκόσμια βιομηχανία, εκμεταλλευόμενη τα νέα πρότυπα για επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Σύμφωνα με στοιχεία του VoIP Providers List and directory [80], στις αρχές του 2012, περισσότεροι από 8000 πάροχοι δραστηριοποιούνταν παγκοσμίως προσφέροντας υπηρεσίες VoIP, χρησιμοποιώντας ως επί το πλείστον το πρωτόκολλο SIP. Οι περισσότεροι από αυτούς είχαν έδρα στις Η.Π.Α. (1111) ενώ αξιοσημείωτος ήταν ο αριθμός αυτών που δραστηριοποιούνταν στον Καναδά (306) και στην Ινδία (267). Στην Ελλάδα αναφέρονταν 22 ενεργοί πάροχοι.

Ο κατάλογος εξοπλισμού που υποστηρίζει το πρωτόκολλο SIP (όπως τηλέφωνα, λογισμικό υπολογιστών και φορητών συσκευών, δρομολογητές, πύλες, κλπ.) είναι πλέον μεγάλος και συνεχίζει να αυξάνεται. Στην πραγματικότητα, όλοι οι παραδοσιακοί προμηθευτές εξοπλισμού και συστημάτων τηλεφωνίας υποστηρίζουν πλέον το πρωτόκολλο SIP.

Η παρουσία (Presence) και τα άμεσα μηνύματα (IM, Instant Messaging) αποτελούν την επικρατούσα τάση σήμερα στις επικοινωνίες. Η παρουσία, που αποτελεί πολύτιμο εξάρτημα της τηλεφωνίας VoIP, μπορεί να εξελιχθεί στον ήχο κλήσης του εικοστού πρώτου αιώνα. Οι λεγόμενες υπηρεσίες άμεσων μηνυμάτων που παρέχεται από μεγάλες εταιρείες του διαδικτύου, όπως AOL, Apple, Google, IBM, Microsoft, Skype (που δεν βασίζονται στο πρωτόκολλο SIP), και το Yahoo!, στην πραγματικότητα διεξάγουν επί του παρόντος, το μεγαλύτερο μέρος της δημόσιας κυκλοφορίας VoIP μεταξύ των τελικών χρηστών σε όλο τον κόσμο. Επίσης, πολλές από τις παλαιές εταιρείες τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούν την τεχνολογία VoIP για την αντικατάσταση των εσωτερικών δικτύων TDM, αλλά οι VoIP υπηρεσίες τους δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τις προηγμένες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί από τις εταιρείες άμεσων μηνυμάτων του διαδικτύου και την πρόκληση της peer-to-peer (P2P) επικοινωνίας.

Στην σημερινή εποχή, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως η εποχή της κινητικότητας, οι επικοινωνίες μέσω του Διαδικτύου πλεονεκτούν, καθώς δεν εξαρτώνται από την τοποθεσία στο

διαδίκτυο. Η πολυμεσική φύση των επικοινωνιών μέσω διαδικτύου δίνει επίσης την ευκαιρία σε άτομα με προβλήματα ομιλίας και ακοής να συμμετέχουν πλήρως και στους χώρους εργασίας, οι οποίοι έχουν αυξημένες απαιτήσεις επικοινωνίας και πληροφόρησης, αλλά και στην προσωπική τους ζωή.

2.2 Μετάδοση φωνής μέσω δικτύων μεταγωγής πακέτων

Το παλιό τηλεφωνικό σύστημα PSTN χρησιμοποιεί την τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος σε αντίθεση με την τηλεφωνία VoIP η οποία χρησιμοποιεί την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων. Η διαφορά στον τρόπο λειτουργίας των δύο αυτών μεθόδων μεταγωγής είναι ο παράγοντας που συνετέλεσε στην επιτυχία της τηλεφωνίας VoIP.

2.2.1 Δίκτυα μεταγωγής πακέτων έναντι δικτύων μεταγωγής κυκλώματος

Στον Πίν. 2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριες διαφορές μεταξύ των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος και των δικτύων μεταγωγής πακέτων.

Μεταγωγή κυκλώματος	Μεταγωγή πακέτων
Απαιτείται εγκαθίδρυση σύνδεσης	Δεν απαιτείται εγκαθίδρυση σύνδεσης
Αποκλειστική χρήση των πόρων μεταγωγής και μετάδοσης	Μη αποκλειστική χρήση των πόρων μετάδοσης – Απαίτηση δρομολόγησης
Εγκαθίδρυση μονοπατιού για όλη τη σύνοδο	Εγκαθίδρυση διαδρομής για κάθε πακέτο
Προσφέρεται για συνεχή μετάδοση δεδομένων	Προσφέρεται για μετάδοση σποραδικών καταγιστικών (bursty) δεδομένων – Πακέτα
Σε μία εγκαθιδρυμένη σύνδεση δεν υπάρχει καθυστέρηση λόγω υπερφόρτωσης	Καθυστέρηση στη μετάδοση των πακέτων λόγω υπερφόρτωσης
Σταθερό εύρος ζώνης – Συχνά μη αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης	Δυναμική χρήση εύρους ζώνης – Αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης
Μεγαλύτερο κόστος	Μικρότερο κόστος
Πολυπλεξία FDM ή TDM	Κατά μία έννοια στατιστική πολυπλεξία

Πίν. 2.1 Διαφορές μεταγωγής κυκλώματος και μεταγωγής πακέτων

2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα VoIP έναντι PSTN

Λειτουργικό κόστος

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της τηλεφωνίας VoIP έναντι της συμβατικής τηλεφωνίας PSTN αφορά στο λειτουργικό κόστος που είναι σημαντικά χαμηλότερο. Η χρέωση είναι συνήθως σταθερή ανεξαρτήτως του αριθμού και της διάρκειας των κλήσεων. Ιδιαίτερα, το κόστος των υπεραστικών κλήσεων είναι πολύ χαμηλό. Αντίθετα, στην τηλεφωνία PSTN η χρέωση συνήθως γίνεται ανάλογα με τον χρόνο και την απόσταση της κλήσης με αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος κυρίως των υπεραστικών κλήσεων.

Ποιότητα επικοινωνίας

Η ποιότητα επικοινωνίας στην τηλεφωνία VoIP είναι χαμηλότερη και μεταβαλλόμενη καθώς η λειτουργία της βασίζεται στη μεταγωγή πακέτων με μη σταθερό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Παρουσιάζονται προβλήματα καθυστέρησης, απώλειας πακέτων καθώς και το φαινόμενο της ηχούς. Στην τηλεφωνία PSTN η ποιότητα είναι υψηλότερη και σταθερή καθώς η λειτουργία της βασίζεται στην μεταγωγή κυκλώματος με σταθερό εύρος ζώνης 64 Kbps ανά κατεύθυνση.

Διαθεσιμότητα

Η διαθεσιμότητα των υπηρεσιών τηλεφωνίας VoIP είναι μικρότερη από αυτή της συμβατικής τηλεφωνίας στην οποία η διαθεσιμότητα είναι πρακτικά 100%.

Ταυτόχρονες κλήσεις

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τηλεφωνίας VoIP, που αντανακλάται άμεσα στο κόστος της υπηρεσίας, είναι το γεγονός ότι μέσω μιας φυσικής γραμμής μπορούν να γίνουν ταυτόχρονα πολλές κλήσεις ενώ στην τηλεφωνία PSTN απαιτείται η εγκατάσταση επί πλέον φυσικών γραμμών.

Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος

Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των συσκευών και γενικά του εξοπλισμού VoIP σε αντίθεση με τις συμβατικές τηλεφωνικές συσκευές PSTN οι οποίες δεν χρειάζονται εξωτερική τροφοδοσία καθώς τροφοδοτούνται από το ίδιο το δίκτυο της τηλεφωνίας.

Φορητότητα και μετακίνηση

Στην τηλεφωνία VoIP είναι δυνατή η χρήση του ίδιου αριθμού από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Προσφέρει επίσης τη δυνατότητα κλήσης χωρίς κόστος από διάφορα μέρη, όπως αεροδρόμια, café, ξενοδοχεία όπου προσφέρεται δωρεάν πρόσβαση στο Internet. Αντίθετα στα δίκτυα PSTN δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα. Σημειωτέον ότι, η προσφερόμενη ανάλογη υπηρεσία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας (roaming) έχει σήμερα πάρα πολύ υψηλές χρεώσεις.

Κλήσεις αριθμών πρώτης ανάγκης

Στην τηλεφωνία VoIP, αν και υπάρχει η δυνατότητα κλήσης αριθμών πρώτης ανάγκης (100, 166, 199 κλπ.), εν τούτοις δεν είναι εφικτός ο άμεσος εντοπισμός της θέσης του καλούντος που πολλές φορές έχει αποδειχθεί χρήσιμος για τη διάσωση ανθρώπινων ζωών. Αντίθετα στην τηλεφωνία PSTN υπάρχει η δυνατότητα άμεσου εντοπισμού της θέσης του καλούντος και παροχή βοήθειας, ακόμη και σε περίπτωση διακοπής της σύνδεσης ή αδυναμίας του καλούντος να δώσει τα στοιχεία της θέσης του.

Τηλεφωνικός κατάλογος

Σήμερα δεν είναι διαθέσιμοι τηλεφωνικοί κατάλογοι συνδρομητών υπηρεσιών VoIP, λόγω του μεγάλου αριθμού παρόχων και της μη ταύτισης αριθμού και γεωγραφικού σημείου. Όμως, έχει ήδη αρχίσει η προσφορά της υπηρεσίας από κάποιους παρόχους. Στη συμβατική τηλεφωνία, ο τηλεφωνικός κατάλογος ήταν διαθέσιμος είτε σε έντυπη είτε σε ηλεκτρονική μορφή είτε ως υπηρεσία από τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της.

Δυνατότητες τηλεφωνικών συσκευών

Οι τηλεφωνικές συσκευές VoIP έχουν συνήθως μικρότερο μέγεθος, με πληθώρα δυνατοτήτων αλλά ακριβότερο κόστος. Επί πλέον, τα τελευταία χρόνια έχουν ενσωματωθεί λειτουργίες VoIP και σε συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Οι συμβατικές συσκευές PSTN έχουν συνήθως μεγαλύτερο μέγεθος με συγκεκριμένες δυνατότητες και χαμηλότερο κόστος.

Ενοποιημένη υπηρεσία φωνής, εικόνας και δεδομένων

Οι συνδρομητές υπηρεσιών τηλεφωνίας VoIP απολαμβάνουν απλούστερων διαδικασιών καθώς συνδιαλέγονται με ένα και μόνο πάροχο που προσφέρει ταυτόχρονα και υπηρεσίες εικόνας και δεδομένων. Για τους συνδρομητές της συμβατικής τηλεφωνίας απαιτούνται περισσότερες συνδιαλλαγές καθώς οι πάροχοι είναι τουλάχιστον δύο ή περισσότεροι.

Ασφάλεια επικοινωνιών

Η ασφάλεια των επικοινωνιών VoIP είναι μικρότερη συγκρινόμενη με αυτή των δικτύων PSTN καθώς οι πρώτες υπόκεινται σε όλους τους κινδύνους του Internet.

Προστιθέμενες υπηρεσίες

Υπηρεσίες, όπως, η τριμερής επικοινωνία, η αναμονή, η αναγνώριση κλήσεων, ο αυτόματος τηλεφωνητής, το φωνητικό e-mail και πολλές άλλες, είναι διαθέσιμες στην τηλεφωνία VoIP χωρίς επί πλέον χρέωση. Αντίθετα, στην τηλεφωνία PSTN η υλοποίησή τους γίνεται με επί πλέον χρέωση της κάθε υπηρεσίας.

Εταιρική χρήση

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας VoIP για τους εταιρικούς χρήστες είναι η εύκολη αναβάθμιση hardware και software των τηλεφωνικών κέντρων. Πλεονέκτημα επίσης είναι η διαθεσιμότητα λογισμικού ανοικτού κώδικα. Η συντήρηση του εξοπλισμού γίνεται συνήθως από το προσωπικό IT της ίδιας της εταιρείας που τον χρησιμοποιεί. Τέλος, ένα επί πλέον πλεονέκτημα της τεχνολογίας VoIP για τους εταιρικούς χρήστες είναι η δυνατότητα τηλεδιάσκεψης με εικόνα.

Η αναβάθμιση των τηλεφωνικών κέντρων συμβατικής τεχνολογίας είναι συνήθως περιορισμένη και με μεγάλο κόστος. Το κόστος επισκευής και συντήρησης είναι επίσης υψηλό, καθώς σχεδόν όλα τα εταιρικά τηλεφωνικά κέντρα PSTN είναι «κλειστά συστήματα».

Αποστολή Fax

Η αποστολή Fax μέσω υπηρεσιών VoIP δεν ενδείκνυται καθώς οι χρησιμοποιούμενοι σήμερα αλγόριθμοι συμπίεσης είναι βελτιστοποιημένοι για φωνητικές κλήσεις και όχι για fax over IP. Αντίθετα, η αποστολή fax είναι δεδομένη στα δίκτυα PSTN.

2.3 Ιδιωτικά τηλεφωνικά κέντρα και συσκευές VoIP

Τα ιδιωτικά τηλεφωνικά κέντρα (PBX, Private Branch Exchange) είναι τηλεφωνικά συστήματα που δίνουν τη δυνατότητα σε μεγάλες και μικρές εταιρείες να παρέχουν τηλεφωνική επικοινωνία σε πολλούς εργαζομένους αξιοποιώντας λίγες εξωτερικές γραμμές και μηδενίζοντας το κόστος των ενδοεταιρικών επικοινωνιών. Η εξέλιξη των τηλεφωνικών κέντρων ξεκίνησε το

1878, δύο χρόνια μετά την κατοχύρωση του διπλώματος ευρεσιτεχνίας από τον Graham Bell, όταν εγκαταστάθηκε το πρώτο δημόσιο τηλεφωνικό κέντρο στο New Haven των Η.Π.Α. [69]. Μέχρι τα τέλη του 20ού αιώνα η ανάπτυξη τους βασίστηκε στην τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος. Η τελευταία όμως σημαντική πρόοδος στην εξέλιξη των τηλεφωνικών κέντρων είναι η υιοθέτηση της τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων η οποία γίνεται όλο και πιο δημοφιλής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μεγάλο πλεονέκτημα των IP PBX για μια επιχείρηση είναι ότι έχουν πολύ μικρότερο κόστος επέκτασης και διαχείρισης σε σύγκριση με τα συμβατικά.



Εικ. 2.1: Η εξέλιξη των τηλεφωνικών κέντρων

Όλες οι μεγάλες εταιρείες του χώρου, όπως για παράδειγμα οι Avaya, Cisco, Siemens, Alcatel, Nortel κ.ά., έχουν πλέον αναπτύξει και διαθέτουν στην αγορά τηλεφωνικά κέντρα και τηλεφωνικές συσκευές που συνδυάζουν hardware και software βασισμένο στο πρωτόκολλο IP. Όμως, η μεγάλη καινοτομία, που συντελέστηκε με το πέρασμα στη νέα χιλιετία, είναι η ανάπτυξη τηλεφωνικών κέντρων υλοποιημένων μόνο με software το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί σε κοινούς Η/Υ, μειώνοντας ακόμη περισσότερο το κόστος και διευκολύνοντας τη διαχείριση.

Σήμερα κυκλοφορούν στην αγορά software IP PBX για τα περισσότερα από τα γνωστά λειτουργικά συστήματα, με πιο διαδεδομένο εξ αυτών το Asterisk το οποίο διατίθεται σαν ελεύθερο λογισμικό για συστήματα Linux [2]. Υπάρχουν όμως και εκδόσεις του Asterisk που τρέχουν σε άλλα λειτουργικά συστήματα όπως NetBSD, OpenBSD, FreeBSD, Mac OS X, και Solaris. Ένα από τα πιο διαδεδομένα software IP PBX για τα λειτουργικά συστήματα Windows της Microsoft είναι το 3CX Phone System [1].

Κεφάλαιο 3

Το Πρωτόκολλο SIP

Το Session Initiation Protocol (SIP) είναι ένα σχετικά νέο πρωτόκολλο σηματοδότησης, παρουσίας και άμεσων μηνυμάτων το οποίο αναπτύχθηκε αφενός για τη δημιουργία, την τροποποίηση και τον τερματισμό συνόδων πολυμέσων και αφετέρου για την αίτηση και παράδοση παρουσίας και άμεσων μηνυμάτων μέσω του Διαδικτύου.

Αναπτύχθηκε από την IETF (Internet Engineering Task Force - Ομάδα Εργασίας Μηχανικών Internet) ως μέρος της αρχιτεκτονικής συνδιασκέψεων πολυμέσων του Internet (Internet Multimedia Conferencing Architecture) και σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συνεργάζεται με άλλα πρωτόκολλα του Διαδικτύου, όπως TCP, TLS, UDP, IP, DNS και άλλα.

3.1 Οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου SIP

Όπως υποδηλώνει το όνομά του, το πρωτόκολλο επιτρέπει σε δύο άκρα (endpoints) τη δημιουργία συνόδων μεταξύ τους. Οι βασικές λειτουργίες σηματοδοσίας του πρωτοκόλλου έχουν ως εξής:

- Πληροφορίες θέσης του ενός άκρου,
- Επικοινωνία με το άλλο άκρο για τη διερεύνηση διαθεσιμότητας και επιθυμίας δημιουργίας συνόδου,
- Ανταλλαγή πληροφοριών για την εγκαθίδρυση της συνόδου,
- Τροποποίηση υφιστάμενων συνόδων,
- Τερματισμός υφιστάμενων συνόδων.

Το πρωτόκολλο SIP έχει επίσης επεκταθεί και υποστηρίζει την αίτηση και παράδοση πληροφοριών παρουσίας (καταστάσεις on-line/off-line και πληροφορίες θέσης) καθώς και συνόδους άμεσων μηνυμάτων. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- Δημοσιοποίηση πληροφοριών παρουσίας,
- Αίτηση παράδοσης πληροφοριών παρουσίας,
- Κοινοποίηση άλλων γεγονότων,
- Μεταφορά των άμεσων μηνυμάτων.

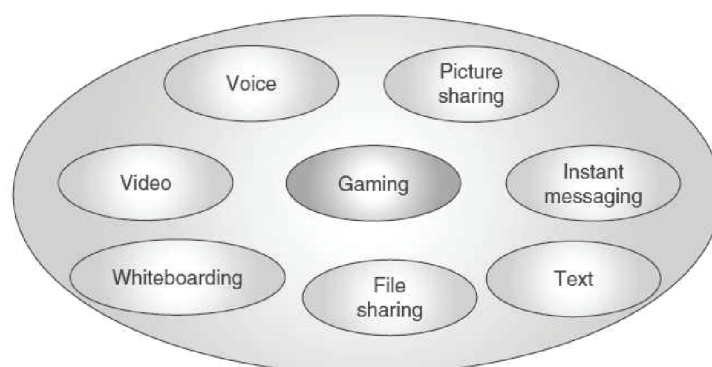
Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι εκτός από την τυπική τηλεφωνική σύνοδο, υπάρχουν πολλοί άλλοι τύποι συνόδων όπου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο SIP και οι οποίοι δεν έχουν καμία ομοιότητα με ένα τηλεφώνημα.

- Επικοινωνία βίντεο
- Άμεσα μηνύματα επικοινωνίας: διαδραστική online ανταλλαγή συνήθως σύντομων μηνυμάτων
- Κείμενο over IP: ανταλλαγή κειμένου σε πραγματικό χρόνο
- Παιχνίδια P2P: συνομιλία με φωνή ενσωματωμένη σε παιχνίδια P2P
- Υπηρεσίες λευκού πίνακα (Whiteboarding) : συνομιλία με φωνή στις εφαρμογές υπηρεσίας λευκού πίνακα. Σε αυτό το είδος υπηρεσίας, κάθε χρήστης βλέπει έναν λευκό πίνακα στην οθόνη του και μπορεί να σχεδιάσει ή να γράψει πάνω του. Οι αλλαγές στον πίνακα που από τους χρήστες παραμένουν σε συγχρονισμό μεταξύ τους.
- Μεταφορά αρχείων: ανταλλαγή δεδομένων peer-to-peer.

Επιπλέον, το πρωτόκολλο SIP παρέχει εγγενή υποστήριξη για το συνδυασμό διαφορετικών τύπων μέσων στην ίδια σύνοδο. Είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί που μπορεί να φανταστεί κανείς, με πιο συνηθισμένους τους παρακάτω:

- φωνή σε συνδυασμό με εικόνα βίντεο: εικονοτηλέφωνο.
- φωνή σε συνδυασμό με IM: Οι χρήστες μπορούν να συνομιλούν μεταξύ τους ενώ ταυτόχρονα ανταλλάσσουν μηνύματα.
- φωνή σε συνδυασμό με κείμενο σε πραγματικό χρόνο: Για παράδειγμα, σε κάποιο σημείο μιας συνομιλίας που βρίσκεται σε εξέλιξη, ένας από τους συνομιλητές δεν καταλαβαίνει κάποια λέξη και ζητά από τον άλλο να τη γράψει σε κείμενο και να το αποστείλει σε πραγματικό χρόνο.
- φωνή σε συνδυασμό με την απευθείας μεταφορά εικόνας: Οι χρήστες μπορούν να μοιραστούν ζωντανά μια εικόνα, ενώ μιλούν ο ένας στον άλλο. Για παράδειγμα η Alice και ο Bob μιλούν ο ένας στον άλλο. Σε κάποιο σημείο η Alice λέει στον Bob για το σπίτι που αγόρασε και στέλνει on-line μια φωτογραφία ώστε να μπορούν να τη μοιραστούν ενώ μιλούν.
- φωνή σε συνδυασμό με την on-line μεταφορά ενός αρχείου.
- φωνή σε συνδυασμό με παιχνίδια: Ο Bob και η Alice μπορούν να παίξουν μια παρτίδα σκάκι, ενώ μιλούν ο ένας στον άλλο.
- φωνή σε συνδυασμό με λευκό πίνακα: Οι χρήστες μοιράζονται ένα λευκό πίνακα, ενώ έχουν μια φωνητική συνομιλία. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι η πλατφόρμα τηλε-εκπαίδευσης Blackboard Collaborate (εξέλιξη της πλατφόρμας Elluminate) [4].

Αυτά είναι μερικά πιθανά παραδείγματα από τα πολλά που υπάρχουν. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το κύριο συστατικό των μέσων είναι η φωνή. Αυτά τα συγκεκριμένα σενάρια μερικές φορές αναφέρονται ως “εμπλουτισμένη φωνή” (rich voice) [77].



Εικ. 3.1: Επικοινωνίες πολυμέσων (Πηγή: Perea [77])

3.2 Η εξέλιξη του πρωτοκόλλου SIP

Το πρωτόκολλο SIP αναπτύχθηκε αρχικά από την ομάδα εργασίας για τον έλεγχο πολυμερών συνόδων πολυμέσων της IETF, γνωστή ως MMUSIC (Multiparty Multimedia Session Control).

Η έκδοση 1.0 υποβλήθηκε ως προσχέδιο το 1997. Στη συνέχεια έγιναν σημαντικές αλλαγές του πρωτοκόλλου που οδήγησαν στην έκδοση 2.0 η οποία υποβλήθηκε ως προσχέδιο το 1998. Τον Μάρτιο του 1999 απέκτησε το καθεστώς Προτεινόμενου Προτύπου και δημοσιεύτηκε ως RFC 2543 τον Απρίλιο του 1999. Λόγω του συνεχώς αυξανόμενου ενδιαφέροντος, τον Σεπτέμβριο του 1999 συστάθηκε από την IETF η ομάδα εργασίας SIP και τον Ιούλιο του 2000 υποβλήθηκε ως RFC 2543-bis ένα νέο προσχέδιο που περιείχε διορθώσεις και διευκρινίσεις. Το έγγραφο αυτό τελικά δημοσιεύθηκε ως RFC 3261 [29], το οποίο αντικατέστησε το αρχικό πρότυπο RFC 2543. Έκτοτε, έχουν δημοσιευτεί αρκετά έγγραφα RFC που επεκτείνουν το πρωτόκολλο SIP.

Η δημοτικότητα του στην IETF έχει οδηγήσει στο σχηματισμό και άλλων σχετικών ομάδων εργασίας. Μία από αυτές, η SIPPING (Session Initiation Protocol Investigation Working Group), διαμορφώθηκε για να ερευνήσει τις εφαρμογές του, να αναπτύξει τις απαιτήσεις για επεκτάσεις του και να δημοσιεύει έγγραφα βέλτιστης τρέχουσας πρακτικής BCP (Best current practice) σχετικά με τη χρήση του. Μια άλλη ομάδα εργασίας, η SIMPLE (SIP for Instant Messaging and Presence Leveraging Extensions), δημιουργήθηκε για την τυποποίηση πρωτοκόλλων σχετικών με την παρουσία και τις εφαρμογές άμεσων μηνυμάτων. Τέλος, άλλες ομάδες εργασίας που ασχολούνται με τη χρήση του SIP είναι η PINT (PSTN and Internet Internetworking), η SPIRITS (Service in the PSTN/IN requesting Internet Services) [68].

Για την αναβάθμιση ενός πρωτοκόλλου από προτεινόμενο πρότυπο (proposed standard) σε σχέδιο προτύπου (draft standard) απαιτούνται πολλές ανεξάρτητες υλοποιήσεις και περιορισμένη επιχειρησιακή εμπειρία. Όσον αφορά στο πρωτόκολλο SIP, έχουν ήδη γίνει πολλές δοκιμές διαλειτουργικότητας. Το τελικό επίπεδο του προτύπου (standard) επιτυγχάνεται μετά από αποδεδειγμένη επιχειρησιακή επιτυχία. Είναι προφανές ότι, με την τεκμηριωμένη διαλειτουργικότητα και την προβλεπόμενη επιχειρησιακή επιτυχία, το πρωτόκολλο SIP θα εξελιχθεί στο άμεσο μέλλον σε πρότυπο.

Το SIP ενσωματώνει στοιχεία από δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα του διαδικτύου: το HTTP (Hyper Text Transport Protocol) που χρησιμοποιείται για την περιήγηση στον

παγκόσμιο ιστό και το SMTP (Simple Mail Transport Protocol) που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρονική αλληλογραφία e-mail. Από το HTTP, το SIP δανείστηκε το σχεδιασμό πελάτη εξυπηρετητή και τη χρήση των διευθύνσεων URL και URI ενώ από το SMTP δανείστηκε τον μηχανισμό κωδικοποίησης του κειμένου και τη μορφή της επικεφαλίδας. Για παράδειγμα, το SIP χρησιμοποιεί τις ίδιες επικεφαλίδες με το SMTP, όπως Προς (To), Από (From), Ημερομηνία (Date) και Θέμα (Subject).

3.3 Αιτήσεις SIP

Οι αιτήσεις SIP (SIP Requests) διακρίνονται από τη γραμμή αίτησης (Request-Line) που περιέχουν σαν πρώτη γραμμή. Η γραμμή αίτησης περιέχει ένα όνομα μεθόδου, μια Αίτηση-URI και την έκδοση του πρωτοκόλλου. Τα στοιχεία αυτά διαχωρίζονται από ένα μόνο χαρακτήρα κενού διαστήματος (SP) και η γραμμή αίτησης τελειώνει με τους χαρακτήρες αλλαγής γραμμής CRLF. Χαρακτήρες CR ή LF δεν γίνονται δεκτοί, εκτός αν αυτοί βρίσκονται σε ακολουθία στο τέλος της γραμμής. Επίσης δεν επιτρέπονται γραμμικά κενά (LWS) σε οποιαδήποτε από τα στοιχεία.

Request-Line = Method SP Request-URI SP SIP-Version CRLF

Method

Η προδιαγραφή RFC 3261 ορίζει έξι βασικές μεθόδους: REGISTER για καταγραφή στοιχείων επικοινωνίας, INVITE, ACK και CANCEL για τη δημιουργία των συνόδων, BYE για τον τερματισμό συνόδων, και OPTIONS για θέση ερωτήματος σε διακομιστές σχετικού με τις ικανότητές τους. Είναι επίσης δυνατόν να ορισθούν πρόσθετοι μέθοδοι, επεκτείνοντας το πρωτόκολλο, αρκεί αυτές να τεκμηριώνονται με πρότυπα RFC. Έχουν ήδη τεκμηριωθεί οι μέθοδοι REFER στο RFC 3515 [36], SUBSCRIBE στα RFC 3265 [31] και RFC 7367 [41], NOTIFY στο RFC 3265 [31], MESSAGE στο RFC 3428 [34], UPDATE στο RFC 3311 [32], INFO στο RFC 6086 [43] και PRACK στο RFC 3262 [30]).

Request-URI

Η Αίτηση-URI είναι ένα SIP ή SIPS URI ή ένα γενικό URI (RFC 2396). Δείχνει τον χρήστη ή την υπηρεσία στην οποία απευθύνεται το αίτημα. Η Αίτηση-URI δεν πρέπει να περιέχει unescaped κενά ή χαρακτήρες ελέγχου και δεν πρέπει να περικλείεται σε "<>".

SIP-Version

Αμφότερα τα μηνύματα αίτησης και απόκρισης περιλαμβάνουν την έκδοση του SIP που χρησιμοποιείται και ακολουθούν το πρότυπο του πρωτοκόλλου HTTP. Το όνομα του πρωτοκόλλου HTTP αντικαθίσταται από το SIP και το HTTP/1.1 αντικαθίσταται από SIP/2.0. Για να είναι συμβατές με την προδιαγραφή RFC 3261, οι εφαρμογές που αποστέλλουν μηνύματα SIP πρέπει να περιλαμβάνουν την έκδοση "SIP/2.0". Η συμβολοσειρά (string) είναι case-insensitive, δεν διακρίνει δηλαδή πεζά ή κεφαλαία, αλλά οι υλοποιήσεις πρέπει να αποστέλλουν κεφαλαία. Σε αντίθεση με το HTTP/1.1, το SIP αντιμετωπίζει τον αριθμό έκδοσης ως συμβολοσειρά. Στην πράξη αυτό δεν κάνει καμία διαφορά.

3.4 Αποκρίσεις SIP

Οι αποκρίσεις του πρωτοκόλλου SIP ξεχωρίζουν από τα αιτήματα, καθώς έχουν σαν αρχική τους γραμμή την γραμμή κατάστασης (Status-Line). Μια γραμμή κατάστασης αποτελείται από την έκδοση του πρωτοκόλλου, ακολουθούμενη από ένα αριθμητικό κωδικό κατάστασης (Status-Code) και το συναφές επεξηγηματικό κείμενο. Κάθε στοιχείο διαχωρίζεται από το επόμενο με ένα μεμονωμένο χαρακτήρα SP. Δεν επιτρέπονται CR ή LF εκτός από την τελική ακολουθία CRLF.

Status-Line = SIP-Version SP Status-Code SP Reason-Phrase CRLF

Ο κωδικός κατάστασης είναι ένας 3-ψήφιος ακέραιος αριθμός που δηλώνει την έκβαση μιας προσπάθειας για την κατανόηση και την ικανοποίηση του αιτήματος. Η Reason-Phrase αποσκοπεί στο να δώσει μια σύντομη περιγραφή με κείμενο του προηγούμενου κωδικού. Ο Status-Code προορίζεται για αυτοματοποιημένη χρήση, ενώ η Reason-Phrase προορίζεται για τον άνθρωπο χρήστη. Επίσης, ένας πελάτης δεν είναι υποχρεωμένος να εξετάζει ή να εμφανίζει το Reason-Phrase. Αν και η προδιαγραφή RFC 3261 προτείνει συγκεκριμένη διατύπωση για τη Reason-Phrase, οι εφαρμογές μπορούν να επιλέξουν άλλο κείμενο, για παράδειγμα, στη γλώσσα που αναφέρεται στο πεδίο Accept-Language της επικεφαλίδας της αίτησης.

3.4.1 Κωδικοί απόκρισης πρωτοκόλλου SIP

Οι κωδικοί απόκρισης είναι συνεπείς και επεκτείνουν τους κωδικούς απόκρισης του πρωτοκόλλου HTTP/1.1. Όμως, σύμφωνα με το RFC 3261, δεν είναι κατάλληλοι όλοι οι κωδικοί απόκρισης του HTTP/1.1 παρά μόνον αυτοί που αναφέρονται παρακάτω. Οι δε υπόλοιποι

κωδικοί του πρωτοκόλλου HTTP/1.1 δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται. Επίσης, το πρωτόκολλο SIP ορίζει μια νέα κατηγορία, την 6xx.

1xx Provisional (informational) responses

Οι προσωρινές αποκρίσεις της μορφής 1xx, επίσης γνωστές ως πληροφοριακές αποκρίσεις, δείχνουν ότι η ο κληθείς διακομιστής εκτελεί κάποια περαιτέρω ενέργεια και δεν έχει ακόμα μια οριστική απάντηση. Ένας διακομιστής αποστέλλει απάντηση τύπου 1xx, αν αναμένει να παρέλθει χρόνος μεγαλύτερος από 200 ms για να αποκτήσει μια τελική απάντηση. Σημειωτέον ότι, οι απαντήσεις 1xx δεν διαβιβάζονται αξιόπιστα καθώς δεν καλούν τον πελάτη να αποστείλει αποδεικτικό παραλαβής ACK. Οι προσωρινές απαντήσεις μπορεί να περιέχουν το σώμα του μηνύματος και να συμπεριλαμβάνουν την περιγραφή της συνόδου. Οι κυριότερες είναι:

- 100 Trying
- 180 Ringing
- 181 Call Is Being Forwarded
- 182 Queued
- 183 Session Progress

2xx Success responses

Οι αποκρίσεις επιτυχίας 2xx δείχνουν ότι το αίτημα είχε επιτυχή έκβαση. Αυτές είναι :

- 200 OK
- 202 accepted: Used for referrals

3xx Redirection responses

Οι αποκρίσεις ανακατεύθυνσης 3xx δίνουν πληροφορίες για τη νέα θέση του χρήστη, ή πληροφορίες σχετικά με εναλλακτικές υπηρεσίες που θα μπορούσαν να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν την κλήση. Είναι δε οι παρακάτω:

- 300 Multiple Choices
- 301 Moved Permanently
- 302 Moved Temporarily
- 305 Use Proxy
- 380 Alternative Service

4xx Request failures

Οι αποκρίσεις αποτυχίας αίτησης 4xx δηλώνουν την οριστική αποτυχία απόκρισης από έναν συγκεκριμένο διακομιστή. Ο πελάτης δεν πρέπει να επαναλάβει το ίδιο αίτημα, χωρίς να το τροποποιήσει. Για παράδειγμα, μπορεί να προσθέσει την κατάλληλη εξουσιοδότηση. Ωστόσο, το ίδιο αίτημα σε ένα διαφορετικό διακομιστή μπορεί να είναι επιτυχές.

- 400 Bad Request
- 401 Unauthorized: Used only by registrars. Proxies should use proxy authorization 407
- 402 Payment Required (Reserved for future use)
- 403 Forbidden
- 404 Not Found: User not found
- 405 Method Not Allowed
- 406 Not Acceptable
- 407 Proxy Authentication Required
- 408 Request Timeout: Couldn't find the user in time
- 410 Gone: The user existed once, but is not available here anymore.
- 413 Request Entity Too Large
- 414 Request-URI Too Long
- 415 Unsupported Media Type
- 416 Unsupported URI Scheme
- 420 Bad Extension: Bad SIP Protocol Extension used, not understood by the server
- 421 Extension Required
- 423 Interval Too Brief
- 480 Temporarily Unavailable
- 481 Call/Transaction Does Not Exist
- 482 Loop Detected
- 483 Too Many Hops
- 484 Address Incomplete
- 485 Ambiguous
- 486 Busy Here
- 487 Request Terminated
- 488 Not Acceptable Here
- 491 Request Pending
- 493 Undecipherable: Could not decrypt S/MIME body part

5xx Server errors

Οι αποκρίσεις σφάλματος διακομιστή 5xx δίδονται όταν το σφάλμα οφείλεται στον ίδιο τον διακομιστή και είναι οι παρακάτω:

- 500 Server Internal Error
- 501 Not Implemented: The SIP request method is not implemented here
- 502 Bad Gateway
- 503 Service Unavailable
- 504 Server Time-out
- 505 Version Not Supported: The server does not support this version of the SIP protocol
- 513 Message Too Large

6xx Global failures

Οι αποκρίσεις γενικής αποτυχίας 6xx δηλώνουν ότι ένας διακομιστής έχει οριστικές πληροφορίες για έναν συγκεκριμένο χρήστη και όχι μόνο για τη συγκεκριμένη περίπτωση που αναφέρεται στο αίτημα URI.

- 600 Busy Everywhere
- 603 Decline
- 604 Does Not Exist Anywhere
- 606 Not Acceptable

3.5 Πεδία επικεφαλίδας

Τα πεδία επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου SIP είναι παρόμοια με τα πεδία της επικεφαλίδας του HTTP και στη σύνταξη και τη σημασιολογία. Ειδικότερα, τα πεδία της επικεφαλίδας του SIP ακολουθούν τους κανόνες σύνταξης για την επικεφαλίδα του μηνύματος και τους κανόνες για την επέκταση των πεδίων της επικεφαλίδας σε πολλαπλές γραμμές.

Κάθε πεδίο της επικεφαλίδας αποτελείται από το όνομα του πεδίου, άνω-κάτω τελεία (":") και την τιμή του πεδίου. Έχει δηλαδή τη μορφή `field-name: field-value`

Η αρχική γραμμή ενός μηνύματος SIP ακολουθείται από μία ή περισσότερες επικεφαλίδες. Οι ενσωματωμένες επικεφαλίδες εξαρτώνται από το είδος του μηνύματος, αν δηλαδή πρόκειται για

απόκριση ή αίτηση. Οι επικεφαλίδες που αναφέρονται στον Πίν. 3.1 προσδιορίζονται στο RFC 3261 [29].

General	Request	Response	Entity
Accept	Authorization	Allow	Content-encoding
Accept-encoding	Contact	Proxy-authenticate	Content-length
Accept-language	Hide	Retry-after	Content-type
Call-ID	Max-forwards	Server	
Contact	Organization	Unsupported	
Cseq	Priority	Warning	
Date	Proxy-authorization	WWW-authenticate	
Encryption	Proxy-require		
Expires	Route		
From	Require		
Record-route	Response-key		
Time stamp	Subject		
To	User-agent		
Via			

Πίν. 3.1: Επικεφαλίδες πρωτοκόλλου SIP

3.6 Εξυπηρετητές και πράκτορες χρηστών SIP

Το περιβάλλον SIP αποτελείται από δύο κύρια μέρη: τους εξυπηρετητές SIP (SIP servers) και τους πράκτορες SIP των πελατών (SIP user agents).

Υπάρχουν τρεις τύποι SIP servers: proxy, registrar και redirect. Κάθε τύπος εξυπηρετητή εκτελεί μια διαφορετική λειτουργία, η οποία καθορίζει και το ποιες αιτήσεις αυτός επεξεργάζεται. Σημειώνεται ότι, οι SIP servers μπορεί να αναπτυχθούν σαν ξεχωριστές εφαρμογές ή σαν μια ενιαία εφαρμογή συνδυάζοντας τη λειτουργικότητα και των τριών. Ο συνδυασμός ενός registrar και ενός proxy server μερικές φορές αναφέρεται σαν rendez-vous server.

Οι πράκτορες SIP των χρηστών διακρίνονται και αυτοί σε δύο τύπους: τους πελάτες (user agent client) και τους εξυπηρετητές (user agent server). Πράκτορας πελάτης ονομάζεται ο πράκτορας που ξεκινά τις αιτήσεις, ενώ πράκτορας εξυπηρετητής αυτός που δέχεται τις αιτήσεις.

3.6.1 Proxy server

Ο proxy server δρα ως διαμεσολαβητής μεταξύ ενός SIP user agent client και ενός SIP user agent server. Εκτελεί τις λειτουργίες είτε του SIP user agent client είτε του SIP user agent server. Αυτό εξαρτάται από την κατεύθυνση της επικοινωνίας μεταξύ πελάτη και εξυπηρετητή. Μπορεί απλά να προωθήσει την αίτηση SIP ή να την τροποποιήσει πριν την προωθήσει.

3.6.2 Registrar server

Ο registrar server δέχεται αιτήσεις REGISTER οι οποίες περιέχουν την διεύθυνση IP και την διεύθυνση SIP (URL) του user agent. Αυτό επιτρέπει στον Registrar server να τηρεί έναν κατάλογο των user agents από τους οποίους έλαβε αιτήσεις REGISTER.

3.6.3 Redirect server

Ο redirect server δέχεται το εναρκτήριο μήνυμα μιας συνόδου SIP, δηλαδή μια αίτηση SIP INVITE, από τον user agent του καλούντος, ανακτά τη σωστή διεύθυνση SIP του user agent του κληθέντος, και απαντά στον user agent του καλούντος διαβιβάζοντας τη σωστή διεύθυνση SIP. Στη συνέχεια, ο user agent του καλούντος χρησιμοποιεί τη σωστή διεύθυνση SIP για να ξεκινήσει μια σύνοδο SIP με τον user agent του κληθέντος.

3.7 Ακολουθία μηνυμάτων SIP

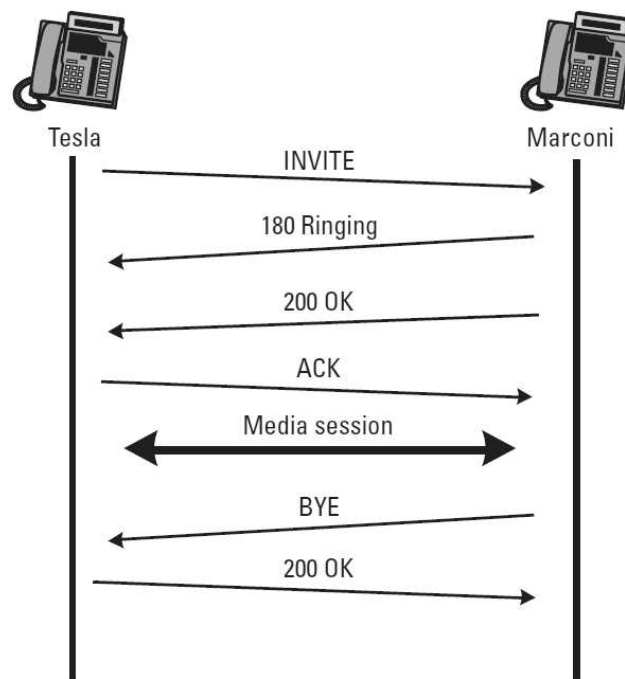
Η ακολουθία των μηνυμάτων SIP εξαρτάται από το αν η σύνοδος SIP εγκαθίσταται απ' ευθείας μεταξύ των πρακτόρων ή αν παρεμβάλλεται μεταξύ των πρακτόρων ένας εξυπηρετητής SIP (proxy, registrar, ή redirect).

3.7.1 Εγκαθίδρυση απλής συνόδου SIP

Στην Εικ. 3.2 φαίνεται η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ δύο τηλεφωνικών συσκευών χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SIP. Αυτές μπορεί να είναι τηλεφωνικές συσκευές IP (hardware) ή λογισμικό SIP που τρέχει σε Η/Υ, υπολογιστή παλάμης ή συσκευή κινητής τηλεφωνίας. Και οι δύο είναι συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο IP, όπως είναι το Internet και επίσης η κάθε μία γνωρίζει την διεύθυνση IP της άλλης. Η ανταλλαγή μηνυμάτων αρχίζει από την πλευρά

του καλούντος (Tesla) με την αποστολή ενός μηνύματος INVITE στον αποδέκτη της κλήσης (Marconi). Το μήνυμα περιέχει λεπτομέρειες για τον τύπο της αιτούμενης συνόδου. Αυτή θα μπορούσε να είναι μια απλή σύνοδος φωνής (τηλεφωνική κλήση), μια σύνοδος πολυμέσων όπως είναι η τηλεδιάσκεψη με εικόνα (video conference), ή ακόμη και η σύνοδος κάποιου παιχνιδιού. Οι βασικές πληροφορίες που μεταφέρονται στο μήνυμα INVITE είναι:

- Connection IP address (π.χ. 100.101.102.103)
- Media format (π.χ. audio)
- Port number (π.χ. 49170)
- Media transport protocol (π.χ. RTP)
- Media encoding (π.χ. PCM μ -law)



Εικ. 3.2: Ανταλλαγή μηνυμάτων απλής συνόδου SIP

Το μήνυμα 180 Ringing είναι ένα μήνυμα απόκρισης το οποίο μεταξύ άλλων περιλαμβάνει και το πεδίο Contact το οποίο περιέχει μια διεύθυνση στην οποία μπορεί ο Marconi να κληθεί απ' ευθείας μετά την εγκαθίδρυση της συνόδου.

Όταν ο Marconi αποφασίσει να απαντήσει την κλήση, τότε αποστέλλεται το μήνυμα απόκρισης 200 OK. Η απάντηση μεταφέρει επίσης την πληροφορία ότι ο τύπος της συνόδου που

προτάθηκε από τον καλούντα έχει γίνει αποδεκτός. Οι βασικές πληροφορίες που μεταφέρονται στο μήνυμα είναι:

- End-point IP address (π.χ. 200.201.202.203)
- Media format (π.χ. audio)
- Port number (π.χ. 60000)
- Media transport protocol (π.χ. RTP)
- Media encoding (π.χ. PCM μ -law)
- Sampling rate (π.χ. 8000 Hz)

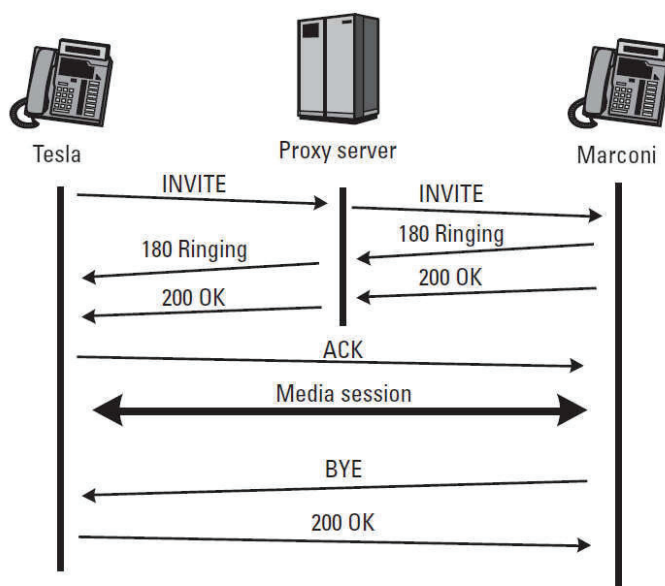
Το τελευταίο βήμα είναι η επικύρωση της συνόδου media με την αποστολή επιβεβαίωσης (ACK). Η επιβεβαίωση σημαίνει ότι ο Tesla έχει λάβει επιτυχώς την απάντηση του Marconi. Η ανταλλαγή αυτή των πληροφοριών για το μέσο, επιτρέπει την εγκαθίδρυση της συνόδου media με χρήση άλλου πρωτοκόλλου όπως το RTP.

Η παραπάνω ανταλλαγή μηνυμάτων δείχνει ότι το SIP είναι ένα πρωτόκολλο σηματοδοσίας από άκρο σε άκρο και ότι δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός SIP server. Τα δύο άκρα μπορούν να χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο SIP για την εγκατάσταση της συνόδου του μέσου μεταξύ τους, αρκεί να γνωρίζουν τις δύο IP διευθύνσεις. Παρόλο που δεν είναι εμφανές, το παράδειγμα δείχνει ότι το πρωτόκολλο λειτουργεί με τη μορφή client-server. Ο Tesla λειτουργεί ως πελάτης SIP όταν αποστέλλει το μήνυμα INVITE και ο Marconi ως εξυπηρετητής SIP όταν αποκρίνεται στην αίτηση. Αντίθετα, όταν ο Marconi αποστέλλει το μήνυμα BYE, για να τερματίσει τη σύνοδο, τότε λειτουργεί ως πελάτης. Επομένως, μια συσκευή SIP πρέπει να περιλαμβάνει και τα δύο λογισμικά, του πελάτη και του εξυπηρετητή. Αυτό διαφοροποιεί το SIP από άλλα γνωστά πρωτόκολλα του Internet όπως το HTTP ή το FTP.

3.7.2 Κλήση SIP με την χρήση Proxy server

Στο παράδειγμα της προηγούμενης παραγράφου, ο Tesla γνώριζε την διεύθυνση IP του Marconi και έτσι μπόρεσε να στείλει το εναρκτήριο μήνυμα INVITE απ' ευθείας στη διεύθυνση αυτή. Κατά κανόνα όμως, δεν συμβαίνει αυτό. Δεν μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί μια IP διεύθυνση σαν να ήταν τηλεφωνικός αριθμός. Ο λόγος είναι ότι πολλές φορές οι διευθύνσεις IP είναι δυναμικές και επίσης μια IP διεύθυνση δεν προσδιορίζει μονοσήμαντα έναν χρήστη, αλλά έναν κόμβο του δικτύου. Ένα άτομο έχει μια IP διεύθυνση στο σπίτι, μια άλλη στο γραφείο και μια διαφορετική

όταν συνδεθεί από μακριά κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού. Το ιδανικό θα ήταν να έχει μια IP διεύθυνση που να τον ακολουθεί όπως συμβαίνει για παράδειγμα με την διεύθυνση e-mail.



Εικ. 3.3: Κλήση SIP μέσω Proxy server

Στο σχήμα της Εικ. 3.3, στο οποίο ο Tesla δεν γνωρίζει που βρίσκεται ο Marconi και με ποια συσκευή είναι συνδεδεμένος, χρησιμοποιείται ένας SIP proxy server για τη δρομολόγηση του μηνύματος INVITE.

Πρώτα γίνεται μια αναζήτηση DNS του domain name του SIP URI του Marconi, η οποία επιστρέφει την IP διεύθυνση του proxy server που διαχειρίζεται το domain (π.χ. bologna.it). Στη συνέχεια, η αίτηση INVITE αποστέλλεται σ' αυτή τη διεύθυνση.

Ο proxy server αναζητά στη βάση δεδομένων του τη διεύθυνση SIP URI, που περιέχεται στο μήνυμα (π.χ. sip: marconi@bologna.it), εντοπίζει τον Marconi, και του προωθεί το μήνυμα INVITE προσθέτοντας ένα επί πλέον πεδίο VIA στην επικεφαλίδα το οποίο περιέχει τη διεύθυνσή του (του proxy).

Από την παρουσία δύο πεδίων VIA στην επικεφαλίδα, ο Marconi γνωρίζει ότι η αίτηση INVITE δρομολογήθηκε μέσω ενός proxy server. Με τη λήψη του μηνύματος, ο Marconi αποστέλλει ένα μήνυμα απόκρισης 180 Ringing στον proxy server το οποίο περιέχει και αυτό δύο πεδία VIA.

Ο proxy λαμβάνει την απάντηση, ελέγχει ότι το πρώτο πεδίο VIA περιέχει τη δική του διεύθυνση, διαγράφει το πεδίο αυτό και προωθεί το μήνυμα 180 Ringing στον Tesla.

Όταν η κλήση γίνει αποδεκτή από τον Tesla, τότε αυτός στέλνει στον proxy ένα μήνυμα 200 OK το οποίο με την ίδια, όπως προηγουμένως, διαδικασία προωθείται στον Tesla. Το μήνυμα περιλαμβάνει επίσης το πεδίο contact, που περιέχει τη διεύθυνση SIP URI του Marconi. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον Tesla να στείλει το μήνυμα επιβεβαίωσης ACK απ' ευθείας στον Marconi, παρακάμπτοντας τον proxy server.

Από τα προηγούμενα φαίνεται ότι ο proxy server δεν συμμετέχει πραγματικά στην κλήση. Απλά διευκολύνει τα δύο άκρα να εντοπίσουν και να έλθουν σε επαφή το ένα με το άλλο και, όταν δεν είναι πλέον απαραίτητος, αποσύρεται από την επικοινωνία. Η διαδρομή των μηνυμάτων σηματοδοσίας SIP είναι ανεξάρτητη από τη διαδρομή του μέσου. Στην τηλεφωνία αυτό ονομάζεται διαχωρισμός του διαύλου ελέγχου (control channel) και του φέροντος διαύλου (bearer channel).

Η σύνοδος τερματίζεται με την αποστολή του μηνύματος BYE από τον Marconi.

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα μηνύματα που ανταλλάσσονται σε μια σύνοδο SIP με την μεσολάβηση ενός proxy server. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί κάποιος να ανατρέξει στο RFC 3261 [30].

Κεφάλαιο 4

Άλλα πρωτόκολλα

Εκτός του πρωτοκόλλου SIP, στην τηλεφωνία VoIP χρησιμοποιούνται και άλλα πρωτόκολλα όπως το RTP, για το οποίο έχουν γίνει κάποιες αναφορές προηγουμένως, αλλά και τα STUN, SDP, RTCP, CRTP, ROHC και SRTP. Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται σε αυτά.

4.1 Το πρωτόκολλο STUN

Το πρωτόκολλο STUN (Simple Traversal of UDP through NATs (Network Address Translation)) είναι ένα πρωτόκολλο του application layer που βοηθά συσκευές που βρίσκονται πίσω από NAT firewall ή router στη δρομολόγηση των πακέτων τους. Γενικά χρησιμοποιείται σε διάφορες εγκαταστάσεις δικτύων, με μία από αυτές τα δίκτυα VoIP. Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου δημοσιεύτηκαν για πρώτη φορά στο RFC 3489 [35] αλλά στη συνέχεια αυτό κατέστη παρωχημένο με τη δημοσίευση του RFC 5389 [42]. Σύμφωνα με το τελευταίο έγγραφο, το αρκτικόλεξο STUN ορίζεται εκ νέου σαν “Session Traversal Utilities for NAT”.

Λόγω του τρόπου που χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα σε ένα δίκτυο VoIP, υλοποιημένο με το πρωτόκολλο SIP, η επικοινωνία μεταξύ δύο οντοτήτων SIP που βρίσκονται πίσω από συσκευές

NAT, όπως ένας router ή ένα firewall, πολλές φορές είναι προβληματική. Το σενάριο οι συσκευές SIP να βρίσκονται πίσω από NAT είναι πολύ συνηθισμένο σε οικιακά δίκτυα αλλά και δίκτυα γραφείων. Αποτέλεσμα είναι οι χρήστες να αντιμετωπίζουν προβλήματα, όπως, η μονόδρομη μετάδοση φωνής και οι αποτυχημένες προσπάθειες των συσκευών να κάνουν Registration στον server του VoIP provider ή σε ένα IP PBX που δεν βρίσκεται στο ίδιο δίκτυο. Το πρωτόκολλο STUN βοηθά στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων σε δίκτυα VoIP.

4.1.1 Σκοπός πρωτοκόλλου STUN

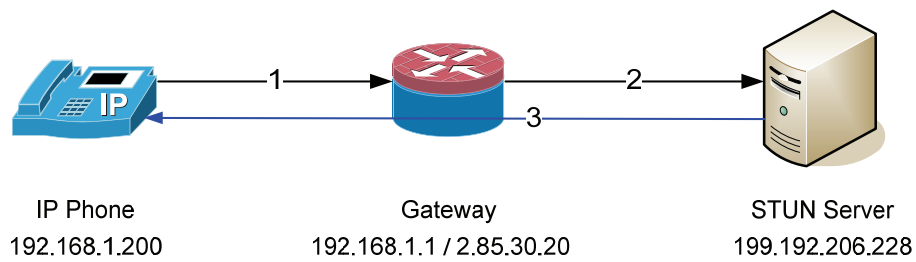
Ο κύριος σκοπός του πρωτοκόλλου STUN είναι να δώσει τη δυνατότητα σε μια συσκευή που βρίσκεται πίσω από μια υπηρεσία NAT να ανακαλύψει τη δημόσια IP διεύθυνσή της καθώς επίσης και τον τύπο της υπηρεσίας NAT πίσω από την οποία βρίσκεται. Δίνει επίσης τη δυνατότητα στη συσκευή που είναι πίσω από μια πύλη (gateway) να ανακαλύψει την θύρα που αναθέτει η πύλη κατά τη διαδικασία port translation. Ποια θύρα δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιήσουν για να συνδεθούν μαζί της άλλες συσκευές που βρίσκονται εκτός του τοπικού δικτύου. Η λειτουργία port translation δεν χρησιμοποιείται από όλους τους routers και εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας NAT και από τη ρύθμιση αυτής.

4.1.2 Λειτουργία πρωτοκόλλου STUN

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου STUN βασίζεται στη μέθοδο client-server. Ο STUN server λειτουργεί και με τα δύο πρωτόκολλα TCP και UDP και ακούει στη θύρα 3478. Ο client συνήθως έρχεται σε επαφή με τον STUN server σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση IP και θύρα (3478) αλλά ο server μπορεί να οδηγήσει τους πελάτες να δοκιμάσουν εναλλακτικές διευθύνσεις IP και θύρες, καθώς αυτές είναι αυθαίρετες.

Η λειτουργία ενός αιτήματος STUN συνοψίζεται σε τρία βήματα, όπως φαίνεται στην Εικ. 4.1.

1. Η συσκευή IP Phone αποστέλλει μια αίτηση STUN, μέσω της πύλης 192.168.1.1, στον STUN server που βρίσκεται εκτός του τοπικού δικτύου και έχει διεύθυνση IP 199.192.206.228. Η συσκευή IP Phone χρησιμοποιεί την θύρα 5060.
2. Η πύλη 192.168.1.1 προωθεί την αίτηση στον STUN server 199.192.206.228 και αλλάζει τη θύρα 5060 σε 15060.



Εικ. 4.1: Διάγραμμα αιτήματος STUN

3. Ο STUN server 199.192.206.228 στέλνει την απάντηση πίσω στο IP Phone μέσω της πύλης με δημόσια διεύθυνση 2.85.30.20 προσδιορίζοντας ότι η αίτηση ελήφθη από την IP 2.85.30.20 και τη θύρα 15060.

Όταν η συσκευή IP phone (στη θέση της οποίας μπορεί να είναι ένας υπολογιστής με κάποιο πρόγραμμα SIP Phone), εγκαθιδρύσει μια σύνοδο VoIP βασισμένη στο πρωτόκολλο SIP με μια άλλη συσκευή, που βρίσκεται εκτός του τοπικού δικτύου, έχει τη δυνατότητα να ενημερώσει την εξωτερική συσκευή να στέλνει τις απαντήσεις στη διεύθυνση 2.85.30.20 και στη θύρα 15060. Είναι φανερό ότι το πρωτόκολλο STUN διαδραματίζει σημαντικό ρόλο βοηθώντας δύο συσκευές που βρίσκονται πίσω από πύλες δικτύων ρυθμισμένες με NAT να υλοποιήσουν μια σύνδεση UDP.

Το πρωτόκολλο STUN έχει όμως και μειονεκτήματα. Δεν λειτουργεί σωστά με δίκτυα που χρησιμοποιούν Symmetric NAT¹. Επειδή το συμμετρικό NAT δημιουργεί μια νέα διεύθυνση και αντιστοίχιση θύρας κάθε φορά που ένας εσωτερικός του δικτύου host προσπαθεί να συνδεθεί σε έναν εξωτερικό host, το πρωτόκολλο STUN δεν ενδείκνυται για ένα τέτοιο σενάριο.

4.1.3 Παράδειγμα χρήσης πρωτοκόλλου STUN

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου μπορεί να γίνει πιο εύκολα κατανοητή με το παράδειγμα που ακολουθεί. Ένα SIP VoIP Phone, το οποίο βρίσκεται πίσω από ένα NAT, προσπαθεί να κάνει Register χωρίς τη χρήση του πρωτοκόλλου STUN σαν το εσωτερικό τηλέφωνο 201 σε ένα IP PBX που ακούει στο όνομα voiprbx.com και βρίσκεται εκτός του δικτύου. Το μήνυμα που στέλνει είναι το παρακάτω:

¹ Συμμετρικό είναι το NAT που όλες οι αιτήσεις από την ίδια εσωτερική IP διεύθυνση και θύρα, προς μια συγκεκριμένη IP διεύθυνση και θύρα προορισμού, αντιστοιχίζονται στην ίδια εξωτερική διεύθυνση και θύρα. Επί πλέον, μόνο ο εξωτερικός host που έχει λάβει κάποιο πακέτο μπορεί να στείλει ένα πακέτο UDP πίσω στον εσωτερικό host.

```
REGISTER sip:voippbx.com SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.2.14:7214;branch=z9hG4bK-d8754z;rport
Max-Forwards: 70
Contact: : <sip:201@192.168.2.14:7214;rinstance=0639bae5043c66ac>
To: "account1" <sip:201@voippbx.com>
From: "account1"<sip:201@voippbx.com>;tag=0a75d76e
Call-ID: 0TcxMDU5MGNhNTAxNzgzYjZkODVkyZl3MmE3NDh1NzQ.
CSeq: 1 REGISTER
Expires: 3600
Content-Length: 0
```

Στο πεδίο Contact του μηνύματος φαίνεται ότι το SIP VoIP Phone χρησιμοποιεί την ιδιωτική του διεύθυνση IP (192.168.2.14:7214) και τη θύρα 7214. Απαιτεί δηλαδή από το απομακρυσμένο τηλεφωνικό κέντρο, που βρίσκεται εκτός του δικτύου, να προσπαθήσει να υλοποιήσει μια σύνδεση στέλνοντας τα μηνύματα SIP στην διεύθυνσή του 192.168.2.14 και στη θύρα 7214. Σε αυτή την περίπτωση, το τηλεφωνικό κέντρο θα προσπαθήσει να υλοποιήσει τη σύνδεση, αλλά επειδή η διεύθυνση του παραλήπτη του μηνύματος είναι ιδιωτική και επομένως μη δρομολογήσιμη στο Internet, η απάντησή του θα απορριφθεί από κάποιον router ή πύλη. Αφού λοιπόν τα πακέτα θα απορριφθούν, η σύνδεση δεν μπορεί να υλοποιηθεί.

Όταν ένα SIP VoIP Phone έχει ενεργοποιημένη την λειτουργία STUN τότε στέλνει ένα μήνυμα στον STUN Server και περιμένει την απάντησή του. Αυτό γίνεται συνήθως κατά την εκκίνηση του VoIP Phone ή πριν από μια κλήση σε μια οντότητα εξωτερική του δικτύου. Στο παράδειγμα που ακολουθεί το ίδιο SIP VoIP Phone προσπαθεί πάλι να κάνει Registration στο τηλεφωνικό κέντρο χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά το πρωτόκολλο STUN.

```
REGISTER sip:voippbx.org SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.2.14:7214;branch=z9hG4bK-d8754z;rport
Max-Forwards: 70
Contact: <sip:201@78.158.143.115:8676;rinstance=c82d2f5b1918e5cf>
To: "account1"<sip:201@voippbx.com>
From: "account1"<sip:201@voippbx.com>;tag=484b4e36
Call-ID: YwI3Y2I3ODIzOWIxYwI5NDQwMzA5ZTYxMTAzOTM4Y2I.
CSeq: 1 REGISTER
Expires: 3600
Content-Length: 0
```

Στη δεύτερη γραμμή του μηνύματος, στο πεδίο Via, παρατηρούμε ότι ο πελάτης VoIP ακούει στην ίδια ιδιωτική διεύθυνση και στην ίδια θύρα 192.168.2.14:7214. Στην τέταρτη γραμμή του μηνύματος, SIP Register, στο πεδίο Contact το VoIP Phone αντικατέστησε την διεύθυνσή του με την εξωτερική διεύθυνση 78.158.143.115 και την εξωτερική θύρα 8676, που ανακάλυψε στέλνοντας μια αίτηση STUN πριν προσπαθήσει να κάνει Register στο εξωτερικό τηλεφωνικό κέντρο. Τώρα, χάρη στο πρωτόκολλο STUN, το IP PBX μπορεί να υλοποιήσει τη σύνδεση με το VoIP Phone στέλνοντας τις απαντήσεις SIP στη διεύθυνση 78.158.143.115 στη θύρα 8676 που έχει αντιστοιχιστεί στη συσκευή NAT με την εσωτερική διεύθυνση IP 192.168.2.14 και τη θύρα 7214.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι, καθώς η πλειονότητα των πρωτοκόλλων της βασισμένης στο SIP τηλεφωνίας VoIP χρησιμοποιούν σαν πρωτόκολλο μεταφοράς το UDP, το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο καλύτερης προσπάθειας χωρίς σύνδεση (connectionless), το STUN παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, όταν οι συσκευές SIP βρίσκονται πίσω από NAT. Όμως, το RFC επισημαίνει ότι το πρωτόκολλο STUN δεν είναι πανάκεια για όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με τις υπηρεσίες NAT. Επί πλέον, δεν υποστηρίζεται ακόμη από όλες τις συσκευές VoIP.

4.2 Το πρωτόκολλο SDP

Το πρωτόκολλο SDP (Session Description Protocol) είναι ένα τυποποιημένο σχήμα περιγραφής των παραμέτρων αρχικοποίησης των μέσων συνεχούς ροής (streaming media). Μέσα συνεχούς ροής είναι αυτά που το περιεχόμενό τους βλέπεται ή ακούγεται καθώς αυτό μεταδίδεται. Το πρωτόκολλο περιγράφεται στο πρότυπο RFC 4566 [40].

Όταν τα μέσα, τα οποία μπορεί να είναι φωνή, εικόνα ή και τα δύο, μεταδίδονται σε μια βασισμένη στο πρωτόκολλο SIP συνδιάλεξη VoIP, μια από τις προϋποθέσεις είναι οι συμμετέχοντες να γνωρίζουν πληροφορίες για το μέσο. Τέτοιες πληροφορίες είναι IP διεύθυνση προορισμού, το πρωτόκολλο μεταφοράς και άλλα μεταδεδομένα της συνόδου. Το SDP χρησιμοποιείται μαζί με το πρωτόκολλο SIP για την δημοσιοποίηση των πληροφοριών αυτών.

4.2.1 Περιγραφή του πρωτοκόλλου SDP

Το πρωτόκολλο SDP μπορεί να διαχωριστεί σε τρία τμήματα. Το πρώτο δημοσιοποιεί τις λεπτομέρειες της συνόδου και ονομάζεται "Session description". Το δεύτερο ονομάζεται "Time

description” και δημοσιοποιεί χρονικές πληροφορίες σχετικές με τη σύνοδο. Τέλος, το τρίτο ονομάζεται “Media description” και δημοσιοποιεί λεπτομέρειες για το μέσο που πρόκειται να μεταδοθεί με συνεχή ροή. Ακολουθεί μία λίστα με τα πεδία του πρωτοκόλλου SDP.

Session Description

v= (protocol version)
o= (owner/creator and session identification)
s= (session name)
i= (session information)*
u= (URI of description)*
e= (email address - contact detail)*
p= (phone number - contact detail)*
c= (connection information - not required if included in media description)*
b= (session bandwidth information)*
z= (time zone adjustments)*
k= (encryption key)*
a= (zero or more session attribute lines)*

Time description

t= (time the session is active)
r= (repeat times)*

Media description

m= (media name/ transport address)
i= (media title)*
c= (connection information - not required if included in session description)*
b= (bandwidth information)*
k= (encryption key)*
a= (zero or more media attribute lines)*

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη χρήση των πεδίων μπορεί κάποιος να συμβουλευτεί το RFC 4566 [40].

* Μη υποχρεωτικό πεδίο

Στη βασισμένη στο πρωτόκολλο SIP τηλεφωνία VoIP, κατά τη διάρκεια μιας κλήσης ο ήχος και η εικόνα μεταδίδονται με συνεχή ροή μεταξύ των δύο πλευρών. Καθώς πολλοί και διαφορετικοί codec υποστηρίζονται από διαφορετικές συσκευές ή λογισμικό και η κάθε πλευρά που παίρνει μέρος στην κλήση δεν γνωρίζει την IP διεύθυνση ή σε ποια θύρα πρέπει να στείλει το stream, το πρωτόκολλο SDP χρησιμοποιείται για τη δημοσιοποίηση τέτοιων σχετικών με τη ροή του μέσου πληροφοριών κατά την έναρξη της διαδικασίας.

4.2.2 Λειτουργία του πρωτοκόλλου SDP

Κατά την αρχικοποίηση μιας κλήσης VoIP με το πρωτόκολλο SIP, ένα μήνυμα SDP επισυνάπτεται στο μήνυμα SIP INVITE, το οποίο αποστέλλεται στο τηλεφωνικό κέντρο στο οποίο είναι καταγεγραμμένο (registered) το τηλέφωνο SIP. Στο μήνυμα SDP δημοσιοποιούνται λεπτομέρειες για τη σύνδεση, πληροφορίες για το μέσο και ενδεχομένως γεγονότα σηματοδότησης DTMF (Dual Tone Multi Frequency signaling).

Κατά κανόνα, οι πληροφορίες αυτού του τύπου αποστέλλονται από το SIP Phone του καλούντος στο τηλεφωνικό κέντρο το οποίο τις προωθεί στο SIP Phone που δέχεται την κλήση. Το τηλέφωνο που δέχεται την κλήση, η οποία σημειωτέον δεν έχει ακόμη οριστικοποιηθεί, στέλνει και αυτό από την πλευρά του πληροφορίες πίσω στο τηλεφωνικό κέντρο οι οποίες και αυτές με τη σειρά τους προωθούνται στο τηλέφωνο του καλούντος. Λόγω αυτής της διαδικασίας, και αφού εγκαθιδρυθεί η συνεδρία, τα τηλέφωνα SIP που λαμβάνουν μέρος στην κλήση VoIP γνωρίζουν που να στείλουν τη ροή του μέσου και τι είδους μέσο και codec να χρησιμοποιήσουν. Γνωρίζουν επίσης το είδος και τον codec του μέσου που θα λάβουν.

Τα τηλέφωνα SIP συνήθως υποστηρίζουν περισσότερους από έναν codec και γι' αυτό το λόγο οι υποστηριζόμενοι codecs διαβιβάζονται με καθορισμένη σειρά στο μήνυμα SDP η οποία εξαρτάται από την προτεραιότητα του καθενός. Η προτεραιότητα καθορίζεται από τον χρήστη στις ρυθμίσεις του SIP Phone. Για παράδειγμα τα δύο τηλέφωνα A και B έχουν τις ρυθμίσεις:

SIP Phone A: Προτεραιότητα codec 1: PCMU, 2: PCMA, 3: GSM

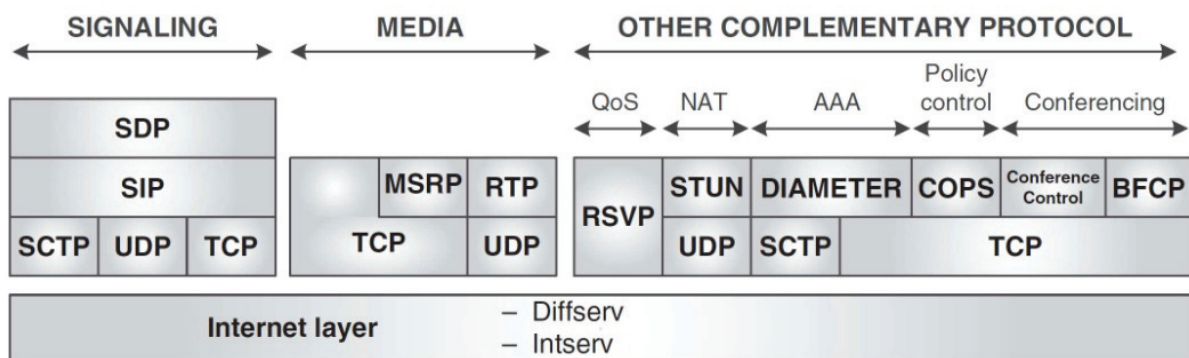
SIP Phone B: Προτεραιότητα codec 1: Speex, 2: G729, 3: PCMA

Σε ένα τέτοιο σενάριο θα επιλεγθεί ο codec PCMA καθώς είναι ο πρώτος στη σειρά που υποστηρίζεται και από τα δύο τηλέφωνα.

Στην αναλυτική καταγραφή των μηνυμάτων μιας κλήσης VoIP με το πρωτόκολλο SIP που υπάρχει στο Παράρτημα Α φαίνεται αναλυτικά η χρήση του πρωτοκόλλου SDP. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το πρωτόκολλο SDP χρησιμοποιείται και από άλλα πρωτόκολλα, εκτός του SIP, όπως για παράδειγμα το H.323. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το SDP μπορεί κάποιος να ανατρέξει στο πρότυπο RFC 4566 που το περιγράφει [40].

4.3 Το πρωτόκολλο RTP

Το βασικό πρότυπο για τη μεταφορά ήχου και εικόνας σε δίκτυα IP είναι το πρωτόκολλο RTP (Real-time Transport Protocol), μαζί με τα συνεργαζόμενα προφίλ και τις διαμορφώσεις φορτίου. Αποσκοπεί στην παροχή υπηρεσιών, χρήσιμων για τη μεταφορά των μέσων στα δίκτυα IP σε πραγματικό χρόνο. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την ανάκτηση χρονισμού (timing recovery), τον εντοπισμό και τη διόρθωση απωλειών, την ταυτοποίηση του φορτίου και της πηγής και τον συγχρονισμό του μέσου. Αρχικά είχε σχεδιαστεί για τη χρήση σε συνεδρίες multicast αλλά έκτοτε αποδείχθηκε χρήσιμο για ένα εύρος εφαρμογών: H.323 video conferencing, webcasting, διανομή τηλεοπτικού προγράμματος καθώς επίσης και στην σταθερή και κινητή τηλεφωνία. Το πρωτόκολλο RTP προδιαγράφεται στο πρότυπο RFC 3550 [37] και η θέση του στην αρχιτεκτονική των επικοινωνιών πολυμέσων του Internet φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 4.2).



Εικ. 4.2: Πρωτόκολλα αρχιτεκτονικής επικοινωνιών πολυμέσων του Internet
(Πηγή: Perea [77])

4.3.1 Επικεφαλίδα RTP

Η επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου RTP που παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικ. 4.3 περιλαμβάνει τα παρακάτω πεδία:

bit offset	0-1	2	3	4-7	8	9-15	16-31
0	Ver.	P	X	CC	M	PT	Sequence Number
32	Timestamp						
64	Synchronization source (SSRC) identifier						
96	Contributing source (CSRC) identifier						
	Data						

Εικ. 4.3: Επικεφαλίδα πρωτοκόλλου RTP

Version [2 bits]: Έκδοση του πρωτοκόλλου (η τρέχουσα είναι 2)

P (Padding) [1 bit]: Δείχνει αν υπάρχουν επιπλέον padding bytes στο τέλος του πακέτου RTP

X (Extension) [1 bit]: Δείχνει την ύπαρξη extension header μεταξύ standard header και payload

CC (CSRC Count) [4 bits]: Περιέχει τον αριθμό CSRC identifiers που έπονται του fixed header

M (Marker) [1 bit]: Χρησιμοποιείται από το επίπεδο εφαρμογής για κάποια επισήμανση

PT (Payload Type) [7 bits]: Δείχνει το format του payload

Sequence Number [16 bits]: Αριθμός ακολουθίας που αυξάνεται για κάθε απεσταλμένο πακέτο και χρησιμοποιείται από τον αποδέκτη για τον εντοπισμό απωλειών και για την αποκατάσταση της ακολουθίας των πακέτων (η αρχική του τιμή είναι τυχαία)

Timestamp [32 bits]: Χρησιμοποιείται από τον αποδέκτη για να αναπαράγει τα ληφθέντα δεδομένα στο σωστό χρόνο

SSRC (Synchronization source) [32 bits]: Προσδιορίζει την πηγή συγχρονισμού

CSRC (Contributing source): Απαριθμεί τις πηγές που συμβάλουν στη δημιουργία ενός stream που δημιουργήθηκε από πολλές πηγές.

4.3.2 Ωφέλιμο φορτίο πρωτοκόλλου RTP

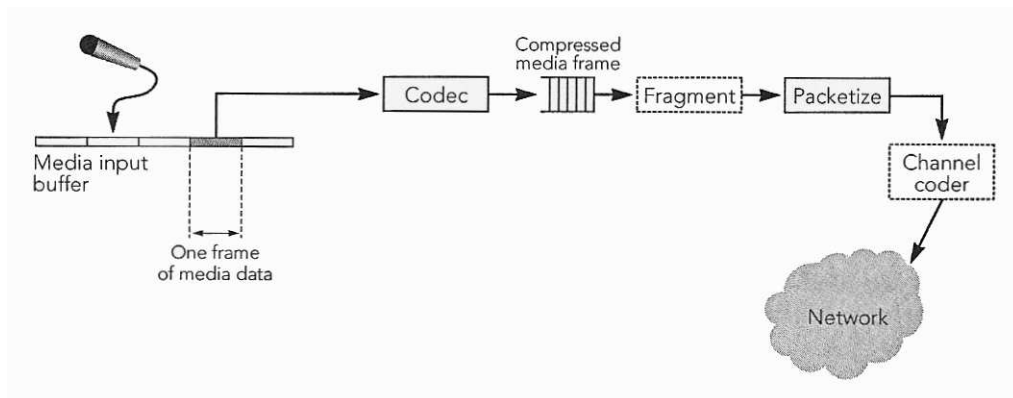
Το πεδίο PT (payload type) της επικεφαλίδας του RTP προσδιορίζει το μέσο που μεταφέρει το πακέτο RTP. Η εφαρμογή που το παραλαμβάνει εξετάζει το πεδίο αυτό για να αποφασίσει πως θα χειριστεί τα δεδομένα. Στον Πίν. 4.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικοί τύποι ωφέλιμου φορτίου ήχου.

Payload Type Number	Audio Format	Sampling Rate	Throughput
0	PCM μ -law	8 KHz	64 Kbps
1	1016	8 KHz	4.8 Kbps
3	GSM	8 KHz	13 Kbps
7	LPC	8 KHz	2.4 Kbps
9	G.722	8 KHz	48-64 Kbps
14	MPEG Audio	90 KHz	-
15	G.728	8 KHz	16 Kbps

Πίν. 4.1: Μερικοί τύποι ωφέλιμου φορτίου ήχου του πρωτοκόλλου RTP

4.3.3 Συνοπτική περιγραφή εφαρμογής του RTP

Ο αποστολέας είναι υπεύθυνος για την συλλογή και μετατροπή του προς εκπομπή οπτικοακουστικού σήματος καθώς επίσης για τη δημιουργία των πακέτων RTP. Μπορεί επί πλέον να συμμετέχει στη διόρθωση λαθών και στον έλεγχο της συμφόρησης, προσαρμόζοντας το εκπεμπόμενο media stream ανταποκρινόμενος στην ανατροφοδότηση πληροφοριών του δέκτη. Το διάγραμμα της διαδικασίας αποστολής φαίνεται στην Εικ. 4.4.

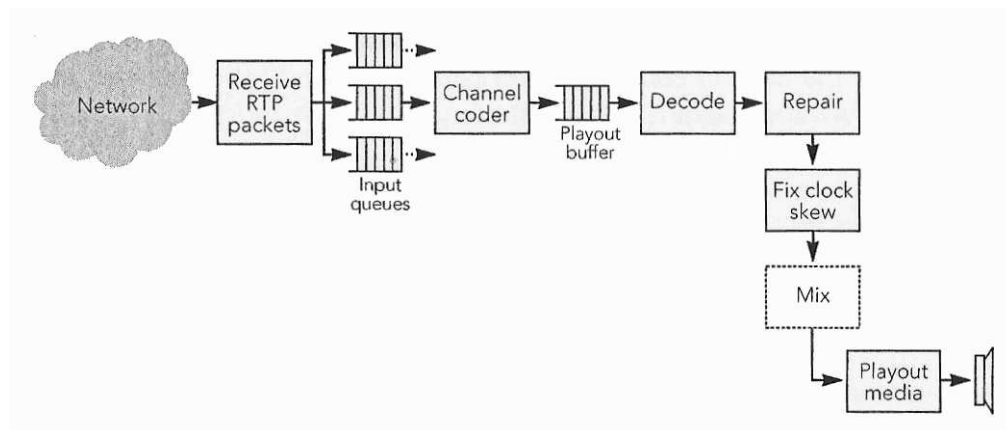


Εικ. 4.4: Block διάγραμμα αποστολέα RTP (Πηγή: Perkins [78])

Τα ασυμπιεστά δεδομένα ήχου ή εικόνας συλλαμβάνονται σε έναν buffer από τον οποίο παράγονται συμπιεσμένα πλαίσια. Τα πλαίσια μπορεί να κωδικοποιούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο συμπίεσης και να εξαρτώνται από προηγούμενα αλλά και επόμενα δεδομένα. Τα συμπιεσμένα πλαίσια φορτώνονται σε πακέτα RTP τα οποία είναι έτοιμα για αποστολή. Αν τα πλαίσια είναι μεγάλα, μπορούν να διασπαστούν σε περισσότερα πακέτα, ενώ αν είναι μικρά μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα μοναδικό πακέτο

RTP. Μπορεί επίσης να υπάρχει ένας κωδικοποιητής καναλιού που παράγει πακέτα διόρθωσης λαθών πριν από την εκπομπή.

Αφού αποσταλούν τα πακέτα RTP, τότε μόνο απελευθερώνεται ο buffer που αντιστοιχεί στα συγκεκριμένα πακέτα. Δεν μπορεί δηλαδή ο αποστολέας να σβήσει δεδομένα που ενδεχομένως χρειαστούν για διόρθωση λάθους.



Εικ. 4.5: Block διάγραμμα δέκτη RTP (Πηγή: Perkins [78])

Ο δέκτης είναι υπεύθυνος για την παραλαβή από το δίκτυο των πακέτων RTP, τη διόρθωση τυχόν απωλειών, την ανάκτηση χαμένου χρόνου, την αποσυμπίεση του μέσου και την παρουσίαση του αποτελέσματος στον χρήστη. Στέλνει επίσης πληροφορίες ποιότητας στον αποστολέα έτσι ώστε αυτός να προσαρμόσει την εκπομπή του στον δέκτη. Το διάγραμμα μιας πιθανής διαδικασίας λήψης φαίνεται στην Εικ. 4.5.

4.4 Το πρωτόκολλο RTCP

Το πρωτόκολλο RTCP (Real-Time Transport Control Protocol) είναι ένα σχετικό με το RTP πρωτόκολλο ελέγχου. Παρέχει περιοδικές αναφορές της ποιότητας λήψης, αναγνώρισης των συμμετεχόντων, κοινοποιήσεις για αλλαγές των συμμετεχόντων στη σύνοδο και τις απαραίτητες πληροφορίες για τον συγχρονισμό των media streams.

Η εφαρμογή του πρωτοκόλλου περιλαμβάνει τρία μέρη: τη διαμόρφωση των πακέτων (packet formats), τους κανόνες χρονισμού (timing rules) και τη βάση δεδομένων των συμμετεχόντων.

Κάθε σύνοδος RTP προσδιορίζεται από μια διεύθυνση δικτύου και ένα ζεύγος θυρών: μία για τα δεδομένα του πρωτοκόλλου RTP και μία για τα δεδομένα του RTCP. Η θύρα RTP πρέπει να είναι άρτιος αριθμός ενώ αυτή του RTCP πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά ένα. Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου RTCP περιλαμβάνονται στο ίδιο πρότυπο με το πρωτόκολλο RTP (RFC 3550 [37]).

4.5 Τα πρωτόκολλα CRTP και ROHC

Το πρωτόκολλο RTP συχνά κατηγορείται για το μέγεθος των επικεφαλίδων του. Πολλοί ισχυρίζονται ότι τα 12 bytes της επικεφαλίδας του RTP συν τα 28 bytes της επικεφαλίδας του UDP/IPv4 είναι πάρα πολλά για ένα πακέτο φωνής που ενδεχομένως είναι μόνο 14 bytes. Τα πρωτόκολλα συμπίεσης των επικεφαλίδων CRTP και ROHC αντιμετωπίζουν το πρόβλημα αυτό.

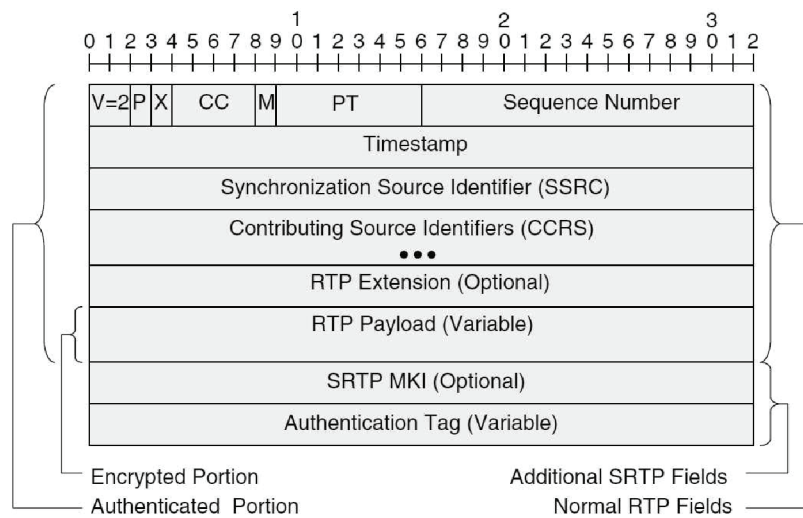
Το πρωτόκολλο CRTP (Compressed Real-time Transport Protocol) που προδιαγράφεται στο RFC 2508 [26] είχε σχεδιαστεί για χρήση σε σειριακές ζεύξεις χαμηλής ταχύτητας, όπως τα dial-up modem, που παρουσιάζουν μικρά ποσοστά σφαλμάτων. Αποτελεί επέκταση του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται για την συμπίεση των επικεφαλίδων του TCP, σχεδιασμένο έτσι, ώστε να λειτουργεί με το RTP/UDP/IP. Όμως, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς, η οποία χρησιμοποιεί σαν φορέα την τεχνολογία VoIP, αποδείχθηκε ότι το CRTP δεν αποδίδει καλά σε περιβάλλον με μεγάλη καθυστέρηση ζεύξης και απώλειες πακέτων. Έτσι, αναπτύχθηκε ένα εναλλακτικό πρωτόκολλο, το ROHC (Robust Header Compression), το οποίο προδιαγράφεται στο RFC 3095 [28].

Το CRTP παραμένει το πρωτόκολλο επιλογής για χρήση dial-up λόγω της απλότητάς του και της καλής του απόδοσης στο περιβάλλον αυτό. Το ROHC είναι σημαντικά πιο σύνθετο αλλά αποδίδει πολύ καλύτερα σε περιβάλλον ασύρματου δικτύου.

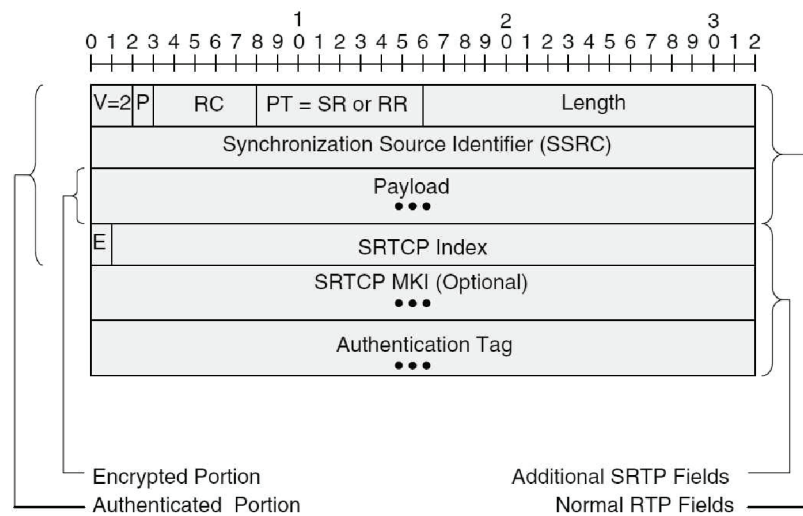
4.6 Τα πρωτόκολλα SRTP και SRTCP

Το SRTP (Secure RTP) είναι ένας μηχανισμός παροχής εμπιστευτικότητας και πιστοποίησης, ο οποίος σχεδιάστηκε κυρίως για την ασύρματη τηλεφωνία. Είναι δηλαδή κατάλληλο για ζεύξεις με μεγάλα ποσοστά απωλειών πακέτων και με απαίτηση συμπίεσης των επικεφαλίδων για αποδοτική λειτουργία. Το SRTP, μέχρι τη στιγμή που γράφεται η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, είναι σε κατάσταση προτεινόμενου προτύπου (IETF RFC 3711 [38]).

Το SRTP παρέχει εμπιστευτικότητα στα πακέτα δεδομένων του πρωτοκόλλου RTP κρυπτογραφώντας μόνο το τμήμα του ωφέλιμου φορτίου (payload) όπως φαίνεται και στο σχήμα της Εικ. 4.6.



Εικ. 4.6: Κρυπτογράφηση SRTP πακέτου δεδομένων RTP (Πηγή: Cisco [6])



Εικ. 4.7: Κρυπτογράφηση SRTCP πακέτου ελέγχου RTCP (Πηγή: Cisco [6])

Ο μηχανισμός SRTP παρέχει επίσης εμπιστευτικότητα και στα πακέτα ελέγχου RTCP. Στην περίπτωση αυτή κρυπτογραφείται ολόκληρο το πακέτο RTCP εκτός της επικεφαλίδας (πρώτα 64 bits) και διαφόρων πρόσθετων πεδίων που προστίθενται στο τέλος κάθε RTCP πακέτου, όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικ. 4.7.

Τα πρόσθετα πεδία είναι ένας δείκτης SRTCP (Secure RTCP), ένα bit που δείχνει αν το ωφέλιμο φορτίο είναι κρυπτογραφημένο, ένα προαιρετικό αναγνωριστικό του πρωτεύοντος κλειδιού (master key identifier) και μια επικεφαλίδα πιστοποίησης.

Κεφάλαιο 5

Επικοινωνίες VoIP και ιδιωτικότητα

Ο όρος ιδιωτικότητα χρησιμοποιείται συχνά σε καθημερινές συνομιλίες, όπως επίσης σε φιλοσοφικές, πολιτικές και νομικές συζητήσεις. Όμως, δεν υπάρχει ακόμη ένας μοναδικός ορισμός ή ανάλυση της σημασίας του όρου. Η ιδέα της ιδιωτικότητας έχει μακρά ιστορία, ειδικά σε φιλοσοφικές θεωρίες. Αξιοσημείωτος είναι ο διαχωρισμός που έκανε ο Αριστοτέλης μεταξύ της σφαίρας της πολιτικής δραστηριότητας και της ιδιωτικής σφαίρας που έχει σχέση με την οικογένεια και την οικιακή ζωή [89]. Στο Άρθρο 1 της ΥΑΠ με τίτλο «Κύρωση Πλαισίου Παροχής Υπηρεσιών Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης» που δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 1301Β/12-04-2012 [99] δίδονται οι παρακάτω δύο ορισμοί:

«Ως ιδιωτικότητα νοείται η μη αποκάλυψη προσωπικών πληροφοριών σε μη εξουσιοδοτημένες οντότητες».

«Ως δεδομένα προσωπικού χαρακτήρα ή προσωπικά δεδομένα, θεωρούνται πληροφορίες που αναφέρονται στο υποκείμενο των δεδομένων, δηλαδή στο φυσικό πρόσωπο στο οποίο αναφέρονται τα δεδομένα και του οποίου η ταυτότητα είναι γνωστή ή μπορεί να εξακριβωθεί

δηλαδή μπορεί να προσδιορισθεί αμέσως ή εμμέσως, ιδίως βάσει αριθμού ταυτότητας ή βάσει ενός η περισσότερων συγκεκριμένων στοιχείων που χαρακτηρίζουν την υπόστασή του από άποψη φυσική, βιολογική, ψυχική, οικονομική, πολιτιστική, πολιτική ή κοινωνική. Δεν λογίζονται ως δεδομένα προσωπικού χαρακτήρα τα στατιστικής φύσεως συγκεντρωτικά στοιχεία, από τα οποία δεν μπορούν πλέον να προσδιορισθούν τα υποκείμενα των δεδομένων».

Η προστασία της ιδιωτικότητας και της ανωνυμίας των χρηστών στο περιβάλλον των επικοινωνιών VoIP είναι το αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού.

5.1 Η ιδιωτικότητα στην τηλεφωνία VoIP

Παρά τη μεγάλη δημοσιότητα που έχει πάρει το θέμα της ιδιωτικότητας σε σχέση με τη χρήση του διαδικτύου, σε μία έρευνα που διεξήχθη το 2011 μεταξύ φοιτητών πληροφορικής στην Αυστραλία, τα αποτελέσματα δεν ήταν ενθαρρυντικά [20]. Η έρευνα είχε σκοπό την καταγραφή του μεγέθους επίγνωσης και ανησυχίας των φοιτητών στα θέματα ασφαλείας και ιδιωτικότητας της τηλεφωνίας VoIP. Οι φοιτητές, που έλαβαν μέρος στην έρευνα, απάντησαν ότι τους απασχολεί κατά πρώτο λόγο το κόστος και έπειτα, η ποιότητα, η ευκολία και τέλος η ασφάλεια. Σχεδόν οι μισοί (43.9%) απάντησαν ότι δεν ενδιαφέρονται καθόλου ή ενδιαφέρονται λίγο για την ιδιωτικότητα της τηλεφωνίας VoIP, το 38.3% ότι ανησυχεί σοβαρά, ενώ οι υπόλοιποι απάντησαν ουδέτερα. Επίσης, η πλειοψηφία αυτών που ανησυχούν για την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια της τηλεφωνίας VoIP, ανησυχούν το ίδιο και για την παραδοσιακή τηλεφωνία. Αυτό δείχνει ότι στην απάντησή τους δεν έπαιξε ρόλο η τεχνολογία της τηλεφωνίας.

Οι χρήστες του παραδοσιακού τηλεφωνικού δικτύου PSTN γνωρίζουν τον κίνδυνο των υποκλοπών, αλλά το θέμα δεν να τους ανησυχεί ιδιαίτερα. Γνωρίζουν ότι για να πραγματοποιηθεί μια υποκλοπή απαιτείται φυσική πρόσβαση στο μέσο, δηλαδή την τηλεφωνική γραμμή ή την τηλεφωνική συσκευή. Όμως, στην τηλεφωνία VoIP ο κίνδυνος είναι μεγαλύτερος αν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Ο εξοπλισμός ή το λογισμικό που απαιτείται για την πραγματοποίηση υποκλοπής στην τηλεφωνία VoIP είναι μεν πολύ πιο προηγμένα, αλλά ταυτόχρονα είναι και πολύ εύκολο να τα αποκτήσει κάποιος κακόβουλος χρήστης.

Οι άνθρωποι γενικά υποθέτουν ότι οι ιδιωτικές τηλεφωνικές κλήσεις τους, είναι ακριβώς αυτό: ιδιωτικές. Ωστόσο, οι χρήστες τηλεφωνίας VoIP δεν πρέπει να το θεωρούν αυτό δεδομένο. Το πρόβλημα με τις κλήσεις VoIP είναι ότι δρομολογούνται μέσω του Internet, το οποίο είναι ένα

δημόσιο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι οι κλήσεις VoIP είναι ευάλωτες σε υποκλοπή σε διάφορα σημεία της διαδρομής τους. Επί πλέον, οι κλήσεις μπορούν να υποκλαπούν με φυσική πρόσβαση στην καλωδίωση. Ως εκ τούτου, ανταγωνιστές ή υπάλληλοι επιχειρήσεων, εγκληματικά στοιχεία, hackers ή απλά και μόνο περίεργοι έχουν τη δυνατότητα να ακούσουν τις συνομιλίες VoIP ενός ιδιώτη η μιας επιχείρησης. Το μόνο που χρειάζεται είναι ένα πρόγραμμα συλλογής πακέτων, που εύκολα μπορεί κάποιος να κατεβάσει από το Internet, και ενδεχομένως μια μικρή συσκευή παγίδευσης, που θα την τοποθετήσει απαρατήρητος στη φυσική γραμμή.

Όμως η ιδιωτικότητα δεν αφορά μόνο στην υποκλοπή του περιεχομένου μιας τηλεφωνικής συνομιλίας. Αφορά και σε θέματα όπως η ανωνυμία και η μη δημοσιοποίηση της θέσης από την οποία πραγματοποιήθηκε μια κλήση. Η υποκλοπή αφορά αποκλειστικά στο πρωτόκολλο RTP ενώ η ανωνυμία και η θέση αφορούν σε όλα τα πρωτόκολλα και κυρίως στο SIP.

5.2 Θέματα ιδιωτικότητας πρωτοκόλλου SIP

Το πρότυπο IETF RFC 3323 [33] αναφέρεται στον σχεδιασμό ενός μηχανισμού, ο οποίος επιτρέπει στους χρήστες του πρωτοκόλλου να πραγματοποιούν κλήσεις ανωνύμως. Αναφέρει δύο τρόπους ενίσχυσης της ιδιωτικότητας. Ο πρώτος, που αφορά αποκλειστικά στις εφαρμογές, προτείνει να μην συμπεριλαμβάνονται στην ανταλλαγή των μηνυμάτων πληροφορίες που δεν είναι υποχρεωτικές για το πρωτόκολλο SIP. Όμως, αυτό δεν λύνει το πρόβλημα, καθώς στις υποχρεωτικές πληροφορίες περιλαμβάνονται οι IP διευθύνσεις και οι διευθύνσεις URI. Η δεύτερη πρόταση αφορά σε ένα μηχανισμό παροχής ιδιωτικότητας μέσω του δικτύου. Προτείνεται η ανταλλαγή των μηνυμάτων να γίνεται μέσω ενός έμπιστου τρίτου μέρους, δηλαδή μέσω ενός privacy server, ο οποίος θα μετατρέπει συνεχώς τις διευθύνσεις URI των χρηστών σε τυχαία ψευδώνυμα έτσι ώστε να διατηρείται η ανωνυμία. Μια άλλη προσέγγιση στο θέμα είναι η δημιουργία Voice Anonymisation Service (VAS) που προτείνει ο Zhang [98] ενώ οι Chen και Shulzerinne προτείνουν έναν ενοποιημένο μηχανισμό ενίσχυσης της ιδιωτικότητας όχι μόνο των χρηστών αλλά και των VSPs (Voice Service Provider) [86].

Τα πεδία επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου SIP που μπορούν να αποκαλύψουν πληροφορίες για τον χρήστη ή τον πάροχο της υπηρεσίας αναφέρονται συνοπτικά στον Πίν. 5.1. Η πρώτη στήλη περιλαμβάνει τον τύπο της επικεφαλίδας χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα, ενώ η δεύτερη στήλη αναφέρεται στο αν το αντίστοιχο πεδίο αφορά σε θέμα ιδιωτικότητας του χρήστη ή του παρόχου της υπηρεσίας VoIP.

Πεδία επικεφαλίδας	Ιδιωτικότητα
Alert-Info:<http://vsp.example.com/sounds/moo.wav>	p
Authorization:Digestusername=\Alice", realm=\VIP@example.com", nonce=\84a4cc6f3082121f32b42a2187831a9e", response=\7587245234b3434cc3412213e5f113a5432"	u
Call-ID:f81d4fae-7dec-11d0-a765-00a0c91e6bf6@192.0.2.4	up
Call-Info:<http://vsp.example.com/alice/photo.jpg>;purpose=icon, <http://vsp.example.com/alice/>;purpose=info	pp
Contact:\Alice"<sips:alice@vsp.example.com>;expires=60	up
Error-Info:<sip:not-in-service-recording@vsp.example.com>	p
From:\Bob"<sip:bob@vspexample.com>;tag=hyh8	up
In-Reply-To:10230@vsp.example.com, 44150@vsp.example.com	up
Organization:exampleInc.	up
Proxy-Authenticate:Digestrealm=\VIP@example.com", domain=\sip:vsp.example.com",qop=\auth", nonce=\f84f1cec41e6cbe5aea9c8e88d359", opaque=\",stale=FALSE,algorithm=MD5	p
Record-Route:<sip:vsp1.example.com;lr>, <sip:vsp2.example.com;lr>	p
Reply-To:Bob<sip:bob@vsp.example.com>	up
Route:<sip:vsp1.example.com;lr>, <sip:vsp2.example.com;lr>	p
Server:HomeServerv2	p
Subject:TechSupport	u
To:sip:+12125551212@vsp.example.com	up
User-Agent:SoftphoneBeta1.5	p
Via:SIP/2.0/UDPvsp.example.com:5060;branch=z9hG4bK87asdks7	p
Warning:307example.com\Sessionparameter`foo'notunderstood"	p
WWW-Authenticate:Digestrealm=\VIP@example.com", domain=\sip:vsp.example.com",qop=\auth", nonce=\f84f1cec41e6cbe5aea9c8e88d359", opaque=\",stale=FALSE,algorithm=MD5	p

Πίν. 5.1: Πεδία επικεφαλίδας SIP που περιέχουν ευαίσθητες πληροφορίες του χρήστη (u) και του παρόχου της υπηρεσίας (p) [86]

5.3 Θέματα ιδιωτικότητας πρωτοκόλλου RTP

Το προφανές θέμα ιδιωτικότητας αφορά στην προστασία των χρηστών της υπηρεσίας VoIP από μη εξουσιοδοτημένη υποκλοπή της συνόδου RTP από τρίτο πρόσωπο. Για να διασφαλιστεί αυτό, δηλαδή να μπορεί να αποκωδικοποιεί τα πακέτα RTP μόνο ο αποδέκτης της κλήσης, πρέπει το περιεχόμενο του πρωτοκόλλου RTP να διατηρηθεί εμπιστευτικό μέσω κρυπτογράφησης. Η κρυπτογράφηση μπορεί να γίνει είτε στο επίπεδο της εφαρμογής, κρυπτογραφώντας ολόκληρο το πακέτο ή μόνο το ωφέλιμο φορτίο, είτε στο επίπεδο του πρωτοκόλλου IP.

Η κρυπτογράφηση στο επίπεδο της εφαρμογής έχει πλεονεκτήματα αλλά και μερικά μειονεκτήματα. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει την ταυτόχρονη συμπίεση της επικεφαλίδας. Στην περίπτωση κρυπτογράφησης μόνο του ωφέλιμου φορτίου, η συμπίεση των επικεφαλίδων θα λειτουργήσει κανονικά, ενώ στην περίπτωση κρυπτογράφησης ολόκληρου του πακέτου RTP, η λειτουργία της συμπίεσης θα διαταραχθεί εν μέρει, αλλά θα παραμείνει η δυνατότητα κρυπτογράφησης των επικεφαλίδων UDP και IP. Άλλο πλεονέκτημα της κρυπτογράφησης στο επίπεδο της εφαρμογής είναι η ευκολία υλοποίησης, καθώς δεν προϋποθέτει επεμβάσεις στο λειτουργικό σύστημα και στους δρομολογητές. Δυστυχώς, αυτό μπορεί να εξελιχθεί σε μειονέκτημα, σε περίπτωση που ο σχεδιασμός παρουσιάσει κενά ασφαλείας. Άλλο ένα εν δυνάμει μειονέκτημα της κρυπτογράφησης στο επίπεδο της εφαρμογής, είναι το γεγονός ότι αφήνει ακρυπτογράφητα κάποια πεδία της επικεφαλίδας. Σε μερικές περιπτώσεις, η έλλειψη κρυπτογράφησης μπορεί να αποκαλύψει ευαίσθητες πληροφορίες. Για παράδειγμα, η γνώση του πεδίου που αφορά στον τύπο του ωφέλιμου φορτίου μπορεί να δώσει την δυνατότητα στον επιτιθέμενο να αποκρυπτογραφήσει κάποια τμήματα του κρυπτογραφημένου ωφέλιμου φορτίου εκμεταλλευόμενος το γεγονός ότι κάθε πλαίσιο ξεκινά με μια επικεφαλίδα φορτίου που έχει τυποποιημένη μορφή [78]. Αυτό το πρόβλημα ξεπερνιέται με την επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου κρυπτογράφησης.

Εναλλακτικά, η κρυπτογράφηση μπορεί να εφαρμοστεί στο επίπεδο IP, με χρήση για παράδειγμα του πρωτοκόλλου IPsec. Η προσέγγιση αυτή έχει τα πλεονεκτήματα ότι, αφ' ενός είναι διαφανής στο RTP, και αφ' ετέρου στηρίζεται σε δοκιμασμένο λογισμικό κρυπτογράφησης το οποίο μάλιστα εφαρμόζεται σε ένα και μόνο σημείο της διαδικασίας. Τα μειονεκτήματα της κρυπτογράφησης στο επίπεδο IP είναι ότι διαταράσσει την λειτουργία της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου RTP και ότι η εφαρμογή της απαιτεί μεγάλες αλλαγές στο λειτουργικό σύστημα.

Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου RTP παρέχουν υποστήριξη για κρυπτογράφηση των πακέτων δεδομένων RTP αλλά και των πακέτων RTCP. Κατά τον χρόνο σχεδιασμού του πρωτοκόλλου RTP, ο προεπιλεγμένος αλγόριθμος κρυπτογράφησης DES (Data Encryption Standard) παρείχε ένα κατάλληλο επίπεδο ασφαλείας. Η αύξηση όμως της υπολογιστικής ισχύος των συστημάτων τον κατέστησε αδύναμο. Συνίσταται επομένως, η επιλογή ισχυρότερων αλγόριθμων κρυπτογράφησης, όπως είναι ο Triple DES και ο AES (Advanced Encryption Standard).

Η λύση διασφάλισης της εμπιστευτικότητας είναι το πρωτόκολλο SRTP [38] το οποίο, μέχρι τη στιγμή που γράφεται η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, είναι σε κατάσταση προτεινόμενου προτύπου και για το οποίο έχει γίνει ήδη αναφορά στην παράγραφο 4.6.

5.4 Θέματα ιδιωτικότητας πρωτοκόλλου RTCP

Το πρωτόκολλο RTCP (βλ. παρ. 4.4) μπορεί να περιλαμβάνει «πακέτα» SDES (Session Description Protocol Security) που παρέχουν στοιχεία ταυτοποίησης του συμμετέχοντος στην κλήση και συμπληρωματικές πληροφορίες, όπως θέση, διεύθυνση e-mail και αριθμό τηλεφώνου. Συνήθως, τα στοιχεία αυτά εισάγονται από τον χρήστη και συχνά φαίνονται στο γραφικό interface των εφαρμογών.

Type	Value	Παράδειγμα
CNAME = 1	user and domain name	alice@company.com ή alice@192.0.2.57 ή company.com ή 192.0.2.57
NAME = 2	common name of source	Alice Smith, Security Manager, Company Ltd.
EMAIL = 3	email address of source	alice.smith@company.com
PHONE = 4	phone number of source	+30 2310 123456
LOC = 5	geographic location of site	Thessaloniki, Greece
TOOL = 6	name/version of source appl.	ABC VoIP Phone v5.2
NOTE = 7	note about the source	“back in 5 min” ή “can’t talk”
PRIV = 8	private extensions	

Πίν. 5.2: Τύποι και παραδείγματα χρήσης SDES

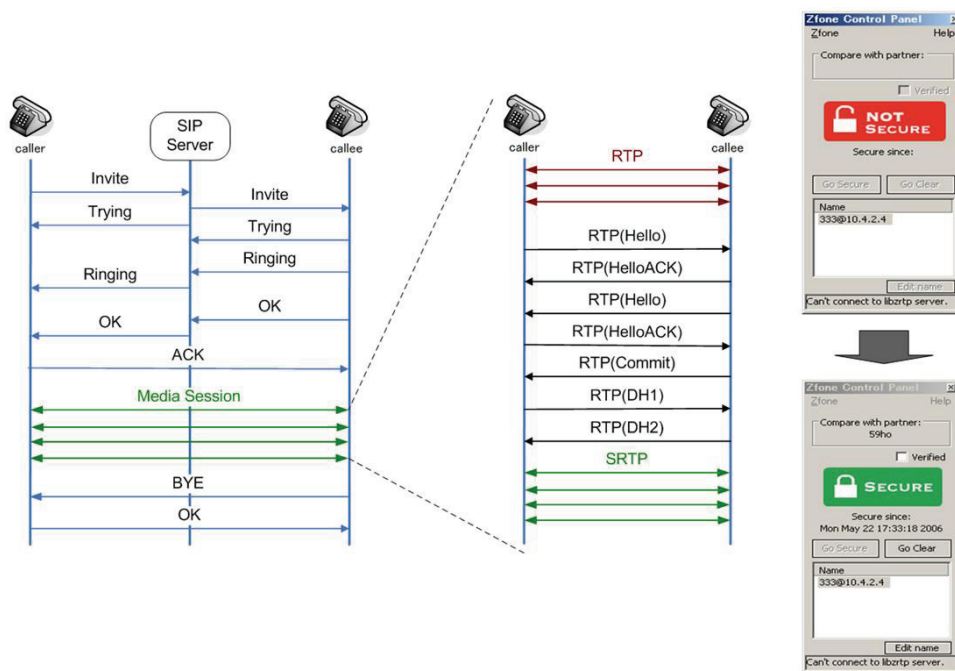
Τα «πακέτα» SDES, που έχουν μέγεθος 32 bit ή πολλαπλάσιο αυτού, αποτελούνται από τα πεδία Type, Length και Value. Οι διάφοροι τύποι που ορίζονται στο πρότυπο IETF RFC 3550 φαίνονται στον Πίν. 5.2 [37]. Από αυτούς, οι εφαρμογές είναι υποχρεωμένες να στέλνουν μόνο τον τύπο CNAME, αλλά πρέπει να έχουν τη δυνατότητα λήψης και των υπολοίπων, ανεξαρτήτως του γεγονότος ότι μπορούν να τις αγνοούν.

Καθώς τίθενται θέματα ιδιωτικότητας σχετικά με τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στο SDES, οι εφαρμογές δεν πρέπει να στέλνουν επιπρόσθετες πληροφορίες εκτός αν ο χρήστης τις έχει ρητά εξουσιοδοτήσει. Αν το ένα άκρο της κλήσης δεν επιθυμεί να στείλει στοιχεία παρουσίας, μπορεί να μη χρησιμοποιήσει το πρωτόκολλο RTCP, αλλά αυτό θα έχει σαν συνέπεια το άλλο άκρο να μη λαμβάνει πληροφορίες για την ποιότητα της κλήσης έτσι ώστε να προσαρμόζει κατάλληλα την εκπομπή του. Τέλος, για λόγους εμπιστευτικότητας τα πακέτα RTCP μπορούν να κρυπτογραφηθούν.

5.5 Η εφαρμογή Zfone™ και το πρωτόκολλο ZRTP

Η εφαρμογή Zfone™ είναι ένα λογισμικό σχετικό με την ασφάλεια των κλήσεων VoIP το οποίο δίνει τη δυνατότητα κρυπτογράφησής τους. Αναπτύχθηκε από τον Phil Zimmermann, τον δημιουργό του PGP (Pretty Good Privacy), του πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενου λογισμικού κρυπτογράφησης ηλεκτρονικής αλληλογραφίας. Χρησιμοποιεί ένα νέο πρωτόκολλο, που ονομάζεται ZRTP, η αρχιτεκτονική του οποίου βασίζεται σε μια νέα προσέγγιση στο θέμα της ασφάλειας της τηλεφωνίας VoIP. Το νέο αυτό πρωτόκολλο έχει υποβληθεί στην IETF με τη μορφή Informational (IETF RFC 6189 [44]).

Η εφαρμογή, η οποία τρέχει στο IP stack των λειτουργικών συστημάτων, είναι διαθέσιμη για Windows XP και Vista (32 bit ή 64 bit), Mac OS X, και Linux [97]. Παρεμβάλλεται στη διακίνηση των εισερχομένων και εξερχομένων πακέτων VoIP και, απο/κρυπτογραφώντας τα, παρέχει ασφάλεια στην επικοινωνία. Μπορεί δε να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με διάφορα προγράμματα πελάτες VoIP που χρησιμοποιούν τυποποιημένα πρωτόκολλα αλλά όχι ιδιόκτητα όπως αυτό του Skype. Το πρόγραμμα δραστηριοποιείται μετά την εγκαθίδρυση της συνόδου, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των πρωτοκόλλων σηματοδότησης SIP ή H.323. Αφού ανιχνευθεί η εγκαθίδρυση της συνόδου, αρχίζει η επικοινωνία μεταξύ των δύο μερών, για την δημιουργία του κλειδιού κρυπτογράφησης και στη συνέχεια κρυπτογραφούνται και αποκρυπτογραφούνται τα πακέτα φωνής της τηλεφωνικής συνομιλίας.



Εικ. 5.1: Ακολουθία μηνυμάτων πρωτοκόλλου ZRTP (Πηγή: VOIPSA [95])

Το πρωτόκολλο ZRTP, παρόλο που χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο δημοσίου κλειδιού, αποφεύγει την πολυπλοκότητα που έχει η υποδομή δημοσίου κλειδιού PKI (Public Key Infrastructure). Στην πραγματικότητα δεν χρησιμοποιεί μόνιμα δημόσια κλειδιά. Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Diffie-Hellman με hash, και η ανίχνευση μιας ενδεχόμενης επίθεσης τύπου man-in-the middle επιτυγχάνεται με την εμφάνιση στην οθόνη της εφαρμογής ενός authentication string το οποίο συγκρίνουν προφορικά τα δύο μέρη της συνδιάλεξης. Για μεγαλύτερη ασφάλεια, τα κλειδιά που δημιουργήθηκαν κατά τη σύνοδο καταστρέφονται μετά το τέλος της. Η λειτουργία του ZRTP δεν απαιτεί PKI, πιστοποίηση κλειδιών, αρχές πιστοποίησης και δεν στηρίζεται στη σηματοδοσία του πρωτοκόλλου SIP για τη διαχείριση των κλειδιών. Η διαχείρισή τους γίνεται με τρόπο P2P πάνω στο RTP stream. Τα πακέτα ZRTP ενσωματώνονται στα πακέτα RTP και, επειδή τα δύο άκρα σε μια επικοινωνία με το RTP απορρίπτουν τυχόν άγνωστες προεκτάσεις του πρωτοκόλλου, το πρωτόκολλο ZRTP είναι συμβατό προς τα πίσω. Στην Εικ. 5.1 φαίνεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου ZRTP και της εφαρμογής Zfone.

5.6 Η υπηρεσία Skype

Το Skype είναι η πιο διαδεδομένη υπηρεσία VoIP στον κόσμο η οποία δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες της να πραγματοποιούν τηλεφωνικές ή video κλήσεις μέσω Internet. Οι κλήσεις μεταξύ των χρηστών είναι δωρεάν ενώ χρεώνονται οι κλήσεις προς σταθερά ή κινητά τηλέφωνα. Στη

μεγάλη του δημοτικότητα συνέβαλαν και οι άλλες ενσωματωμένες λειτουργίες, όπως η IM (Instant Messaging), η μεταφορά αρχείων και η video διάσκεψη. Το 2010 είχε 663 εκατομμύρια εγγεγραμμένους χρήστες, γεγονός που οδήγησε στην αγορά του από την Microsoft τον Μάιο του 2011 έναντι 8.5 δις δολαρίων.

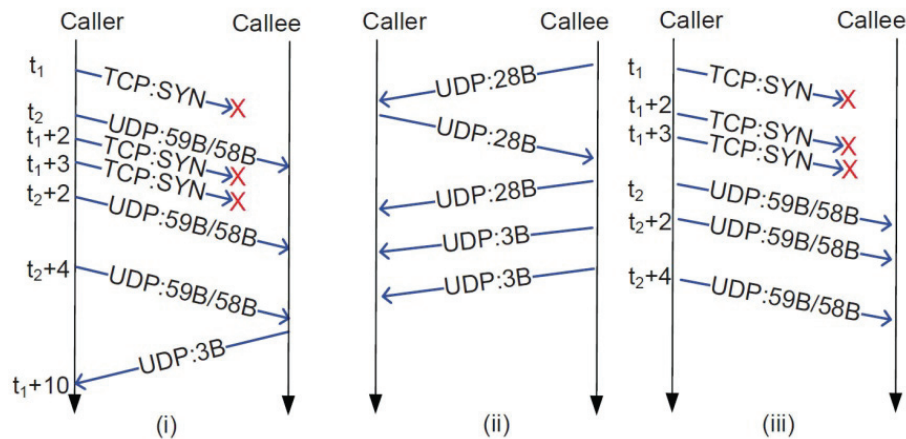
Το Skype είναι μια εφαρμογή P2P (peer-to-peer) και επομένως τα πακέτα μεταδίδονται απευθείας μεταξύ των δύο άκρων της συνομιλίας. Όμως, αυτό έχει σαν συνέπεια οι διευθύνσεις IP όλων των συμμετεχόντων στην συνομιλία να εκτίθενται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, αν η Alice γνωρίζει την ταυτότητα VoIP του Bob, μπορεί να τον καλέσει σε συνομιλία και έτσι να μάθει την τρέχουσα IP διεύθυνσή του, εξετάζοντας απλά τα πακέτα που φθάνουν στον υπολογιστή της. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας υπηρεσίες γεω-εντοπισμού (geo-localization) μπορεί να αντιστοιχίσει την διεύθυνση IP με μια γεωγραφική θέση και με έναν πάροχο υπηρεσιών Internet (ISP, Internet Service Provider).

5.6.1 Το κενό ασφαλείας του Skype

Τον Νοέμβριο του 2011, ερευνητές του INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) της Γαλλίας και του Polytechnic Institute of New York University δημοσίευσαν μια εργασία η οποία έκανε γνωστό ένα σχετικό με θέματα ιδιωτικότητας κενό ασφαλείας του Skype [71]. Συγκεκριμένα, ανέπτυξαν μία μέθοδο με την οποία ένας επιτιθέμενος μπορεί να καλέσει έναν άλλο χρήστη του Skype και να αποκτήσει την IP διεύθυνσή του, χωρίς μάλιστα να γίνει αντιληπτός, καθώς αυτός δεν λαμβάνει κανένα σήμα κλήσης. Η μέθοδος λειτουργεί ακόμη και όταν ο στόχος βρίσκεται πίσω από NAT. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνονται γνωστές στον επιτιθέμενο η ιδιωτική διεύθυνση του στόχου και η δημόσια διεύθυνση του NAT. Καλώντας ανά τακτά διαστήματα, ο επιτιθέμενος μπορεί να καταγράψει την εκάστοτε IP διεύθυνση του στόχου και, μέσω λογισμικού γεω-εντοπισμού, να παρακολουθεί τις κινήσεις του.

Απέδειξαν επίσης, ότι ακόμη και όταν ο στόχος είναι off-line, ο επιτιθέμενος μπορεί να μάθει την IP διεύθυνση με την οποία ο στόχος συνδέθηκε στο Skype την τελευταία φορά, αρκεί αυτό να έχει γίνει μέσα στις τελευταίες 72 ώρες. Καθώς το Skype, αφ' ενός χρησιμοποιεί ένα ιδιόκτητο πρωτόκολλο για την επικοινωνία, και αφ' ετέρου κατά την διαπραγμάτευση της συνόδου επικοινωνεί με πολλούς άλλους χρήστες (Skype supernodes), ο εντοπισμός της IP διεύθυνσης του στόχου δεν είναι εύκολος. Όμως οι ερευνητές εντόπισαν συγκεκριμένα μοτίβα στην κίνηση των πακέτων και έτσι μπόρεσαν να απομονώσουν αυτά που αφορούν στη ροή μεταξύ του

καλούντος και του κληθέντος. Διαπίστωσαν επίσης ότι, κατά τη διαπραγμάτευση της συνόδου, ο καλών αποστέλλει κάποια πακέτα TCP SYN και ότι, αν αυτά απορριφθούν και δεν αποσταλούν, τότε ο στόχος δεν λαμβάνει σήμα κλήσης και έτσι δεν γίνονται αντιληπτές οι κινήσεις του επιτιθεμένου. Τέλος, οι ερευνητές επεσήμαναν ότι, με την κλιμάκωση της μεθόδου, είναι δυνατή η παρακολούθηση χιλιάδων χρηστών.



Εικ. 5.2: Ακολουθία μηνυμάτων του Skype : (i) on-line με δημόσια διεύθυνση, (ii) on-line πίσω από NAT, (iii) off-line (Πηγή: Le Bond et al. [71])

Η απόκτηση της διεύθυνσης IP από τον επιτιθέμενο, είναι το πρώτο και πιο σημαντικό βήμα για την εν συνεχεία αναζήτηση και άλλων πληροφοριών, σχετικών με τις συνήθειες του χρήστη στόχου στο Internet. Για παράδειγμα, όπως απέδειξε η ίδια έρευνα, το τι είδους αρχεία μοιράζεται ο στόχος με άλλους χρήστες στο Bit Torrent.

5.6.2 Η εκμετάλλευση του κενού ασφαλείας και η απάντηση της Skype

Σύμφωνα με συνέντευξη που παραχώρησε ο επί κεφαλής της έρευνας Stevens Le Bond σε δημοσιογράφο της Wall Street Journal, η οποία δημοσιεύτηκε στο blog CIO Report, το συγκεκριμένο κενό ασφαλείας είχε κοινοποιηθεί από τους ερευνητές στην εταιρεία Skype από τον Νοέμβριο του 2010, δηλαδή ένα χρόνο πριν τη δημοσίευση της εργασίας [5].

Θα περίμενε κανείς ότι η Skype, η οποία πλέον ανήκει στη Microsoft, και η οποία ανακοίνωσε ότι το 2011 το 37% των 663 εκατομμυρίων εγγεγραμμένων μελών χρησιμοποίησαν την πλατφόρμα της περιστασιακά ή συχνά για επιχειρηματικούς σκοπούς, θα έδειχνε ενδιαφέρον. Όμως το κενό ασφαλείας παραμένει μέχρι σήμερα, ανέφερε ο Le Bond στην συνέντευξη.

Αφορμή για τη συνέντευξη αυτή ήταν το γεγονός ότι πριν μερικές ημέρες, στις 26 Απριλίου 2012, αναρτήθηκαν ανωνύμως στο website pastebin οδηγίες για τη λήψη μιας τροποποιημένης έκδοσης του Skype 5.5 η οποία επέτρεπε σε έναν επιτιθέμενο να ενεργοποιήσει το αρχείο ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών (debug-log file) του Skype και στη συνέχεια να μάθει την IP διεύθυνσή ενός χρήστη απλά βλέποντας τη Vcard του. Μάλιστα, δεν είναι απαραίτητο ο χρήστης στόχος να περιλαμβάνεται στον κατάλογο επαφών του επιτιθέμενου [76].

Η εφαρμογή Skype έχει τη δυνατότητα καταγραφής των λεπτομερειών των συνόδων ενός χρήστη. Μάλιστα, η εταιρεία παρέχει οδηγίες για τις απαραίτητες ρυθμίσεις στο μητρώο (registry) του συστήματος [88]. Τα παραγόμενα όμως αρχεία είναι κρυπτογραφημένα και δεν είναι αναγνώσιμα ούτε από αυτούς που αναπτύσσουν λογισμικό συνεργαζόμενο με το Skype και προς τους οποίους απευθύνονται οι οδηγίες.

Ένα μέλος της ομάδας του εγχειρήματος που αυτοαποκαλείται “skype-open-source” κατόρθωσε να «σπάσει» τον κώδικα του προγράμματος και αφού έκανε κάποιες τροποποιήσεις το μεταγλώττισε εκ νέου και το ανάρτησε στο site. Στην τροποποιημένη έκδοση του Skype, τα παραγόμενα debug-log files δεν είναι κρυπτογραφημένα και είναι πλέον αναγνώσιμα. Καθώς για κάθε σύνοδο καταγράφονται όλες οι IP διευθύνσεις, είναι πολύ εύκολο στη συνέχεια να εντοπισθεί η γεωγραφική τους θέση.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προς εξακρίβωση των παραπάνω οι οποίες τα επιβεβαίωσαν πλήρως. Στο log file ήταν καταγεγραμμένα όλα τα ονόματα του καταλόγου επαφών του Skype με τις αντίστοιχες IP διευθύνσεις. Για όλες τις επαφές που βρίσκονταν πίσω από NAT ήταν καταγεγραμμένες η ιδιωτική διεύθυνση του τοπικού δικτύου και η δημόσια του NAT. Ακόμη και αν η επαφή δεν ήταν on-line καταγράφηκε η IP διεύθυνση με την οποία είχε πραγματοποιηθεί η τελευταία σύνδεση. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένας νέος λογαριασμός στο Skype στον οποίο η λίστα επαφών ήταν κενή. Στις δοκιμές που ακολούθησαν επιβεβαιώθηκε ότι και μόνο με το άνοιγμα της Vcard ενός χρήστη του Skype, χωρίς δηλαδή την προσθήκη του στις επαφές και χωρίς καμία επικοινωνία με αυτόν, το πρόγραμμα καταχωρεί την IP διεύθυνσή του στο log file.

Η σχετική ανακοίνωση της εταιρείας Skype μετά από τη δημοσιότητα που πήρε το θέμα ήταν η παρακάτω:

“We are investigating reports of a new tool that captures a Skype user’s last known IP address. This is an ongoing, industry-wide issue faced by all peer-to-peer software companies. We are committed to the safety and security of our customers and we are taking measures to help protect them.”

Adrian Asher, director of product Security, Skype

Η ολιγωρία των Skype – Microsoft να διορθώσουν το κενό ασφαλείας ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι το πρόβλημα είναι «βαθιά» στον κώδικα και απαιτείται ριζική αναβάθμιση, οπότε είναι επικίνδυνο για τη δημιουργία άλλων προβλημάτων, δήλωσε ο Keith Ross, άλλο μέλος της ίδιας ερευνητικής ομάδας.

5.7 VoIP Spam

Ο όρος VoIP spam αναφέρεται σε ανεπιθύμητες, αυτοματοποιημένες κλήσεις με ηχογραφημένα μηνύματα με χρήση της τεχνολογίας VoIP. Το φαινόμενο είναι παρόμοιο με αυτό της ανεπιθύμητης ηλεκτρονικής αλληλογραφίας (e-mail spam). Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος SPIT (Spam over Internet Telephony). Τα συστήματα τηλεφωνίας VoIP όπως και άλλες εφαρμογές του Internet είναι ευάλωτα σε καταχρηστική χρήση από κακόβουλα άτομα. Τέτοιες χρήσεις είναι για παράδειγμα οι τηλεπωλήσεις και οι φάρσες.

Το πρόβλημα είναι πως θα ανιχνευτούν αυτές οι κλήσεις έτσι ώστε να μην απαντηθούν. Σε αντίθεση με την ανεπιθύμητη αλληλογραφία, οι κλήσεις VoIP spam πρέπει να αναγνωριστούν σε πραγματικό χρόνο. Πολλές από τις τεχνικές που σχεδιάστηκαν για την ανεπιθύμητη αλληλογραφία βασίζονται στην ανάλυση του περιεχομένου. Όμως, στην περίπτωση της τηλεφωνίας VoIP, όταν επιχειρηθεί να αναλυθεί το περιεχόμενο, δηλαδή η φωνή, θα είναι πολύ αργά αφού ο χρήστης θα έχει ήδη απαντήσει την κλήση. Η πραγματική πρόκληση είναι να μπλοκαριστεί η κλήση spam πριν ενεργοποιηθεί ο ήχος κλήσης.

5.8 Μέτρα Προστασίας

Οι κλήσεις VoIP είναι ευάλωτες σε υποκλοπές σε δύο φάσεις: κατά την εγκατάσταση της συνόδου και κατά την διάρκεια της κλήσης. Η υποκλοπή κατά την εγκατάσταση της συνόδου παρέχει στον εισβολέα πληροφορίες σχετικά με το ποιος κάλεσε ένα συγκεκριμένο αριθμό, κάτι που μπορεί να παρουσιάζει ενδιαφέρον για έναν ανταγωνιστή, υπάλληλο ή σύζυγο. Η υποκλοπή

της ροής των δεδομένων των κλήσεων επιτρέπει στον εισβολέα να ακούσει την τηλεφωνική συνδιάλεξη καθώς αυτή λαμβάνει χώρα.

Υπάρχουν όμως διαθέσιμα μέθοδοι και συστήματα για τη διασφάλιση της κυκλοφορίας VoIP. Και ενώ η τηλεφωνία VoIP είναι ευπαθής σε ψηφιακούς ωτακουστές, η τεχνολογία παρέχει μια σειρά από ενσωματωμένες δυνατότητες που μπορούν να αυξήσουν την προστασία της ιδιωτικής ζωής των χρηστών.

Η εγκατάσταση συστημάτων ασφαλείας σε συσκευές στην περίμετρο του δικτύου, όπως δρομολογητές και πύλες, μπορεί να προστατεύσει την ιδιωτικότητα κρυπτογραφώντας τόσο την κίνηση των πρωτοκόλλων εγκαθίδρυσης της συνεδρίας όσο και τη ροή των πακέτων της φωνής με τη χρήση τεχνολογιών όπως TLS (Transport Layer Security), ZRTP (Z Real-Time Transport Protocol), SRTP (Secure Real-Time Transport Protocol) και IPSec (IP Security). Εν τω μεταξύ, οι επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν VPN (Virtual Private Network) μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ενσωματωμένη τεχνολογία κρυπτογράφησης για την προστασία των κλήσεων VoIP από πύλη σε πύλη. Αυτή η ασφάλεια παρέχεται αυτόματα σε όλους τους χρήστες VoIP - ακόμα και υπαλλήλους που ταξιδεύουν και συνδέονται με το VPN από τον φορητό τους υπολογιστή. Η εσωτερική ασφάλεια VoIP μπορεί να ενισχυθεί με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας στο τοπικό δίκτυο της επιχείρησης και έτσι να εξασφαλισθεί το δίκτυο VoIP από εσωτερικές υποκλοπές.

Οι επιχειρήσεις και οι ιδιώτες συνδρομητές μιας VoIP υπηρεσίας μπορούν να επωφεληθούν από την κρυπτογράφηση που πολλοί πάροχοι έχουν ενσωματώσει στις υπηρεσίες τους ή από λογισμικό κρυπτογράφησης όπως το Zfone. Η εταιρεία Skype, για παράδειγμα, έχει προσθέσει υποστήριξη κρυπτογράφησης στο ιδιόκτητο λογισμικό της. Όμως, παρά το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των υποκλοπών για την απόσπαση ευαίσθητων δεδομένων γίνεται από «μέσα», τα περισσότερα εταιρικά δίκτυα δεν την χρησιμοποιούν. Παλαιότερα, ο λόγος ήταν ότι οι διαδικασίες κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης εισήγαγαν αισθητή καθυστέρηση στα συστήματα, καθώς απαιτούσαν μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Σήμερα, με την αλματώδη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος δεν τίθεται αυτό το θέμα.

Κεφάλαιο 6

Η Ποιότητα Υπηρεσίας

QoS

Η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS, Quality of Service) είναι ένα θέμα ζωτικής σημασίας για την επιτυχία της τηλεφωνίας VoIP. Στην παραδοσιακή τηλεφωνία, η ποιότητα της υπηρεσίας για κάθε τηλεφωνική κλήση είναι εγγυημένη από τη συνεχή διαθεσιμότητα του αφιερωμένου εύρους ζώνης. Κάθε φορά που ένα κανάλι είναι εγκατεστημένο στο δίκτυο, το εύρος ζώνης που διατίθενται για αυτό το κανάλι είναι σταθερό και αμετάβλητο. Επίσης όλες οι ψηφιακές συνδέσεις PSTN χρησιμοποιούν τον ίδιο κωδικοποιητή/αποκωδικοποιητή (codec) φωνής, τον G.711, και έτσι δεν χρειάζεται ποτέ ανακωδικοποίηση, η οποία εισάγει χρονική καθυστέρηση [96]. Έτσι, στα δίκτυα PSTN δεν παρατηρείται σχεδόν ποτέ συμφόρηση λόγω επεξεργασίας, και δεδομένου ότι το σύστημα γενικά δεν βασίζεται στη μεταγωγή πακέτων, δεν υπάρχει σχεδόν ποτέ αντιληπτή υποβάθμιση στην ποιότητα της κλήσης.

Στα δίκτυα PSTN αν δεν μπορεί να δημιουργηθεί ένα μονοπάτι με πλήρες εύρος ζώνης, η κλήση απλά δεν είναι εφικτή και ο καλών ακούει σήμα κατελιμμένου. Όμως τα δίκτυα μεταφοράς πακέτων λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο. Όταν η διαθεσιμότητα εύρους ζώνης μειώνεται, με

την αποστολή όλο και περισσότερων πακέτων στο δίκτυο, τότε η διακίνηση επιβραδύνεται. Ορισμένες εφαρμογές είναι ανεκτικές στη συμφόρηση και στην αργή απόδοση καλύτερα από άλλες.

Οι καθυστερήσεις στη μετάδοση είναι ο μεγαλύτερος εχθρός της τηλεφωνίας VoIP και ένας από τους βασικούς συντελεστές για μια αποτυχημένη υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Εκτός από τον προσεκτικό σχεδιασμό του δικτύου και την διάθεση του απαραίτητου εύρους ζώνης, που άλλωστε είναι οι βασικοί παράγοντες στην υλοποίηση οποιουδήποτε δικτύου IP, υπάρχει μια καλοσχεδιασμένη λύση στο πρόβλημα της καθυστέρησης, η οποία εγγυάται το απαιτούμενο εύρος ζώνης και την ιεράρχηση της κίνησης VoIP πάνω από την λιγότερο ευαίσθητη κίνηση και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο. Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται τη λύση αυτή, η οποία ονομάζεται QoS και χρησιμοποιεί διάφορα πρωτόκολλα και πρότυπα του Internet όπως τα 802.1Q VLAN, DiffServ, RSVP, και MPLS.

6.1 Ορισμός QoS

Σύμφωνα με την ITU-T Rec. E.800 η ποιότητα υπηρεσίας ορίζεται ως «Η αθροιστική επίδραση της απόδοσης της υπηρεσίας η οποία καθορίζει τον βαθμό ικανοποίησης του χρήστη»

Η ποιότητα υπηρεσίας αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες: υποστήριξη υπηρεσίας (service support), λειτουργικότητα υπηρεσίας (service operability), αξιοπιστία υπηρεσίας (service serveability) και ασφάλεια υπηρεσίας (service security). Η υποστήριξη έχει σχέση με υπηρεσίες όπως βοήθεια καταλόγου ή τεχνική βοήθεια. Η λειτουργικότητα αφορά στο πόσο εύκολα μπορεί να χειριστεί την υπηρεσία ο χρήστης. Η αξιοπιστία περιλαμβάνει την προσβασιμότητα και την διατηρησιμότητα της υπηρεσίας καθώς επίσης το επίπεδο ποιότητας της φωνής που αυτή παρέχει. Τέλος, η ασφάλεια έχει να κάνει κυρίως με θέματα ιδιωτικότητας.

6.2 Απαιτήσεις QoS

Οι απαιτήσεις όλων των εφαρμογών δεν είναι ίδιες. Άλλες απαιτούν μεγάλη αξιοπιστία, άλλες είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, άλλες απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης. Στον Πίν. 6.1 παρουσιάζονται διάφορες γνωστές εφαρμογές και οι απαιτήσεις τους σε τέσσερις βασικές

παραμέτρους της ποιότητας υπηρεσίας. Αυτές είναι η αξιοπιστία (reliability), η καθυστέρηση (delay), η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) και το εύρος ζώνης (bandwidth).

Εφαρμογή Application	Αξιοπιστία Reliability	Καθυστέρηση Delay	Διακύμανση καθυστέρησης Jitter	Εύρος ζώνης Bandwidth
e-mail	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
File transfer	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέση
Web access	Υψηλή	Μέση	Χαμηλή	Μέση
Remote login	Υψηλή	Μέση	Μέση	Χαμηλή
Audio on demand	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Μέση
Video on demand	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Telephony	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Videoconferencing	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή

Πίν. 6.1: Απαιτήσεις εφαρμογών για QoS (Tanenbaum [91])

6.3 Επιφυλάξεις χρηστών

Το πρώτο βήμα για τον καθορισμό μέτρων αντιληπτής ποιότητας υπηρεσίας είναι η περιγραφή των πιθανών ερωτημάτων, ανησυχιών και επιφυλάξεων των χρηστών αναφορικά με τη ποιότητα της υπηρεσίας (QoS).

6.3.1 Ερωτήματα σχετικά με την ποιότητα της φωνής

Οι ανησυχίες των χρηστών βασίζονται σε εμπειρίες παρόμοιων υπηρεσιών με μη ικανοποιητική ποιότητα και συνήθως εκφράζονται σαν αμφιβολίες ή ερωτήματα που αναζητούν θετική διαβεβαίωση. Στην περίπτωση της τηλεφωνίας VoIP, τα βασικά ερωτήματα των χρηστών έχουν να κάνουν με την ποιότητα της σύνδεσης, δηλαδή την ποιότητα των τηλεφωνικών συνομιλιών. Μερικά τέτοια ερωτήματα είναι τα παρακάτω.

- Θα παρουσιάζουν οι συνδέσεις υποβαθμίσεις (impairments) που θα με δυσκολεύουν να ακούσω ή να κατανοήσω τι λέει ο συνομιλητής μου; Θα έχω ενοχλητικά προβλήματα ηχούς όταν μιλώ;

- Θα ακούγονται φυσιολογικές οι φωνές μακρινών συνομιλητών; Θα είμαι σε θέση να αναγνωρίζω διαφορετικούς ομιλητές;
- Θα διατηρούνται στη ροή του λόγου με μακρινούς συνομιλητές οι φυσιολογικοί ρυθμοί και τονισμοί της ομιλίας;
- Θα υποστηρίζει η υπηρεσία τους φυσιολογικούς ρυθμούς συνομιλίας και την αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών;

Εκφράζοντας ανησυχίες όπως οι παραπάνω, οι εν δυνάμει χρήστες μιας νέας υπηρεσίας αντιδρούν βάσει των προηγούμενων εμπειριών τους. Επομένως, οι ανησυχίες σχετικά με την ποιότητα της φωνής θα εστιάζονται σε προβλήματα που βίωσαν χρησιμοποιώντας άλλες υπηρεσίες φωνής. Ομοίως, οι χρήστες που έχουν βιώσει και ενοχληθεί από τις καθυστερήσεις που παρουσιάζονται σε μακρινές υπεραστικές κλήσεις που πραγματοποιούνται μέσω δορυφόρων θα εκφράσουν την ανησυχία τους για το αν η τηλεφωνία VoIP μπορεί να έχει παρόμοιες καθυστερήσεις.

Η μεταφορά της τηλεφωνικής υπηρεσίας σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων θα έχει διαφορές στην απόδοση οι οποίες είναι δυνατόν να έχουν σοβαρές συνέπειες στην αντίληψη της ποιότητας από μερικούς χρήστες. Ωστόσο, κανένα από αυτά τα ερωτήματα δεν έχει πάρει τις διαστάσεις που έχει πάρει ο ευρέως διαδεδομένος σκεπτικισμός σε σχέση με την επίδραση που έχουν τα δίκτυα μεταγωγής πακέτων στην ποιότητα της φωνής [19].

6.3.2 Ερωτήματα μη σχετικά με την ποιότητα της φωνής

Πολλά ερωτήματα χρηστών σχετικά με την ποιότητα των τηλεφωνικών υπηρεσιών δεν αφορούν στην ποιότητα της φωνής. Μπορούν να αφορούν στη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας, στην ταχύτητα δρομολόγησης των κλήσεων, στην αξιοπιστία της σύνδεσης και της δρομολόγησης, στη συνέχεια της σύνδεσης και τέλος στην αξιοπιστία της αποσύνδεσης.

Διαθεσιμότητα

Θα είναι διαθέσιμη η υπηρεσία όταν θα τη χρειαστώ;

Πόσο θα πρέπει να περιμένω αν τυχόν δεν είναι διαθέσιμη;

Πόσο συχνά η μη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας θα είναι πραγματικά ενοχλητική;

Ταχύτητα δρομολόγησης

- Πόσο χρόνο πρέπει να περιμένω να παρέλθει ώστε να γνωρίζω ότι η σύνδεση πραγματοποιήθηκε;
- Ο χρόνος αυτός είναι προβλέψιμος;

Αξιοπιστία σύνδεσης

- Όταν καλέσω έναν έγκυρο αριθμό η υπηρεσία θα πραγματοποιήσει τη σύνδεση; Διαφορετικά, θα με ενημερώσει ότι ο κληθείς αριθμός είναι κατελημμένος;

Αξιοπιστία δρομολόγησης

- Αν καλέσω τον σωστό αριθμό, η υπηρεσία θα υλοποιήσει τη σωστή σύνδεση;

Συνέχεια σύνδεσης

- Η σύνδεση θα είναι ενεργή συνεχώς έως ότου κλείσω το τηλέφωνο;
- Οι συνδιαλέξεις θα ολοκληρώνονται χωρίς πρόωρες αποσυνδέσεις;

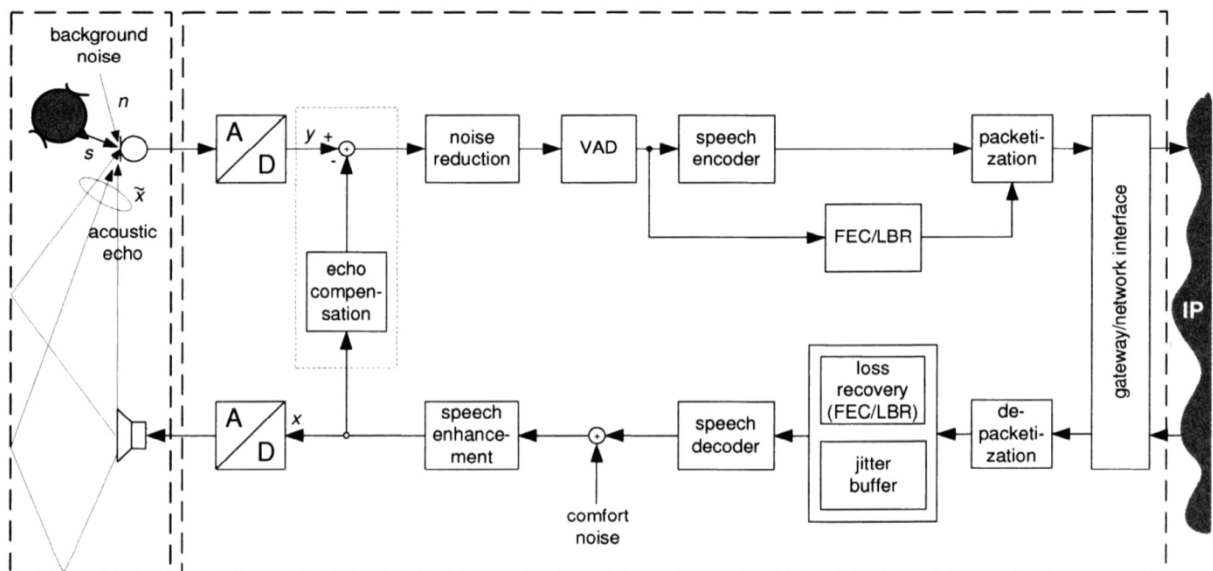
Αξιοπιστία αποσύνδεσης

- Θα διακοπεί η σύνδεση μόλις κλείσω το τηλέφωνο; Σε αντίθετη περίπτωση ποιες θα είναι οι συνέπειες; Θα υπάρχει κάποιος να με πιστέψει όταν του αναφέρω ότι δεν μιλούσα με την πεθερά μου για 5 ώρες και να αντιλογήσει την εσφαλμένη χρέωση στο λογαριασμό;

6.4 Λειτουργία υπηρεσίας VoIP

Στην Εικ. 6.1 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα των βαθμίδων επεξεργασίας φωνής σε μια τηλεφωνική συσκευή VoIP. Στο διάγραμμα συμπεριλαμβάνεται και η πύλη σύνδεσης με το δίκτυο IP. Επίσης, ο θόρυβος υποβάθρου n και η ακουστική ηχώ του ομιλητή \tilde{x} σημειώνονται σαν πιθανά στοιχεία ποιότητας που τα σήματά τους προστίθενται στο σήμα της φωνής. Μετά τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (βαθμίδα A/D), το σήμα του μικροφώνου $y(k) = s(k) + n(k) + \tilde{x}(k)$ συνήθως διέρχεται μέσα από διάφορες βαθμίδες επεξεργασίας πριν λάβει χώρα το τελικό πακετάρισμα. Μετά την απόσβεση της πιθανής ηχούς του ομιλητή (βαθμίδα echo compensation), στη συνέχεια μειώνεται ο θόρυβος υποβάθρου του σήματος της φωνής (βαθμίδα noise reduction). Έπειτα ανιχνεύεται αν το πλαίσιο περιέχει φωνή (βαθμίδα

VAD, voice activity detection) και σε περίπτωση που αυτό δεν περιέχει φωνή ένας αλγόριθμος αποφασίζει την εκπομπή ενός εκτιμώμενου σήματος υποβάθρου αντί για το πραγματικό σήμα. Η μείωση του όγκου των δεδομένων που επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτό συνεισφέρει στη μείωση του απαιτούμενου εύρους ζώνης και της καταναλισκόμενης ενέργειας εκπομπής, ειδικά στις συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Αν το πλαίσιο περιέχει φωνή τότε κωδικοποιείται και συμπιέζεται σύμφωνα με κάποιο αλγόριθμο (βαθμίδα speech encoder). Εάν έχει επιλεγθεί στρατηγική απόκρυψης λαθών στην πλευρά του αποστολέα, τότε μπορεί να προστεθούν στα κωδικοποιημένα πλαίσια φωνής και δεδομένα FEC (Forward Error Correction) ή LBR (Low Bit-rate Redundancy). Τέλος, τα δεδομένα πακετάρονται και εκπέμπονται στο δίκτυο IP. Λόγω της δρομολόγησης διά μέσου πολλών διαφορετικών διαδρομών στο δίκτυο, τα πακέτα μπορεί να υποστούν σταθερή ή μεταβαλλόμενη καθυστέρηση και απώλειες.



Εικ. 6.1: Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδων επεξεργασίας φωνής τηλεφωνίας VoIP

(Πηγή: Raake [83])

Στην πλευρά του δέκτη, κατ' αρχάς εξάγεται το ωφέλιμο φορτίο από τα πακέτα (βαθμίδα depacketization) και στη συνέχεια, από τα στοιχεία των επικεφαλίδων, υπολογίζονται οι διακυμάνσεις της καθυστέρησης οι οποίες εξουδετερώνονται μέσω ενός buffer (βαθμίδα jitter buffer). Οι απώλειες πακέτων κατά τη μετάδοση, οι μεγάλες καθυστερήσεις στην άφιξη των πακέτων και η κατά συνέπεια παράλειψή τους από τον jitter buffer αποτελούν τις συνολικές απώλειες. Μερικές όμως από τις απώλειες μπορεί να ανακτηθούν κάνοντας χρήση των μέτρων (FEC ή LBR) που έχουν ληφθεί από τον αποστολέα (βαθμίδα loss recovery). Η εξερχόμενη από την προηγούμενη βαθμίδα σειρά πακέτων RTP, χωρίς τα οριστικά απολεσθέντα πακέτα, περνά

στην επόμενη βαθμίδα και αποκωδικοποιείται (βαθμίδα speech decoder). Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί ένας πρόσθετος μηχανισμός PLC απ' ευθείας στη φάση της αποκωδικοποίησης. Για παράδειγμα, μπορεί να αντικατασταθούν χαμένα πακέτα από εκτιμώμενα πλαίσια του codec παίρνοντας πληροφορίες από προγενέστερα δεδομένα φωνής. Σε περίπτωση περιόδων σιγής δημιουργείται ένα σήμα θορύβου άνεσης βασισμένο στον θόρυβο υποβάθρου των προηγούμενων πακέτων. Μετά την αποκωδικοποίηση, μπορεί να υπάρχει μια βαθμίδα βελτίωσης της φωνής μέσω καταλλήλου αλγορίθμου. Τέλος, το σήμα μετατρέπεται σε αναλογική μορφή (βαθμίδα A/D) και αναπαράγεται στον δέκτη από το interface που αυτός χρησιμοποιεί.

6.5 Στοιχεία ποιότητας υπηρεσίας

Πρόκειται για στοιχεία της υπηρεσίας που μπορούν να μετρηθούν με όργανα, όπως για παράδειγμα η καθυστέρηση, και τα οποία έχουν άμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα.

6.5.1 Διακύμανση καθυστέρησης (jitter)

Λόγω της δρομολόγησης των πακέτων μέσω διαφορετικών μονοπατιών και των ασύγχρονων χαρακτηριστικών του δικτύου, πακέτα που ανήκουν στο ίδιο τμήμα της ομιλίας (στον ίδιο φθόγγο ή στην ίδια λέξη), δηλαδή σε μια χρονική περίοδο της ομιλίας που δεν μπορεί να διακόπτεται από περίοδο σιγής, μπορεί να φθάσουν στον προορισμό με διαφορετική καθυστέρηση. Η διακύμανση της καθυστέρησης υποβαθμίζει σημαντικά την ποιότητα της φωνής και για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνονται αντισταθμιστικά μέτρα. Αυτό γίνεται συνήθως στην πλευρά του δέκτη με την εφαρμογή των λεγόμενων jitter buffers. Ο jitter buffer αποθηκεύει προσωρινά τα πακέτα για ένα στατικό ή δυναμικά μεταβαλλόμενο χρονικό διάστημα πριν αυτά προωθηθούν για αναπαραγωγή. Το ίδιο το μέτρο προσθέτει επί πλέον καθυστέρηση και ενδεχομένως απώλειες όταν για παράδειγμα τα πακέτα φθάσουν αργά πλέον για αναπαραγωγή. Όμως, τα μειονεκτήματα αυτά είναι περισσότερο αποδεκτά από την υποβάθμιση που προκαλεί η διακύμανση της καθυστέρησης.

Στα σημερινά δίκτυα, η υψηλής συχνότητας διακύμανση της καθυστέρησης (π.χ. jitter σε ένα talkspurt) μπορεί να παραβλεφθεί καθώς αντισταθμίζεται από το ίδιο το δίκτυο. Οι routers έχουν τη δυνατότητα να καθυστερήσουν πακέτα που έφθασαν πιο νωρίς από την κανονική σειρά τους. Μπορούν επίσης εύκολα να εξισορροπηθούν από τον jitter buffer του δέκτη. Οι

χαμηλής όμως συχνότητας διακυμάνσεις της καθυστέρησης καταλήγουν σε μια απόλυτη καθυστέρηση η οποία δεν είναι απαραίτητα σταθερή για όλη τη διάρκεια της κλήσης.

6.5.2 Καθυστέρηση

Η συνολική καθυστέρηση της μετάδοσης οφείλεται αφ' ενός στην καθυστέρηση του αλγορίθμου του κωδικοποιητή και της μεθόδου διόρθωσης λαθών και αφ' ετέρου στην καθυστέρηση που εισάγουν το δίκτυο, οι jitter buffers, ο αποκωδικοποιητής και άλλα στοιχεία επεξεργασίας του σήματος. Το άθροισμα των διαφόρων καθυστερήσεων φαίνεται στον Πίν. 6.2.

Πηγή καθυστέρησης	Τυπικό εύρος [ms]
Εγγραφή	10 – 40
Κωδικοποιητής	10 – 20
Μετάδοση στο Internet	70 – 120
Jitter buffer	50 – 200
Αποκωδικοποιητής	10 – 20
Σύνολο	150 – 400

Πίν. 6.2: Πηγές και τυπικές τιμές καθυστέρησης

6.5.3 Απώλειες πακέτων

Από όλα τα στοιχεία ποιότητας, οι απώλειες πακέτων είναι το στοιχείο υποβάθμισης που κάνει την τηλεφωνία VoIP αισθητά διαφορετική από τα ενσύρματα τηλεφωνικά δίκτυα. Πακέτα μπορεί να χαθούν είτε κατά τη μεταφορά τους λόγω κορεσμού του δικτύου είτε στον δέκτη. Στα ασύρματα δίκτυα, λόγω της φύσης του μέσου, μπορεί να χαθούν τμήματα πακέτων και όχι μόνο ολόκληρα πακέτα. Ανάλογα με την σπουδαιότητα της χαμένης πληροφορίας τα ελλιπή αυτά πακέτα μπορεί και να χρησιμοποιηθούν στη φάση της αποκωδικοποίησης.

Οι σχετικές με την απώλεια πακέτων κύριες παράμετροι που επιδρούν σημαντικά στην υποβάθμιση της ποιότητας της φωνής είναι: η κατανομή των απωλειών, το μέγεθος του πακέτου, η ανάκτηση απολεσθέντων πακέτων με την εφαρμογή μηχανισμών όπως το FEC, η αποκωδικοποίηση της φωνής και τα αντίστοιχα μέτρα για την απόκρυψη των απολεσθέντων πακέτων που εφαρμόζονται στον αποκωδικοποιητή.

Καθώς η συμπεριφορά των δικτύων είναι δυναμική και μεταβαλλόμενη με τον χρόνο, οι απώλειες πακέτων μπορεί να έχουν πληθώρα κατανομών. Τα μοντέλα που πιο συχνά εφαρμόζονται σε δοκιμές σχετικές με την ποιότητα φωνής είναι οι τυχαίες απώλειες (random) και το μοντέλο Bernoulli. Ο όρος τυχαίες απώλειες σημαίνει γεγονότα απωλειών ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η απώλεια δηλαδή ενός πακέτου είναι ανεξάρτητη από το αν τα προηγούμενα πακέτα έφθασαν στον προορισμό τους ή χάθηκαν. Όμως, το μοντέλο των τυχαίων απωλειών δεν είναι αντιπροσωπευτικό των κατανομών που απαντώνται στα πραγματικά δίκτυα. Για παράδειγμα, πολύ συχνά οι απώλειες οφείλονται σε συμφόρηση του δικτύου με συνέπεια να χάνονται συνεχόμενα πακέτα για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι κάθε διακριτή απώλεια έχει κάποια εξάρτηση.

6.5.4 Ανάκτηση απολεσθέντων πακέτων

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την ανάκτηση πληροφοριών φωνής που απωλέσθηκαν με το πακέτο. Οι τεχνικές διακρίνονται σε αυτές που εφαρμόζονται ανεξάρτητα στην πλευρά του δέκτη και σε αυτές που βασίζονται στην αποστολή πρόσθετων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση. Συχνά εφαρμόζονται συνδυασμοί των τεχνικών αυτών. Οι κύριες τεχνικές ανάκτησης είναι:

- Packet Loss Concealment (PLC)
- Forward Error Correction (FEC)
- Low-Bitrate Redundancy (LBR)

6.5.5 Μέγεθος πακέτου

Το μέγεθος του πακέτου αφορά στο μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου και μετράται συνήθως σε ms. Τον ίδιο όρο μπορεί να το συναντήσει κανείς σαν payload size (bytes), packet interval, μήκος πακέτου (ms) ή αριθμός πλαισίων του codec ανά πακέτο. Καθώς το κάθε πρωτόκολλο προσθέτει επί πλέον δεδομένα επικεφαλίδας στο ωφέλιμο φορτίο φωνής, για να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων που μεταδίδονται, πέραν αυτών της φωνής, πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των πακέτων. Δηλαδή, σε κάθε πακέτο να συμπεριλαμβάνονται περισσότερα πλαίσια κωδικοποιημένης φωνής. Η αύξηση όμως του μεγέθους του πακέτου έχει σαν συνέπεια την αύξηση της καθυστέρησης της μετάδοσης και την εν δυνάμει χαμηλότερη ποιότητα φωνής σε περίπτωση απώλειας του πακέτου. Οι υπηρεσίες VoIP έχουν σήμερα συμβιβαστεί με τη χρήση

πακέτων που περιέχουν ένα μικρό αριθμό πλαισίων. Το μέγεθος των πακέτων είναι συνήθως 10 – 60 ms. Σημειωτέον ότι ο όγκος των δεδομένων των επικεφαλίδων μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση τεχνικών συμπίεσης.

6.5.6 Παράδοση πακέτων εκτός σειράς

Όταν μία σειρά σχετικών μεταξύ τους πακέτων δρομολογείται σε ένα δίκτυο, τα πακέτα μπορούν να ακολουθήσουν διαφορετική διαδρομή με αποτέλεσμα να φθάσουν στον προορισμό με διαφορετική καθυστέρηση. Έτσι τα πακέτα φθάνουν με διαφορετική σειρά από αυτή που απεστάλησαν. Το πρόβλημα απαιτεί ειδικά πρόσθετα πρωτόκολλα υπεύθυνα για την αναδιάταξη των πακέτων μόλις αυτά φθάσουν στον προορισμό. Αυτό είναι σημαντικό για ροές πακέτων video ή VoIP όπου η ποιότητα επηρεάζεται σημαντικά από την καθυστέρηση και την ασυνέπεια στην ακολουθία.

6.5.7 Σφάλματα bit

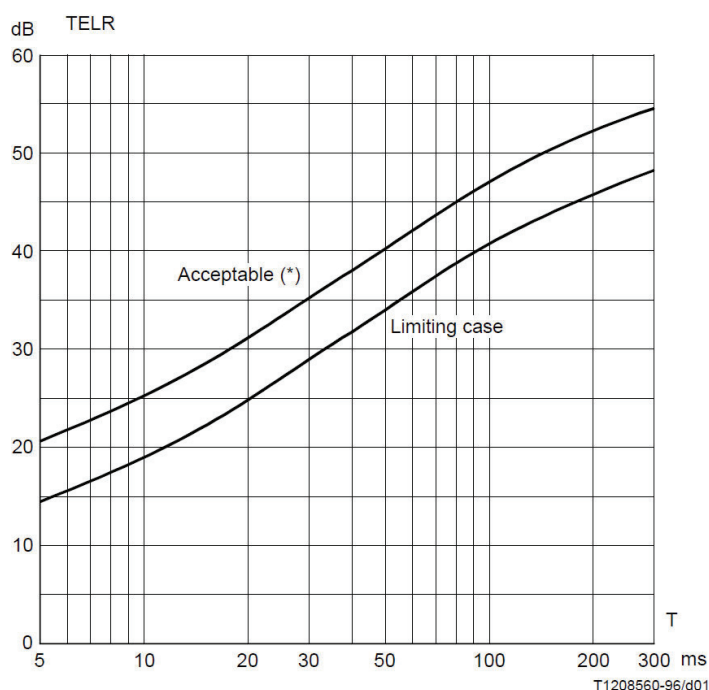
Τα σφάλματα bit μπορούν να συμβούν είτε σε ενσύρματα δίκτυα όπως το DSL (Digital Subscriber Line) είτε σε ασύρματα δίκτυα. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται σε παρεμβολές σημάτων οι οποίες υπολογίζονται από τον λόγο του φέροντος σήματος προς τις παρεμβολές C/I (carrier-to-interference ratio) ο οποίος μετράται σε dB. Επομένως, τα σφάλματα bit συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο του μοντέλου OSI (Open System Interconnection).

Αν το ποσοστό των εσφαλμένων bit είναι στα κανονικά επίπεδα λειτουργίας των δικτύων Ethernet, τότε δεν επηρεάζεται σημαντικά η ποιότητα της φωνής, παρόλο που γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη ακόμη και ενός εσφαλμένου bit στο δείγμα. Αν όμως το ποσοστό αυξηθεί τόσο ώστε να γίνει ενοχλητικά αισθητό, τότε κινδυνεύει και η ίδια η ακεραιότητα της κλήσης. Η σύσταση ITU-T Rec. G.821 [51] καθορίζει τα επίπεδα των ποσοστών εσφαλμένων bit για συγκεκριμένα μέσα και αποστάσεις. Στην τηλεφωνία VoIP, ένα εσφαλμένο bit μπορεί να οδηγήσει στην απόρριψη ενός ολόκληρου πακέτου IP και, αν τα πακέτα είναι μεγάλα σε μέγεθος, τότε υπάρχει αισθητή υποβάθμιση στην ποιότητα. Το πρωτόκολλο UDP μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να έχει ανοχή σε σφάλματα bit (όταν το ποσοστό τους είναι μικρό) αποσκοπώντας στη μείωση των απωλειών πακέτων [18].

6.5.8 Ηχώ

Το μεταδιδόμενο σήμα μιας τηλεφωνικής συνδιάλεξης μπορεί να ανακλαστεί σε κάποιο σημείο της διαδρομής του σήματος από τον ομιλητή προς τον ακροατή και να επιστρέψει πίσω στον ομιλητή. Στην τηλεφωνία το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηχώ (echo). Σημεία ανάκλασης που θα προκαλέσουν το φαινόμενο μπορεί να δημιουργηθούν στο δίκτυο αλλά και στο τηλέφωνο του χρήστη. Στην κλασική τηλεφωνία το φαινόμενο οφειλόταν στο δίκτυο και προκαλείτο από ελαττωματικές ενώσεις των δισύρματων και τετρασύρματων τηλεφωνικών γραμμών.

Σήμερα, οι ανακλάσεις είναι κυρίως ακουστικής μορφής που οφείλονται στο γεγονός ότι το μικρόφωνο λαμβάνει τον ήχο του ακουστικού. Το φαινόμενο της ηχούς γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο όταν η καθυστέρηση του επιστρεφόμενου σήματος υπερβεί κάποιο κατώφλι. Σημαντικός παράγοντας για την ανθρώπινη αντίληψη είναι και η ένταση του ήχου, το σήμα του οποίου συνήθως επιστρέφει εξασθενημένο. Επομένως, το αν το φαινόμενο είναι αντιληπτό ή όχι εξαρτάται από δύο παράγοντες που απεικονίζονται στο γράφημα της Εικ. 6.2 (ITU-T Rec. G.131 [50]).



Εικ. 6.2: Καμπύλες ανοχής echo (Πηγή: ITU-T Rec. G.131 [50])

TELR: Talker Echo Loudness Rating (dB), T: Mean one-way transmission time (ms)

Όταν ο ομιλητής ακούει τον εαυτό του, το φαινόμενο ονομάζεται ηχώ ομιλητή (talker echo). Όταν ο ακροατής λαμβάνει το σήμα με ηχώ, η οποία οφείλεται σε πολλαπλές ανακλάσεις και καθυστερήσεις, τότε το φαινόμενο ονομάζεται ηχώ ακροατή (listener echo).

Σε σύγκριση με την τηλεφωνία PSTN, στην τηλεφωνία VoIP το φαινόμενο μπορεί να γίνει περισσότερο αντιληπτό λόγω των εγγενών μεγαλύτερων καθυστερήσεων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια τεχνική που ονομάζεται echo cancellation. Η τεχνική βασίζεται σε έναν αλγόριθμο ο οποίος ανιχνεύει και απομακρύνει από το λαμβανόμενο σήμα το εκπεμπόμενο που έχει παρεμβληθεί.

6.5.9 Ανίχνευση φωνητικής δραστηριότητας

Στα δίκτυα μεταγωγής φωνής, όλες οι κλήσεις φωνής χρησιμοποιούν συνδέσεις σταθερού εύρους ζώνης 64 Kbps, ανεξάρτητα από το ποσοστό χρόνου ομιλίας ή χρόνου σιωπής κατά την συνομιλία. Τα πακέτα των δικτύων VoIP περιέχουν ομιλία και σιωπή. Με την Ανίχνευση Φωνητικής Δραστηριότητας (VAD, Voice Activity Detection), τα πακέτα σιωπής μπορεί να κατασταλούν. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και ο όρος Silence Suppression (π.χ. από την Cisco) με την ίδια ακριβώς σημασία.

Με την πάροδο του χρόνου ο μηχανισμός VAD μπορεί να προσφέρει έως και 35% εξοικονόμηση εύρους ζώνης (Για όγκο μεγαλύτερο από 24 κλήσεις). Η εξοικονόμηση δεν πραγματοποιείται σε κάθε μεμονωμένη κλήση φωνής. Ο μηχανισμός VAD δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του δικτύου και τον υπολογισμό του εύρους ζώνης, ειδικά στις συνδέσεις που μεταφέρουν λιγότερες από 24 κλήσεις ταυτόχρονα [8]. Διάφορα άλλα χαρακτηριστικά, όπως η μουσική σε αναμονή, κάνουν τη λειτουργία VAD αναποτελεσματική. Όταν το δίκτυο έχει σχεδιαστεί για το πλήρες εύρος ζώνης των φωνητικών κλήσεων, τότε όλο το bandwidth που εξοικονομείται από τον μηχανισμό VAD θα είναι διαθέσιμο στις άλλες εφαρμογές δεδομένων.

Ο μηχανισμός VAD παρέχει επίσης και την λειτουργία παραγωγής θορύβου άνεσης (CNG, Comfort Noise Generation). Επειδή η σιωπή μπορεί να εκληφθεί σαν γεγονός αποσύνδεσης, η λειτουργία CNG παρέχει έναν τοπικά δημιουργούμενο λευκό θόρυβο, έτσι ώστε και τα δύο μέρη της κλήσης να έχουν την αίσθηση ότι η σύνδεση παραμένει ενεργή.

6.5.10 Αποκοπή φωνής

Πολλές φορές, κατά τη διάρκεια μιας κλήσης VoIP, παρατηρείται το φαινόμενο να αποκόπτονται τμήματα από κάποιες λέξεις. Αυτό ονομάζεται αποκοπή και συνήθως οφείλεται σε υψηλά ποσοστά απωλειών ή σε απόρριψη πακέτων που αφίχθηκαν με καθυστέρηση από τον jitter buffer. Μπορεί όμως να προκληθεί και από τη λειτουργία ανίχνευσης φωνητικής δραστηριότητας σε συνδυασμό με αυτήν της απόσβεσης ηχούς.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις αποκοπής:

- αποκοπή τυχαίων τμημάτων των λέξεων (clipping), και
- αποκοπή της αρχής και του τέλους των λέξεων (dipping).

6.5.11 Εύρος ζώνης

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψη κατά τον σχεδιασμό του δικτύου VoIP είναι το εύρος ζώνης καθώς μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης μιας κλήσης VoIP εξαρτάται από τον codec, και το μέγεθος των πακέτων της φωνής. Ακολουθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού του απαραίτητου bandwidth για κλήσεις VoIP με χρήση του G.711 codec.

Παράδειγμα για τον codec G.711 (64 Kbps, δειγματοληψία ανά 20 ms)

Ρυθμός μετάδοσης: $\frac{1000 \text{ ms/s}}{20 \text{ ms/πλαίσιο}} = 50 \text{ πλαίσια φωνής ανά δευτερόλεπτο}$

Μέγεθος πλαισίων φωνής: $\frac{64000 \text{ bits/s}}{50 \text{ πλαίσια/s}} = 1280 \text{ bits/πλαίσιο} = 160 \text{ bytes/πλαίσιο}$

Επικεφαλίδα Ethernet: 38 bits

Επικεφαλίδες IP/UDP/RTP: $20 + 8 + 12 = 40 \text{ bits}$

Μέγεθος πακέτου: $38 + 40 + 160 = 238 \text{ bytes}$

Ρυθμός μετάδοσης πακέτων: $238 \text{ bytes} \times 50 \text{ πλαίσια/s} = 11900 \text{ bytes/s} = 95.2 \text{ Kbps}$

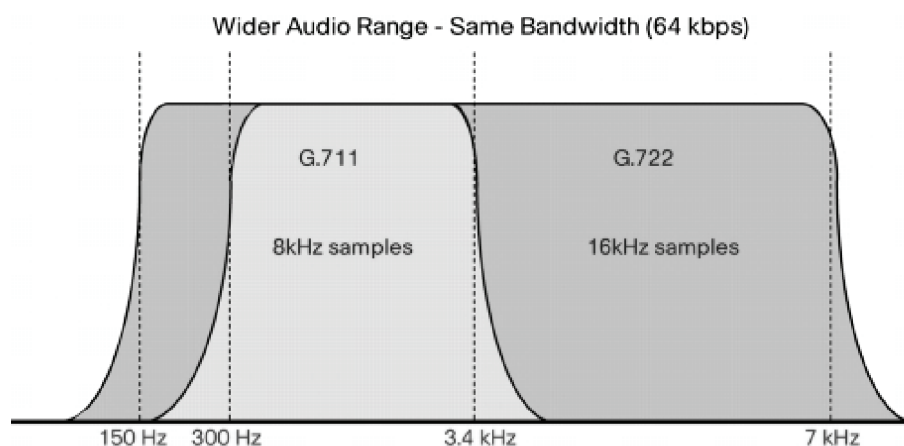
Καθώς ο υπολογισμός αφορά στη μία μόνο κατεύθυνση, το απαιτούμενο bandwidth για μία κλήση θα είναι $2 \times 95.2 = 190.4 \text{ Kbps}$. Όμως, το εύρος ζώνης μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές συμπίεσης των επικεφαλίδων, όπως για παράδειγμα το πρωτόκολλο CRTP, ή λειτουργίες όπως η ανίχνευση φωνητικής δραστηριότητας.

6.6 Codecs

Με σκοπό τη μείωση του απαιτούμενου εύρους ζώνης στα δίκτυα μετάδοσης φωνής, έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται σήμερα πληθώρα αλγορίθμων κωδικοποίησης και συμπίεσης των δεδομένων φωνής. Η λειτουργία των κωδικοποιητών/αποκωδικοποιητών ή codec βασίζεται στην κβαντοποίηση της κυματομορφής του ήχου (waveform codecs) ή σε ένα μοντέλο παραγωγής λόγου (parametric codecs). Υπάρχουν επίσης codecs που συνδυάζουν τα δύο προηγούμενα μοντέλα (hybrid codecs).

Η κωδικοποίηση έχει συχνά σαν αποτέλεσμα την αντιληπτή υποβάθμιση της ποιότητας της φωνής. Επίσης, ένα σήμα φωνής μπορεί να κωδικοποιηθεί πολλές φορές (tandeming), για παράδειγμα κατά τη μεταφορά του σε διαφορετικά δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές συμπίεσης φωνής.

Οι codecs διακρίνονται σε narrowband (στενής ζώνης) και wideband (ευρείας ζώνης) ανάλογα με τον ρυθμό δειγματοληψίας που χρησιμοποιούν. Στους κωδικοποιητές στενής ζώνης η δειγματοληψία γίνεται στα 8000 Hz και έτσι το εύρος ζώνης διέλευσης (pass-band) της φωνής που προκύπτει είναι περίπου 300 – 3400 Hz. Αντίθετα, στους κωδικοποιητές ευρείας ζώνης η δειγματοληψία γίνεται με διπλάσιο ρυθμό στα 16000 Hz με αποτέλεσμα το εύρος ζώνης διέλευσης της φωνής να είναι μεγαλύτερο, περίπου 150 – 7000 Hz. Για τον χρήστη της τηλεφωνίας VoIP, αυτό σημαίνει πολύ καλύτερη ποιότητα και πιστότητα της φωνής. Η διαφορά μεταξύ narrowband και wideband codec φαίνεται στο σχήμα της Εικ. 6.3.



Εικ. 6.3: Απόκριση συχνότητας narrowband και wideband codec (Πηγή: Cisco [9])

Το εύλογο ερώτημα που προκύπτει είναι γιατί δεν χρησιμοποιούνται στην τηλεφωνία VoIP μόνο κωδικοποιητές ευρείας ζώνης αφού προσφέρουν πολύ καλύτερη ποιότητα; Η απάντηση είναι ότι απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς και μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

6.6.1 Κύρια χαρακτηριστικά διαδεδομένων codec

G.711 (64 Kbps)

Παρέχει μεγάλη ακρίβεια στην κωδικοποίηση της φωνής και έχει πολύ χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Υπάρχουν δύο εκδόσεις: η a-law που χρησιμοποιείται στην Β. Αμερική και Ιαπωνία και η μ-law που χρησιμοποιείται στον υπόλοιπο κόσμο. Η διαφορά τους έγκειται στην μέθοδο δειγματοληψίας του αναλογικού σήματος η οποία και στις δύο μεθόδους δεν γίνεται με γραμμικό αλλά με λογαριθμικό τρόπο. Η χρήση του στην τηλεφωνία VoIP προσφέρει την καλύτερη ποιότητα φωνής καθώς δεν χρησιμοποιεί συμπίεση. Είναι δε ο codec που χρησιμοποιείται στην τηλεφωνία PSTN και ISDN. Το μειονέκτημά του είναι ότι απαιτούνται 128 Kbps για αμφίδρομη επικοινωνία.

G.722 (48/56/64 Kbps)

Είναι ένας wideband codec ο οποίος είναι κατάλληλος για εφαρμογές VoIP σε επίπεδο τοπικού δικτύου όπου υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης και προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα φωνής σε σχέση με τους narrowband codecs, συμπεριλαμβανομένου και του G.711, χωρίς να αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της εφαρμογής. Σε περιβάλλοντα με περιορισμένο bandwidth είναι προτιμότεροι άλλοι codecs όπως ο G.722.1 (Siren7) ή ο G.722.2 (AMR-WB).

G.723.1 (5.3/6.3 Kbps)

Είναι ένας codec χαμηλού bit rate που χρησιμοποιείται στα πρότυπα H.323 και H.324 (video conferencing). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνδέσεις dial-up καθώς προσφέρει την υψηλότερη συμπίεση από τους codec της ITU. Η χρήση του απαιτεί την καταβολή δικαιωμάτων μέσω της Sipro Lab Telecom. Προσφέρει υψηλή ποιότητα ήχου αλλά απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

G.726 (16/24/32/40 Kbps)

Οι καταβολές του είναι από τα δίκτυα PSTN όπου χρησιμοποιείται κυρίως σε διεθνείς υπεραστικές κλήσεις με σκοπό την εξοικονόμηση bandwidth. Ο G.726, χρησιμοποιώντας

32 Kbps, προσφέρει σχεδόν ίδια ποιότητα με τον G.711 που χρησιμοποιεί 64 Kbps. Αποτελεί επίσης το πρότυπο που χρησιμοποιείται στις ασύρματες τηλεφωνικές συσκευές DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications). Από τα τέσσερα bit rate που υποστηρίζει, έχει καθιερωθεί αυτό των 32 Kbps.

G.729 (8 Kbps)

Προσφέρει πολύ καλή ποιότητα με ένα σχετικά χαμηλό bit rate 8 Kbps. Όμως, έχει μεγάλο κόστος χρόνου επεξεργασίας και, για το λόγο αυτό, μερικές συσκευές VoIP (Linksys/Cisco) μπορούν να διαχειριστούν μόνο μια κλήση G.729 τη φορά. Η χρήση του απαιτεί την καταβολή δικαιωμάτων στις εταιρείες που τα αντιπροσωπεύουν.

GSM (13.3/15.2 Kbps)

Είναι ο codec που χρησιμοποιείται στην κινητή τηλεφωνία GSM (Global System for Mobile communications). Χρησιμοποιεί τις πληροφορίες από προηγούμενα δείγματα (οι οποίες δεν αλλάζουν γρήγορα) με σκοπό να προβλέψει το τρέχον δείγμα. Το σήμα διαιρείται σε τμήματα των 20 ms τα οποία στη συνέχεια διαβιβάζονται στον codec που παράγει blocks των 260 bits. Έχει υψηλό λόγο συμπίεσης και είναι ελεύθερος δικαιωμάτων.

iLBC (15 Kbps)

Ο iLBC (internet Low Bitrate Codec) είναι ένας ελεύθερος δικαιωμάτων codec κατάλληλος για στιβαρή επικοινωνία VoIP. Έχει σχεδιαστεί για ομιλία στενού εύρους ζώνης και σε περίπτωση χαμένων πλαισίων, που οφείλονται σε απώλειες ή καθυστερήσεις πακέτων IP, προσφέρει πολύ ομαλή υποβάθμιση της ποιότητας.

Speex (2.15/44 Kbps)

Ο codec Speex είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα και αποτελεί μια εναλλακτική λύση για τις εφαρμογές VoIP καθώς δεν απαιτείται η καταβολή δικαιωμάτων. Επί πλέον, είναι κατάλληλος για διαδικτυακές εφαρμογές παρέχοντας χρήσιμες λειτουργίες μη διαθέσιμες σε άλλους codec. Ελαχιστοποιεί την χρήση εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας μεταβλητό bit rate αλλά ταυτόχρονα έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Codec & Bit Rate (Kbps)	Codec Information				Bandwidth Calculations				
	Codec Sample Size (Bytes)	Codec Sample Interval (ms)	Mean Opinion Score (MOS)	Voice Payload Size (Bytes)	Voice Payload Size (ms)	Packets Per Second (PPS)	Bandwidth MP or FRF.12 (Kbps)	Bandwidth w/cRTP MP or FRF.12 (Kbps)	Bandwidth Ethernet (Kbps)
G.711 (64 Kbps)	80 Bytes	10 ms	4.1	160 Bytes	20 ms	50	82.8 Kbps	67.6 Kbps	87.2 Kbps
G.729 (8 Kbps)	10 Bytes	10 ms	3.92	20 Bytes	20 ms	50	26.8 Kbps	11.6 Kbps	31.2 Kbps
G.723.1 (6.3 Kbps)	24 Bytes	30 ms	3.9	24 Bytes	30 ms	33.3	18.9 Kbps	8.8 Kbps	21.9 Kbps
G.723.1 (5.3 Kbps)	20 Bytes	30 ms	3.8	20 Bytes	30 ms	33.3	17.9 Kbps	7.7 Kbps	20.8 Kbps
G.726 (32 Kbps)	20 Bytes	5 ms	3.85	80 Bytes	20 ms	50	50.8 Kbps	35.6 Kbps	55.2 Kbps
G.726 (24 Kbps)	15 Bytes	5 ms		60 Bytes	20 ms	50	42.8 Kbps	27.6 Kbps	47.2 Kbps
G.728 (16 Kbps)	10 Bytes	5 ms	3.61	60 Bytes	30 ms	33.3	28.5 Kbps	18.4 Kbps	31.5 Kbps
G722_64k (64Kbps)	80 Bytes	10 ms	4.13	160 Bytes	20 ms	50	82.8 Kbps	67.6 Kbps	87.2 Kbps
ilbc_mode_20 (15.2Kbps)	38 Bytes	20 ms	NA	38 Bytes	20 ms	50	34.0 Kbps	18.8 Kbps	38.4 Kbps
ilbc_mode_30 (13.33Kbps)	50 Bytes	30 ms	NA	50 Bytes	30 ms	33.3	25.867 Kbps	15.73 Kbps	28.8 Kbps

Πίν. 6.3: Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις εύρους ζώνης διαφόρων codec

6.7 Τεχνικές και πρότυπα QoS

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την εφαρμογή QoS στα δίκτυα οι οποίες προσφέρουν πρακτικές λύσεις στο πρόβλημα της ποιότητας υπηρεσίας. Μάλιστα, πολλές φορές οι τεχνικές αυτές συνδυάζονται. Οι κυριότερες είναι:

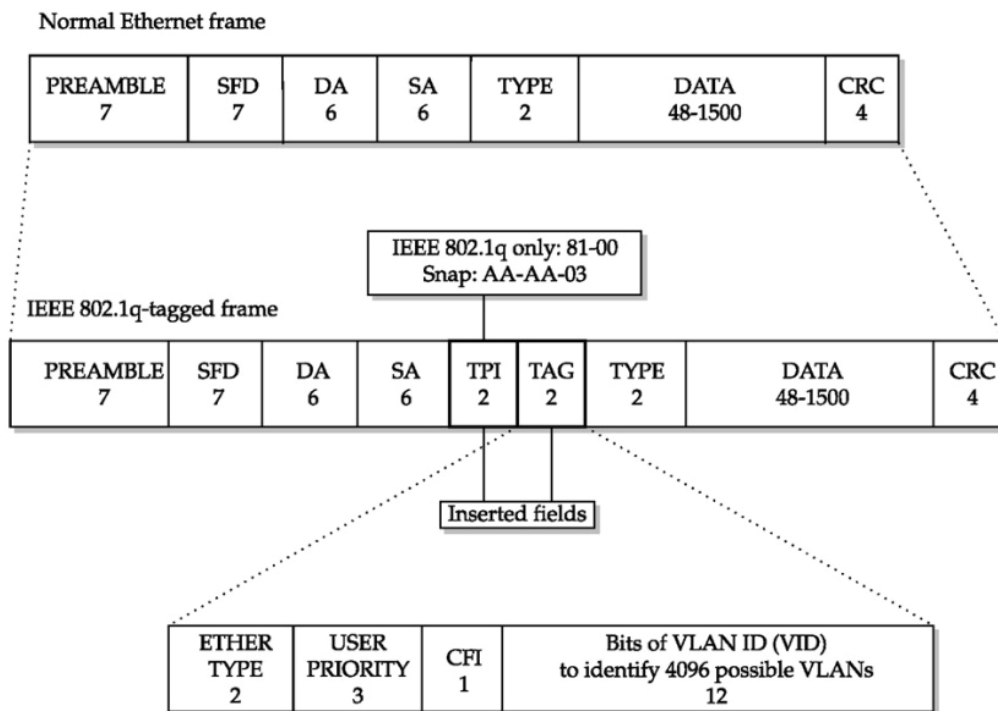
- Υπερδιαστασιολόγηση του δικτύου (Over provisioning)
- Χρήση ενδιάμεσης μνήμης (Buffering)
- Ρύθμιση της κυκλοφορίας (Traffic Shaping)
- Ο αλγόριθμος Leaky Bucket
- Ο αλγόριθμος Token Bucket
- Δέσμευση πόρων (Resource Reservation)
- Έλεγχος εισδοχής (Admission Control)
- Αναλογική δρομολόγηση (Proportional Routing)
- Χρονοπρογραμματισμός πακέτων (Packet Scheduling)
- Ολοκληρωμένες υπηρεσίες (Integrated Services)

6.7.1 Εικονικά δίκτυα IEEE 802.1Q

Ο όρος εικονικό δίκτυο ή VLAN (Virtual LAN) αναφέρεται σε ένα σύνολο λογικά δικτυωμένων συσκευών που βρίσκονται σε ένα ή περισσότερα LAN, τα οποία με τις κατάλληλες ρυθμίσεις μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αν και στην πραγματικότητα ανήκουν σε διαφορετικά LAN segments. Επειδή τα VLAN στηρίζονται σε λογικές συνδέσεις αντί για φυσικές, είναι πολύ ευέλικτα στη διαχείριση χρηστών και host, στην κατανομή του εύρους ζώνης και στη βελτιστοποίηση των πόρων του δικτύου. Υπάρχουν οι παρακάτω τύποι VLAN:

- Port-based VLAN
- MAC-based VLAN
- Protocol-based VLAN (με χρήση πρωτοκόλλου IPX)
- ATM VLAN – (με χρήση πρωτοκόλλου LAN Emulation (LANE))

Το πρότυπο IEEE 802.1Q [22] καθορίζει μια τυποποιημένη μέθοδο επισύναψης ετικέτας με πληροφορίες ιδιότητας μέλους VLAN. Καθορίζει την λειτουργία γεφυρών VLAN που επιτρέπουν την εγκατάσταση, λειτουργία και διαχείριση τοπολογιών VLAN σε μια γεφυρωμένη υποδομή τοπικού δικτύου. Το πρότυπο αποσκοπεί στην επίλυση του προβλήματος του διαχωρισμού μεγάλων δικτύων σε μικρότερα τμήματα έτσι ώστε η κίνηση broadcast και multicast να μην καταλαμβάνει περισσότερο από όσο χρειάζεται εύρος ζώνης. Παρέχει επίσης μεγαλύτερο επίπεδο ασφαλείας μεταξύ των τμημάτων των δικτύων



Εικ. 6.4: Πλαίσιο Ethernet 802.1Q

Το κλειδί για την λειτουργία του IEEE 802.1Q είναι οι ετικέτες. Οι θύρες ενός συμβατού με το πρωτόκολλο switch μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να εκπέμπουν πλαίσια με ετικέτες (tagged frames) ή χωρίς. Το πεδίο ετικέτας που περιέχει πληροφορίες VLAN (και/ή προτεραιότητα 802.1p) μπορεί να εισαχθεί σε ένα πλαίσιο Ethernet. Αν μια θύρα του switch είναι συνδεδεμένη με μία συσκευή συμβατή με το πρωτόκολλο 802.1Q, όπως για παράδειγμα ένα άλλο switch, τότε τα πλαίσια με τις ετικέτες μπορούν να μεταφέρουν τις πληροφορίες για τα μέλη του VLAN και με αυτόν τον τρόπο το VLAN να επεκταθεί σε πολλά switch. Πολλές όμως κάρτες δικτύου Η/Υ και περιφερειακές συσκευές δεν υποστηρίζουν αυτό το σχετικά πρόσφατο πρωτόκολλο και καθώς δεν καταλαβαίνουν τα frames με την ετικέτα τα απορρίπτουν. Άλλος ένας λόγος για να απορρίψουν το πλαίσιο οι παλιές συσκευές είναι ότι το επιτρεπτό μέγεθος των πλαισίων αυξήθηκε με το 802.1Q από τα 1518 στα 1522 bytes.

Το πρωτόκολλο περιλαμβάνει επίσης ένα μηχανισμό χειρισμού της κίνησης για την υποστήριξη QoS σε τοπικά δίκτυα, όπως Ethernet, Token-Ring, FDDI (Fiber Distributed Data Interface) και άλλων παραλλαγών. Τα δίκτυα αυτά αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των εγκατεστημένων σήμερα δικτύων. Ο μηχανισμός αυτός παλαιότερα αναφερόταν ως IEEE 802.1p από το όνομα της αντίστοιχης ομάδας εργασίας της IEEE που είχε συσταθεί για τον σχεδιασμό πρωτοκόλλου διαχείρισης προτεραιοτήτων κυκλοφορίας προς διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας.

Ορίζει ένα πεδίο 3 bits (μέσα στο IEEE 802.1Q tag) στην επικεφαλίδα του Layer 2 (Data Link) των πακέτων. Το πεδίο αυτό ονομάζεται Priority Code Point (PCP) και η τιμή του καθορίζει 8 επίπεδα προτεραιότητας, με 7 την υψηλότερη και 1 την χαμηλότερη. Το δε επίπεδο προτεραιότητας 0 είναι η προεπιλεγμένη τιμή. Οι συσκευές του Layer 2 όπως τα switches, επισημαίνουν (μαρκάρουν) το κάθε πακέτο ώστε αυτό να μεταδίδεται με την κατάλληλη τιμή προτεραιότητας. Στη συνέχεια, οι άλλες συσκευές του δικτύου, όπως γέφυρες (bridges), και καταναμητές (switches), μεταχειρίζονται τα πακέτα ανάλογα, κάνοντας χρήση των μηχανισμών αναμονής που διαθέτουν. Η ισχύς του πεδίου προτεραιότητας περιορίζεται στο τοπικό δίκτυο. Μόλις τα πακέτα μεταφερθούν έξω από το τοπικό δίκτυο, μέσω μιας συσκευής Layer 3, το πεδίο προτεραιότητας αφαιρείται.

Στον Πίν. 6.4 παρουσιάζονται τα 8 επίπεδα προτεραιότητας που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.Q. Ιδιαίτερης προσοχής χρήζει το γεγονός ότι η τιμή Priority = 1 έχει μικρότερη προτεραιότητα από την τιμή Priority = 0.

Priority	Acronym	Traffic Type
1	BK	Background
0 (Default)	BE	Best Effort
2	EE	Excellent Effort
3	CA	Critical Applications
4	VI	Video < 100 ms latency and jitter
5	VO	Voice < 10 ms latency and jitter
6	IC	Internetwork Control
7	NC	Network Control

Πίν. 6.4: Τύποι κυκλοφορίας και προτεραιότητες IEEE 802.1Q

6.7.2 Διαφοροποιημένες υπηρεσίες (DiffServ)

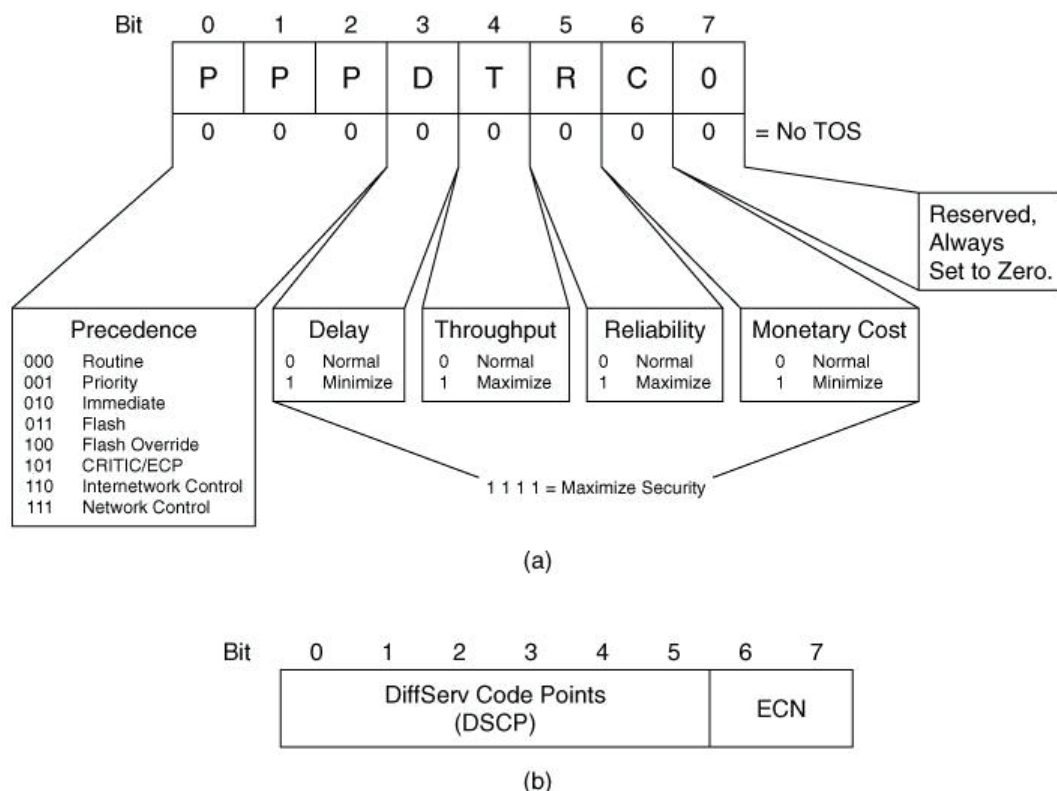
Η αρχιτεκτονική DiffServ (Differential Services) που περιγράφεται στο πρότυπο IETF RFC 2475 [25] έχει σκοπό την παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών. Παρέχει δηλαδή τη δυνατότητα διαχείρισης διαφορετικών κλάσεων κυκλοφορίας με διαφορετικούς τρόπους. Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τις παρακάτω δύο ομάδες λειτουργιών (Kurose [70]).

Edge functions: ταξινόμηση πακέτων και ρύθμιση της κυκλοφορίας

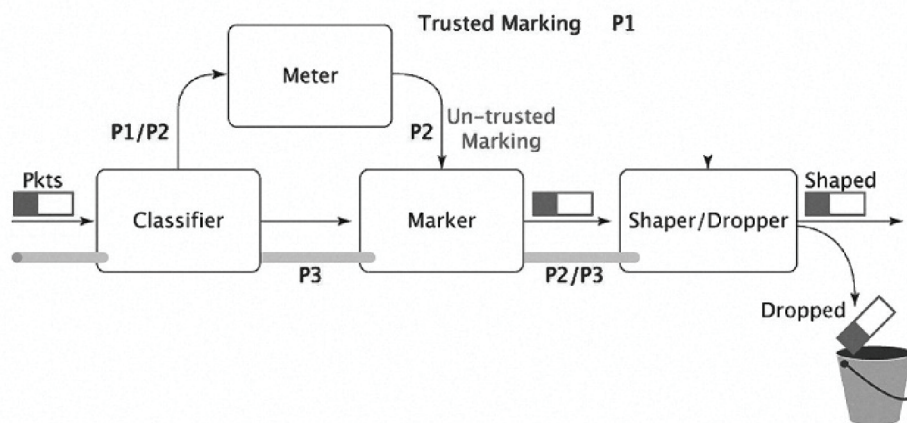
Κατά την δημιουργία των πακέτων σε έναν host που έχει ενσωματωμένη την αρχιτεκτονική DiffServ ή όταν αυτά φθάσουν στον πρώτο δρομολογητή που προσφέρει την υπηρεσία DiffServ, τα πακέτα μαρκάρονται. Συγκεκριμένα καταχωρείται μια τιμή στο πεδίο DS της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου IP [24]. Η τιμή αυτή προσδιορίζει την κλάση της κυκλοφορίας στην οποία ανήκει το πακέτο, με αποτέλεσμα στη συνέχεια, οι διαφορετικές κλάσεις κυκλοφορίας να δέχονται διαφορετική υπηρεσία στο δίκτυο κορμού.

Core function: προώθηση πακέτων

Όταν ένα πακέτο φθάσει σε έναν δρομολογητή που υποστηρίζει το πρωτόκολλο DiffServ, προωθείται στον επόμενο, με έναν τρόπο που ονομάζεται «συμπεριφορά ανά κόμβο» (per-hop behavior), ο οποίος εξαρτάται από την κλάση του πακέτου. Ο τρόπος αυτός καθορίζει πως θα καταναείμει ο δρομολογητής τους buffers και το εύρος ζώνης της ζεύξης μεταξύ των διαφόρων κλάσεων κυκλοφορίας.



Εικ. 6.5: Πεδίο διαφοροποιημένων υπηρεσιών DS (Πηγή: Cisco [13])



Εικ. 6.6: Λογικό διάγραμμα ταξινόμησης πακέτων και ρύθμισης της κυκλοφορίας DiffServ (Πηγή: Cisco [7])

Βασική αρχή της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι ότι η συμπεριφορά “per-hop” του δρομολογητή βασίζεται μόνο στην τιμή DS της επικεφαλίδας, δηλαδή στην κλάση κυκλοφορίας των πακέτων. Με αυτό τον τρόπο, το δίκτυο DiffServ δεν είναι αναγκασμένο να αναγνωρίζει την κάθε σύνδεση ξεχωριστά και να κρατά μεγάλο όγκο πληροφορίας για τις συνδέσεις που διαχειρίζεται. Αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του DiffServ έναντι άλλων πρωτοκόλλων, όπως του IntServ και του RSVP, αφού μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί.

6.7.3 RSVP

Το πρωτόκολλο RSVP (Resource Reservation Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων σχεδιασμένο για ολοκληρωμένες υπηρεσίες ποιότητας στο Internet το οποίο προδιαγράφεται στο RFC 2205 [23]. Χρησιμοποιείται από έναν host για να ζητήσει από το δίκτυο εξειδικευμένες υπηρεσίες ποιότητας για τα δεδομένα ή τη ροή δεδομένων κάποιας εφαρμογής. Επίσης, χρησιμοποιείται από τους δρομολογητές για να μεταφέρουν τις αιτήσεις QoS σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται στη διαδρομή. Οι αιτήσεις RSVP έχουν συνήθως σαν αποτέλεσμα τη δέσμευση πόρων σε κάθε κόμβο κατά μήκος της διαδρομής που ακολουθούν τα δεδομένα. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, το πρότυπο IETF RFC 2205 έχει υποστεί πολλές συμπληρώσεις (RFC 2750, RFC 3936, RFC 4495, RFC 5946 και RFC 6437).

6.7.4 MPLS

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου MPLS (Multiprotocol Label Switching) παρέχει γρήγορη διακλάδωση (switching) και δρομολόγηση (routing). Το MPLS προδιαγράφεται στο

RFC 3031 [27]. Είναι ανεξάρτητο από τα πρωτόκολλα των επιπέδων 2 και 3 όπως είναι το ATM και το IP και παρέχει ένα μέσο για την καταχώρηση διευθύνσεων IP σε απλές ετικέτες σταθερού μεγέθους, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τεχνολογίες διακλάδωσης και δρομολόγησης πακέτων. Συνεργάζεται με πολλά υφιστάμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης και διακλάδωσης, όπως είναι τα IP, ATM, Frame Relay, RSVP, OSPF και άλλα [67].

Κεφάλαιο 7

Η Ποιότητα Εμπειρίας

QoE

Ο όρος ποιότητα εμπειρίας (QoE, Quality of Experience) είναι ένας σχετικά νέος όρος, που σχετίζεται με την ποιότητα υπηρεσίας, αλλά αφορά στον χρήστη της υπηρεσίας. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και άλλοι παρόμοιοι όροι, όπως QoP, QoSE, QoSD με δυσδιάκριτες διαφορές. Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποιότητας εμπειρίας και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών.

7.1 Ορισμός της ποιότητας εμπειρίας

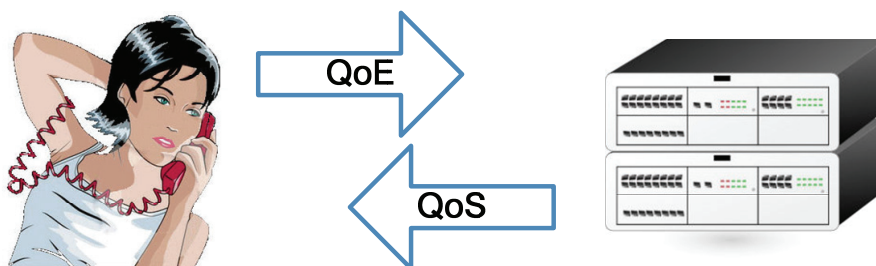
Ο ορισμός της ποιότητας εμπειρίας σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI, European Telecommunications Standards Institute) είναι:

«Το βασισμένο σε αντικειμενικά αλλά και ψυχολογικά υποκειμενικά κριτήρια μέτρο της ικανοποίησης του χρήστη από τη χρήση μιας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος τεχνολογίας πληροφορικής και επικοινωνιών» [15].

Λαμβάνει υπ' όψη τις τεχνικές παραμέτρους (π.χ. QoS) και τις συναφείς με τη χρήση μεταβλητές (π.χ. επικοινωνία) και μετρά τη διαδικασία και το αποτέλεσμα της επικοινωνίας (π.χ. αποτελεσματικότητα, απόδοση, ικανοποίηση και ευχαρίστηση).

Τα κατάλληλα ψυχολογικά κριτήρια εξαρτώνται από το πλαίσιο της επικοινωνίας. Τα αντικειμενικά ψυχολογικά κριτήρια δεν εξαρτώνται από την γνώμη του χρήστη (π.χ. ο χρόνος περάτωσης της δοκιμασίας μετρημένος σε δευτερόλεπτα και η ακρίβεια της δοκιμασίας μετρημένη σε αριθμό σφαλμάτων). Τα υποκειμενικά ψυχολογικά κριτήρια βασίζονται στη γνώμη του χρήστη (π.χ. αντιληφθείσα ποιότητα του μέσου, ικανοποίηση από τη χρήση μιας υπηρεσίας).

Παρόμοιος με την QoE είναι ο όρος QoS. Εδώ και πολλά χρόνια, ο όρος QoS χρησιμοποιείται από τους παρόχους, τους διαχειριστές δικτύων και τους κατασκευαστές εξοπλισμού και έχει εξελιχθεί σε κοινό παρονομαστή συνεννόησης. Το έργο της QoS βασίζεται σε τεχνική απόδοση, είναι δηλαδή επικεντρωμένο στην τεχνολογία, ενώ η QoE βασίζεται στη συμπεριφορά του τελικού χρήστη, είναι δηλαδή επικεντρωμένο στον χρήστη (Εικ. 7.1).



Εικ. 7.1: Η ποιότητα εμπειρίας επικεντρώνεται στον χρήστη, ενώ η ποιότητα υπηρεσίας στην τεχνολογία

Η ποιότητα υπηρεσίας είναι σημαντική αλλά δεν είναι επαρκής για τη μέτρηση της εμπειρίας του χρήστη. Η ποιότητα υπηρεσίας και η ποιότητα εμπειρίας είναι δύο διακριτές έννοιες, και οι δύο σημαντικές, και πρέπει να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους.

Κατά την αμφίδρομη επικοινωνία οι χρήστες αλληλεπιδρούν με μία υπηρεσία, η οποία έχει χαρακτηριστικά που μπορεί να μεταβάλλονται και να επιδρούν στην συμπεριφορά του χρήστη. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση στην άφιξη των πληροφοριών φωνής και εικόνας μπορεί να οδηγήσει, κατά την αντίληψη ενός ακροατή, στον αποσυγχρονισμό των χειλιών του ομιλητή. Τέτοια χαρακτηριστικά, όπως ο αποσυγχρονισμός ήχου και εικόνας, η καθυστέρηση μετάδοσης ή ο ρυθμός αλλαγής πλαισίων μπορεί να βοηθήσουν ή να παρακωλύσουν την επικοινωνία. Τα τεχνικά αυτά χαρακτηριστικά έχουν σχέση με την ποιότητα υπηρεσίας.

Μπορούμε επίσης να διακρίνουμε τρεις προσεγγίσεις στην ποιότητα:

- Ποιότητα υπηρεσίας (QoS)
- Ποιότητα αντίληψης (QoP, Quality of Perception) ή αντιληπτή από τον χρήστη QoS
- Ποιότητα εμπειρίας (QoE)

Οι δύο τελευταίες (QoP και QoE) προσεγγίσεις επικεντρώνονται στον χρήστη ενώ η πρώτη (QoS) στην τεχνολογία.

Η προσέγγιση QoP ασχολείται κυρίως με το αν γίνεται αντιληπτή μια αλλαγή της ποιότητας ή αν γίνεται αποδεκτή η ποιότητα ενός επιπέδου. Τυπικά, η αντίληψη της ποιότητας από τον χρήστη μετράται με την υποκειμενική κλίμακα βαθμολόγησης που αναφέρεται σαν “Mean Opinion Score” ή εν συντομία MOS.

Σχετικός είναι επίσης ο ορισμός που δίνει η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU για την ποιότητας υπηρεσίας όπως την αντιλήφθηκε ο χρήστης (QoSE, QoS Experienced): «QoSE είναι μία δήλωση που εκφράζει το επίπεδο της ποιότητας που πιστεύουν ότι βίωσαν οι χρήστες.» (ITU-T Rec. E.800 [57]). Τα κύρια στοιχεία της είναι ποιοτικά και ποσοτικά. Κατά την ITU, την ίδια έννοια έχει και ο όρος QoS (QoS delivered) που αφορά στους παρόχους υπηρεσιών.

Η έννοια της ποιότητας εμπειρίας (QoE) είναι σχετικά πρόσφατη και εξελίσσεται καθώς προσελκύει όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Για το λόγο αυτό έχουν δημοσιευτεί πολλοί ορισμοί. Η ITU ορίζει την QoE ως «την συνολική αποδεξιμότητα μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας όπως υποκειμενικά την αντιλήφθηκε ο τελικός χρήστης». Προσθέτει επίσης ότι η ποιότητα εμπειρίας περιλαμβάνει το σύνολο των επιρροών (πελάτης, τερματική συσκευή, δίκτυο, υπηρεσίες, υποδομή κλπ.) και ότι η συνολική αποδεξιμότητα μπορεί να επηρεαστεί από τις προσδοκίες του χρήστη και από το περιβάλλον (ITU-T Rec. P.10/G100 Amendment 2 [53]).

Τυπικά, οι χρήστες βαθμολογούν την ποιότητα σύμφωνα με την αντίληψή τους σε μία κλίμακα (π.χ. MOS) και/η αναφέρουν την εμπειρία χρήσης και το επίπεδο ικανοποίησης μέσω τεχνικών αξιολόγησης όπως συνεντεύξεις, ομάδες εστίασης ενδιαφέροντος (focus groups) και ερωτηματολόγια.

7.2 Παράγοντες ποιότητας εμπειρίας (QoE) VoIP

Οι παράγοντες που επιδρούν στην ποιότητα εμπειρίας της τηλεφωνίας VoIP μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Στους σχετικούς με τον άνθρωπο παράγοντες, στους σχετικούς με την ποιότητα υπηρεσίας και σε παράγοντες σχετικούς με την προσφερόμενη υπηρεσία και την υποστήριξη αυτής.

Ανθρωπογενείς παράγοντες:	Προσδοκίες Ηλικία ομιλητή και ακροατή Φύλλο ομιλητή και ακροατή Οικειότητα μεταξύ ομιλητή και ακροατή Μητρική γλώσσα
Παράγοντες QoS:	Αλγόριθμος κωδικοποίησης φωνής Συμπύεση φωνής Κατάργηση περιόδων σιωπής Εξουδετέρωση ηχούς Επανακωδικοποίηση φωνής Καθυστέρηση δικτύου Διακύμανση της καθυστέρησης Απώλεια πακέτων Διαθεσιμότητα εύρους ζώνης δικτύου
Υπηρεσίες και υποστήριξη:	Δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων (σύνδεση modem ή fax) DTMF Calling features Χρέωση υπηρεσίας

7.3 Μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις στην αξιολόγηση της ποιότητας της φωνής: Οι υποκειμενικές μέθοδοι και οι αντικειμενικές μέθοδοι.

Οι υποκειμενικές βασίζονται σε ανθρώπους οι οποίοι μπορούν να εκτιμήσουν όλες τις σχετικές με την ποιότητα παραμέτρους. Αρκετές τέτοιες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και δημοσιευτεί από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών στις συστάσεις ITU-T Rec. P.800 [57] και ITU-T Rec. P.830 [60].

Αντιθέτως, οι αντικειμενικές μέθοδοι βασίζονται σε αλγορίθμους που επιχειρούν να εκτιμήσουν τις παραμέτρους της ποιότητας όπως θα τις εκτιμούσε ο άνθρωπος. Το αποτέλεσμα που εξάγουν, ο βαθμός της ποιότητας δηλαδή, προσπαθεί να προσεγγίσει αυτόν που θα αποδιδόταν από υποκειμενικές δοκιμές.

7.3.1 Σύγκριση υποκειμενικών και αντικειμενικών μεθόδων

Οι αντικειμενικές μέθοδοι βασίζονται σε αλγορίθμους οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί βάσει ενός συνόλου δεδομένων που ελήφθησαν από υποκειμενικές δοκιμές με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων. Συνεπώς, κάθε αντικειμενική μέθοδος εξαρτάται από τα δεδομένα στα οποία στηρίχθηκε η ανάπτυξή της. Για παράδειγμα, μια αντικειμενική μέθοδος μπορεί να δουλεύει καλά για το σύνολο των codec και τις συνθήκες σφραμάτων για τα οποία έχει βελτιστοποιηθεί. Αυτό όμως, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι μπορεί να εκτιμήσει με αξιοπιστία την απόδοση νέων codec η διαφορετικών συνθηκών στις οποίες δεν έχει δοκιμαστεί.

Από την άλλη πλευρά, οι υποκειμενικές μέθοδοι επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες όπως είναι οι προτιμήσεις των ατόμων και από το συνολικό πλαίσιο του πειράματος. Για παράδειγμα, αν στα υπό αξιολόγηση δείγματα φωνής περιλαμβάνονται πολλά με συνθήκες καλής ποιότητας, η βαθμολογία που θα λάβει ένα άλλο δείγμα χαμηλότερης ποιότητας θα είναι μικρότερη από αυτή που θα λάμβανε στην περίπτωση που υπήρχαν λιγότερα δείγματα καλής ποιότητας. Αυτό το φαινόμενο είναι χαρακτηριστικό των μεθόδων αξιολόγησης με απόλυτη βαθμολογική κλίμακα.

7.4 Μέθοδοι υποκειμενικού προσδιορισμού ποιότητας

Σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-T P.800 [57], οι προτεινόμενες μέθοδοι για τον υποκειμενικό προσδιορισμό της ποιότητας, ανεξάρτητα από το είδος της τηλεφωνίας, διακρίνονται σε:

- Δοκιμές αξιολόγησης συνομιλίας (Conversation-opinion tests)
- Δοκιμές αξιολόγησης ακρόασης (Listening-opinion tests)
- Δημοσκοπικές έρευνες (Interview and survey tests)
- Άλλες μέθοδοι

7.4.1 Δοκιμές αξιολόγησης συνομιλίας

Πρόκειται για εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες έχουν σκοπό, κατά το μέτρο του δυνατού, να αναπαράγουν σε εργαστηριακό περιβάλλον τις πραγματικές συνθήκες που βιώνουν οι χρήστες της τηλεφωνίας. Για την επίτευξη του σκοπού, είναι απαραίτητο να επιλεγούν καταλλήλως οι συνθήκες του κυκλώματος και τα υποκείμενα (άτομα) και η επίβλεψη της διαδικασίας να γίνει με τον τρόπο που αρμόζει.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό οι προσομοιωμένες συνθήκες των δοκιμών να έχουν προδιαγραφεί και υλοποιηθεί σωστά. Για την διενέργεια των δοκιμών, τα δύο υποκείμενα κάθονται σε ξεχωριστούς ηχομονωμένους θαλάμους οι οποίοι πρέπει να είναι τοποθετημένοι κοντά στη θέση εποπτείας της διαδικασίας. Για δοκιμές με χρήση παραδοσιακού ακουστικού, ο όγκος του δωματίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 m³ με αντήχηση μικρότερη των 500 ms ενώ για δοκιμές με συστήματα hands-free ο όγκος πρέπει να είναι τουλάχιστον 30 m³. Επί πλέον, οι θάλαμοι προβλέπεται να έχουν διακόσμηση ώστε το περιβάλλον να είναι φυσικό. Υπάρχουν επίσης προδιαγραφές για την προσομοίωση θορύβων, όπως φυσικού περιβάλλοντος, δωματίου και εσωτερικού αυτοκινήτου.

Η επιλογή των ατόμων γίνεται με τυχαία δειγματοληψία με την προϋπόθεση να μην έχουν σχέση με το αντικείμενο και ούτε να έχουν λάβει μέρος σε δοκιμές αυτού του είδους προσφάτως. Ο γενικός κανόνας για τη συνομιλία, η οποία καταγράφεται και παρακολουθείται, είναι ότι πρέπει να αρχίζει και να τελειώνει με φυσικό τρόπο.

Για την αξιολόγηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες 5-βάθμιες κλίμακες, ανάλογα με τη δοκιμή. Η καθιερωμένη κλίμακα γνώμης που χρησιμοποιείται από την ITU είναι η παρακάτω:

- Excellent = 5
- Good = 4
- Fair = 3
- Poor = 2
- Bad = 1

Ο μέσος όρος του συνόλου των βαθμών των αξιολογημένων κλήσεων ονομάζεται “mean opinion score” ή MOS.

Στο τέλος κάθε συνομιλίας τα κάθε άτομο πρέπει να απαντήσει με «Ναι» ή «Όχι» στην ερώτηση «Είχατε εσείς ή ο συνομιλητής σας δυσκολία στην ομιλία ή την ακρόαση;» και από το ποσοστό των «Ναι» υπολογίζεται ο βαθμός δυσκολίας %D.

7.4.2 Δοκιμές αξιολόγησης ακρόασης

Οι δοκιμές αξιολόγησης που αφορούν μόνο σε ακρόαση ηχογραφημένου σήματος δεν αναμένεται να έχουν το επίπεδο ρεαλισμού των δοκιμών συνομιλίας και έτσι, σε ορισμένα θέματα, οι περιορισμοί τους είναι λιγότερο αυστηροί. Η συνιστώμενη από την ITU μέθοδος ονομάζεται ACR (Absolute Category Rating). Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η “Quantal-Response Detectability Method”, η “Degradation Category Rating” (DCR), η “Comparison Category Rating” (CCR) και η “Threshold Method”. Πληροφορίες για όλες αυτές τις μεθόδους υπάρχουν στην σύσταση ITU-T P.800 [57].

Οι δοκιμές αυτού του τύπου έχουν εφαρμογή σε συστήματα μετάδοσης μιας κατεύθυνσης, όπως τα κυκλώματα εκπομπής για το ευρύ κοινό (broadcasting) και τα συστήματα κοινοποίησης ηχογραφημένων μηνυμάτων.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αξιολόγησης ακρόασης μπορούν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση της ποιότητας αμφίδρομης επικοινωνίας, όπως είναι η τηλεφωνία με κάποιους περιορισμούς. Πρέπει επιπροσθέτως να συνυπολογισθούν κατάλληλα οι επιδράσεις των υποβαθμίσεων της ομιλίας, όπως για παράδειγμα η ηχώ, και οι επιδράσεις των υποβαθμίσεων του διαλόγου, όπως για παράδειγμα η καθυστέρηση μετάδοσης.

7.4.3 Δημοσκοπικές έρευνες

Αν υπάρχει διαθέσιμος ο απαιτούμενος χρόνος, τότε η ποιότητα μπορεί να προσδιοριστεί με δημοσκοπικές έρευνες που αφορούν στους χρήστες της υπό αξιολόγηση τηλεφωνικής υπηρεσίας. Οι τρόποι διεξαγωγής των δημοσκοπικών αυτών ερευνών όπως επίσης και τα σχετικά ερωτηματολόγια προδιαγράφονται στην σύσταση ITU-T Rec. P.82 [59].

7.4.4 Άλλες μέθοδοι αξιολόγησης

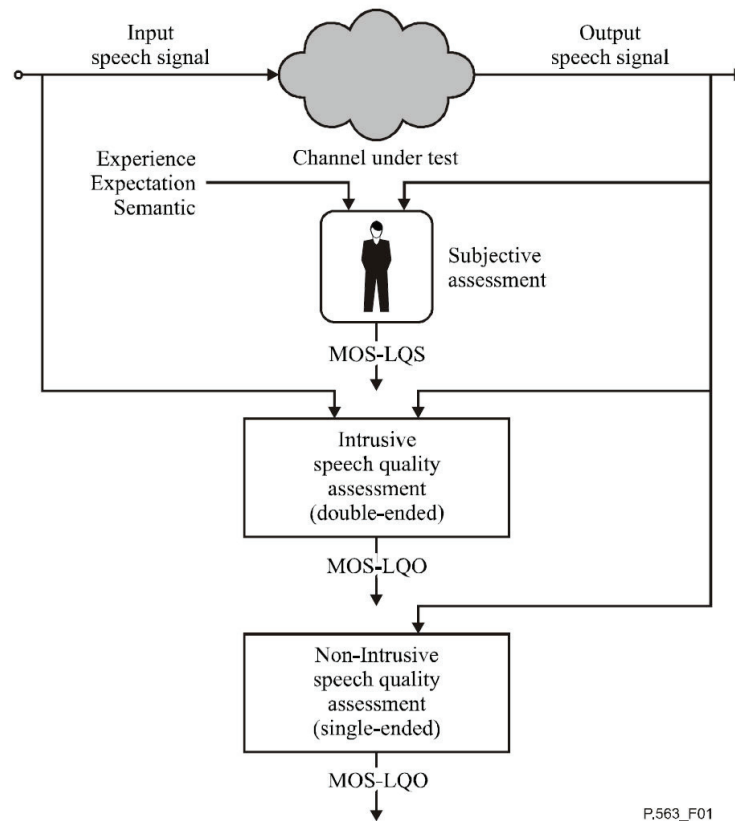
Μειονέκτημα των δημοσκοπικών ερευνών είναι ότι δεν μπορούν να ελεγχθούν τα επί μέρους χαρακτηριστικά των υπό αξιολόγηση τηλεφωνικών συνδέσεων. Μια μέθοδος που ξεπερνά το μειονέκτημα αυτό, διατηρώντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα της προηγούμενης μεθόδου, είναι η αποκαλούμενη SIBYL [56,57]. Η μέθοδος αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από την Bell Laboratories και χρησιμοποιήθηκε από την AT&T Co. [17,56]. Σύμφωνα με τη μέθοδο, υπάλληλοι της εταιρείας Bell Laboratories συναινούν εθελοντικά ώστε κάποιες από τις συνηθισμένες εσωτερικές κλήσεις να διέρχονται μέσα από ειδικές διατάξεις που τροποποιούν την ποιότητα σύμφωνα με το πρόγραμμα των δοκιμών. Με το τέλος της κάθε κλήσης, ο υπάλληλος αξιολογεί την ποιότητα της κλήσης πιέζοντας ένα αριθμητικό πλήκτρο στην τηλεφωνική του συσκευή. Τα αποτελέσματα καταγράφονται από τον υπολογιστή που ελέγχει την όλη διαδικασία διατηρώντας μάλιστα την ιδιωτικότητα [56].

7.5 Αντικειμενικός προσδιορισμός ποιότητας

Οι αντικειμενικές μέθοδοι διακρίνονται σε παρεμβατικές και μη παρεμβατικές (Εικ. 7.2).

Οι παρεμβατικές βασίζονται στην αποστολή μέσω του δικτύου ενός δείγματος ήχου αναφοράς και συγκρίνουν το αποτέλεσμα με τον πρωτότυπο ήχο αναφοράς για να εκτιμήσουν τις επιπτώσεις του δικτύου στην ποιότητα της φωνής. Αναφέρονται επίσης με τον όρο ενεργητικές μέθοδοι.

Οι μη παρεμβατικές μέθοδοι βασίζονται στην υποκλοπή της φωνής, καθώς αυτή μεταδίδεται στο δίκτυο, και αξιολογούν την ποιότητα χωρίς να έχουν το προνόμιο του αυθεντικού δείγματος αναφοράς. Αναφέρονται επίσης με τον όρο παθητικές μέθοδοι.



Εικ. 7.2: Παρεμβατικές και μη παρεμβατικές μέθοδοι (Πηγή: ITU-T Rec. P.563 [55])

7.6 Παρεμβατικές αντικειμενικές μέθοδοι

Στον παρακάτω Πίν. 7.1 αναφέρονται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες παρεμβατικές μέθοδοι αντικειμενικού προσδιορισμού της ποιότητας οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

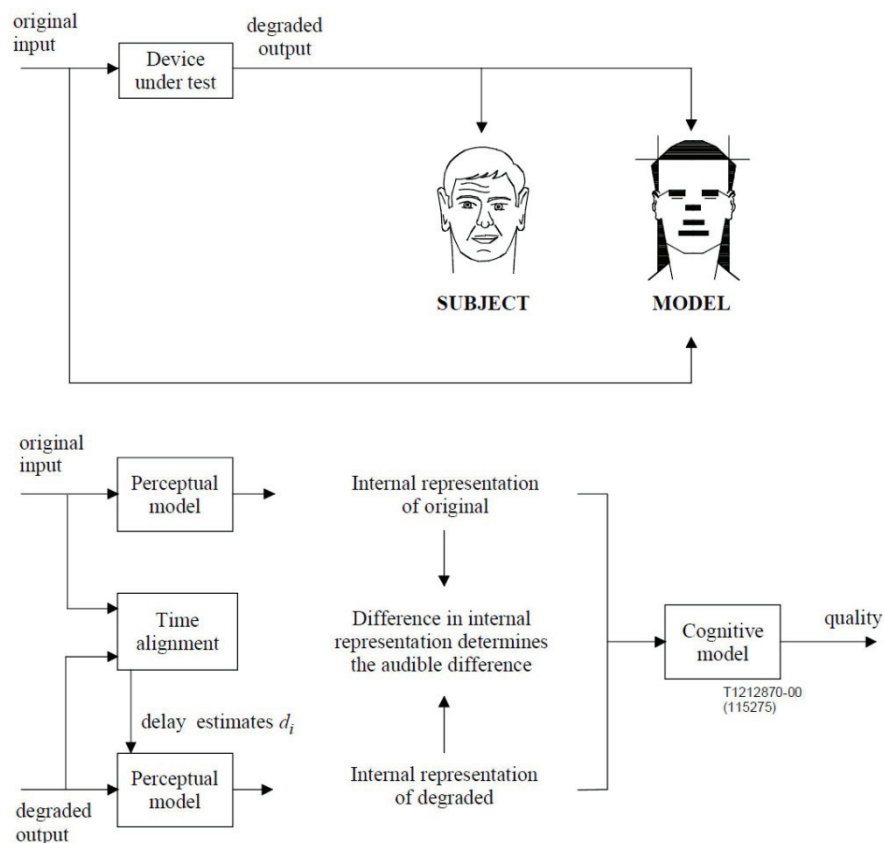
PSQM	Perceptual Speech Quality Measure	ITU-T Rec. P.861 [61]
PESQ	Perceptual evaluation of speech quality	ITU-T Rec. P.862 [62]
PSQM+	Perceptual Speech Quality Measure Plus	KPN, Ολλανδία
PAMS	Perceptual Analysis Measurement System	British Telecom [82], [84]
PEAQ	Perceptual Evaluation of Audio Quality	ITU-R BS. 1387-1 [45]
POLQA	Perceptual Objective Listening Quality Analysis	ITU-T Rec. P.863 [64]

Πίν. 7.1: Αντικειμενικές μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας

7.6.1 Οι μέθοδοι PSQM (ITU-T Rec P.861) και PESQ (ITU-T Rec. P.862)

Το 1998 δημοσιεύτηκε από την ITU-T η Σύσταση P.861, η οποία προσδιόριζε μια μέθοδο για την αντικειμενική μέτρηση της ποιότητας των codec της τηλεφωνίας (συχνότητες φωνής 300 – 3400 Hz). Η μέθοδος αυτή, γνωστή και σαν αλγόριθμος PSQM (Perceptual Speech Quality Measure), συνίστατο να χρησιμοποιείται μόνο για την αξιολόγηση codec ομιλίας και δεν ήταν σε θέση να λαμβάνει δεόντως υπόψη το φιλτράρισμα, τη μεταβλητή καθυστέρηση, και τις σύντομες τοπικές στρεβλώσεις. Οι περιορισμοί αυτοί της μεθόδου αναγνωρίστηκαν πολύ σύντομα και, για το λόγο αυτό, το 2001 η Σύσταση αντικαταστάθηκε από την P.862, η οποία βασίζεται σε ένα βελτιωμένο αλγόριθμο αντικειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας της ομιλίας.

Η Σύσταση P.862 της ITU-T [62] προσδιορίζει μια αντικειμενική μέθοδο για τον προσδιορισμό της ποιότητας ομιλίας από άκρο σε άκρο για δίκτυα τηλεφωνίας στενής ζώνης (narrow-band) και codecs ομιλίας. Η μέθοδος ονομάζεται αντιληπτική εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας ή, εν συντομία, μέθοδος PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality).



Εικ. 7.3: Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου PESQ (Πηγή: ITU-T Rec. P.862 [62])

Στο πρώτο βήμα, ο αλγόριθμος υπολογίζει μια σειρά καθυστερήσεων μεταξύ της αρχικής εισόδου και της υποβαθμισμένης εξόδου, μία για κάθε χρονικό διάστημα για το οποίο η καθυστέρηση είναι σημαντικά διαφορετική από το προηγούμενο χρονικό διάστημα. Για κάθε ένα από αυτά τα διαστήματα, υπολογίζονται τα αντίστοιχα σημεία εκκίνησης και τερματισμού. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην αρχή της σύγκρισης, της εμπιστοσύνης της ύπαρξης δύο καθυστερήσεων σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, με την εμπιστοσύνη της ύπαρξης μιας ενιαίας καθυστέρησης για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Μπορεί δε να χειριστεί τις αλλαγές καθυστέρησης, τόσο κατά τη διάρκεια διαστημάτων σιωπής, όσο και κατά τη διάρκεια διαστημάτων λόγου.

Με βάση το σύνολο των καθυστερήσεων, η μέθοδος PESQ συγκρίνει το αρχικό σήμα (είσοδος) με το υποβαθμισμένο της υπό δοκιμή συσκευής (έξοδος), χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αντίληψης, όπως αυτό φαίνεται στην Εικ. 7.3. Το κλειδί σε αυτή τη διαδικασία είναι ο μετασχηματισμός, τόσο του αρχικού, όσο και του υποβαθμισμένου σήματος, σε μια εσωτερική αναπαράσταση που είναι ανάλογη με την ψυχοσωματική αντιπροσώπευση των ηχητικών σημάτων στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα.

Στο τέλος, η εσωτερική αναπαράσταση υποβάλλεται σε επεξεργασία, για να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις παραμέτρων που μπορεί να έχουν μικρή αντιληπτική σημασία, εάν δεν είναι πάρα πολύ σοβαρές.

7.6.2 Η μέθοδος PSQM+

Η μέθοδος PSQM, όπως είχε αρχικά σχεδιαστεί, δεν λάμβανε υπόψη υποβαθμίσεις που οφείλονται σε δικτυακές παραμέτρους QoS, όπως η απώλεια πακέτων, η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) και τα σφάλματα στη σειρά των πακέτων, που είναι συνηθισμένο φαινόμενο στις εφαρμογές VoIP. Έτσι η PSQM, μη υπολογίζοντας αυτές τις παραμέτρους, δίνει εσφαλμένα αποτελέσματα σε προσομοιώσεις δικτύων με υψηλό φορτίο. Αδυνατεί δηλαδή να καταγράψει αισθητές υποβαθμίσεις της ποιότητας της φωνής, εξάγοντας υπερτιμημένο τον δείκτη MOS.

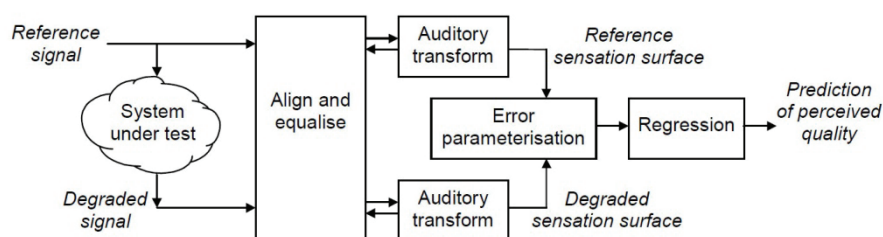
Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, αναπτύχθηκε η μέθοδος PSQM+ από την KPN Research το 1997 με τροποποίηση του αρχικού αλγορίθμου. Η PSQM+ παράγει αποτελέσματα που

φαίνεται να αντικατοπτρίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις αρνητικές επιδόσεις των κωδικοποιητών ομιλίας κάτω από πραγματικές συνθήκες φορτίου του δικτύου.

Μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύτερο φάσμα υποβαθμίσεων σε σύγκριση με την PSQM. Η PSQM+ έχει έναν επί πλέον συντελεστή προσαύξησης σε σχέση με την PSQM, έτσι ώστε να συνυπολογίζονται υποβαθμίσεις, όπως η αποκοπή (clipping) της φωνής που παρουσιάζεται στην τηλεφωνία VoIP. Ωστόσο, η απόδοση της μεθόδου PSQM+ μπορεί να αμφισβητηθεί για άλλους διαφορετικούς τύπους των υποβαθμίσεων [74].

7.6.3 Η μέθοδος PAMS

Η μέθοδος PAMS (Perceptual Analysis Measurement System) [84] αναπτύχθηκε για να αναγνωρίζει ακουστικές υποβαθμίσεις της ποιότητας, μέσω μιας αντικειμενικής διαδικασίας, βασισμένης στην ανθρώπινη αντίληψη. Έχει βελτιστοποιηθεί μέσα από συγκρίσεις με αποτελέσματα υποκειμενικών δοκιμών, περιλαμβανομένων και πραγματικών συστημάτων, όπως για παράδειγμα τα υφιστάμενα δίκτυα VoIP. Δοκιμάστηκε δηλαδή σε συνθήκες αντιπροσωπευτικές αυτών που απαντώνται στην πραγματικότητα, σε μεγάλο αριθμό κωδικοποιητών, σε συνθήκες επανακωδικοποίησης και σε διάφορους τύπους σφαλμάτων. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από την British Telecom και σήμερα έχει τα δικαιώματα η εταιρεία Psytechnics [82].



Εικ. 7.4: Σχηματικό διάγραμμα διεργασιών μεθόδου PAMS (Πηγή: Psytechnics [82])

Τα στάδια επεξεργασίας της μεθόδου PAMS τα οποία φαίνονται στην Εικ. 7.4 είναι:

1. Συγχρονισμός υποβαθμισμένου σήματος και σήματος αναφοράς (time alignment),
2. Ισοστάθμιση απολαβής (level alignment) των δύο σημάτων στα 79 dB SPL σύμφωνα με το πρότυπο ITU-T Rec. P.830
3. Εξισορρόπηση (equalization) σημάτων για αντιστάθμιση κάποιας πιθανής εισαγωγής φιλτραρίσματος

4. Μετατροπή των σημάτων προσομοιώνοντας την ανθρώπινη ακοή (auditory transform)
5. Παραμετροποίηση σφαλμάτων (error parameterization)
6. Μη γραμμική συσχέτιση (regression) βάσει δεδομένων υποκειμενικών δοκιμών

Σύμφωνα με την κάτοχο των δικαιωμάτων εταιρεία, η μέθοδος PAMS είναι κατάλληλη για την ανάπτυξη κωδικοποιητών φωνής, την επιλογή ή βελτίωση εξοπλισμού, και την παρακολούθηση δικτύων τηλεπικοινωνιών. Σε συγκριτικές δοκιμές με άλλες μεθόδους έδωσε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, ειδικά στην τηλεφωνία VoIP (Πίν. 7.2).

No. tests	Type	Corr. coeff.	PAMS	PSQM	PSQM+	MNB
19	Mobile network	average	0.954	0.924	0.935	0.884
		worst-case	0.895	0.843	0.859	0.731
9	Fixed network	average	0.936	0.881	0.897	0.801
		worst-case	0.805	0.657	0.652	0.596
10	VoIP/ multi-type	average	0.916	0.674	0.726	0.690
		worst-case	0.758	0.260	0.469	0.363

Πίν. 7.2: Σύγκριση μεθόδων PAMS, PSQM, PSQM+ και MNB - Μέσες και ελάχιστες τιμές συντελεστή συσχέτισης με υποκειμενικές δοκιμές (Πηγή δεδομένων: Psytechnics [82])

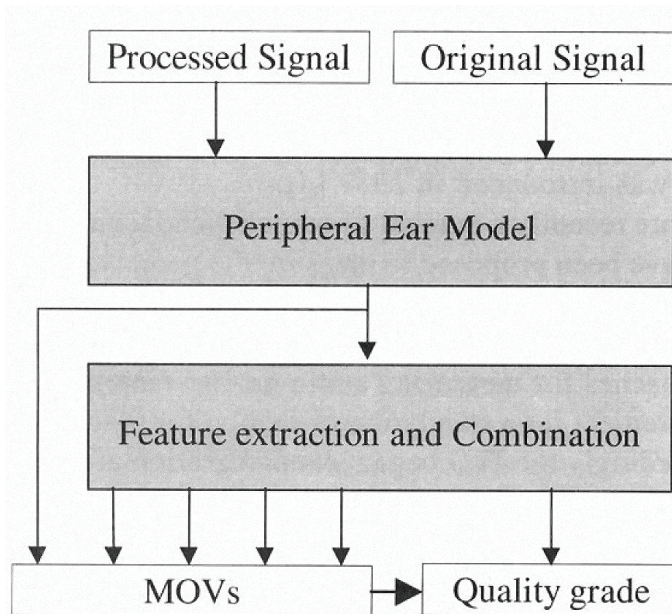
7.6.4 Η μέθοδος PEAQ

Η μέθοδος PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality) είναι μια ενεργητική αντικειμενική μέθοδος αξιολόγησης της ποιότητας του ήχου, η οποία βασίζεται σε γενικά αποδεκτές ψυχοακουστικές² αρχές. Αναπτύχθηκε με τη συνεργασία οκτώ ερευνητικών κέντρων από όλο τον κόσμο και προδιαγράφεται στη σύσταση ITU-R BS. 1387-1 [45].

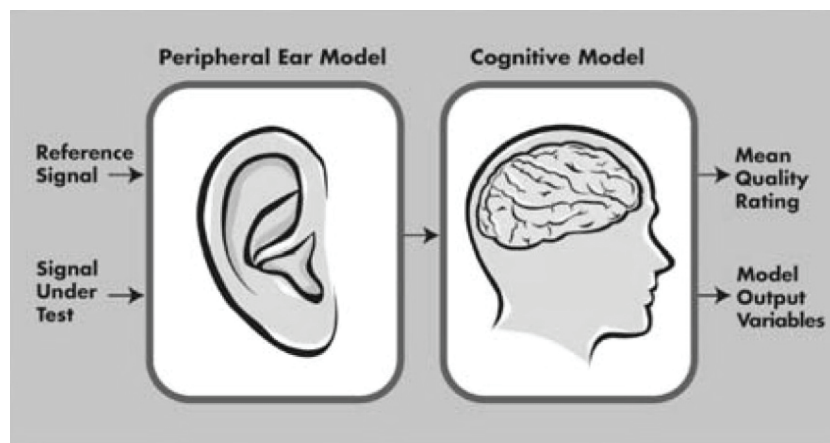
Το μοντέλο στο οποίο βασίζεται η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικ. 7.5. Σε γενικές γραμμές, συγκρίνει το επεξεργασμένο με κάποιο τρόπο σήμα με το συγχρονισμένο πρωτότυπο σήμα. Τα αντίστοιχα πλαίσια του αυθεντικού και του επεξεργασμένου σήματος μετατρέπονται σε μια αναπαράσταση της βασικής μεμβράνης (μεμβράνη που βρίσκεται στον κοχλία στο εσωτερικό αυτί του ανθρώπου) και στη συνέχεια οι διαφορές αναλύονται περεταιίρω σαν συναρτήσεις συχνότητας και χρόνου από ένα γνωστικό μοντέλο. Το τελευταίο εξάγει τα σχετικά με την αντίληψη χαρακτηριστικά, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου της

² Ψυχοακουστική (psychoacoustics) ονομάζεται η επιστήμη που μελετά τον υποκειμενικό τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο σύστημα ακοής αντιλαμβάνεται τους διάφορους ήχους (wikipedia.com)

ποιότητας. Όπως φαίνεται στην εικόνα, το μοντέλο υπολογίζει πολλές ενδιάμεσες μεταβλητές εξόδου (MOV, model output variable). Τέλος, το σύνολο των ενδιαμέσων παραμέτρων που έχει προεπιλεχθεί αντιστοιχίζεται σε ένα βαθμό ποιότητας. Η αντιστοίχιση επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ της κατανομής των αντικειμενικών μετρήσεων και της αντίστοιχης κατανομής των μέσων υποκειμενικών ποιοτήτων του διαθέσιμου συνόλου.



Εικ. 7.5: Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου PEAQ (Πηγή: Thiede et al. [92])



Εικ. 7.6: Αρχή λειτουργίας μοντέλου PEAQ (Πηγή: CRC [12])

Η μέθοδος PEAQ για την βαθμολογία της ποιότητας χρησιμοποιεί την κλίμακα που προδιαγράφεται στην σύσταση ITU-R Rec. BS.562. Πρόκειται για την 5-βάθμια κλίμακα υποβάθμισης που φαίνεται στον Πίν. 7.3.

Grade	Impairment	Υποβάθμιση
5.0	Imperceptible	Μη αντιληπτή
4.0	Perceptible but not annoying	Αντιληπτή αλλά μη ενοχλητική
3.0	Slightly annoying	Ελαφρώς ενοχλητική
2.0	Annoying	Ενοχλητική
1.0	Very annoying	Πολύ ενοχλητική

Πίν. 7.3: Κλίμακα υποβαθμίσεων ποιότητας ITU-R Rec. BS.562

Ο βαθμός που εξάγεται ονομάζεται ODG (Objective Difference Grade) κατ' αντιστοιχία του SDG (Subjective Difference Grade) που υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$SDG = \text{Βαθμός σήματος υπό δοκιμή} - \text{Βαθμός σήματος αναφοράς}$$

Επομένως, η κλίμακα βαθμών SDG και ODG είναι από 0 έως -4, με το 0 να αντιστοιχεί σε μη αντιληπτή υποβάθμιση και το -4 σε υποβάθμιση που χαρακτηρίζεται πολύ ενοχλητική.

Μια εφαρμογή του μοντέλου PEAQ έχει αναπτυχθεί από το Ερευνητικό Κέντρο Τηλεπικοινωνιών του Καναδά CRC (Communications Research Centre Canada) και διατίθεται με την εμπορική ονομασία CRC-SEAQ (CRC - System for the Evaluation of Audio Quality) [12].

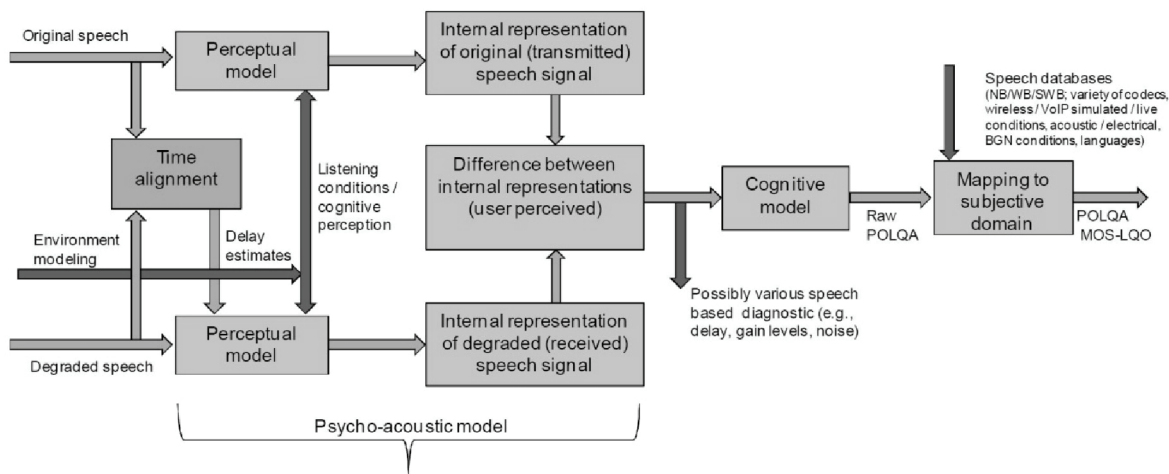
7.6.5 Η μέθοδος POLQA

Η μέθοδος POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Analysis) είναι η τελευταία εξέλιξη των ενεργητικών αντικειμενικών μεθόδων αξιολόγησης της ποιότητας της φωνής. Αναπτύχθηκε κατά την περίοδο 2006-2011 από κορυφαίους ειδήμονες του ITU-T Study Group 12, περιλαμβανομένων και αυτών που είχαν συμμετάσχει στην ανάπτυξη των προηγούμενων προτύπων ITU-T Rec. P.861 (PSQM) [61] και ITU-T Rec. P.862 (PESQ) [62]. Η μέθοδος POLQA τυποποιήθηκε το 2011, με τη σύσταση ITU-T Rec. P.863 [63], και είναι κατάλληλη για έλεγχο ποιότητας δικτύων σταθερής τηλεφωνίας, κινητής τηλεφωνίας και τηλεφωνίας βασισμένης στο πρωτόκολλο IP. Μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα φωνής συμβατικά ή υψηλής ευκρίνειας HD (High Definition) και σε δίκτυα 2G, 3G και 4G/LTE.

Η μέθοδος POLQA διορθώνει πολλούς από τους περιορισμούς της μεθόδου PESQ, όπως:

- Μετρήσεις τηλεφωνίας ευρείας ζώνης
- Ανακρίβεια στους CDMA codecs (π.χ. EVRC) και, κατ' επέκταση, γενικά στα δίκτυα CDMA

- Ευαισθησία σε συγκεκριμένες συνθήκες στα δίκτυα GSM/WCDMA όπως DTX/Ανίχνευση δραστηριότητας φωνής με τον codec AMR
- Περιορισμοί VoIP (μεταβαλλόμενη καθυστέρηση έως 1 s)
- Ισχυρές γραμμικές στρεβλώσεις και μεταβολές απολαβής
- Περιορισμοί με συσκευές επεξεργασίας (βελτίωσης) φωνής όπως υποβάθμιση θορύβου και αυτόματος έλεγχος απολαβής

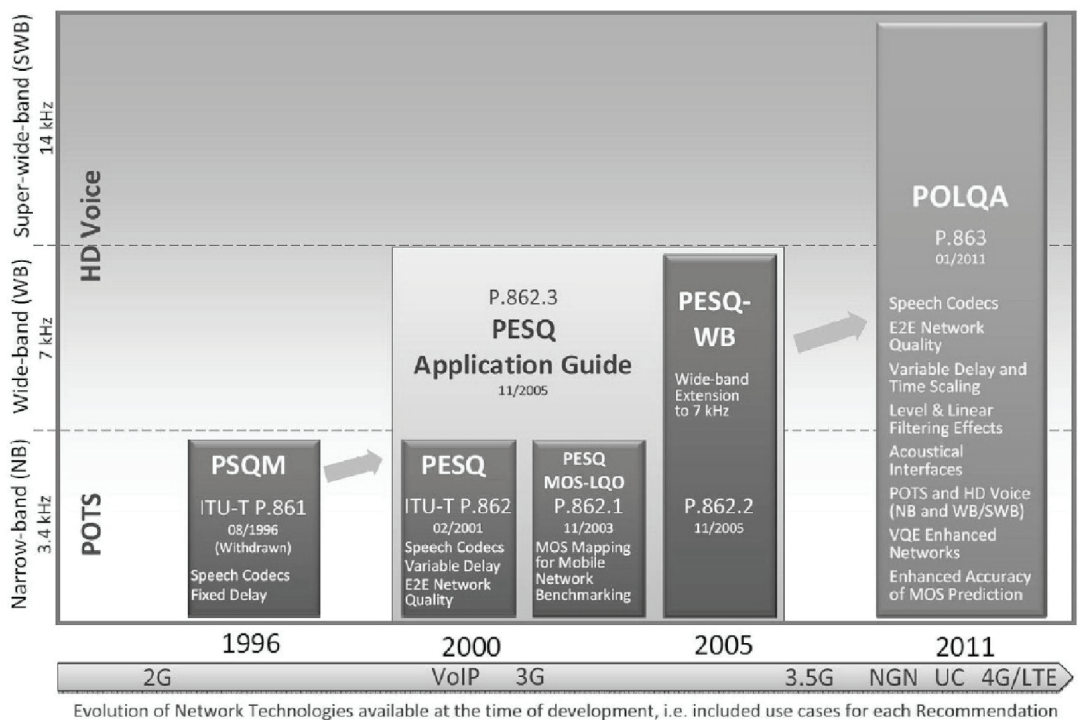


Εικ. 7.7: Αρχιτεκτονική αλγορίθμου PEAQ (Πηγή: Cotanis [11])

Προσφέρει επίσης νέες δυνατότητες όπως:

- Λειτουργεί και στα τρία διαθέσιμα εύρη ζώνης NB, WB, SWB και κάτω από διάφορες συνθήκες θορύβου υποβάθρου όπως δρόμος, αυτοκίνητο, εστιατόριο κλπ.
- Λειτουργεί με όλους τους νέους εμπορικούς και τυποποιημένους codec που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές τεχνολογίες (GSM/WCDMA, LTE, VoIP, VoIP over IMS) όπως AMR-WB, EVRC-WB, iLBC, AMB+, AAC, Skype / SLIK, G.711, G.729, κλπ.
- Επιτρέπει μετρήσεις διαφόρων συνδυασμών διεπαφών ηλεκτρική-ηλεκτρική, ακουστική-ακουστική, ηλεκτρική-ακουστική και ακουστική ηλεκτρική παρέχοντας την δυνατότητα δοκιμής τερματικών και εφαρμογών hands-free.

Επίσης η μέθοδος είναι συμβατή με νέους κωδικοποιητές, επανακωδικοποίηση, απώλειες πακέτων και στρατηγικές απόκρυψης, σφάλματα πλαισίων και bit, διακοπές και αποκοπές της φωνής, συσκευές βελτίωσης της φωνής, καθώς επίσης με συστήματα υποβάθμισης θορύβου και απόσβεσης φωνής.



Εικ. 7.8: Εξέλιξη συστάσεων ITU-T P.86x για δοκιμές ποιότητας φωνής
(Πηγή: POLQA Coalition [79])

7.7 Μη Παρεμβατικές αντικειμενικές μέθοδοι

Η σύσταση ITU-T P.562 [54] παρέχει συμβουλές σχετικά με την ανάλυση και την ερμηνεία μετρήσεων φωνητικών υπηρεσιών όπως παράγονται από μια μη παρεμβατική συσκευή μέτρησης INMD (In-service Non-Intrusive Measurement Device). Θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την ITU-T Rec. P.561, In-service, non-intrusive measurement device – Voice service measurements. Οι διατάξεις INMD χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση παραμέτρων της φωνής, όπως η ομιλία, ο θόρυβος και η ηχώ. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση παραμέτρων που σχετίζονται με τα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος και των δικτύων μεταγωγής πακέτων, που επηρεάζουν την ποιότητα των καναλιών φωνής που αυτά μεταφέρουν. Χρησιμοποιούνται ως ανεξάρτητες συσκευές ή μπορούν να εγκατασταθούν ως μέρος ενός στοιχείου του δικτύου. Μπορούν να αναπτυχθούν σε επιλεγμένους καταναμητές (switches) και κόμβους εγκαταστάσεων τηλεπικοινωνιακών δικτύων για τη μέτρηση των παραμέτρων υπηρεσιών φωνής και να εντοπίσουν και να αναλύσουν ανωμαλίες του δικτύου.

Οι πιο γνωστές χρησιμοποιούμενες μέθοδοι αντικειμενικού προσδιορισμού της ποιότητας οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους είναι οι:

3SQM	Single Sided Speech Quality Measure	ITU-T Rec. P.563 [55]
E-model	A computational model for use in transmission planning	ITU-T Rec. G.107 [46]

7.7.1 Η μέθοδος ITU-T Rec. P.563

Η μέθοδος, η οποία προδιαγράφεται στην Σύσταση της ITU-T P.563 [55], μπορεί να εφαρμοστεί για προβλέψεις της ποιότητας της ομιλίας, χωρίς ξεχωριστό σήμα αναφοράς. Για το λόγο αυτό, συνιστάται για μη παρεμβατική αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας, ζωντανή παρακολούθηση του δικτύου και αξιολόγηση, χρησιμοποιώντας άγνωστες πηγές ομιλίας στο άλλο άκρο της τηλεφωνικής σύνδεσης. Είναι επίσης γνωστή ως Single Sided Speech Quality Measure ή 3SQM³.

Η αξιολόγηση της ποιότητας φωνής με τη μέθοδο P.563 απαιτεί πολλά βήματα. Πριν την αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος της φωνής, το σήμα πρέπει να υποστεί μια προεπεξεργασία. Τα σημαντικά βήματα της προεπεξεργασίας είναι: το φιλτράρισμα για την αποκοπή ορισμένων συχνοτήτων, η ρύθμιση της στάθμης της ομιλίας και ο διαχωρισμός σε φωνητικά και μη φωνητικά μέρη μέσω ανίχνευσης δραστηριότητας φωνής (VAD, Voice Activity Detection). Σε δεύτερη φάση, εξάγονται από το σήμα η παραμόρφωση και κάποιες παράμετροι της ομιλίας. Τρία βασικά λειτουργικά τμήματα ανάλυσης που αντιστοιχούν στις κύριες ομάδες των παραμορφώσεων, οι οποίες ορίζονται στην P.563, βοηθούν στην ταξινόμηση των σημάτων και των παραμορφώσεών τους. Οι κύριοι τύποι παραμόρφωσης ορίζονται ως εξής: μη φυσικότητα του λόγου, βασική ποιότητα ομιλίας, ρομποτική φωνή, αφύσικη φωνή σαν βόμβος, ισχυρός προσθετικός θόρυβος, θόρυβος υποβάθρου, τμηματικά χαμηλό SNR (Signal-to-noise ratio – λόγος σήματος προς θόρυβο), διακοπές και αποκοπές. Τελικά, μετά από την ανάλυση, καθορίζεται η τάξη παραμόρφωσης και υπολογίζεται ένα MOS (Mean Opinion Score). Το MOS χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα φωνής σε μια κλίμακα από το 1 (κακή ποιότητα) έως 5 (άριστη ποιότητα).

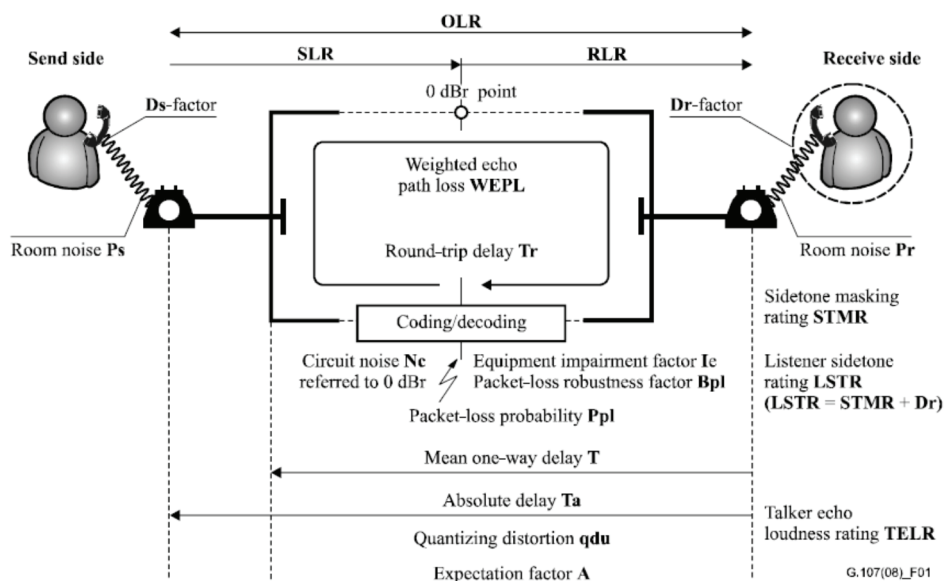
Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του P.563 σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις μέτρησης είναι ότι δεν χρειάζεται να γίνουν υποθέσεις σχετικά με το υπό δοκιμή δίκτυο ή για το είδος παραμόρφωσης που μπορεί να συμβεί σε ένα συγκεκριμένο σενάριο δοκιμής τηλεφωνίας. Η

³ Εμπορικό σήμα της Opticom GmbH.

μόνη προϋπόθεση που απαιτεί το μοντέλο είναι η επιστημονική γνώση σχετικά με το πώς παράγεται η ανθρώπινη ομιλία και το πώς αυτή γίνεται αντιληπτή από τον άνθρωπο. Ο αλγόριθμος P.563 περιλαμβάνει στον υπολογισμό τις επιπτώσεις υποβάθμισης που σχετίζονται τόσο με τη μεταγωγή πακέτων (loss, jitter) όσο και με και το ίδιο το σήμα (θόρυβος και παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις διαδικασίες κωδικοποίησης). Το μοντέλο παραμόρφωσης που βασίζεται σε αυτή τη γνώση είναι τόσο γενικό όσο επιτρέπεται και ως εκ τούτου μπορεί να είναι ανεξάρτητο από τις τρέχουσες και μελλοντικές εφαρμογές της τηλεφωνίας και τα δίκτυα [75].

7.8 Ο αλγόριθμος αξιολόγησης της ποιότητας μετάδοσης E-model

Η Σύσταση ITU-T G.107 [46] ορίζει τον αλγόριθμο E-model που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε αξιολόγηση μετάδοσης. Αυτό το υπολογιστικό μοντέλο είναι χρήσιμο στους μηχανικούς που σχεδιάζουν μια μετάδοση, και βοηθά ώστε να διασφαλιστεί ότι οι χρήστες θα είναι ικανοποιημένοι με την απόδοσή της από άκρο σε άκρο. Η κύρια έξοδος του μοντέλου είναι μια κλιμακωτή αξιολόγηση της ποιότητας μετάδοσης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου αυτού είναι η χρήση παραγόντων υποβάθμισης της μετάδοσης, που αντανακλούν τις επιδράσεις των σύγχρονων συσκευών επεξεργασίας σήματος.



Εικ. 7.9: Σύνδεση αναφοράς του E-model (Πηγή: ITU-T G.107 [46])

Το E-model δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1998 και έκτοτε η ITU-T το βελτιώνει συνεχώς, αναθεωρώντας το και εμπλουτίζοντάς το κάθε 1-2 χρόνια. Το 2000, συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς του μοντέλου οι επιπτώσεις του θορύβου του χώρου στην πλευρά της εκπομπής και η παραμόρφωση κβαντοποίησης. Στην έκδοση του 2002 συμπεριλήφθηκε, με ένα παραμετρικό τρόπο, η υποβάθμιση που οφείλεται στην τυχαία απώλεια πακέτων για διαφορετικούς κωδικοποιητές. Το 2003, βελτιώθηκε η μοντελοποίηση της ποιότητας στην περίπτωση χαμηλού επιπέδου sidetone⁴ της συσκευής του ομιλητή. Η έκδοση του 2005 επέτρεψε πιο ακριβείς προβλέψεις για την ποιότητα των codecs κάτω από συνθήκες απώλειας πακέτων. Στην τελευταία έκδοση της σύστασης (2009), περιλαμβάνεται ένα Παράρτημα όπου περιγράφεται ένα προσωρινό πλαίσιο παραγόντων υποβάθμισης για ευρυζωνικά συστήματα μετάδοσης ομιλίας. Περιλαμβάνεται επίσης μια εφαρμογή αναφοράς του μοντέλου.

7.8.1 Υπολογισμός του παράγοντα αξιολόγησης της μετάδοσης, R

Το αποτέλεσμα κάθε υπολογισμού με το E-model είναι ένας παράγοντας αξιολόγησης της μετάδοσης R (R -factor), ο οποίος συνδυάζει όλες τις σχετικές με την εξεταζόμενη σύνδεση παραμέτρους μετάδοσης. Ο εν λόγω παράγοντας υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e\text{-eff} + A \quad (5.1)$$

Ο όρος R_o αντιπροσωπεύει τον βασικό λόγο σήματος προς θόρυβο, συμπεριλαμβανομένων των πηγών θορύβου, όπως ο θόρυβος κυκλωμάτων και ο θόρυβος υποβάθρου του χώρου.

Ο όρος I_s αποτελεί ένα συνδυασμό όλων των υποβαθμίσεων που εμφανίζονται σχεδόν ταυτόχρονα με το σήμα φωνής. Τέτοιες είναι αυτές που οφείλονται στην κβαντοποίηση και σε μη βέλτιστες τιμές sidetone.

Ο όρος I_d αντιπροσωπεύει τις υποβαθμίσεις που προκαλούνται από καθυστερήσεις.

Ο όρος $I_e\text{-eff}$ (effective equipment impairment) εκφράζει τις υποβαθμίσεις που προκαλούνται από τους codec χαμηλού ρυθμού bit. Περιλαμβάνει επίσης υποβαθμίσεις που οφείλονται σε απώλειες πακέτων με τυχαία κατανομή.

⁴ Το φαινόμενο κατά το οποίο ο προσληφθείς από το μικρόφωνο του τηλεφώνου ήχος διαβιβάζεται (σε χαμηλό επίπεδο) στο ακουστικό της ίδιας συσκευής, ενεργώντας ως ανάδραση. Οι επιδράσεις του αναφέρονται στο Supplement 11 της Σειράς Συστάσεων P της ITU-T [66].

Ο συντελεστής πλεονεκτήματος A (advantage) επιτρέπει την αντιστάθμιση των παραγόντων απομείωσης όταν υπάρχουν άλλα πλεονεκτήματα διαθέσιμα στον χρήστη.

Επίσης, οι όροι R_o , I_s και I_d υποδιαιρούνται σε περαιτέρω εξειδικευμένους συντελεστές υποβάθμισης.

Ακολουθεί ο αναλυτικός υπολογισμός όλων των επί μέρους όρων του R -Factor. Οι δύο πρώτοι όροι R_o και I_s σχετίζονται με ηλεκτρολογικές παραμέτρους της αναλογικής μετάδοσης και των τηλεφωνικών συσκευών και απλά παρατίθενται οι τύποι χωρίς επί πλέον εξηγήσεις, καθώς ξεφεύγουν από το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Basic signal-to-noise ratio, R_o

$$R_o = 15 - 1.5(SLR + N_o) \quad (5.2)$$

$$N_o = 10 \log \left[10^{\frac{N_c}{10}} + 10^{\frac{N_{os}}{10}} + 10^{\frac{N_{or}}{10}} + 10^{\frac{N_{fo}}{10}} \right] \quad (5.3)$$

$$N_{os} = P_s - SLR - D_s - 100 + 0.004(P_s - OLR - D_s - 14)^2 \quad (5.4)$$

όπου

$$OLR = SLR + RLR$$

$$N_{or} = RLR - 121 + Pre + 0.008(Pre - 35)^2 \quad (5.5)$$

$$Pre = Pr + 10 \log \left[1 + 10^{\frac{(10-LSTR)}{10}} \right] \quad (5.6)$$

$$N_{fo} = N_{for} + RLR \quad (5.7)$$

Simultaneous impairment factor, I_s

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q \quad (5.8)$$

$$I_{olr} = 20 \left[\left\{ 1 + \left(\frac{X_{olr}}{8} \right)^8 \right\}^{\frac{1}{8}} - \frac{X_{olr}}{8} \right] \quad (5.9)$$

$$X_{olr} = OLR + 0.2(64 + N_o - RLR) \quad (5.10)$$

$$Ist = 12 \left[1 + \left(\frac{STMRO-13}{6} \right)^8 \right]^{\frac{1}{8}} - 28 \left[1 + \left(\frac{STMRO+1}{19.4} \right)^{35} \right]^{\frac{1}{35}} - 13 \left[1 + \left(\frac{STMRO-3}{33} \right)^{13} \right]^{\frac{1}{13}} + 29 \quad (5.11)$$

$$STMRO = -10 \log \left[10^{-\frac{STMRO}{10}} + e^{-\frac{T}{4}} 10^{-\frac{TELRO}{10}} \right] \quad (5.12)$$

$$Iq = 15 \log[1 + 10^Y + 10^Z] \quad (5.13)$$

$$Y = \frac{Ro-100}{15} + \frac{46}{8.4} - \frac{G}{9} \quad (5.14)$$

$$Z = \frac{46}{30} - \frac{G}{40} \quad (5.15)$$

$$G = 1.07 + 0.258Q + 0.0602Q^2 \quad (5.16)$$

$$Q = 37 - 15 \log(qdu) \quad (5.17)$$

Delay impairment factor, *Id*

Ο όρος *Id*, που εκφράζει όλες τις υποβαθμίσεις που οφείλονται σε καθυστερήσεις του σήματος της φωνής αποτελείται από 3 επί μέρους όρους: *Idte*, *Idle* και *Idd*. Όπου

$$Id = Idte + Idle + Idd \quad (5.18)$$

Ο όρος *Idte* εκτιμά την υποβάθμιση λόγω ηχούς ομιλητή:

$$Idte = \left[\frac{Roe-Re}{2} + \sqrt{\frac{(Roe-Re)^2}{4} + 100 - 1} \right] (1 - e^{-T}) \quad (5.19)$$

όπου

$$Roe = -1.5(No - RLR) \quad (5.20)$$

$$Re = 80 + 2.5(TERV - 14) \quad (5.21)$$

$$TERV = TELR - 40 \log \frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} + 6e^{-0.3T^2} \quad (5.22)$$

Για τιμές $T < 1$ ms, η ηχώ του ομιλητή μπορεί να θεωρηθεί sidetone, δηλαδή $Idte = 0$. Ο αλγόριθμος υπολογισμού συνδυάζει επί πλέον την επίδραση του STMR στην ηχώ του ομιλητή. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι οι χαμηλές τιμές του STMR μπορεί να έχουν κάποια επίδραση συγκάλυψης της ηχούς του ομιλητή, και ότι για μεγάλες τιμές του STMR η ηχώ του ομιλητή μπορεί να καταστεί περισσότερο αντιληπτή, οι όροι $TERV$ και $Idte$ ρυθμίζονται όπως παρακάτω:

Για $STMR < 9$ dB:

Στην εξίσωση 5-21, ο όρος $TERV$ αντικαθίσταται με $TERVs$, όπου:

$$TERVs = TERV + \frac{Ist}{2} \quad (5-23)$$

Για $9 \text{ dB} \leq STMR \leq 20$ dB:

Εφαρμόζονται οι εξισώσεις 5-19 έως 5-22.

Για $STMR > 20$ dB:

Στην εξίσωση 5-18, ο όρος $Idte$ αντικαθίσταται από τον $Idtes$, όπου:

$$Idtes = \sqrt{Idte^2 + Ist^2} \quad (5-24)$$

Ο όρος $Idle$ εκφράζει τις υποβαθμίσεις λόγω της ηχούς ακροατή. Οι εξισώσεις είναι:

$$Idle = \frac{Ro - Rle}{2} + \sqrt{\frac{(Ro - Rle)^2}{4} + 169} \quad (5.25)$$

όπου:

$$Rle = 10.5(WEPL + 7)(Tr + 1)^{-0.25} \quad (5.26)$$

Ο όρος Idd εκφράζει την υποβάθμιση που οφείλεται σε μεγάλη απόλυτη καθυστέρηση Ta , η οποία παρατηρείται ακόμη και με τέλεια απόσβεση ηχούς.

Για $Ta \leq 100$ ms:

$$Idd = 0$$

Για $Ta > 100$ ms:

$$Idd = 25 \left\{ (1 + X^6)^{\frac{1}{6}} - 3 \left(1 + \left[\frac{X}{3} \right]^6 \right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\} \quad (5.27)$$

$$X = \frac{\log\left(\frac{Ta}{100}\right)}{\log 2} \quad (5.28)$$

Equipment impairment factor Ie

Οι τιμές του παράγοντα Ie των στοιχείων που χρησιμοποιούν codec χαμηλού bit-rate δεν συσχετίζονται με άλλες παραμέτρους. Εξαρτώνται μόνο από τον βαθμό MOS των υποκειμενικών δοκιμών και από εμπειρικά δεδομένα σχετικά με τα δίκτυα. Οι τρέχουσες συνιστώμενες τιμές για διάφορους codec αναφέρονται στο Appendix I της ITU-T Rec. G.113 (Πίν. 7.4).

Η τιμή του παράγοντα Bpl ορίζεται συναρτήσει του codec. Ο όρος $Ie-eff$, ο οποίος συμπεριλαμβάνει τις υποβαθμίσεις λόγω απώλειας πακέτων, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ειδική για κάθε codec τιμή μηδενικών απωλειών του παράγοντα Ie και την τιμή του παράγοντα Bpl . Τιμές των δύο αυτών παραγόντων για διάφορους codec αναφέρονται στο Appendix I της ITU-T Rec. G.113 (Πίν. 7.4).

Ο όρος $Ie-eff$ συναρτήσει της πιθανότητας απωλειών πακέτων, υπολογίζεται από την σχέση:

$$Ie-eff = Ie + (95 - Ie) \cdot \frac{Ppl}{\frac{Ppl}{BurstR} + Bpl} \quad (5.29)$$

Ο παράγοντας $BurstR$ (burst ratio), ορίζεται ως:

$$BurstR = \frac{\text{Average length of observed bursts in an arrival sequence}}{\text{Average length of bursts expected for the network under "random" loss}}$$

Όταν οι απώλειες πακέτων είναι τυχαίες (δηλ. ανεξάρτητες), τότε $BurstR = 1$

Όταν οι απώλειες πακέτων είναι συσχετισμένες (δηλ εξαρτώμενες), τότε $BurstR > 1$

Για παράδειγμα, για κατανομές απωλειών πακέτων που αντιστοιχούν σε μοντέλο Markov δύο καταστάσεων με πιθανότητα αλλαγής κατάστασης από «λήψη» σε «απώλεια» p , και από «απώλεια» σε «λήψη» q , ο παράγοντας $BurstR$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$BurstR = \frac{1}{p+q} = \frac{Ppl/100}{p} = \frac{1-Ppl/100}{q} \quad (5.30)$$

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν απώλειες, είναι δηλαδή $Ppl = 0$, τότε ο όρος $le-eff$ ισούται με την τιμή του παράγοντα le όπως αυτή ορίζεται στο Appendix I της ITU-T Rec. G.113 (Πίν. 7.4).

Ο Πίν. 7.4 περιλαμβάνει τις default τιμές σχεδιασμού για τον συντελεστή le οι οποίες αναφέρονται σε συνθήκες χωρίς λάθη, χωρίς δηλαδή λάθη διάδοσης, διαγραφές πλαισίων ή απώλειες πακέτων.

Codec type	Reference	Operating rate [kbit/s]	le value
PCM	G.711	64	0
	G.726, G.727	40	2
ADPCM	G.721, G.726, G.727	32	7
	G.726, G.727	24	25
	G.726, G.727	16	50
		16	7
LD-CELP	G.728	12.8	20
CS-ACELP	G.729	8	10
	G.729-A + VAD	8	11
VSELP	IS-54	8	20
ACELP	IS-641	7.4	10
QCELP	IS-96a	8	21
RCELP	IS-127	8	6
VSELP	Japanese PDC	6.7	24
RPE-LTP	GSM 06.10, full-rate	13	20
VSELP	GSM 06.20, half-rate	5.6	23
ACELP	GSM 06.60, enhanced full rate	12.2	5
ACELP	G.723.1	5.3	19
MP-MLQ	G.723.1	6.3	15

Πίν. 7.4: Default τιμές σχεδιασμού για τον συντελεστή le [48]

Παράμετρος	Συντομο- γραφία	Μονάδα μέτρησης	Προκαθ. τιμή	Επιτρεπ. εύρος	Παρατη- ρήσεις
Send loudness rating	SLR	dB	+8	0 ... +18	Note 1
Receive loudness rating	RLR	dB	+2	-5 ... +14	Note 1
Sidetone masking rating	STMR	dB	15	10 ... 20	Notes 2, 4
Listener sidetone rating	LSTR	dB	18	13 ... 23	Note 2
D-Value of telephone, send side	Ds	-	3	-3 ... +3	Note 2
D-Value of telephone, receive side	Dr	-	3	-3 ... +3	Note 2
Talker echo loudness rating	TELR	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	Ie	-	0	0 ... 40	Note 5
Packet-loss robustness factor	Bpl	-	4.3	4.3 ... 40	Notes 3, 5
Random packet-loss probability	Ppl	%	0	0 ... 20	Notes 3, 5
Burst ratio	BurstR	-	1	1 ... 8	Notes 3, 6
Circuit noise referred to 0 dBr-point	Nc	dBm0p	-70	-80 ... -40	
Noise floor at the receive side	Nfor	dBmp	-64	-	Note 3
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%.

Πίν. 7.5: Προκαθορισμένες τιμές και επιτρεπτά εύρη τιμών των παραμέτρων του E-model

Advantage factor, A

Ο συντελεστής πλεονεκτήματος A δεν σχετίζεται με άλλες παραμέτρους της μετάδοσης. Μερικές ενδεικτικές τιμές δίνονται στον Πίν. 7.6, ενώ επί πλέον πληροφορίες περιλαμβάνονται στο Appendix II της ITU-T Rec. G.113 [48].

Παράδειγμα συστήματος επικοινωνίας	Μέγιστη τιμή A
Συμβατική τηλεφωνία (ενσύρματη)	0
Κινητή τηλεφωνία εντός κτιρίου	5
Κινητή τηλεφωνία σε μια γεωγραφική περιοχή ή σε κινούμενο όχημα	10
Πρόσβαση σε δυσπρόσιτες περιοχές, π.χ. δορυφορικές συνδέσεις πολλαπλών hop	20

Πίν. 7.6: Ενδεικτικές μέγιστες τιμές συντελεστή A

7.8.2 Μέτρα ποιότητας που απορρέουν από τον παράγοντα R

Ο παράγοντας αξιολόγησης της μετάδοσης R παίρνει τιμές από 0 έως 100, όπου το $R=0$ εκφράζει μια εξαιρετικά κακή ποιότητα και το $R=100$ εκφράζει μια πάρα πολύ υψηλή ποιότητα. Το E-model παρέχει μια στατιστική εκτίμηση μέτρων ποιότητας. Τα ποσοστά γνώμης καλό ή καλύτερο (GoB, good or better) και φτωχό ή χειρότερο (PoW, poor or worse) υπολογίζονται από τον παράγοντα R μέσω της συνάρτησης σφάλματος του Gauss.

Οι εξισώσεις είναι:

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

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

Επίσης μπορεί να εξαχθεί ένα εκτιμώμενο MOS_{CQE} (Mean Opinion Score; Conversational Quality, Estimated) με κλίμακα από 1 έως 5, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Για } R = 0: \quad MOS_{CQE} = 1$$

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

Για $R > 100$: $MOS_{CQE} = 4.5$

Η εξίσωση μπορεί να αναστραφεί για $6.5 \leq R \leq 100$ έτσι ώστε να υπολογισθεί ο παράγοντας R από το MOS_{CQE} .

E-Model (Version March 2005)				
Parameter	ID	Default	Value	Dimension
Electric Circuit Noise	Nc	(-70)	-70	dBm0p
Noise Floor	Nfor	(-64)	-64	dBmp
Room Noise (Send)	Ps	(35)	35	dB(A)
Room Noise (Receive)	Pr	(35)	35	dB(A)
Send Loudness Rating	SLR	(8)	8	dB
Receive Loudness Rating	RLR	(2)	2	dB
Sidetone Masking Rating	STMR	(15)	15	dB
D-factor (Receive)	Dr	(3)	3	
Listener's Sidetone Rating	LSTR	STMR+Dr	18	dB
D-factor (Send)	Ds	(3)	3	
Mean One-Way Delay	T	(0)	0	ms
Absolute Delay from (S) to (R)	Ta	(=T)	0	ms
Round-Trip Delay	Tr	(=2T)	0	ms
Talker Echo Loudness Rating	TELR	(65)	65	dB
Weighted Echo Path Loss	WEPL	(110)	110	dB
Quantizing Distortion Units	qdu	(1)	1	
Equipment Impairment Factor	Ie	(0)	0	
Packet-loss Robustness Factor	Bpl	(1)	1	
Packet-loss Probability	Ppl	(0)	0	%
Burst Ratio	BurstR	(1)	1	
Advantage Factor	A	(0)	0	
Results				
Calculated R-Factor	R	93.2		
Mean Opinion Score	MOS_{CQE}	4.41		
Options				
This E-Model web front-end was brought to you by x-fabric.com				
Last update: 2008-06-02				

Πίνακ. 7.7: E-model Calculation Tool (ITU-T Study Group 12 [65])

7.9 Η Σύσταση ITU-T Rec. G.114

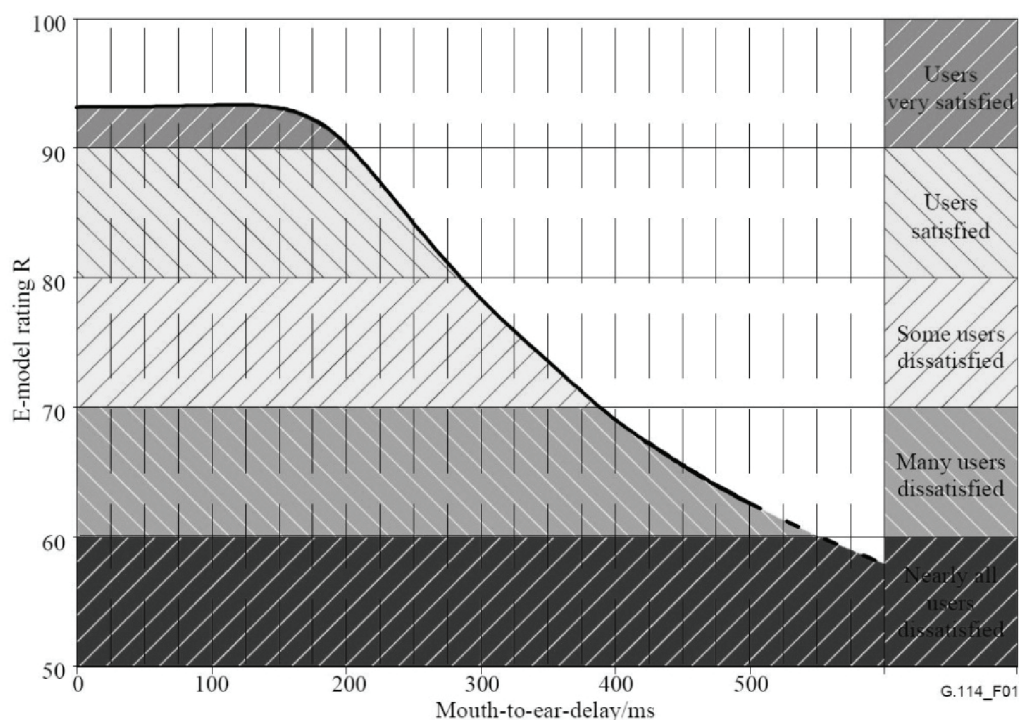
Η σύσταση ITU-T Rec. G.114 [49] προτείνει, ανεξαρτήτως του τύπου της εφαρμογής, η καθυστέρηση μιας κατεύθυνσης (one-way delay) να μην υπερβαίνει τα 400 ms κατά τον σχεδιασμό των δικτύων. Η τιμή αυτή επιτρέπει την ανάπτυξη παγκοσμίων δικτύων χωρίς να δημιουργεί έναν υπερβολικά μεγάλο αριθμό απαράδεκτων εμπειριών χρηστών.

Είναι όμως επιθυμητό να διατηρηθούν οι καθυστερήσεις σε όσο το δυνατό χαμηλότερα επίπεδα και προτείνει τη χρήση του E-model για την εκτίμηση της επίδρασης της καθυστέρησης μίας κατεύθυνσης στην ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας. Στον υπολογισμό πρέπει να συμπεριλαμβάνονται όλες οι πηγές καθυστέρησης, και προτείνει οι καθυστερήσεις end-to-end, δηλαδή από το «στόμα στο αυτί», να περιορίζονται αν είναι δυνατόν κάτω από τα 150 ms. Ενώ όμως, κατά τον γενικό σχεδιασμό δικτύου, οι καθυστερήσεις άνω των 400 ms είναι απαράδεκτες, εν τούτοις αναγνωρίζεται ότι σε ορισμένες εξαιρετικές περιπτώσεις, το όριο αυτό θα ξεπεραστεί. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εξαίρεσης είναι η επικοινωνία δύο απομακρυσμένων σημείων που για την σύνδεσή τους μέσω δορυφόρων απαιτείται διπλό άλμα.

Όσον αφορά τη χρήση του E-model για εφαρμογές ομιλίας, η επίδραση της καθυστέρησης μπορεί να φανεί στο γράφημα του βαθμού R έναντι της καθυστέρησης της Εικ. 7.10. Στο γράφημα φαίνονται επίσης οι κατηγορίες ποιότητας ομιλίας που ορίζονται στη Σύσταση ITU-T G.109 [47], η οποία μεταφράζει τις τιμές R σε επίπεδα αποδοχής από τους χρήστες (βλέπε Πίν. 7.8).

Εύρος R-value	Κατηγορία ποιότητας μετάδοσης ομιλίας	Ικανοποίηση χρηστών
$90 \leq R < 100$	Άριστη	Πολύ ικανοποιημένοι
$80 \leq R < 90$	Υψηλή	Ικανοποιημένοι
$70 \leq R < 80$	Μέση	Μερικοί μη ικανοποιημένοι
$60 \leq R < 70$	Χαμηλή	Πολλοί μη ικανοποιημένοι
$50 \leq R < 60$	Φτωχή	Σχεδόν όλοι μη ικανοποιημένοι
Συνδέσεις με R-value μικρότερη από 50 δεν συνιστώνται		

Πίν. 7.8: Ορισμός κατηγοριών ποιότητας μετάδοσης ομιλίας



Εικ. 7.10: Βαθμός R του E-model συναρτήσει της καθυστέρησης (Πηγή: ITU-R G.114 [49])

Προκειμένου να υπάρξει ένα πρακτικό πλαίσιο για τις κατηγορίες που ορίσθηκαν προηγουμένως, ο Πίν. 7.9 δίνει τις εκτιμήσεις των τιμών R για διάφορα σενάρια υπηρεσιών/δικτύων.

Σενάριο υπηρεσίας/δικτύου	R-value
Τοπική σύνδεση συνδρομητή ISDN με συνδρομητή ISDN	94
Σύνδεση συνδρομητών με αναλογική γραμμή PSTN, 20 ms καθυστέρηση	82
Σύνδεση συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας με συνδρομητή αναλογικής γραμμής PSTN κατά την αντίληψη από την πλευρά του κινητού	72
Σύνδεση συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας με συνδρομητή αναλογικής γραμμής PSTN κατά την αντίληψη από την πλευρά του PSTN	64
Σύνδεση VoIP με χρήση G.729A + VAD ⁵ με 2% απώλεια πακέτων	55

Πίν. 7.9: Παραδείγματα ποιότητας μετάδοσης τυπικών συνδέσεων

⁵ Voice Activity Detection

7.10 Δείκτης MOS (Mean Opinion Score)

Η σύσταση ITU-T Rec. P.800.1 [58] παρέχει την ορολογία του Mean Opinion Score (MOS) που πρέπει να χρησιμοποιείται σε εκφράσεις ποιότητας φωνής. Η σύσταση εκδόθηκε με σκοπό την αποφυγή παρεξηγήσεων για το αν κάποιες τιμές MOS αφορούν σε ποιότητα ακρόασης, ποιότητα ομιλίας ή ποιότητα συνομιλίας και για το αν οι τιμές προέρχονται από υποκειμενικές δοκιμές, αντικειμενικά μοντέλα ή από μοντέλα σχεδιασμού δικτύου. Επίσης, προσδιορίζει επί πλέον διακριτικά γράμματα που αφορούν στο εύρος ζώνης και τον τύπο του interface (ηλεκτρικό ή ακουστικό).

Η συντομογραφία MOS (Mean Opinion Score) ορίζεται στη σύσταση ITU-T Rec. P.10/G.100 ως ο μέσος όρος των τιμών προκαθορισμένης κλίμακας που τα άτομα απονέμουν κατά την κρίση τους στην απόδοση του συστήματος τηλεφωνικής μετάδοσης που χρησιμοποιήθηκε είτε για συνομιλία είτε για ακρόαση είτε για ομιλία. Εκτός από την υποκειμενική γνώμη, η συντομογραφία MOS χρησιμοποιείται για βαθμούς που προέρχονται από αντικειμενικά μοντέλα ή μοντέλα σχεδιασμού δικτύου. Η ITU-T συνιστά, τη χρήση των παρακάτω προσδιοριστικών γραμμάτων μαζί με την συντομογραφία MOS με σκοπό τη διάκριση του πεδίου εφαρμογής:

N	στενή ζώνη 300 - 3400 Hz (narrow-band)
W	ευρεία ζώνη 50 - 7000 Hz (wide-band)
LQ	ποιότητα μόνο ακρόασης (Listening Quality)
CQ	ποιότητα συνομιλίας (Conversational Quality)
S	υποκειμενικό (Subjective)
O	αντικειμενικό (Objective)
E	εκτιμώμενο (Estimated)

	Μόνο ακρόαση	Συζήτηση	Ομιλία
Υποκειμενικό	MOS-LQSy	MOS-CQSy	MOS-TQSy
Αντικειμενικό	NOS-LQOy	MOS-CQOy	MOS-TQOy
Εκτιμώμενο	MOS-LQEy	MOS-CQEy	MOS-TQEy

y: εύρος ζώνης (N ή W)

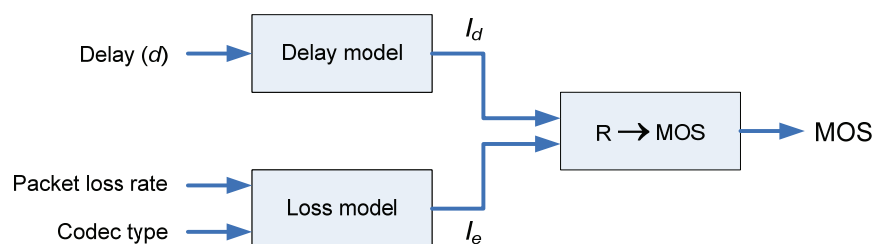
Πίν. 7.10: Προτεινόμενοι δείκτες MOS

MOS	Ποιότητα	Υποβάθμιση (impairment)
5	Εξαιρετική (Excellent)	Δεν διακρίνεται
4	Καλή (Good)	Μόλις διακρίνεται, όχι ενοχλητική
3	Μέτρια (Fair)	Αντιληπτή και ελαφρά ενοχλητική
2	Πτωχή (Poor)	Ενοχλητική αλλά όχι απαράδεκτη
1	Κακή (Bad)	Πολύ ενοχλητική και απαράδεκτη

Πίν. 7.11: Mean Opinion Score

7.11 Απλοποιημένο E-model για χρήση σε VoIP

Στη σχέση υπολογισμού του R οι δύο πρώτοι όροι δεν αφορούν σε υποβαθμίσεις της ποιότητας από παραμέτρους σχετικούς με την τηλεφωνία VoIP. Οι τιμές των όρων R_0 και I_s μπορούν να υπολογισθούν βάσει των προτεινομένων από την ITU default τιμών των παραμέτρων τους και το αποτέλεσμα να συμπεριληφθεί στη σχέση υπολογισμού. Επίσης, καθώς δεν υπάρχουν προκαθορισμένες default τιμές του συντελεστή πλεονεκτήματος A για χρήση VoIP, ο αυξητικός αυτός όρος μπορεί ασφαλώς να παραλειφθεί. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει πολύ εύκολα μέσω του E-model calculator που είναι διαθέσιμος on-line από την ITU (Πίν. 7.7) [65].



$$R = 93.2 - I_d - I_e$$

Εικ. 7.11 Το απλοποιημένο E-model για χρήση σε συστήματα VoIP

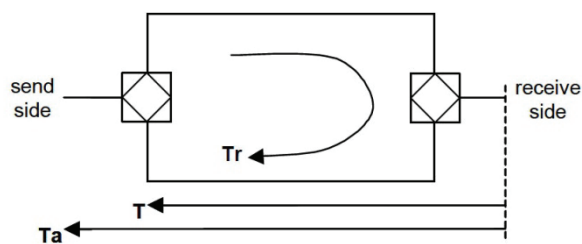
Η απλοποιημένη μορφή του E-model για χρήση σε συστήματα VoIP είναι:

$$R = 93.2 - I_d - I_e$$

Ο όρος I_d περιλαμβάνει όλες τις υποβαθμίσεις που οφείλονται στην καθυστέρηση, δηλαδή την ηχώ και την καθυστέρηση. Είναι το άθροισμα των υποβαθμίσεων λόγω της ηχούς του ομιλητή (I_{dte}), της ηχούς του ακροατή (I_{dle}) και τις μεγάλες καθυστερήσεις (I_{dd}):

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

Στο E-model ο όρος I_{dd} υπολογίζεται μόνο για καθυστερήσεις μεγαλύτερες των 100 ms. Θα μπορούσε δηλαδή κάποιος να υποθέσει ότι καθυστερήσεις μικρότερες των 100 ms δεν γίνονται αντιληπτές. Επειδή όμως αυτό δεν ισχύει, το μοντέλο περιλαμβάνει την επίδραση των περιπτώσεων αυτών στους άλλους δύο όρους I_{dte} και I_{dle} .



Εικ. 7.12: Απαιτούμενες καθυστερήσεις για τον υπολογισμό του E-model

(Πηγή: Psytechnics [81])

Οι σχέσεις υπολογισμού του I_d απαιτούν τρεις διαφορετικές μετρήσεις καθυστέρησης όπως φαίνεται στην Εικ. 7.12:

- T mean one-way delay
- T_a absolute delay
- T_r round-trip delay

Δεν είναι όμως δυνατόν να μετρηθούν οι τιμές και των τριών χρησιμοποιώντας είτε απλές παθητικές (μη παρεμβατικές) λύσεις είτε ενεργές (παρεμβατικές). Για πρακτικούς επομένως λόγους, οι τιμές τους μπορούν να υπολογιστούν κατά προσέγγιση χρησιμοποιώντας μη παρεμβατικές τεχνικές.

Στην περίπτωση της τηλεφωνίας VoIP, τα διαφορετικά σημεία μέτρησης της καθυστέρησης μπορούν να απλοποιηθούν σε δύο μόνο σημεία, τέτοια ώστε:

$$T = T_a = T_r/2$$

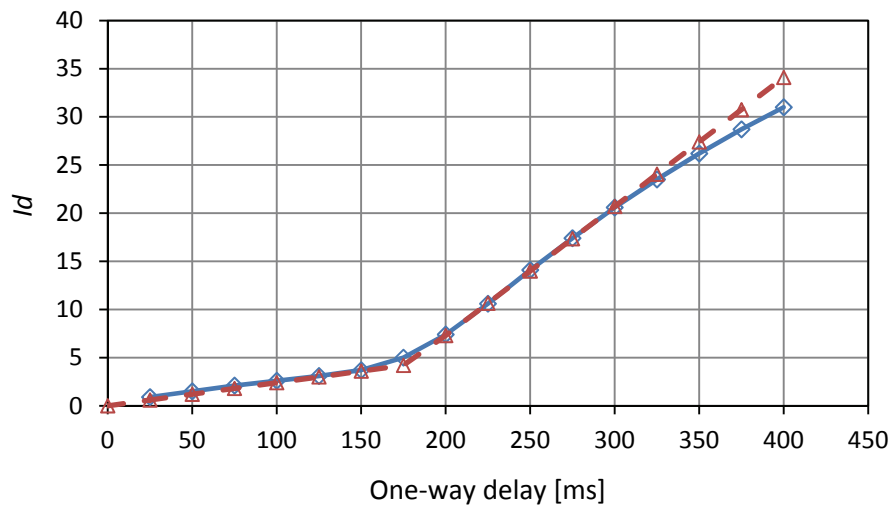
Συνεπώς ο όρος I_d μετατρέπεται σε συνάρτηση μόνο της καθυστέρησης T . Αν αντικατασταθούν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι με τις default τιμές που περιλαμβάνονται στη σύσταση ITU-T Rec. G.107 [46], εκτός δηλαδή των T_a , T και T_r , τότε μπορεί να υπολογιστεί ο όρος I_d σαν συνάρτηση της καθυστέρησης T .

Σύμφωνα με τους Cole και Rosenbluth [10] ο υπολογισμός του I_d μπορεί να απλοποιηθεί περισσότερο με χρήση της παρακάτω εξίσωσης που προκύπτει από την προσαρμογή της καμπύλης της Εικ. 7.13:

$$I_d = 0.02T + 0.11(T - 177.3)H(T - 177.3)$$

όπου

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{για } x < 0 \\ 1 & \text{για } x \geq 0 \end{cases}$$



Εικ. 7.13: Προσαρμογή καμπύλης υπολογισμού I_d [10]

Ο όρος I_e του E-model εξαρτάται αποκλειστικά από τον χρησιμοποιούμενο codec και τις απώλειες πακέτων. Οπότε ο υπολογισμός γίνεται βάσει των προκαθορισμένων τιμών του Πίν. 7.4 που περιλαμβάνονται στη σύσταση ITU-T Rec. G.113 [50].

Κεφάλαιο 8

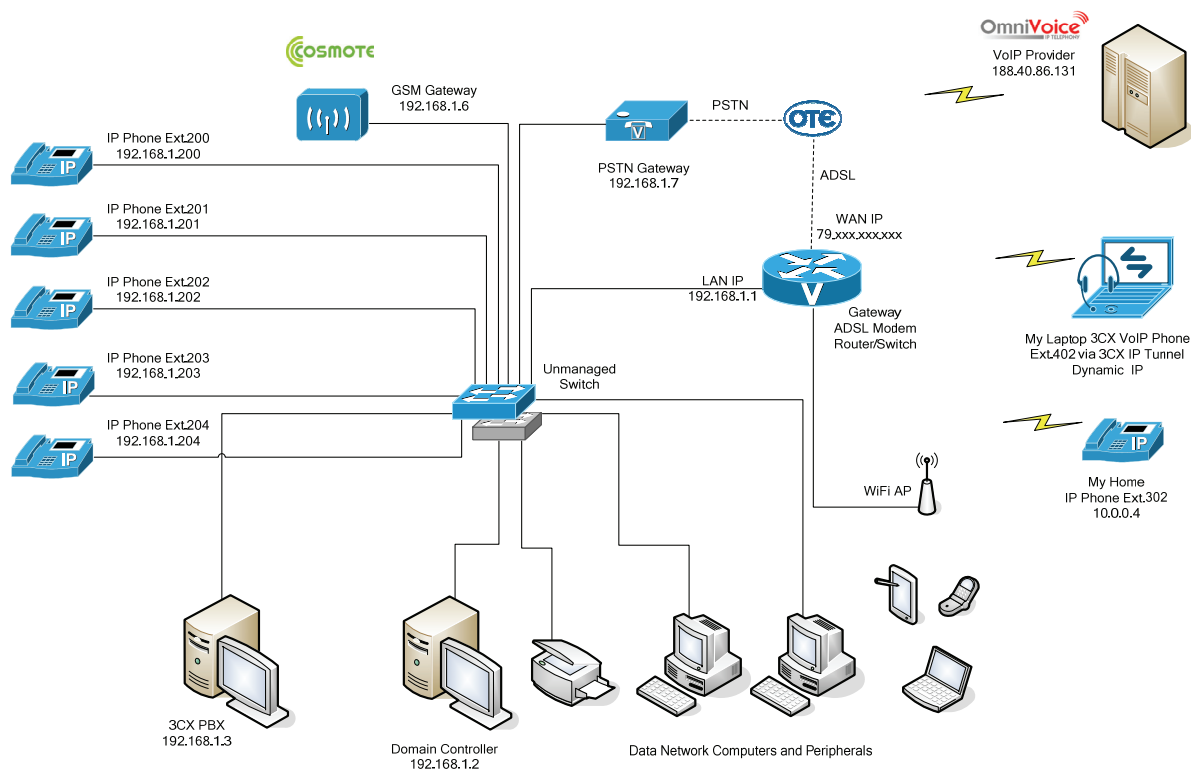
Αξιολόγηση ποιότητας πραγματικών κλήσεων

Με στόχο την βελτίωση της ποιότητας των κλήσεων σε ένα ήδη εγκατεστημένο τηλεφωνικό κέντρο VoIP στα γραφεία μικρής εταιρείας, έγινε αξιολόγηση της τοπολογίας του δικτύου, βελτίωση της λειτουργίας του με την εγκατάσταση υπηρεσίας QoS και ανάλυση μετρικών ποιότητας VoIP καταγράφοντας πραγματικές κλήσεις.

8.1 Εξοπλισμός και τοπολογία δικτύου

Το ενοποιημένο δίκτυο φωνής και δεδομένων της εταιρείας περιλάμβανε, εκτός των υπολογιστών και των περιφερειακών συσκευών, έναν Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows Server 2003 στον οποίο ήταν εγκατεστημένο το τηλεφωνικό κέντρο 3CX Phone System και 5 hardware IP τηλεφωνικές συσκευές (Linksys SPA941). Το τηλεφωνικό κέντρο ήταν συνδεδεμένο με πάροχο υπηρεσιών τηλεφωνίας VoIP (OmniVoice), με μία τηλεφωνική γραμμή του δημόσιου δικτύου τηλεφωνικής μεταγωγής (OTE) καθώς επίσης και με πάροχο κινητής τηλεφωνίας (Cosmote). Η σύνδεση με την εταιρεία παροχής υπηρεσιών τηλεφωνίας VoIP

γινόταν μέσω ADSL σύνδεσης (OTEnet 24/1 Mbps). Η σύνδεση με την τηλεφωνική γραμμή του ΟΤΕ ήταν υλοποιημένη μέσω συσκευής IP/PSTN Gateway (Linksys SPA3102), ενώ η σύνδεση με την Cosmote μέσω συσκευής IP/GSM Gateway (Portech MV-372). Στο διάγραμμα της Εικ. 8.1 απεικονίζεται η τοπολογία του τοπικού δικτύου στο οποίο σημειωτέον δεν είχε ληφθεί ουδεμία μέριμνα για την υλοποίηση κάποιας μορφής QoS.



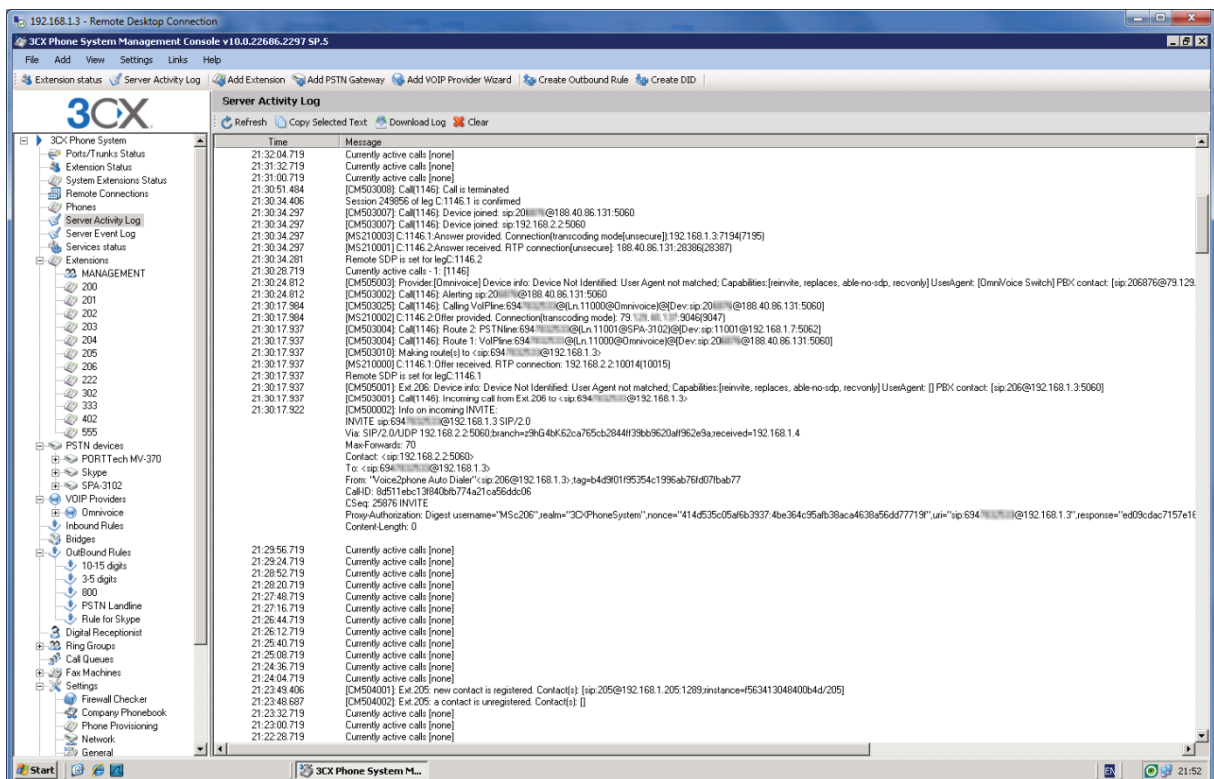
Εικ. 8.1: Διάγραμμα του προϋπάρχοντος δικτύου χωρίς QoS

8.1.1 Το τηλεφωνικό κέντρο 3CX

Το 3CX Phone System είναι ένα software IP PBX υλοποιημένο στην πλατφόρμα των Microsoft Windows που μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τα συμβατικά τηλεφωνικά κέντρα. Υποστηρίζει τα καθιερωμένα τηλέφωνα SIP (software και hardware), υπηρεσίες VoIP και τις παραδοσιακές τηλεφωνικές γραμμές του δημόσιου δικτύου τηλεφωνικής μεταγωγής (PSTN). Το τηλεφωνικό κέντρο 3CX VoIP/IP PBX είναι πολύ πιο οικονομικό από ένα παραδοσιακό τηλεφωνικό κέντρο και μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος των κλήσεων με τη χρήση ενός παρόχου υπηρεσιών VoIP. Η εκ του μακρόθεν ηλεκτρονική διαχείρισή του μέσω δικτύου διευκολύνει τη διαχείριση του τηλεφωνικού συστήματος. Το Τηλεφωνικό Κέντρο 3CX καταργεί

τις ξεχωριστές τηλεφωνικές καλωδιώσεις και επιτρέπει στους χρήστες να αλλάζουν γραφεία μεταφέροντας απλά την τηλεφωνική συσκευή τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Ολοκληρωμένο τηλεφωνικό κέντρο που παρέχει δυνατότητες μεταγωγής, δρομολόγησης και αναμονής κλήσεων
- Φθηνότερο κόστος αγοράς σε σύγκριση με ένα συμβατικό hardware PBX
- Ικανότητα κλιμάκωσης – Απεριόριστες επεκτάσεις και τηλεφωνικές γραμμές. Δεν απαιτούνται ιδιόκτητες μονάδες επέκτασης συγκεκριμένου κατασκευαστή
- Εύκολη διαχείριση του τηλεφωνικού συστήματος μέσω του δικτύου
- Ενοποιημένο σύστημα μηνυμάτων και λήψη φωνητικού ταχυδρομείου μέσω e-mail
- Αυτόματη υποδοχή κλήσεων (auto attendant) π.χ. 1 για πωλήσεις, 2 για υποστήριξη κλπ.)
- Μείωση των χρεώσεων υπεραστικών και εσωτερικών κλήσεων
- Χρήση διαθέσιμων κανονικών τηλεφωνικών συσκευών SIP
- Κατάργηση των καλωδιώσεων τηλεφώνων και ευκολότερη μετακίνηση μεταξύ διαφορετικών γραφείων
- Συνεργασία με το Microsoft Outlook και το Skype



Εικ. 8.2: Η οθόνη Server Activity Log του 3CX Phone System

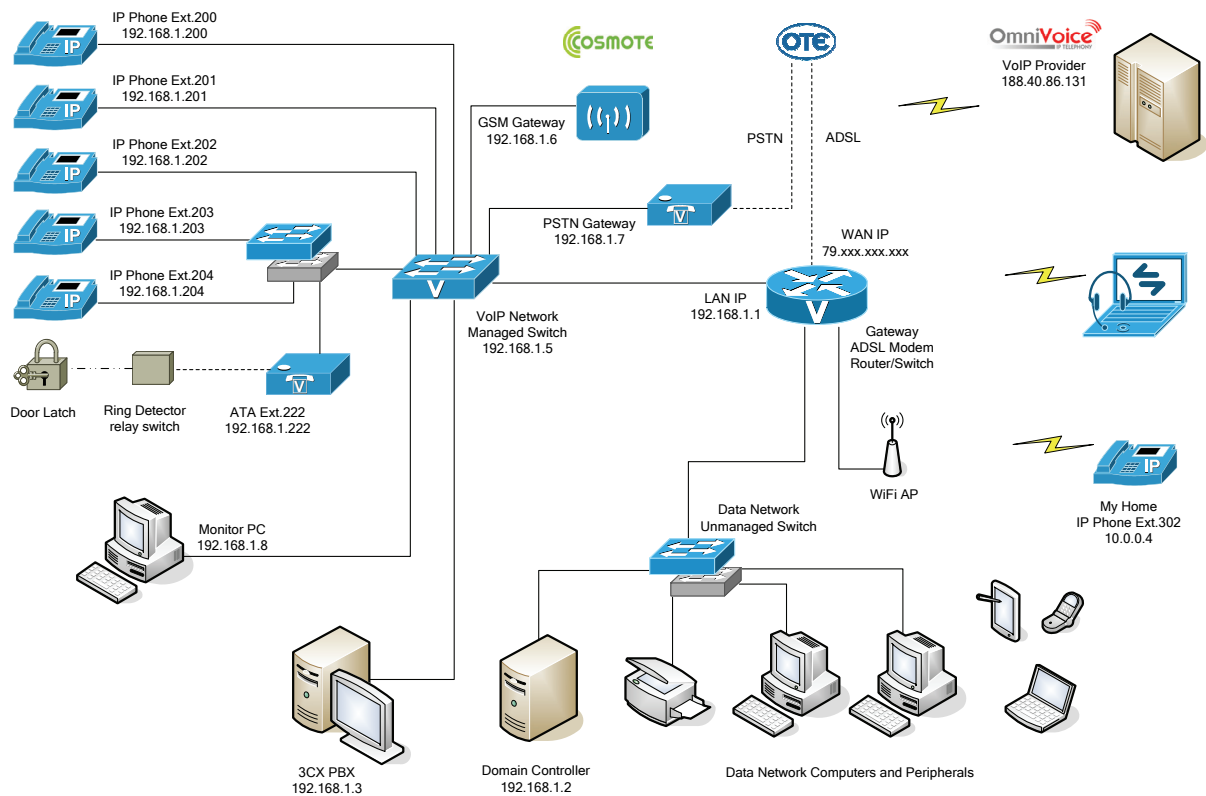
8.2 Βελτίωση τοπολογίας δικτύου VoIP

Το πρώτο βήμα για την βελτίωση της ποιότητας των τηλεφωνικών κλήσεων ήταν η εγκατάσταση ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Για το σκοπό αυτό εγκαταστάθηκε ένα νέο switch που προσέφερε QoS όπως Class of Service (CoS) και Differential Services (βλέπε παρ. 6.7)

Σε ένα τυπικό switch κάθε φυσική θύρα έχει μία ή περισσότερες ουρές πακέτων, τα οποία αναμένουν να μεταδοθούν στο συνδεδεμένο δίκτυο. Η υλοποίηση πολλαπλών ουρών ανά θύρα σε ένα switch προσφέρει τη δυνατότητα παροχής προτεραιότητας σε ορισμένα πακέτα έναντι κάποιων άλλων, σύμφωνα με κριτήρια που θέτει ο διαχειριστής του δικτύου. Όταν ένα πακέτο τεθεί στη ουρά μιας θύρας, αναμένοντας την αποστολή του, ο χρόνος κατά τον οποίο θα εξυπηρετηθεί εξαρτάται κατά πρώτον από το πώς έχει ρυθμιστεί η λειτουργία της ουράς και κατά δεύτερον από τον όγκο της κίνησης άλλων ουρών της ίδιας θύρας. Ενδεχομένως να χρειαστεί να παραμείνει στην ουρά και να αποσταλεί με καθυστέρηση σύμφωνα με την κρίση του λογισμικού. Όταν ο όγκος της κίνησης είναι μεγάλος, είναι πιθανό να πληρωθούν οι ουρές και να μην υπάρχει διαθέσιμος χώρος για τα νέα πακέτα που καταφθάνουν. Στην περίπτωση αυτή τα νέα πακέτα θα απορριφθούν από το switch.

Η ποιότητα υπηρεσίας είναι ένας τρόπος για την παροχή συνεπούς και προβλέψιμης παράδοσης δεδομένων διακρίνοντας τα πακέτα που έχουν αυστηρές χρονικές απαιτήσεις από άλλα που έχουν μεγαλύτερη ανοχή σε καθυστέρηση. Έτσι, σε ένα δίκτυο με δυνατότητες QoS τα πακέτα με τις αυστηρές χρονικές απαιτήσεις απολαμβάνουν ιδιαίτερης μεταχείρισης.

Ο σκοπός της εγκατάστασης υπηρεσίας QoS ήταν να δοθεί προτεραιότητα στην κίνηση των πακέτων VoIP του τοπικού δικτύου. Στο συγκεκριμένο switch συνδέθηκαν όλες οι συσκευές VoIP δηλαδή ο υπολογιστής του τηλεφωνικού κέντρου, οι τηλεφωνικές συσκευές, και οι πύλες PSTN και GSM. Το ίδιο το switch συνδέθηκε με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω του ενσωματωμένου switch στο Gateway Modem/Router. Για την ολοκλήρωση της υπηρεσίας QoS, εκτός της ρύθμισης του switch ώστε τα πακέτα VoIP να εξυπηρετούνται με προτεραιότητα, έπρεπε να ρυθμιστεί και η συσκευή Modem/Router/Switch. Καθώς η συσκευή αυτή προσέφερε μόνο υποτυπώδη υποστήριξη QoS, δόθηκε προτεραιότητα στην κίνηση της θύρας στην οποία συνδέθηκε το VoIP switch έναντι της άλλης θύρας στην οποία ήταν συνδεδεμένο το υφιστάμενο unmanaged switch του δικτύου των υπολογιστών.



Εικ. 8.3: Διάγραμμα του δικτύου μετά την εγκατάσταση QoS

Το νέο switch, εκτός της υποστήριξης QoS, είχε τη δυνατότητα port mirroring, δηλαδή την ικανότητα να προωθεί αντίγραφο της κίνησης των υπολοίπων θυρών σε μία συγκεκριμένη θύρα, με σκοπό την παρακολούθηση, καταγραφή και ανάλυση της κίνησης. Για την αξιολόγηση της ποιότητας των κλήσεων, ενεργοποιήθηκε η λειτουργία port mirroring και στη συγκεκριμένη θύρα συνδέθηκε ένας υπολογιστής (Monitor PC), ο οποίος, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, κατέγραφε την κίνηση δεδομένων, με σκοπό την ανάλυση διαφόρων παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα της φωνής.

Η τοπολογία του δικτύου όπως αυτή διαμορφώθηκε με την εγκατάσταση του νέου εξοπλισμού και της ποιότητας υπηρεσίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικ. 8.3.

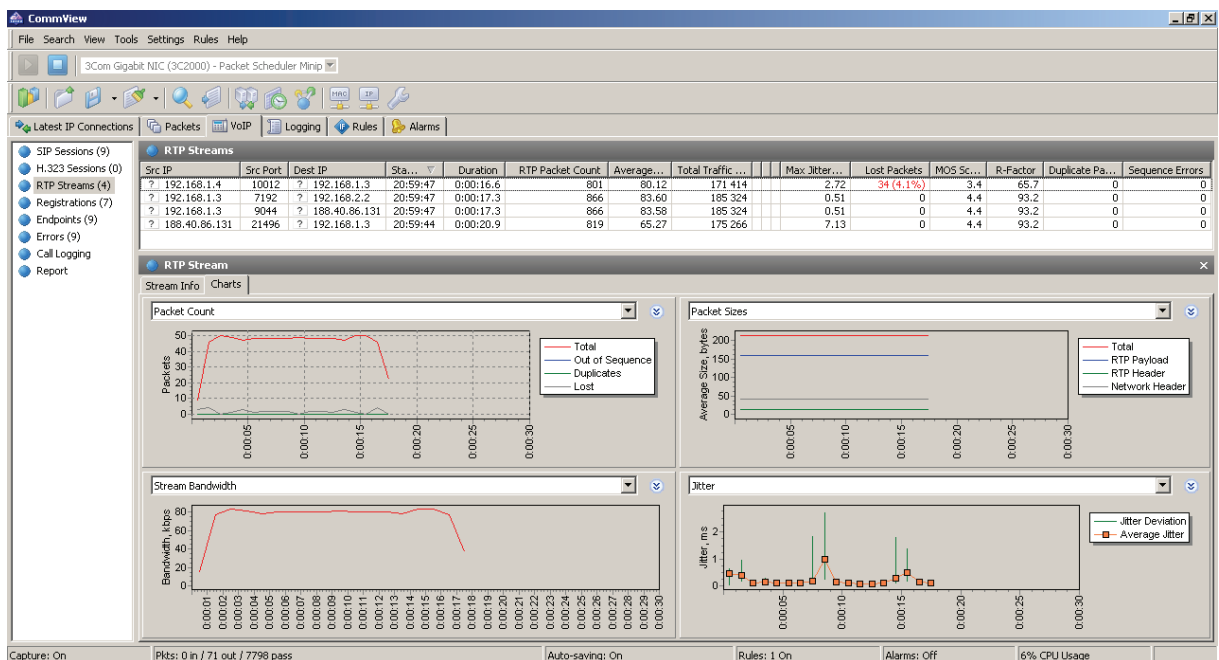
8.3 Μεθοδολογία μετρήσεων

Για την καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων που αφορούν στην ποιότητα των τηλεφωνικών κλήσεων του γραφείου έγινε δοκιμή και αξιολόγηση διαφόρων λογισμικών που προσφέρουν λειτουργίες του τύπου αυτού. Συγκεκριμένα εγκαταστάθηκαν στον υπολογιστή παρακολούθησης και καταγραφής (Monitor PC) και στη συνέχεια αξιολογήθηκαν οι

δυνατότητες των προγραμμάτων Wireshark, VQManager, CommView, Codima Toolbox και TraceBuster. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις το πρόγραμμα CommView της εταιρείας Tamosoft [90]. Ως εναλλακτική λύση επιλέχθηκε το πρόγραμμα VQManager της εταιρείας ZOHO Corp. [72]

8.3.1 Λογισμικό Commview

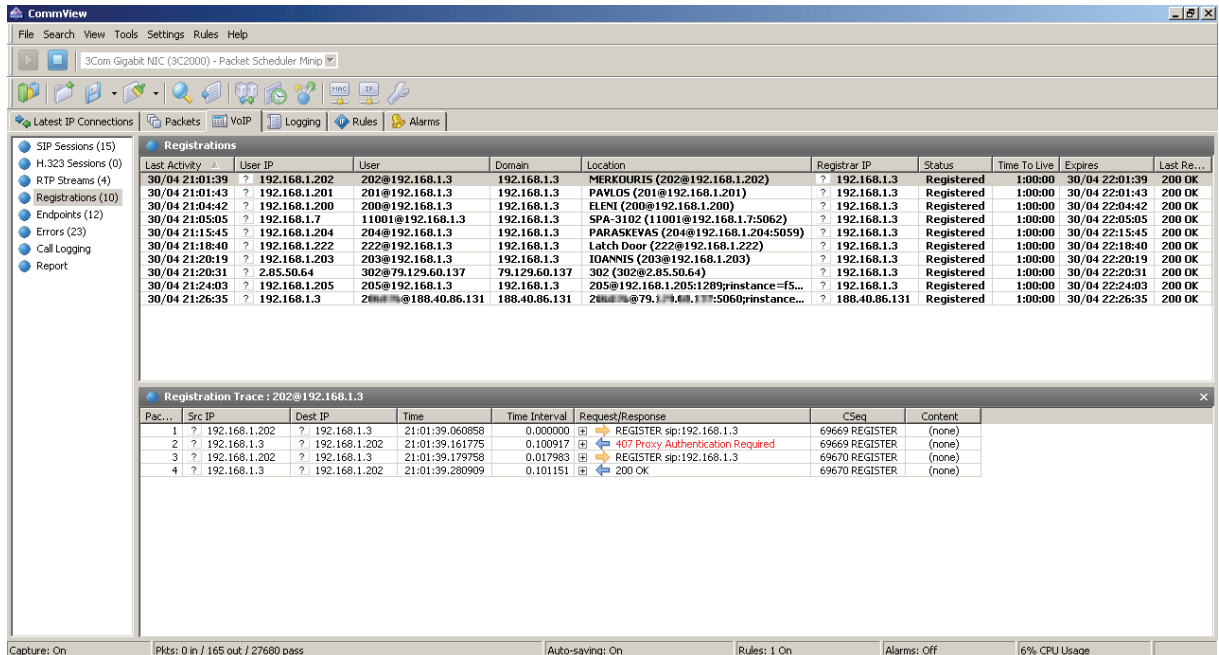
Το λογισμικό CommView είναι ένα πρόγραμμα παρακολούθησης και ανάλυσης δικτύων, που απευθύνεται κυρίως σε διαχειριστές τοπικών δικτύων αλλά και σε επαγγελματίες που ασχολούνται με θέματα ασφαλείας ή με την ανάπτυξη δικτυακών εφαρμογών και δίνει μια πλήρη εικόνα της κίνησης που ρέει μέσω ενός PC ή ενός τμήματος LAN. Η μεγάλη ευκολία χρήσης του ήταν ο πρώτος παράγων για την επιλογή του.



Εικ. 8.4: Χαρακτηριστική οθόνη του προγράμματος CommView

Η εφαρμογή καταγράφει κάθε διερχόμενο πακέτο και εμφανίζει σημαντικές πληροφορίες, όπως μια λίστα των πακέτων και των συνδέσεων του δικτύου, ζωτικής σημασίας στατιστικές, διαγράμματα κατανομής των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων κ.ά. Έχει τη δυνατότητα εξέτασης, αποθήκευσης και εξαγωγής ή εισαγωγής των πακέτων που συλλαμβάνονται και μπορεί να αποκωδικοποιήσει και να αναλύσει έως το κατώτερο στρώμα περί τα 70 από τα πιο διαδεδομένα δικτυακά πρωτόκολλα. Οι πληροφορίες μπορούν να αξιοποιηθούν για τον εντοπισμό προβλημάτων του δικτύου και την αντιμετώπιση προβλημάτων λογισμικού και

υλικού. Σημαντικό για την επιλογή του ήταν επίσης το γεγονός ότι το CommView μπορεί να τρέξει σε οποιοδήποτε σύστημα Windows 2000/XP/2003/Vista/2008/7.



Εικ. 8.5: Η οθόνη Registrations του CommView

8.3.2 Επιλογή κλήσεων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων

Στην αρχή επιχειρήθηκε η καταγραφή και ανάλυση κλήσεων μεταξύ εσωτερικών τηλεφώνων. Όμως, η ποιότητα των κλήσεων ήταν πάντα πολύ καλή λόγω της απουσίας από το τοπικό δίκτυο των παραμέτρων που επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα της φωνής. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, τέτοιες παράμετροι είναι η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων, η αλλοίωση των πακέτων λόγω θορύβου και η άφιξη πακέτων με διαφορετική σειρά από αυτή που απεστάλησαν. Για να υπάρξει υποβάθμιση της ποιότητας της φωνής σε ένα τοπικό δίκτυο πρέπει αυτό να είναι κορεσμένο. Όμως η κίνηση του δικτύου του γραφείου, λόγω του μικρού αριθμού hosts, ήταν πολύ μικρή και έτσι λήφθηκε η απόφαση να γίνει αξιολόγηση των πραγματικών κλήσεων του γραφείου και πιο συγκεκριμένα του σκέλους των κλήσεων VoIP που αφορούσε στη μετάδοση μέσω του Internet.

Κατά τις πρώτες δοκιμές έγινε φανερό ότι για κάθε κλήση καταγράφονταν 4 streams. Δύο μεταξύ παρόχου και τηλεφωνικού κέντρου και άλλα δύο μεταξύ τηλεφωνικού κέντρου και εσωτερικής τηλεφωνικής συσκευής. Αυτό οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας του 3CX IP PBX και συγκεκριμένα στην ενσωματωμένη υπηρεσία 3CX media server.

8.3.3 3CX Media Server

Η κύρια λειτουργία του τηλεφωνικού συστήματος 3CX είναι να συνδέσει 2 (ή περισσότερες) οντότητες με σκοπό την μεταφορά του ήχου μεταξύ τους. Ωστόσο, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παράδοση των streams ήχου μεταξύ των δύο άκρων:

- Bypass Mode (Direct)
- Proxy Mode (Pass-Through)
- Transcoding Mode (Bound to Media Server)

Τα audio streams μεταδίδονται από τον ενσωματωμένο 3CX Media Server ο οποίος μπορεί να αναγνωρίσει αν η κλήση είναι εσωτερική ή εξωτερική. Αυτό το επιτυγχάνει συγκρίνοντας την IP διεύθυνση και τη μάσκα υποδικτύου του τηλεφωνικού συστήματος 3CX με αυτές των δύο άκρων της συνδιάλεξης. Ο 3CX Media Server είναι μία από τις βασικές υπηρεσίες του τηλεφωνικού κέντρου 3CX Phone System.

Κατά τη λειτουργία Bypass Mode ο media server δεν λαμβάνει μέρος στην μεταφορά των RTP streams μεταξύ των δύο άκρων. Αμφότερα τα άκρα διαπραγματεύονται με το τηλεφωνικό κέντρο για να στείλουν το RTP stream απευθείας μεταξύ τους. Το mode αυτό ενεργοποιείται μόνο όταν και τα δύο άκρα είναι στο ίδιο υποδίκτυο όπως συμβαίνει στις κλήσεις μεταξύ των εσωτερικών τηλεφώνων του παραδείγματος:

Τηλέφωνο 1 (Ext. 200) IP Address: 192.168.1.200

Τηλέφωνο 2 (Ext. 201) IP Address: 192.168.1.201

Τηλεφωνικό κέντρο 3CX IP Address: 192.168.1.3

ή όταν τα δύο άκρα είναι εξωτερικές επεκτάσεις του τηλεφωνικού κέντρου, και το τηλεφωνικό κέντρο έχει λάβει τα σήματα από τα δύο άκρα μέσω της ίδιας διεπαφής:

Τηλέφωνο 1 (Ext. XXX) IP Address: 212.56.129.153

Τηλέφωνο 2 (Ext. YYY) IP Address: 194.158.237.54

Τηλεφωνικό κέντρο 3CX IP Address: 79.129.60.137 (STUN-Resolved)

Κατά τη λειτουργία Proxy Mode, ο διακομιστής PBX λειτουργεί ως δρομολογητής μέσω, αφήνοντας τα μέσα (RTP streams) ανέπαφα και αλλάζοντας μόνο τις πληροφορίες της

επικεφαλίδας για τους σκοπούς της δρομολόγησης. Το τηλεφωνικό κέντρο αποφασίζει να χρησιμοποιήσει Proxy Mode όταν τα δύο άκρα ανήκουν σε διαφορετικά υποδίκτυα, για παράδειγμα:

Τηλέφωνο 1 (Ext. XXX) IP Address: 192.168.1.200
 Τηλέφωνο 2 (Ext. YYY) IP Address: 172.16.130.8
 Τηλεφωνικό κέντρο 3CX IP Address: 192.168.1.3 (στην πραγματικότητα θα μπορούσε να είναι οποιαδήποτε καθώς τα τηλέφωνα έχουν διευθύνσεις σε διαφορετικά υποδίκτυα)

ή το ένα άκρο είναι εσωτερικό τηλέφωνο και το άλλο είναι κάποια εξωτερική γραμμή VoIP, για παράδειγμα:

Τηλέφωνο 1 (Ext. XXX) IP Address: 192.168.1.200
 Τηλέφωνο 2 IP Address: 188.40.86.131 (Omnivoice)
 Τηλεφωνικό κέντρο 3CX IP Address: 192.168.1.3 / 79.129.60.137 (STUN Resolved)

Σε αυτή τη λειτουργία και τα δύο μέρη πρέπει να έχουν τουλάχιστον ένα κοινό codec για να επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς ο Media Server λειτουργεί σαν δρομολογητής κίνησης RTP μεταξύ των δύο άκρων.

The screenshot shows the 'RTP Streams' window of a network analysis tool. The top table lists several RTP streams with columns for Src IP, Src Port, Dest IP, Duration, RTP Packet Count, Average, Total Traffic, Max Jitter, Lost Packets, MOS Score, R-Factor, Duplicate Packets, and Sequence. The second table provides a detailed view of a selected RTP stream, including Transport Information (Src IP, Dest IP, Protocol), Timing (Start Time, End Time, Duration), Quality (MOS Score, R-Factor), RTP Statistics (RTP Packet Count, Lost Packets, Duplicate Packets, Sequence Errors), and Network Utilization (Total Traffic, Network Transport, RTP Header Traffic, RTP Payload Traffic, Average Bandwidth).

Εικ. 8.6: RTP stream από 192.168.1.4 προς 3CX PBX: Χρήση G.711

Στη λειτουργία Transcoding, το τηλεφωνικό κέντρο 3CX λειτουργεί ως μεταφραστής των μέσων, αποκωδικοποιώντας το media stream που εισέρχεται από το ένα άκρο, και κωδικοποιώντας το

εκ νέου, σύμφωνα με τον codec που επιλέχθηκε κατά τη διαπραγμάτευση με το άλλο άκρο. Στην καταγεγραμμένη τηλεφωνική κλήση της Εικ. 8.6 βλέπουμε ότι για το ένα σκέλος της κλήσης χρησιμοποιήθηκε ο codec G.711 ενώ στην Εικ. 8.7 βλέπουμε ότι στο άλλο σκέλος της ίδιας κλήσης χρησιμοποιήθηκε ο iLBC.

The screenshot shows the 'RTP Streams' window with a table of stream statistics and a 'Stream Info' window showing a detailed packet list.

Src IP	Src Port	Dest IP	Sta...	Duration	RTP Packet Count	Average...	Total Traffic ...	Max Jitter...	Lost Packets	MOS Sc...	R-Factor	Duplicate Pa...	Sequence ...
? 192.168.1.4	10014	? 192.168.1.3	21:30:48	0:00:16.6	790	79.21	169 060	3.13	44 (5.3%)	3.1	60.4	0	0
? 192.168.1.3	7194	? 192.168.2.2	21:30:48	0:00:17.1	859	83.61	183 826	1.25	0	4.4	93.2	0	0
? 192.168.1.3	9046	? 188.40.86.131	21:30:48	0:00:17.1	574	27.10	59 696	1.12	0	4.1	81.2	0	0
? 188.40.86.131	28386	? 192.168.1.3	21:30:39	0:00:26.8	609	18.42	63 336	12.25	0	4.1	81.2	0	0

Packet...	Date	Time	Time Interval	Type	SSRC	Seq...	RTP Timest...	Payload Name	Payload...	Jitter (ms)	M...
1	30/04/2012	21:30:48.573918	0.000000	RTP	26200	24496	132446	iLBC	50	0.00	Set
2	30/04/2012	21:30:48.595837	0.021919	RTP	26200	24497	132686	iLBC	50	0.51	
3	30/04/2012	21:30:48.625095	0.029258	RTP	26200	24498	132926	iLBC	50	0.52	
4	30/04/2012	21:30:48.656328	0.031233	RTP	26200	24499	133166	iLBC	50	0.56	
5	30/04/2012	21:30:48.685657	0.029329	RTP	26200	24500	133406	iLBC	50	0.57	
6	30/04/2012	21:30:48.716931	0.031274	RTP	26200	24501	133646	iLBC	50	0.62	
7	30/04/2012	21:30:48.745258	0.028327	RTP	26200	24502	133886	iLBC	50	0.68	
8	30/04/2012	21:30:48.776508	0.031250	RTP	26200	24503	134126	iLBC	50	0.72	
9	30/04/2012	21:30:48.805804	0.029296	RTP	26200	24504	134366	iLBC	50	0.72	
10	30/04/2012	21:30:48.837048	0.031244	RTP	26200	24505	134606	iLBC	50	0.75	
11	30/04/2012	21:30:48.865386	0.028338	RTP	26200	24506	134846	iLBC	50	0.81	
12	30/04/2012	21:30:48.896604	0.031218	RTP	26200	24507	135086	iLBC	50	0.83	
13	30/04/2012	21:30:48.925915	0.029311	RTP	26200	24508	135326	iLBC	50	0.82	
14	30/04/2012	21:30:48.956191	0.030276	RTP	26200	24509	135566	iLBC	50	0.79	
15	30/04/2012	21:30:48.985513	0.029322	RTP	26200	24510	135806	iLBC	50	0.78	
16	30/04/2012	21:30:49.016745	0.031232	RTP	26200	24511	136046	iLBC	50	0.81	
17	30/04/2012	21:30:49.046082	0.029337	RTP	26200	24512	136286	iLBC	50	0.80	
18	30/04/2012	21:30:49.076296	0.030214	RTP	26200	24513	136526	iLBC	50	0.76	
19	30/04/2012	21:30:49.105606	0.029310	RTP	26200	24514	136766	iLBC	50	0.76	
20	30/04/2012	21:30:49.136842	0.031236	RTP	26200	24515	137006	iLBC	50	0.79	
21	30/04/2012	21:30:49.165196	0.028354	RTP	26200	24516	137246	iLBC	50	0.84	
22	30/04/2012	21:30:49.196431	0.031235	RTP	26200	24517	137486	iLBC	50	0.87	
23	30/04/2012	21:30:49.225747	0.029316	RTP	26200	24518	137726	iLBC	50	0.86	
24	30/04/2012	21:30:49.255001	0.031254	RTP	26200	24519	137966	iLBC	50	0.88	
25	30/04/2012	21:30:49.285362	0.028361	RTP	26200	24520	138206	iLBC	50	0.93	

Εικ. 8.7: RTP stream από 3CX PBX προς Omnivoice: Χρήση iLBC

Το τηλεφωνικό κέντρο αποφασίζει να χρησιμοποιήσετε τη λειτουργία Transcoding όταν στο ένα από τα δύο άκρα έχει επιλεγεί η παράμετρος "PBX delivers audio" ή το ένα από τα δύο άκρα δεν υποστηρίζει re-INVITES.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για τις εξωτερικές του γραφείου κλήσεις, το τηλεφωνικό κέντρο λειτουργεί είτε σε Proxy Mode είτε σε Transcoding Mode. Και στις δύο περιπτώσεις μεσολαβεί στην επικοινωνία μεταξύ των δύο άκρων και για το λόγο αυτό καταγράφονται δύο streams ανά κατεύθυνση.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ο μηχανισμός transcoding αυξάνει τη συνολική καθυστέρηση προσθέτοντας υπολογιστική καθυστέρηση (computational delay). Η επιβάρυνση εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του κάθε codec.

8.3.4 Επιλογή Codecs

Στον Πίν. 8.1 αναφέρονται οι codecs που υποστηρίζονται από τον εξοπλισμό του γραφείου. Καθώς είχε αποφασιστεί να γίνει ανάλυση των RTP streams μεταξύ OmniVoice και 3CX IP PBX, η

δυνατότητα χρήσης codec περιορίστηκε στους έξι κοινούς μεταξύ τους: G.711 μ-law, G.711 a-law, G.722, GSM, Speex και iLBC.

	OmniVoice	3CX IP PBX	IP Phone SPA941
G.711 u-law	✓	✓	✓
G.711 a-law	✓	✓	✓
G.722	✓	✓	
GSM	✓	✓	
Speex	✓	✓	
iLBC	✓	✓	
G.729	✓	✓ ⁶	✓
Siren7	✓		
Siren14	✓		
G.726	✓		✓
G.723			✓
H261, H263, H263p, H264	✓		

Πίν. 8.1: Codecs υποστηριζόμενοι από τον πάροχο VoIP, το τηλεφωνικό κέντρο 3CX και τις τηλεφωνικές συσκευές της Linksys

Για τη χρήση ενός συγκεκριμένου codec απαιτείται η ρύθμιση του τηλεφωνικού κέντρου του γραφείου αλλά και του τηλεφωνικού κέντρου της OmniVoice μέσω του Web Interface που αυτή παρέχει.

8.3.5 Πλήθος και διάρκεια μετρήσεων

Οι οριστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα από 03.02.2012 έως 05.03.2012. Είχαν δηλαδή διάρκεια ενός μήνα περίπου. Από το σύνολο των καταγεγραμμένων RTP streams απομονώθηκαν για ανάλυση 1324 streams που αφορούσαν στο σκέλος των κλήσεων VoIP μεταξύ 3CX IP PBX και OmniVoice. Δεδομένου ότι σε κάθε τηλεφωνική συνδιάλεξη υπάρχουν δύο κατευθύνσεις, δηλαδή δύο streams, η ανάλυση αφορούσε σε ένα πλήθος 662 ολοκληρωμένων τηλεφωνικών συνδιαλέξεων. Αυτό αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε 110 κλήσεις ανά codec.

⁶ Μη διαθέσιμος codec στην εγκατεστημένη στο γραφείο έκδοση του τηλεφωνικού κέντρου.

8.3.6 Καταγραφείσες παράμετροι ποιότητας

Για κάθε πραγματοποιηθείσα κλήση καταγράφηκαν από το εγκατεστημένο στο Monitor PC λογισμικό τα παρακάτω δεδομένα.

- Source IP
- Source Port
- Destination IP
- Destination Port
- Protocol
- Start Time
- End Time
- Duration [s]
- RTP Packet Count
- Average Bandwidth [kbps]
- Total traffic [bytes]
- Max Jitter [ms]
- MOS
- R-factor
- Network Transport Traffic [bytes]
- RTP Header Traffic [bytes]
- RTP Payload Traffic [bytes]
- Lost Packets
- Duplicate Packets
- Sequence Errors

8.3.7 Διαδικασία ανάλυσης δεδομένων

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων για κάθε διαφορετικό codec, τα καταγεγραμμένα δεδομένα εξάγονταν από το πρόγραμμα σε αρχεία κειμένου. Τα αρχεία αυτά περιείχαν δεδομένα που αφορούσαν σε όλα τα RTP streams που διαχειριζόταν το τηλεφωνικό κέντρο. Εκτός των streams από και προς τον VoIP provider, υπήρχαν τα streams μεταξύ του τηλεφωνικού κέντρου και των τηλεφωνικών συσκευών, αλλά και τα streams των κλήσεων μέσω της πύλης PSTN.

Η κύρια χρήση της PSTN γραμμής του ΟΤΕ είναι για αποστολή και λήψη fax αλλά παράλληλα είναι συνδεδεμένη και στο τηλεφωνικό κέντρο για τη δρομολόγηση κλήσεων σε τριψήφιους, τετραψήφιους και πενταψήφιους αριθμούς που δεν είναι δυνατή μέσω της τηλεφωνίας VoIP. Λειτουργεί επίσης και σαν back-up route δρομολόγησης όλων των κλήσεων σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας της υπηρεσίας VoIP. Η γραμμή αυτή προϋπήρχε και ήταν δηλωμένη σαν τηλέφωνο επικοινωνίας της εταιρείας πριν την συνδρομή με τον πάροχο υπηρεσιών τηλεφωνίας VoIP OmniVoice. Έτσι, χρησιμοποιείται ακόμη από μερικούς συνεργάτες και πελάτες της εταιρείας.

Η πύλη GSM που φαίνεται στις εικόνες των διαγραμμάτων του δικτύου ήταν ανενεργή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Παλαιότερα οι κλήσεις προς κινητά τηλέφωνα δρομολογούνταν μέσω αυτής αλλά λόγω της μεγάλης καθυστέρησης που παρουσίαζε στην υλοποίηση των κλήσεων είχε εγκαταλειφθεί η χρήση της. Έτσι, οι κλήσεις προς και από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δρομολογούνται και αυτές μέσω της σύνδεσης VoIP.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων όλα τα δεδομένα από τα αρχεία κειμένου εισήχθησαν σε μία απλή βάση δεδομένων για το φιλτράρισμα και το «καθάρισμά» τους. Στη συνέχεια τα καθαρά δεδομένα εξήχθησαν από τη βάση και εισήχθησαν στο Excel για την ανάλυσή τους, την στατιστική επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσω διαγραμμάτων.

8.3.8 Άλλες προληπτικές ενέργειες

Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων είχε απενεργοποιηθεί η λειτουργία ενημερώσεων του λειτουργικού συστήματος Microsoft Server 2003, όπως επίσης και των ενημερώσεων του λογισμικού 3CX Phone System. Οι μόνες ενημερώσεις που πραγματοποιούνταν ήταν αυτές του antivirus λογισμικού. Η πρακτική αυτή αποσκοπούσε αφ' ενός στην αποφυγή τυχόν προβλημάτων λόγω κάποιας μη συμβατής με το σύστημα ενημέρωσης και αφ' ετέρου στην λήψη του συνόλου των μετρήσεων υπό τις ίδιες συνθήκες. Η ίδια επίσης πρακτική ακολουθήθηκε και για το Monitor PC.

Σε κάθε αλλαγή codec γινόταν επανεκκίνηση των δύο υπολογιστών, του τηλεφωνικού κέντρου και του Monitor PC, καθαρά για προληπτικούς λόγους. Σκοπός των επανεκκινήσεων ήταν η απελευθέρωση των πόρων των λειτουργικών συστημάτων έτσι ώστε να αποφευχθούν μετρήσεις με τα λειτουργικά συστήματα των δύο υπολογιστών βεβαρυμμένα λόγω ενδεχομένως μειωμένων πόρων.

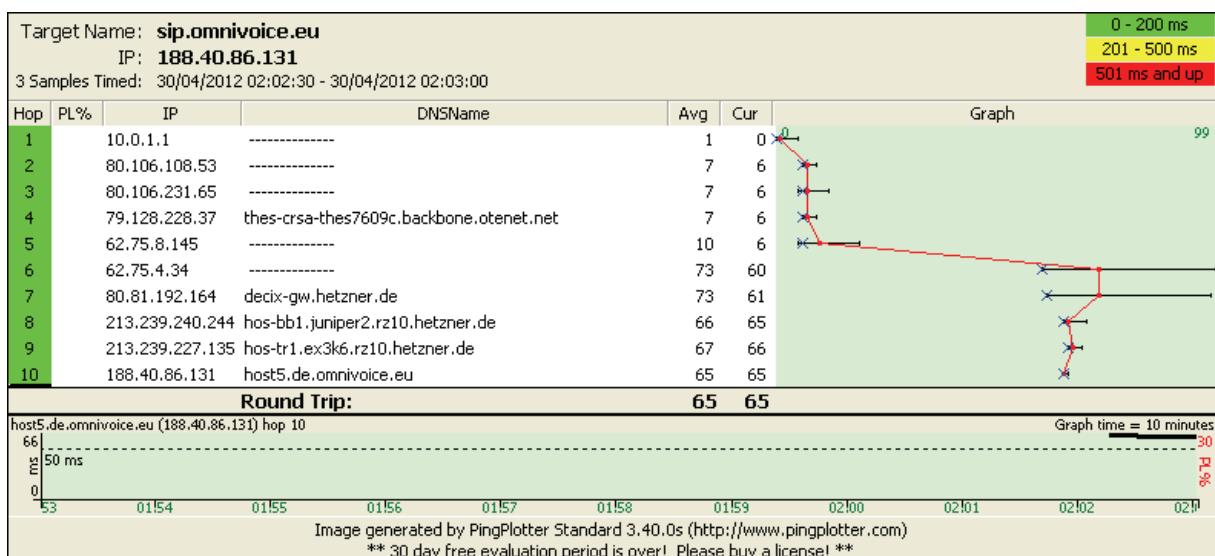
8.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά την ανάλυση των παραμέτρων που καταγράφηκαν. Στα περισσότερα διαγράμματα της παρούσας ενότητας γίνεται σύγκριση των δύο αντίθετης κατεύθυνσης RTP streams μεταξύ του 3CX IP PBX και του παρόχου της υπηρεσίας VoIP.

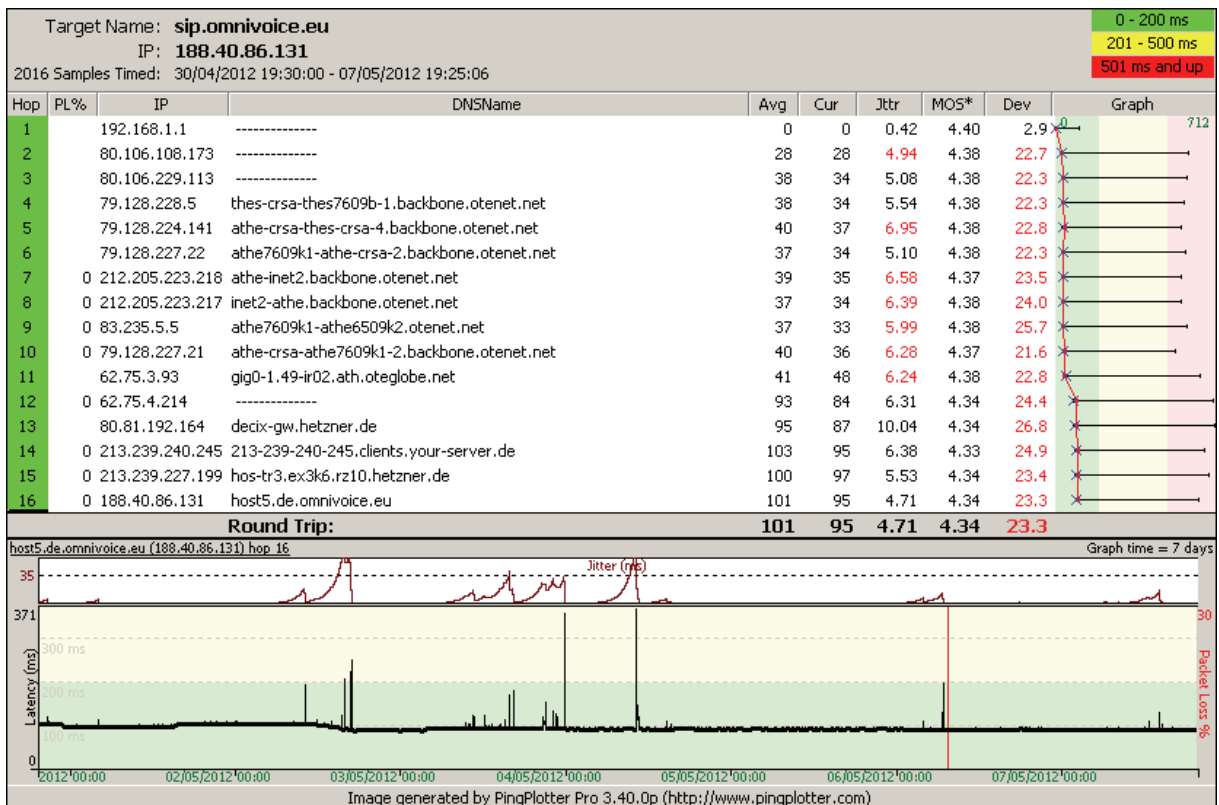
8.4.1 Δρομολόγηση και καθυστέρηση των κλήσεων

Το τηλεφωνικό κέντρο της OmniVoice είναι εγκατεστημένο σε data center στη Γερμανία. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μετρήθηκε αρκετές φορές το RTT προς τον host sip.omnivoice.eu με IP address 188.40.86.131. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το RTT ήταν σταθερό στα 96-97 ms.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η μέτρηση του RTT από τον υπολογιστή της οικίας μου που είναι συνδεδεμένος στο Internet μέσω του ίδιου ADSL provider (OTEnet) και βρίσκεται στη Θεσσαλονίκη, στην ίδια πόλη δηλαδή με το γραφείο που έγιναν οι μετρήσεις, έδειξε ότι η καθυστέρηση είναι περίπου η μισή λόγω διαφορετικής δρομολόγησης στο δίκτυο του ΟΤΕ. Από το γραφείο απαιτούνται 6 επί πλέον hops για να φθάσει ένα πακέτο στον server της OmniVoice! Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στον τρόπο που δρομολογείται το υποδίκτυο των στατικών διευθύνσεων (γραφείο) και αυτό των δυναμικών διευθύνσεων (οικία). Οι μετρήσεις παρουσιάζονται με γραφικό τρόπο στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 8.8 και Εικ. 8.9) και το θέμα βρίσκεται υπό διερεύνηση.



Εικ. 8.8: Μέτρηση RTT προς OmniVoice από την οικία μου



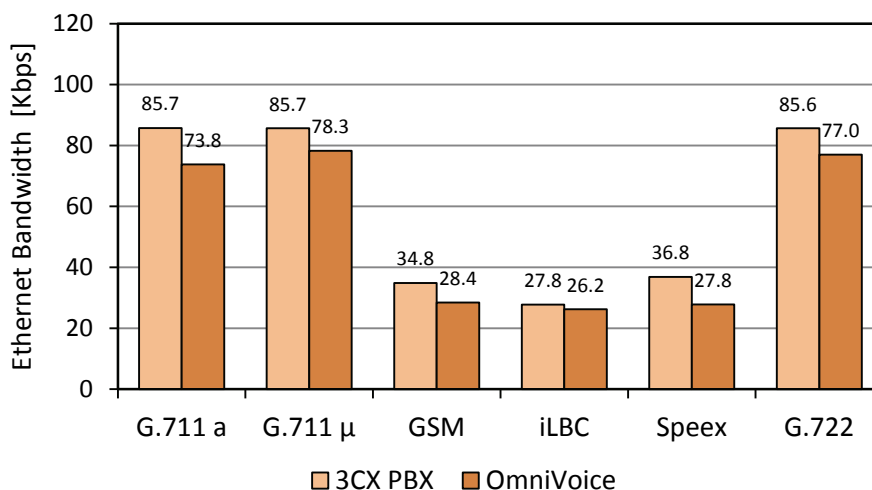
Εικ. 8.9: Μέτρηση RTT προς OmniVoice διάρκειας μιας εβδομάδας ανά 5 min

8.4.2 Απαιτήσεις σε bandwidth

Για τον υπολογισμό του Ethernet bandwidth χρησιμοποιήθηκε ο λόγος του αθροίσματος των bytes του συνόλου των κλήσεων προς το άθροισμα του συνολικού χρόνου των κλήσεων προς κάθε κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των streams που προέρχονταν από το τηλεφωνικό κέντρο είναι ταυτόσημα με τα θεωρητικά του κάθε codec που αναφέρονται στον Πίν. 6.3. Το bandwidth όμως των streams από την OmniVoice είναι μικρότερο όπως φαίνεται στο συγκριτικό ραβδόγραμμα της Εικ. 8.10. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία VAD (βλ. 6.5.9), καθώς μεγάλο ποσοστό των κλήσεων ήταν προς και από συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Η λειτουργία VAD αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της κινητής τηλεφωνίας GSM για εξοικονόμηση αφ' ενός bandwidth και αφ' ετέρου ενέργειας στις συσκευές της κινητής τηλεφωνίας. Αντίθετα, οι τηλεφωνικές συσκευές του γραφείου είχαν απενεργοποιημένη τη λειτουργία VAD (πεδίο Silence Supp Enable: No των συσκευών Linksys SPA941).

Από τους 6 codec που δοκιμάστηκαν οι G.711 a-law, G.711 μ-law και G.722 αποδείχθηκαν πολύ πιο απαιτητικοί σε bandwidth από τους GSM, iLBC και Speex. Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης μπορεί να μειωθούν στο 1/3 αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ο codec iLBC αντί των G.711 ή

G.722. Όμως, θα υπάρχουν επιπτώσεις στην ποιότητα του ήχου, καθώς η μείωση του bandwidth επιτυγχάνεται με τη μείωση του bit rate. Οι G.711 και G.722 κωδικοποιούν σε 64 Kbps bit rate ενώ η χρησιμοποιηθείσα version του iLBC σε μόνο 13.33 Kbps.



Εικ. 8.10: Ethernet bandwidth

8.4.3 Λόγος επιβάρυνσης προς ωφέλιμο φορτίο.

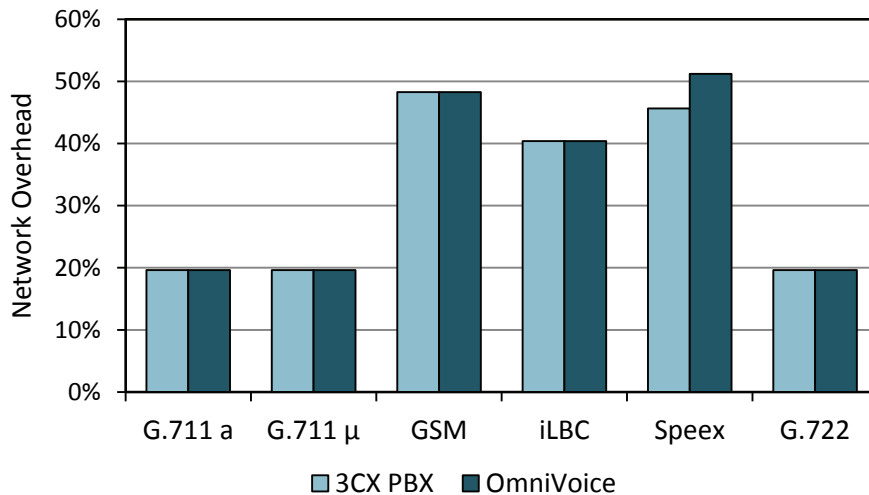
Το κάθε πακέτο, εκτός του ωφέλιμου φορτίου που περιέχει – στην προκειμένη περίπτωση τα κωδικοποιημένα δεδομένα της φωνής – περιλαμβάνει και τις επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται. Στις τηλεφωνικές κλήσεις που καταγράφηκαν, αυτά ήταν τα RTP, UDP και IP. Τα τυπικά μεγέθη επικεφαλίδων είναι 12 bytes για το πρωτόκολλο RTP, 8 bytes για το πρωτόκολλο UDP και 20 bytes για το πρωτόκολλο IP v.4. Δηλαδή, η συνολική επιβάρυνση λόγω των επικεφαλίδων ανέρχεται στα 40 bytes σε κάθε πακέτο (Πίν. 8.2).

IP v.4 header	20 bytes
UDP header	8 bytes
RTP header	12 bytes
RTP Payload	160 bytes
Σύνολο	200 bytes

Πίν. 8.2: Μέγεθος IP πακέτου G.711

Ο λόγος του ωφέλιμου φορτίου (payload) προς την επιβάρυνση (overhead) είναι πολύ σημαντικός. Ειδικά στα πακέτα φωνής που είναι μικρού μεγέθους, συνήθως 20 έως 160 bytes

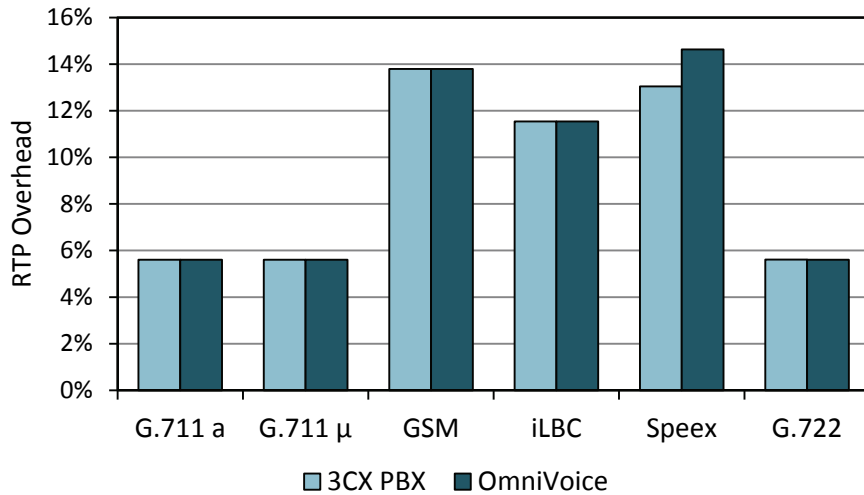
payload, ο λόγος είναι πολύ μικρός, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση του δικτύου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχουν αναπτυχθεί τεχνικές συμπίεσης των επικεφαλίδων όπως ο μηχανισμός CRTP (Compressed Real-Time Protocol) που προδιαγράφεται στο RFC 2508 [26] και ο ROHC (Robust Header Compression) που προδιαγράφεται στο RFC 3095 [28]. Με τη συμπίεση μπορεί να επιτευχθεί μείωση του μεγέθους των επικεφαλίδων από τα 40 bytes στα 2 bytes [78].



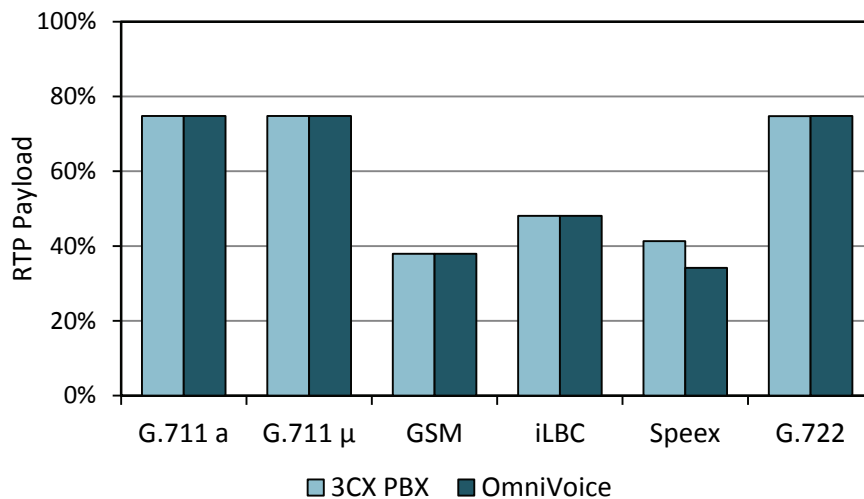
Εικ. 8.11: Κατανάλωση bandwidth επικεφαλίδων πρωτοκόλλων UDP και IP

Στις Εικ. 8.11 και Εικ. 8.12 φαίνεται ότι οι κωδικοποιητές G.711 (a-law και μ-law) και G.722 έχουν μια επιβάρυνση από τις επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων της τάξης του 25% που είναι πολύ μικρότερη από αυτή του πρωτοκόλλου iLBC (52%) και των πρωτοκόλλων GSM και Speex (62%). Αντίστοιχα, το ωφέλιμο φορτίο ως ποσοστό του bandwidth για τα πρωτόκολλα G.711 και G.722 είναι περίπου 75% ενώ για το iLBC είναι 48% και για τα GSM και Speex μόνο 38%.

Για τον codec Speex παρατηρείται μια διαφοροποίηση του λόγου overhead/payload μεταξύ των δύο streams ενώ για τους υπόλοιπους δεν καταγράφηκε καμία διαφορά. Προφανώς το 3CX IP PBX και η OmniVoice χρησιμοποιούν διαφορετικό μέγεθος payload. Η ανάλυση των πακέτων έδειξε ότι τα προερχόμενα από το τηλεφωνικό κέντρο 3CX πακέτα φέρουν 38 bytes ωφέλιμο φορτίο ενώ τα προερχόμενα από την OmniVoice μόνο 28 bytes.

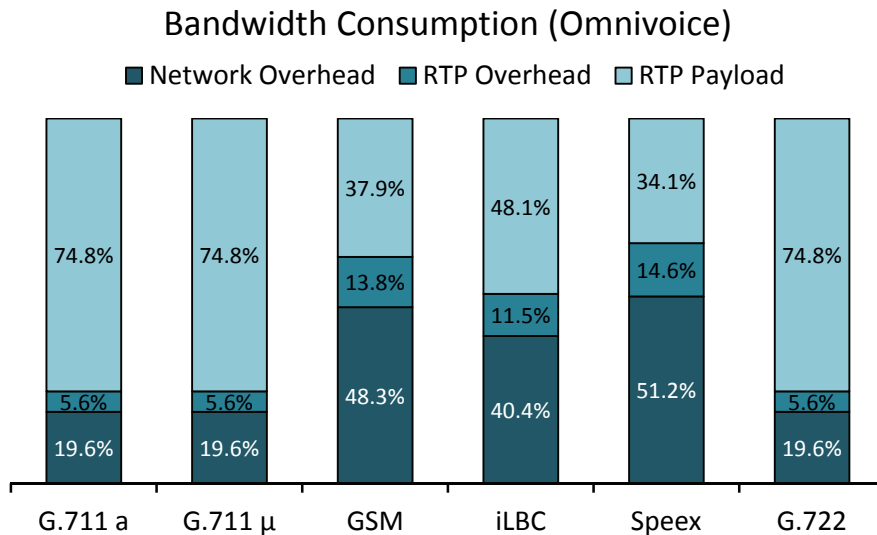


Εικ. 8.12: Κατανάλωση bandwidth της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου RTP

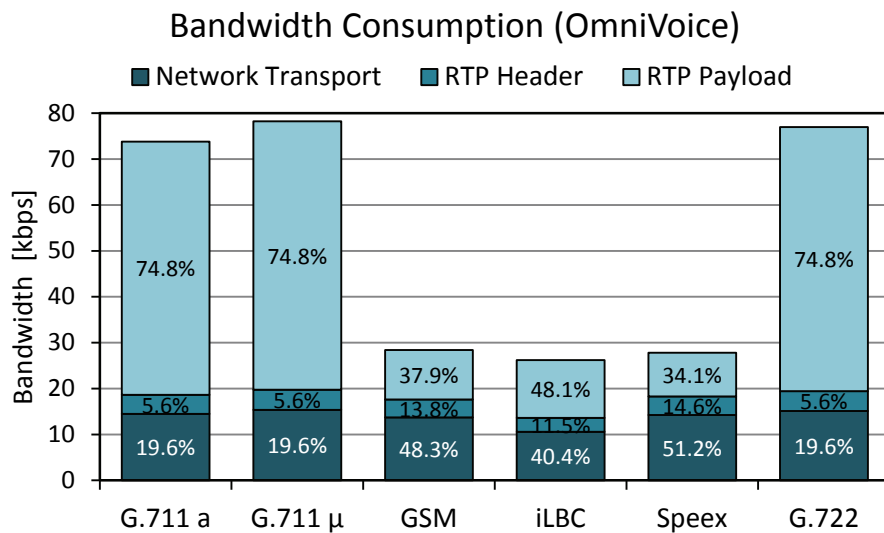


Εικ. 8.13: Κατανάλωση bandwidth από το ωφέλιμο φορτίο του πρωτοκόλλου RTP

Οι σχέσεις των ποσοστών επιβάρυνσης των επικεφαλίδων και του ποσοστού του ωφέλιμου φορτίου φαίνονται ακόμη καλύτερα στα σύνθετα ραβδογράμματα των εικόνων που ακολουθούν (Εικ. 8.14 και Εικ. 8.15).



Εικ. 8.14: Σύγκριση ποσοτών overhead και payload για κάθε codec



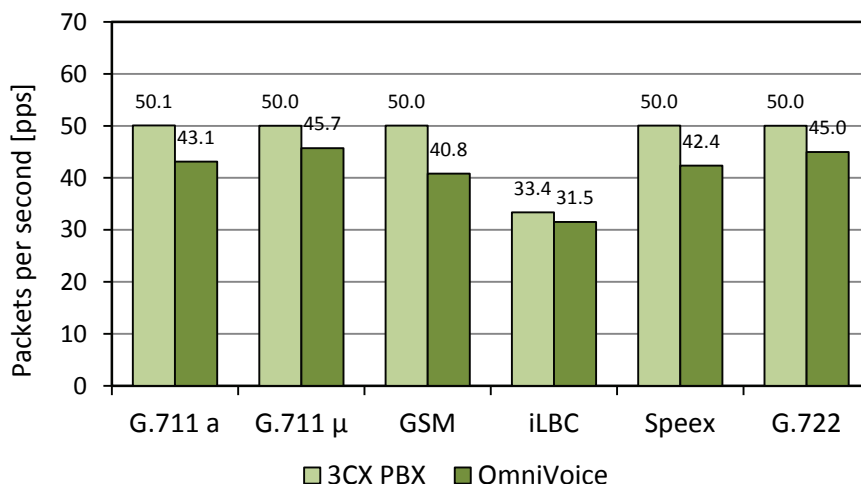
Εικ. 8.15: Απαιτούμενο bandwidth και ποσοστά overhead και payload

8.4.4 Ρυθμός μετάδοσης πακέτων

Ο ρυθμός μετάδοσης πακέτων rps (packets per second) εκφράζει τον αριθμό των πακέτων που πρέπει να μεταδίδονται κάθε δευτερόλεπτο για να καλύπτουν το bit rate του κάθε codec. Για παράδειγμα, ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης πακέτων για μία τηλεφωνική κλήση που χρησιμοποιεί τον codec G.711 με ωφέλιμο φορτίο κάθε πακέτου 160 bytes (1280 bits) κωδικοποιημένης φωνής είναι: $64 \text{ Kbps} / 1280 \text{ bits ανά πακέτο} = 50 \text{ rps}$. Αντίστοιχα, ο ρυθμός

μετάδοσης για τον codec iLBC που έχει ωφέλιμο φορτίο 50 bytes και bit rate 13.33 Kbps (βλ. Πίν. 6.3) πρέπει να είναι: $13.33 \text{ Kbps} / 400 \text{ bits ανά πακέτο} = 33.3 \text{ pps}$.

Για κάθε κλήση καταγράφηκε η διάρκειά της και ο συνολικός αριθμός πακέτων RTP αυτής. Για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης πακέτων κάθε codec χρησιμοποιήθηκε το άθροισμα των πακέτων των κλήσεων και η συνολική διάρκειά τους. Οι υπολογισθέντες ρυθμοί μετάδοσης για τα εξερχόμενα streams ταυτίζονται απολύτως με τους θεωρητικά απαιτούμενους ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης των εισερχόμενων streams υπολείπονται των θεωρητικών. Η διαφορά φαίνεται στο ραβδόγραμμα της Εικ. 8.16. και οφείλεται στον ίδιο λόγο με την παρατηρηθείσα διαφορά στο bandwidth μεταξύ των εισερχομένων και των εξερχομένων stream, δηλαδή στην λειτουργία ανίχνευσης φωνητικής δραστηριότητας VAD.

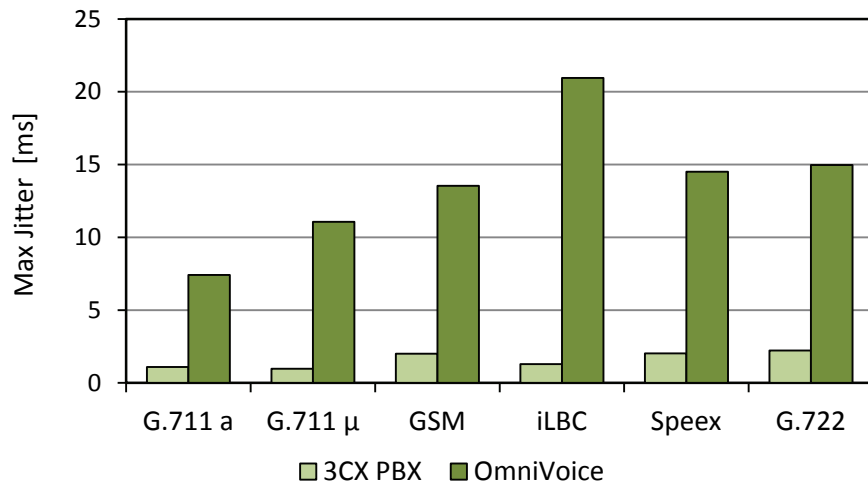


Εικ. 8.16: Ρυθμός μετάδοσης πακέτων

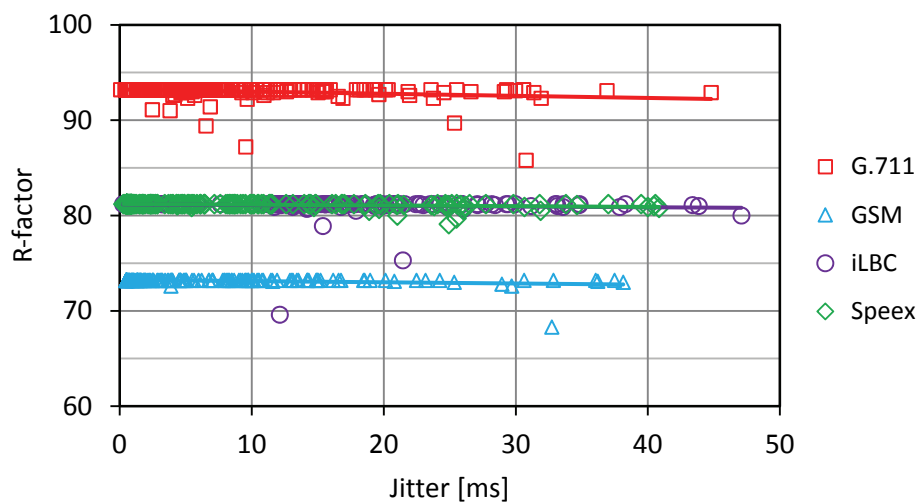
8.4.5 Μέτρηση διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter)

Η διακύμανση της καθυστέρησης ήταν σχετικά χαμηλή καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Για τα εξερχόμενα streams το μέσο μέγιστο jitter ήταν κάτω από 2.3 ms για όλους τους codec ενώ για τα εισερχόμενα ήταν περίπου 7 – 21 ms (Εικ. 8.17). Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το jitter των εξερχομένων από το τηλεφωνικό κέντρο streams αφορά στο τοπικό δίκτυο, καθώς αυτά καταγράφονταν με την έξοδό τους από τον 3CX server, ενώ το jitter των εισερχομένων streams αφορά στο Internet.

Στο διάγραμμα της Εικ. 8.18 επιχειρήθηκε η καταγραφή των επιπτώσεων του jitter στην ποιότητα των κλήσεων. Όμως, οι χαμηλές τιμές jitter, οι οποίες στην μεγάλη πλειονότητά τους ήταν μικρότερες των 30 ms, δεν θα μπορούσαν να έχουν επιπτώσεις στην ποιότητα των κλήσεων ανεξαρτήτως του χρησιμοποιηθέντος codec.



Εικ. 8.17: Μέσος όρος μέγιστου jitter των κλήσεων για κάθε codec

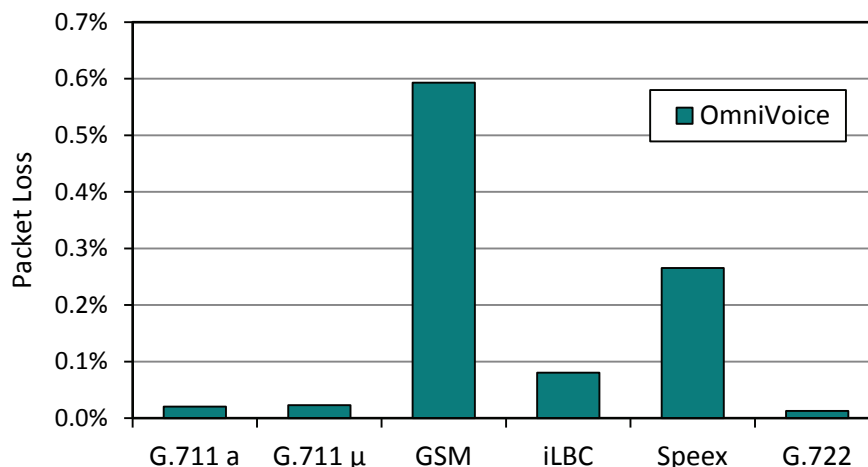


Εικ. 8.18: Ανοχή όλων των codecs σε διακύμανση καθυστέρησης < 50 ms

8.4.6 Επίδραση των απωλειών πακέτων στην ποιότητα

Είναι δεδομένο ότι η απώλεια πακέτων έχει επίδραση στην ποιότητα της φωνής ανεξαρτήτως του codec που χρησιμοποιείται. Μεταξύ των παραμέτρων που καταγράφηκαν για κάθε κλήση ήταν ο αριθμός των απολεσθέντων πακέτων και ο συνολικός αριθμός των πακέτων που

παρελήφθησαν. Από τα στοιχεία αυτά υπολογίστηκε το ποσοστό απωλειών για κάθε κλήση και η μέση τιμή απωλειών για κάθε codec που παρουσιάζεται στην Εικ. 8.19. Το διάγραμμα αφορά μόνο στα προερχόμενα από την OmniVoice streams γιατί στα εξερχόμενα από το 3CX IP PBC δεν καταγράφηκε απώλεια κανενός πακέτου.

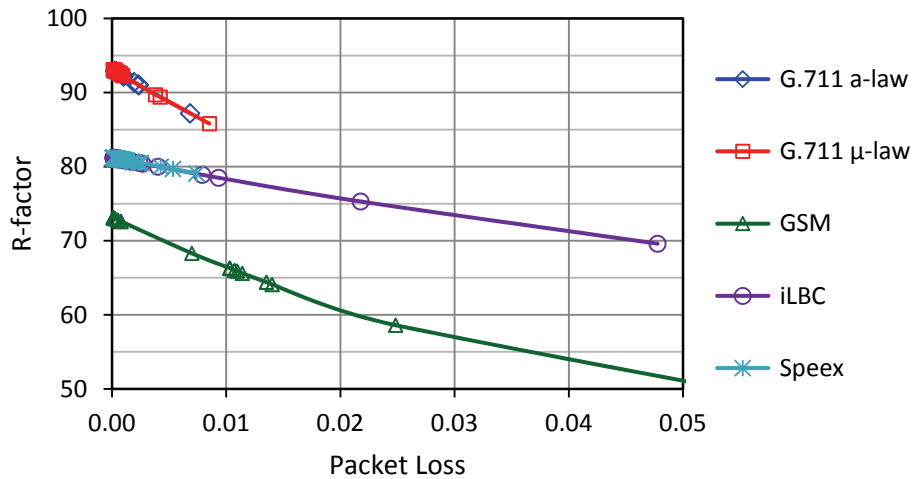


Εικ. 8.19: Απώλειες εισερχόμενων πακέτων

Το διάγραμμα αντικατοπτρίζει τις επικρατούσες συνθήκες στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το μεγάλο ποσοστό απωλειών κατά την περίοδο που δοκιμαζόταν ο GSM οφείλεται στις συνθήκες μιας ημέρας από τις τέσσερις που διήρκησαν οι μετρήσεις. Το μέσο ποσοστό απωλειών ανά ημέρα ήταν: 0%, 1.844%, 0.0005% και 0.004%

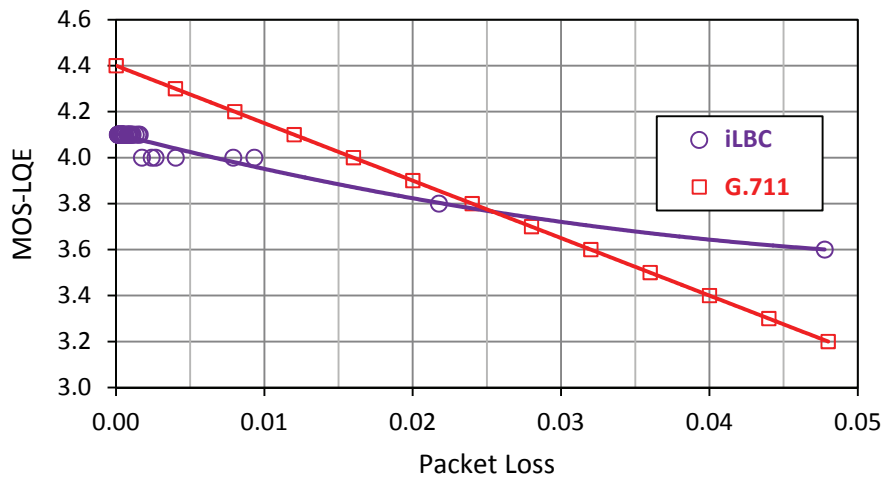
Μέσω του διαγράμματος της Εικ. 8.20, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το σύνολο των κλήσεων, έγινε προσπάθεια σύγκρισης της επίδρασής του ποσοστού των απωλειών στο Mean Opinion Score για κάθε codec.

Δυστυχώς για την πληρότητα του διαγράμματος – αλλά ευτυχώς για την ποιότητα των τηλεφωνικών συνδιαλέξεων – ο αριθμός των κλήσεων με απώλειες πακέτων μεγαλύτερες του 1% ήταν πολύ μικρός και μάλιστα μηδενικός για τις κλήσεις που έγιναν με τους codec G.711 και Speex. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις επικρατούσες συνθήκες στο διαδίκτυο κατά την περίοδο των μετρήσεων. Πάραυτα, στο διάγραμμα φαίνεται καθαρά η διαφορετική κλίση των καμπυλών G.711 (οι καμπύλες a-law και μ-law ταυτίζονται) και της καμπύλης iLBC. Μπορεί δηλαδή να διακρίνει κάποιος ότι η ποιότητα των κλήσεων με codec G.711 φθίνει πολύ πιο γρήγορα από ότι η ποιότητα των κλήσεων με codec iLBC. Για ποσοστά δε απωλειών μεγαλύτερα του 2 – 3%, ενδεχομένως η ποιότητα του iLBC να είναι καλύτερη από αυτή του G.711.



Εικ. 8.20: Επίδραση ποσοστού απώλειας πακέτων στον συντελεστή R-factor

Προς επιβεβαίωση της διαφαινόμενης στο διάγραμμα της Εικ. 8.20 τάσης, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα για τον codec G.711 (βλέπε Εικ. 9.14 στο επόμενο Κεφάλαιο). Με τη χρήση των δεδομένων αυτών έγινε εφικτή η σύγκριση της επίπτωσης της απώλειας πακέτων στον δείκτη MOS για τους codec iLBC και G.711. Το αποτέλεσμα είναι το διάγραμμα της Εικ. 8.21 όπου φαίνεται πλέον καθαρά ότι όταν οι απώλειες πακέτων υπερβαίνουν το ποσοστό του 2.5% τότε η ποιότητα φωνής του codec iLBC είναι καλύτερη αυτής του G.711.

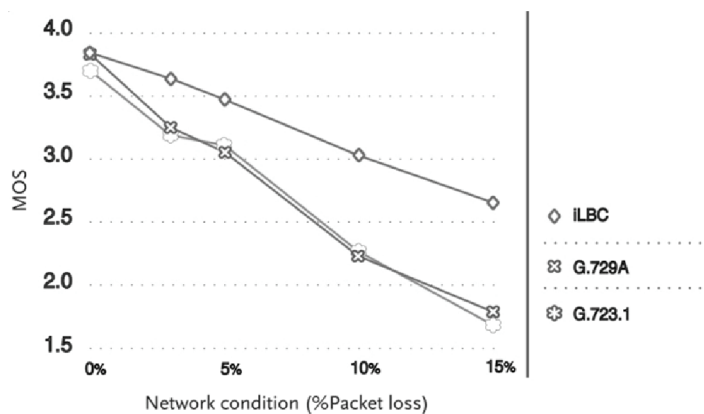


Εικ. 8.21: Επίδραση απώλειας πακέτων στους δείκτες MOS των iLBC και G.711

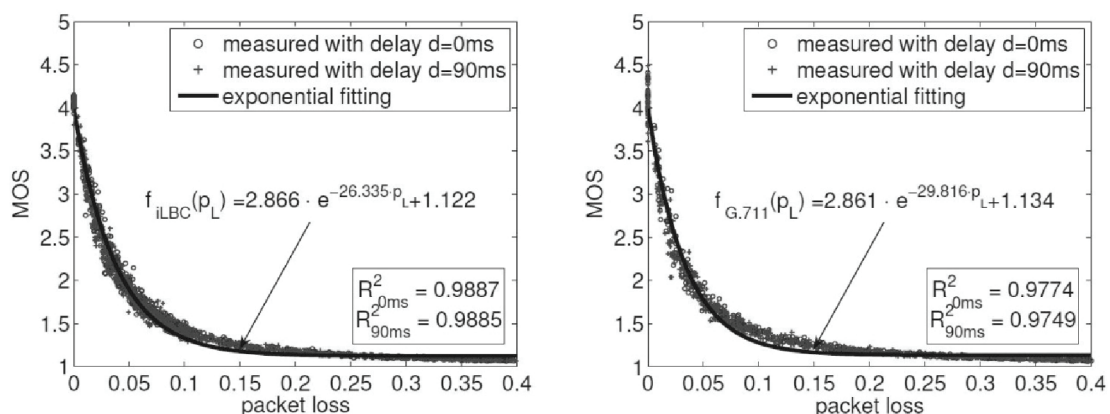
Σύμφωνα με το RFC 3951 [39], ο iLBC codec χρησιμοποιεί μια μέθοδο που επιτυγχάνει την ανεξάρτητη κωδικοποίηση του κάθε block με αποτέλεσμα την εξάλειψη της διάδοσης των αντιληπτών υποβαθμίσεων λόγω απώλειας πακέτων. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει υψηλής

ποιότητας απόκρυψη των απολεσθέντων πακέτων. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο codec iLBC έχει καλύτερη απόδοση σε καταστάσεις απώλειας πακέτων από τους G.729A και G.723.1 (Εικ. 8.22) αλλά, σε σύγκριση με τον G.711, η απόδοσή του είναι ταυτόσημη (Εικ. 8.23) καθώς και το πρότυπο G.711 προβλέπει ενσωματωμένο μηχανισμό PLC.

Όμως η υλοποίηση του μηχανισμού γίνεται από την πλευρά του δέκτη και επομένως δεν έχει σχέση με τα δεδομένα που καταγράφηκαν. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο codec iLBC παρέχει καλύτερη ποιότητα για απώλειες μεγαλύτερες από 2.5% όταν είναι απενεργοποιημένη η λειτουργία απόκρυψης απολεσθέντων πακέτων και στους δύο codec. Στο web site voiptroubleshooter.com υπάρχει διαθέσιμη μια on-line εφαρμογή υπολογισμού του MOS για διάφορους codec μέσω της οποίας επιβεβαιώθηκε το προηγούμενο συμπέρασμα [94].



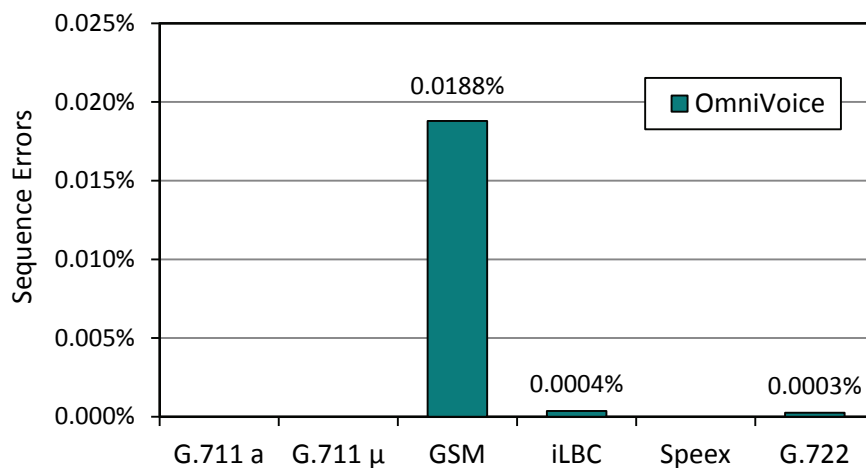
Εικ. 8.22: Σύγκριση της μεταβολής ποιότητας του codec iLBC με τους G.729A και G.723.1 λόγω απωλειών πακέτων (GIPS [16]).



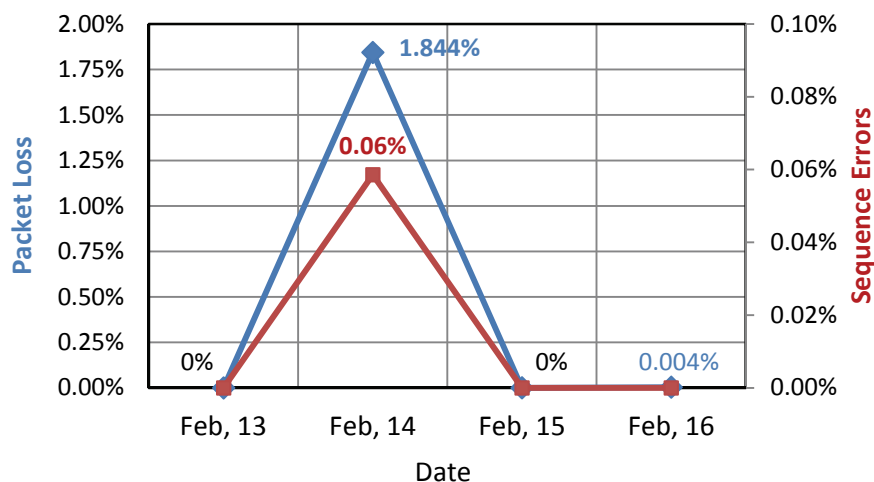
Εικ. 8.23: Σύγκριση της μεταβολής ποιότητας των codec iLBC (αριστερά) και G.711 (δεξιά) λόγω απωλειών πακέτων (Hossfeld et al. [21])

8.4.7 Σφάλματα ακολουθίας (sequence errors)

Τα σφάλματα ακολουθίας, δηλαδή πακέτα που φτάνουν εκτός σειράς, οφείλονται στο γεγονός ότι κάποια πακέτα ενός stream ακολουθούν διαφορετικό μονοπάτι από τα άλλα. Δύο μονοπάτια χρησιμοποιούνται για εξισορρόπηση του φορτίου ή μπορεί να προκύψουν λόγω αστάθειας. Τα πακέτα εκτός σειράς που καταγράφηκαν, ήταν ελάχιστα, και αφορούσαν μόνο τα εισερχόμενα RTP streams (Εικ. 8.24). Δεν είχαν καμία επίπτωση στην ποιότητα των κλήσεων. Το μεγάλο ποσοστό σφαλμάτων ακολουθίας κατά την περίοδο των μετρήσεων με τον GSM οφείλεται στις επικρατούσες συνθήκες στο διαδίκτυο μία συγκεκριμένη ημερολογιακή ημέρα, όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 8.4.6 και φαίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 8.25.



Εικ. 8.24: Σφάλματα ακολουθίας

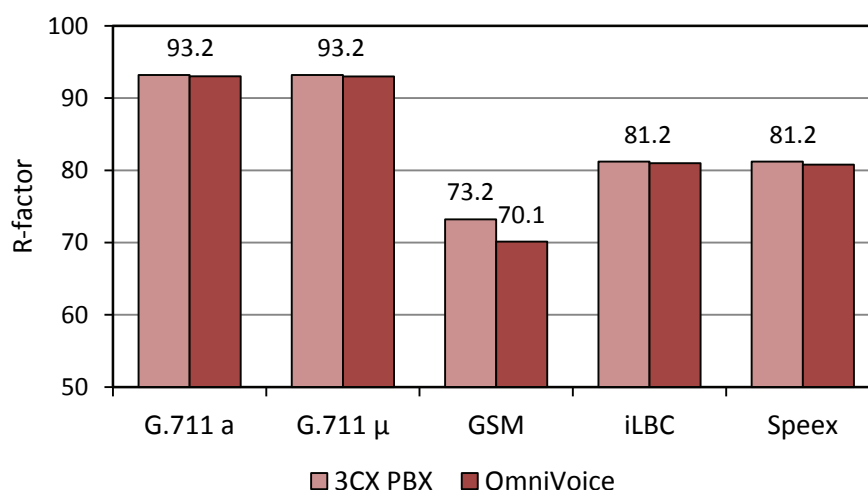


Εικ. 8.25: Απώλειες πακέτων και σφάλματα ακολουθίας την περίοδο μετρήσεων με τον GSM codec

8.4.8 R-Factor και Mean Opinion Score

Ο υπολογισμός του συντελεστή R-factor και του δείκτη αξιολόγησης MOS από το πρόγραμμα CommView έδειξε ότι η μέση ποιότητα των streams των κλήσεων που καταγράφηκαν ήταν άριστη για τον codec G.711, καλή για τους codec iLBC και Speex και μέτρια για τον GSM.

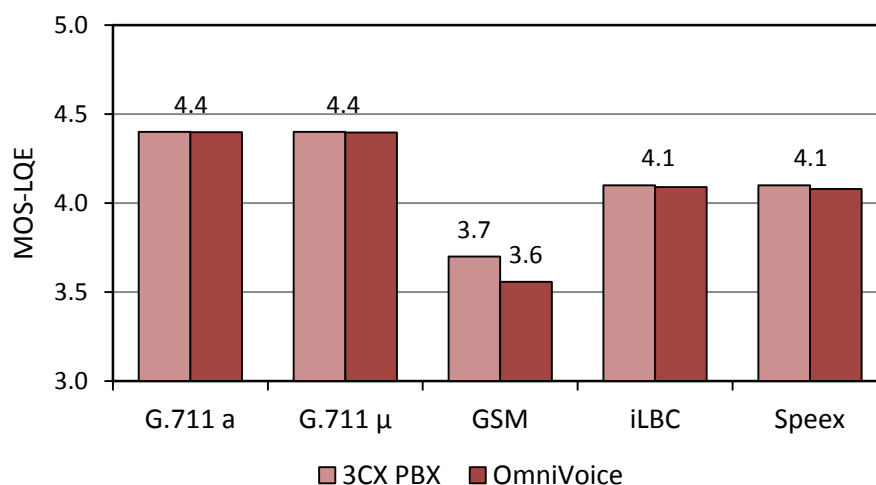
Στις Εικ. 8.26 και Εικ. 8.27 που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα έχει παραλειφθεί ο codec G.722 καθώς το πρόγραμμα δεν τον υποστηρίζει. Ο G.722 είναι ένας wideband codec και ο συντελεστής R-factor υπολογίζεται με το extended E-model που η κλίμακά του ανέρχεται έως το 129 και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ποιότητά του είναι ανώτερη του G.711. Οι μέσες τιμές MOS που καταγράφηκαν είναι οι μέγιστες δυνατές για όλους τους codecs εκτός του GSM και πιο συγκεκριμένα για τα streams με προέλευση την OmniVoice.



Εικ. 8.26: Συντελεστής R-factor

Η υψηλή βαθμολογία της ποιότητας των καταγεγραμμένων streams δεν συνεπάγεται αυτομάτως και την υψηλή ποιότητα των κλήσεων καθώς δεν μετρήθηκε η ποιότητα από άκρο σε άκρο. Πολλές από τις κλήσεις παρουσίασαν αντιληπτή υποβάθμιση της ποιότητας η οποία όμως δεν καταγράφηκε. Υπήρχαν για παράδειγμα κλήσεις που η καθυστέρηση ήταν αισθητή αλλά, λόγω απουσίας άλλων υποβαθμίσεων, η βαθμολόγησή τους ήταν υψηλή. Σε άλλες περιπτώσεις υπήρχε αντιληπτή απώλεια πακέτων αλλά αν αυτή δεν αφορούσε στο stream μεταξύ των δύο τηλεφωνικών κέντρων, 3CX και OmniVoice, τότε και πάλι η βαθμολόγηση ήταν υψηλή. Το γεγονός αυτό συνέβαινε κυρίως σε κλήσεις που το άλλο άκρο ήταν κινητό τηλέφωνο.

Η κινητή τηλεφωνία είναι γνωστό ότι παρέχει πολύ υποβαθμισμένη ποιότητα αλλά αυτό δεν μπορούσε να καταγραφεί.



Εικ. 8.27: Mean Opinion Score

8.4.9 Στατιστικά στοιχεία ποιότητας των κλήσεων

Στους πίνακες που ακολουθούν καταγράφονται τα ποσοστά των κλήσεων ανάλογα με τον υπολογισθέντα συντελεστή R-factor για κάθε χρησιμοποιηθέντα codec. Τα αποτελέσματα έχουν διαχωριστεί σε δύο ξεχωριστούς πίνακες, έναν για τα εξερχόμενα από το τηλεφωνικό κέντρο streams, και ένα για τα εισερχόμενα.

R-factor	G.711 a-law	G.711 μ-law	GSM	iLBC	Speex	Σχόλια
90 - 100	98.8%	97.4%				Πολύ ικανοποιημένοι χρήστες
80 - 90	1.2%	2.6%		98.6%	98.2%	Ικανοποιημένοι χρήστες
70 - 80			98.8%	1.4%	1.8%	Μερικοί μη ικανοποιημένοι χρήστες
60 - 70			1.2%			Πολλοί μη ικανοποιημένοι χρήστες
50 - 60						Σχεδόν όλοι μη ικανοποιημένοι
0 - 50						Δεν συνιστάται

Πίν. 8.3: Κατανομή των εισερχόμενων streams σύμφωνα το R-factor

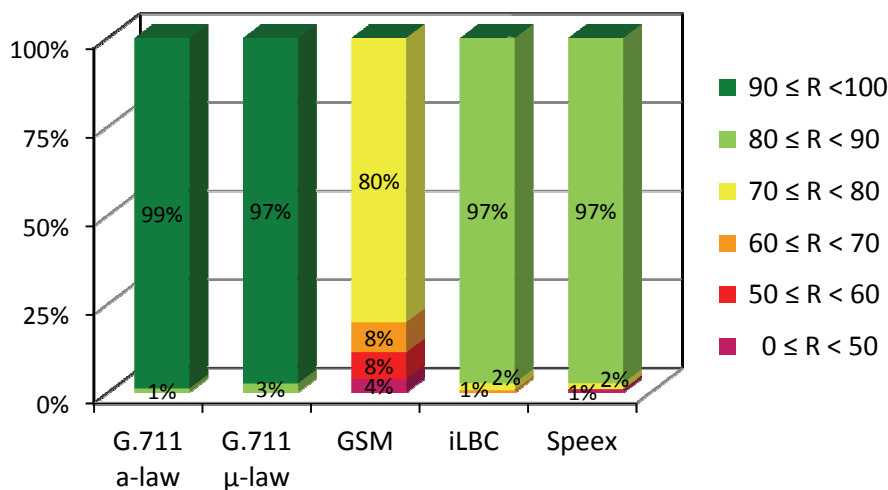
Τα εξερχόμενα streams ήταν αναμενόμενο να βαθμολογηθούν με την ανώτερη βαθμολογία για κάθε codec που χρησιμοποιήθηκε όπως απεικονίζεται στον Πίν. 8.3. Για όλους του codec το ποσοστό των κλήσεων με την ανώτερη βαθμολογία είναι γύρω στο 98%. Εκείνο όμως που δεν

αναμενόταν ήταν τα ποσοστά με την ανώτερη βαθμολογία των streams που προέρχονταν από τον πάροχο. Για όλους εκτός του GSM codecs το ποσοστό των κλήσεων με τη μεγαλύτερη δυνατή βαθμολογία υπερβαίνει το 97%. Για δε τον GSM, οι χαμηλές βαθμολογίες οφείλονται πρώτον στον ίδιο τον codec και δεύτερον, όπως έχει προηγουμένως επισημανθεί, στις επικρατούσες στο διαδίκτυο συνθήκες μια συγκεκριμένη η μέρα των μετρήσεων.

R-factor	G.711 a-law	G.711 μ-law	GSM	iLBC	Speex	Σχόλια
90 - 100	98.8%	97.4%				Πολύ ικανοποιημένοι χρήστες
80 - 90	1.2%	2.6%		97.3%	97.3	Ικανοποιημένοι χρήστες
70 - 80			80.2%	2.0%	1.8%	Μερικοί μη ικανοποιημένοι χρήστες
60 - 70			8.5%	0.7%		Πολλοί μη ικανοποιημένοι χρήστες
50 - 60			7.5%			Σχεδόν όλοι μη ικανοποιημένοι
0 - 50			3.8%		0.9%	Δεν συνιστάται

Πίν. 8.4: Κατανομή των εξερχόμενων streams σύμφωνα το R-factor

Η κατανομή σύμφωνα με την κλίμακα ποιότητας φαίνεται πολύ καλύτερα στο παρακάτω ραβδόγραμμα.



Εικ. 8.28: Ποιοτική κατανομή εξερχόμενων κλήσεων

8.5 Συμπεράσματα μετρήσεων πραγματικών κλήσεων

Η εγκατάσταση υπηρεσίας QoS είναι πολύ σημαντική σε ένα δίκτυο VoIP. Όμως δεν ήταν δυνατόν να γίνουν μετρήσεις που να αφορούν σε πραγματικές κλήσεις χωρίς αυτήν για

προφανείς λόγους. Ωστόσο κάποιες δοκιμές που έγιναν, χρησιμοποιώντας στο δίκτυο του γραφείου απαιτητικά σε bandwidth προγράμματα όπως οι torrent clients, δεν έδειξαν να έχουν επιπτώσεις στην ποιότητα των κλήσεων. Προφανώς λειτουργούσε καλά η εγκατεστημένη υπηρεσία ποιότητας.

Η ποιότητα των τηλεφωνικών συνομιλιών VoIP, όπως αυτή υπολογίζεται από ειδικό λογισμικό ανάλυσης και αξιολόγησης VoIP, είναι υπερτιμημένη σε σχέση με την πραγματική ποιότητα που αντιλαμβάνονται οι συνομιλητές. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα CommView και VQManager με τα ίδια αποτελέσματα. Και στα δύο προγράμματα, η αξιολόγηση της ποιότητας μέσω του αλγορίθμου E-model υλοποιείται για την κάθε κατεύθυνση της συνομιλίας ξεχωριστά εξάγοντας έναν εκτιμώμενο βαθμό ποιότητας MOS-LQE (Mean Opinion Score - Listening Quality, Estimated). Δεν αξιολογείται δηλαδή η ποιότητα της αμφίδρομης τηλεφωνικής συνδιάλεξης, η οποία στην καλύτερη περίπτωση θα είναι ίση με την χαμηλότερη ποιότητα των δύο κατευθύνσεων. Αυτό όμως ισχύει όταν η ποιότητα της μιας κατεύθυνσης είναι άριστη. Στην πραγματικότητα, η αντιλαμβανόμενη από τους δύο συνομιλητές ποιότητα θα είναι υποδεέστερη, λόγω της συνέργειας των ενδεχομένως διαφορετικών υποβαθμίσεων που λαμβάνουν χώρα στις δύο κατευθύνσεις.

Ο υπολογισμός της ποιότητας κλήσεων VoIP προς άλλα δίκτυα σταθερής ή κινητής τηλεφωνίας, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω κάποιου παρόχου υπηρεσιών VoIP, δεν είναι εφικτό να γίνει μέσω λογισμικού ανάλυσης μόνο από το ένα άκρο. Η αιτία είναι ότι πάντα διαμεσολαβεί στην επικοινωνία το τηλεφωνικό κέντρο του παρόχου.

Οι πάροχοι τηλεφωνίας VoIP, για τη δρομολόγηση των κλήσεων προς τις άλλες εταιρείες, χρησιμοποιούν συνήθως έναν συγκεκριμένο codec χαμηλού bandwidth για ευνόητους λόγους. Για παράδειγμα, η OmniVoice χρησιμοποιεί τον G.729 όπως φαίνεται στον Πίν. 8.5. Για να μπορέσει να κάνει χρήση της υπηρεσίας ένας πελάτης που δεν υποστηρίζει τον συγκεκριμένο codec, πρέπει να διαμεσολαβήσει το τηλεφωνικό κέντρο του παρόχου κάνοντας το λεγόμενο transcoding. Να μετατρέπει δηλαδή τα πακέτα φωνής από έναν codec σε κάποιον άλλο. Αυτό συνέβαινε πάντα στις κλήσεις που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, καθώς η χρησιμοποιηθείσα έκδοση του 3CX Phone System δεν υποστήριζε τον G.729. Ο δεύτερος και πιο σημαντικός λόγος για τη διαμεσολάβηση του τηλεφωνικού κέντρου είναι για τη χρέωση των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Ημερομηνία	Από	Προς	Διάρ- κεια	Κόστος	Κατάσταση	Codec: KByte
30/04/2012 21:01	302312xxxxxx (20xxx)	(694xxxxxxx) 694xxxxxxx	3	0,000 0,006	ANSWER NORMAL CLEARING	GSM: 15,47 G729: 10,90
30/04/2012 20:30	302312xxxxxx (20xxxx)	(694xxxxxxx) 694xxxxxxx	17	0,000 0,030	ANSWER NORMAL CLEARING	iLBC: 71,51 G729: 55,34
30/04/2012 19:59	302312xxxxxx (20xxxx)	(694xxxxxxx) 694xxxxxxx	18	0,000 0,030	ANSWER NORMAL CLEARING	PCMU: 283,03 G729: 52,57

Πίν. 8.5: Απόσπασμα από το log file της OmniVoice

Δεν μπορούν επομένως να καταγραφούν οι παράμετροι που αφορούν στο σκέλος της δρομολόγησης μεταξύ των εταιρειών τηλεφωνίας. Επί πλέον, στην περίπτωση που μεσολαβεί και δεύτερο τηλεφωνικό κέντρο, όπως συμβαίνει στις εγκαταστάσεις των εταιρικών πελατών, τότε ενδεχομένως να διαμεσολαβεί και αυτό, γεγονός που δυσχεραίνει περισσότερο την συνολική μέτρηση της ποιότητας της φωνής από άκρο σε άκρο.

Καταγράφηκαν οι αδυναμίες των προγραμμάτων: α) να αξιολογήσουν συνολικά την αμφίδρομη τηλεφωνική επικοινωνία παρά μόνο την ροή κάθε κατεύθυνσης ξεχωριστά, και β) να καταγράψουν το μέγεθος της καθυστέρησης.

Διαπιστώθηκε διαφορά στη δρομολόγηση των πακέτων από την πόλη της Θεσσαλονίκης προς την OmniVoice (Γερμανία) εξαρτώμενη από το αν η παρεχόμενη από την Otenet διεύθυνση IP είναι δυναμική ή στατική. Η διαφορά αφορά στη δρομολόγηση εντός του δικτύου υποδομής (backbone) του ΟΤΕ εντός της Ελλάδος, με αποτέλεσμα το RTT να είναι 55 – 65 ms από δυναμική διεύθυνση και 95 – 108 ms από την στατική διεύθυνση του γραφείου.

Από τους 6 codec που δοκιμάστηκαν οι G.711 a-law, G.711 μ-law και G.722 αποδείχθηκαν πολύ πιο απαιτητικοί σε bandwidth σε σύγκριση με τους GSM, iLBC και Speex. Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης μπορεί να μειωθούν στο 1/3 αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ο codec iLBC αντί των G.711 ή G.722. Όμως, υπάρχουν επιπτώσεις στην ποιότητα του ήχου, καθώς η μείωση του bandwidth επιτυγχάνεται με τη μείωση του bit rate.

Η μειωμένη χρήση bandwidth των εισερχομένων σε σύγκριση με τα εξερχόμενα streams, οφείλεται στη λειτουργία VAD καθώς μεγάλο ποσοστό των κλήσεων ήταν προς και από συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Η λειτουργία VAD αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της κινητής τηλεφωνίας GSM για δύο λόγους. Πρώτον για εξοικονόμηση bandwidth, και κατά συνέπεια

αύξηση χωρητικότητας κλήσεων του δικτύου, και δεύτερον για εξοικονόμηση ενέργειας στις φορητές συσκευές της κινητής τηλεφωνίας. Η μέση διαφορά που καταγράφηκε για το σύνολο των κλήσεων ήταν 12.4%. Το ποσοστό αυτό θα ήταν σαφώς μεγαλύτερο αν όλες οι κλήσεις αφορούσαν σε κινητά τηλέφωνα.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο codec iLBC παρέχει καλύτερη ποιότητα φωνής από τον G.711 όταν το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι μεγαλύτερο από 2.5% με απενεργοποιημένη τη λειτουργία απόκρυψης απολεσθέντων πακέτων και στους δύο codec. Σε μικρότερα ποσοστά απωλειών υπερτερεί ο G.711 λόγω του κατά πολύ μεγαλύτερου bit rate (64 Kbps έναντι 13.33 Kbps).

Η έως και δέκα φορές μεγαλύτερη διακύμανση της καθυστέρησης των εισερχομένων σε σχέση με τα εξερχόμενα stream δεν είχε καμία επίπτωση στην ποιότητα της φωνής από τη στιγμή που αυτή ήταν μικρότερη των 50 ms και στην μεγάλη πλειονότητα των κλήσεων μικρότερη των 30 ms.

Η υποκειμενική και μη τεκμηριωμένη επιστημονικά εκτίμηση του γράφοντος είναι ότι αν η αξιολόγηση των κλήσεων πραγματοποιούνταν από ανθρώπους, τότε η βαθμολογία των κλήσεων θα ήταν μια βαθμίδα κατώτερη για όλους τους codec.

Κεφάλαιο 9

Προσομοίωση WAN

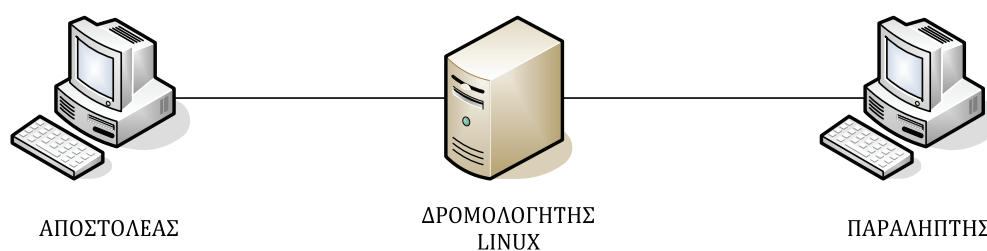
Τα συμπεράσματα από την ανάλυση μετρήσεων πραγματικών κλήσεων του προηγούμενου κεφαλαίου οδήγησαν στην απόφαση να πραγματοποιηθούν εργαστηριακές μετρήσεις κλήσεων VoIP με προσομοίωση της λειτουργίας του Internet στο τοπικό δίκτυο του γραφείου χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του λειτουργικού συστήματος Linux. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

9.1 Netem Network Emulator

Ο προσομοιωτής δικτύου netem αποτελεί επέκταση του εργαλείου ελέγχου της κίνησης του δικτύου “tc” του κελύφους του Linux, το οποίο περιλαμβάνεται στο πακέτο iproute2. Παρέχει τη λειτουργία προσομοίωσης δικτύων για τον έλεγχο διαφόρων πρωτοκόλλων εξομοιώνοντας τις ιδιότητες των δικτύων ευρείας περιοχής (WAN). Η εντολή είναι διαθέσιμη στις νεώτερες εκδόσεις του kernel του Linux (έκδοση 2.6 ή μεταγενέστερη) των διανομών Fedora, OpenSuse, Gentoo, Debian, Mandriva και Ubuntu.

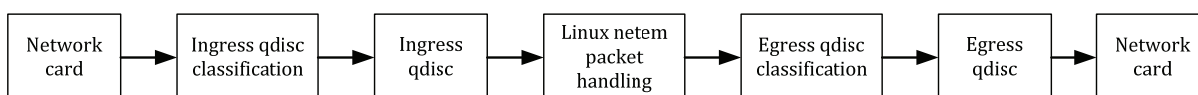
Οι παράμετροι που ελέγχονται μέσω της εντολής είναι η καθυστέρηση (delay), η απώλεια πακέτων (packet loss), τα διπλά πακέτα (packet duplication), η αναδιάταξη των πακέτων (packet re-ordering) και η αλλοίωση των πακέτων (packet corruption).

Για τη χρήση του Netem, ο υπολογιστής με λειτουργικό σύστημα Linux πρέπει να διαμορφωθεί έτσι ώστε να λειτουργεί σαν δρομολογητής (router) ή γέφυρα (bridge). Είναι απαραίτητη επομένως η ύπαρξη δύο καρτών δικτύου. Η απλούστερη τοπολογία του δικτύου είναι αυτή της Εικ. 9.1.



Εικ. 9.1: Τοπολογία τοπικού δικτύου προσομοίωσης WAN

Η διαχείριση των πακέτων μέσα στον router γίνεται ως ακολούθως. Τα πακέτα εισέρχονται στην μία διεπαφή δικτύου, ταξινομούνται και τοποθετούνται σε ουρά πριν εισέλθουν στον πυρήνα του Linux προς διαχείριση. Μετά την διαχείριση, τα πακέτα εκ νέου ταξινομούνται και τοποθετούνται σε ουρά πριν την εκπομπή τους μέσω της διεπαφής εξόδου.



Εικ. 9.2: Διαχείριση πακέτων εντός του Linux router

Η ταξινόμηση των πακέτων μπορεί να επιτευχθεί αναλύοντας τα πεδία της επικεφαλίδας των πακέτων, όπως οι διευθύνσεις IP αποστολέα και παραλήπτη, οι αριθμοί θυρών κ.ά. Η ταξινόμηση ρυθμίζεται μέσω του εργαλείου ελέγχου της κίνησης "tc". Βάσει αυτής της ταξινόμησης τα πακέτα τοποθετούνται σε μία από τις ουρές εισόδου και εξόδου. Στην τυπική διαμόρφωση υπάρχει μία μόνο ουρά ανά διεπαφή και η διεκπεραίωση των πακέτων γίνεται με τρόπο FIFO (First in first out). Ο συνδυασμός της ουράς και του αλγορίθμου ο οποίος αποφασίζει το πότε και το πιο πακέτο θα αποσταλεί ονομάζεται qdisc. Η ονομασία qdisc προέρχεται από τις αγγλικές λέξεις queuing discipline.

Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης πολλαπλών qdisc στην διεπαφή εισόδου καθώς επίσης και των κανόνων ταξινόμησης των πακέτων ώστε να αναγνωρίζονται και να διαχωρίζονται διαφορετικές ροές πακέτων. Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής η ρύθμιση πολλαπλών qdisc δεν ήταν απαραίτητη.

9.2 Ρύθμιση δρομολογητή Linux

Χρησιμοποιήθηκε η διανομή Ubuntu 10.10 (kernel version 2.6.35-22-generic) εγκατεστημένη σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Pentium® 4 CPU 2.80 GHz, μνήμη 2GB και δύο κάρτες δικτύου.

Η διεπαφή eth0 χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση στο υφιστάμενο δίκτυο του γραφείου με τις παρακάτω ρυθμίσεις:

```
iface eth0 inet static
    address 192.168.1.4
    network 192.168.1.0
    netmask 255.255.255.0
    gateway 192.168.1.1
    broadcast 192.168.1.255
```

Η διεπαφή eth1 ρυθμίστηκε για το δίκτυο 192.168.2.0

```
iface eth1 inet static
    address 192.168.2.1
    netmask 255.255.255.0
    broadcast 192.168.2.255
```

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το παρακάτω αρχείο script με το όνομα router.sh

```
# delete old configuration, if any
# Flush all the rules in filter and nat tables
iptables --flush
iptables --table nat --flush

# delete all chains that are not in default filter and nat table, if any
```

```
iptables --delete-chain
iptables --table nat --delete-chain

# Set up IP FORWARDing and Masquerading (NAT)
iptables --table nat --append POSTROUTING --out-interface eth0 -j MASQUERADE
iptables --append FORWARD --in-interface eth1 -j ACCEPT

# enable IP forwarding
echo 1 > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward
```

Το αρχείο τοποθετήθηκε στη διαδρομή /etc/init.d και μετατράπηκε σε εκτελέσιμο με την εντολή

```
sudo chmod +x /etc/init.d/router.sh
```

Για να εκτελείται το αρχείο αυτομάτως κατά την εκκίνηση του λειτουργικού χρησιμοποιήθηκε η εντολή

```
sudo update-rc.d router.sh defaults 98 02
```

Οι αριθμητικές παράμετροι 98 και 02 είναι οι αριθμοί σειράς εκκίνησης και τερματισμού του script. Καθορίζουν το πόσο νωρίς ή αργά θα αρχίσει ή θα τερματίσει μια υπηρεσία κατά την εκκίνηση ή τον τερματισμό του συστήματος.

Με την εκτέλεση του παραπάνω αρχείου ο υπολογιστής Linux λειτουργεί ως δρομολογητής. Η διεπαφή eth0 ορίζεται σαν έξοδος ενώ η διεπαφή eth1 ορίζεται σαν είσοδος. Έτσι τα πακέτα που φθάνουν στη κάρτα δικτύου eth1 και προορίζονται για δίκτυα διαφορετικά του 192.168.2.0 δρομολογούνται μέσω της κάρτας εξόδου eth0.

9.3 Παράμετροι προσομοίωσης WAN της εντολής netem

Η εντολή netem έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την λειτουργία των WAN και κατ' επέκταση του Internet. Αυτές είναι η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων, η μετάδοση διπλών πακέτων, η αλλοίωση των δεδομένων των πακέτων και η αναδιάταξή τους.

9.3.1 Καθυστέρηση (delay)

Στην απλούστερη περίπτωση μπορεί να καθοριστεί μια σταθερή καθυστέρηση για όλα τα εξερχόμενα πακέτα από τον δρομολογητή. Η παρακάτω εντολή προσθέτει καθυστέρηση 100 ms.

```
# tc qdisc add dev eth0 root netem delay 100ms
```

Η επίδραση της εντολής μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας την εντολή ring προς έναν host του τοπικού δικτύου. Για την αλλαγή του μεγέθους της καθυστέρησης, αντί της επιλογής add χρησιμοποιείται η επιλογή change όπως στο παρακάτω παράδειγμα.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 150ms
```

Στην πραγματικότητα όμως, η καθυστέρηση στα δίκτυα ευρείας περιοχής δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται. Στην εντολή netem μπορεί να οριστεί μια τυχαία διακύμανση της καθυστέρησης.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 10ms
```

Η προηγούμενη εντολή καθορίζει καθυστέρηση $100\text{ ms} \pm 10\text{ ms}$. Όμως η μεταβολή της καθυστέρησης είναι τυχαία, γεγονός που δεν ισχύει στα πραγματικά δίκτυα ευρείας περιοχής. Για να επιτευχθεί αυτό, η εντολή netem δέχεται μια επί πλέον παράμετρο συσχέτισης.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 10ms 25%
```

Η επιπρόσθετη παράμετρος 25% ορίζει ότι το επόμενο μέγεθος της μεταβολής δεν είναι καθαρά τυχαίο αλλά εξαρτάται κατά 25% από το προηγούμενο. Όμως η συσχέτιση αυτής της μορφής δεν είναι αληθινή στατιστική συσχέτιση αλλά μια προσπάθεια προσέγγισης.

9.3.2 Κατανομή της καθυστέρησης

Τυπικά, η καθυστέρηση στα δίκτυα ευρείας περιοχής δεν είναι ομοιόμορφη. Για την πιστότερη προσομοίωση της καθυστέρησης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η τυπική κατανομή. Για τον προσδιορισμό μιας μη ομοιόμορφης κατανομής, η εντολή netem μπορεί να δεχθεί σαν παράμετρο έναν πίνακα κατανομής όπως στο παρακάτω παράδειγμα όπου χρησιμοποιείται η κανονική κατανομή.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 10ms distribution normal
```

Κατά την εγκατάσταση του πακέτου iproute2 δημιουργούνται οι πίνακες των κατανομών normal, pareto και paretonormal οι οποίοι τοποθετούνται στη διαδρομή /usr/lib/tc. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρήσης πινάκων άλλων κατανομών οι οποίοι μπορούν ενδεχομένως να κατασκευαστούν από διαθέσιμα πραγματικά ή εργαστηριακά δεδομένα.

9.3.3 Απώλεια πακέτων (packet loss)

Η απώλεια πακέτων καθορίζεται ως ποσοστό επί τοις εκατόν.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 0.1%
```

Η παραπάνω εντολή έχει σαν αποτέλεσμα το 1 στα 1000 πακέτα τυχαία να απορριφθεί. Η μικρότερη τιμή του ποσοστού απώλειας που μπορεί να δεχθεί η εντολή είναι 0.000000232%.

9.3.4 Απώλεια συνεχόμενων πακέτων (burst packet loss)

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της εντολής netem, μπορεί να ορισθεί προαιρετικά και μια παράμετρος συσχέτισης έτσι ώστε η απώλεια να μην είναι εντελώς τυχαία αλλά να εξαρτάται εν μέρει από την κατάσταση του προηγούμενου πακέτου. Με τον τρόπο αυτό γίνεται προσπάθεια να προσομοιωθεί η απώλεια συνεχόμενων πακέτων (burst losses).

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 0.3% 25%
```

Σύμφωνα πάντα με το εγχειρίδιο, η προηγούμενη εντολή έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια του 0.3% των πακέτων και η πιθανότητα απώλειας για το κάθε πακέτο εξαρτάται κατά ¼ από την πιθανότητα του προηγούμενου. Είναι δηλαδή

$$P(n) = 0.25 * P(n-1) + 0.75 * \text{Random}$$

Κατά την πειραματική εφαρμογή της εντολής στο δίκτυο VoIP τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα. Συγκεκριμένα, η προσθήκη της παραμέτρου συσχέτισης είχε σαν αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των απολεσθέντων πακέτων.

Προς επαλήθευση της προβληματικής λειτουργίας της εντολής netem, όταν περιλαμβάνεται η παράμετρος συσχέτισης, χρησιμοποιήθηκε η εντολή ping. Συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις χωρίς την παράμετρο συσχέτισης και στη συνέχεια με την παράμετρο συσχέτισης για διάφορα ποσοστά απώλειας πακέτων. Σε κάθε περίπτωση απεστάλησαν δύο φορές από 10000 πακέτα ICMP ECHO_REQUEST προς τον gateway router του τοπικού δικτύου με χρήση της παραμέτρου -i 0.0001 έτσι ώστε τα πακέτα να αποστέλλονται ανά 0.1 ms. Έγινε επίσης χρήση της παραμέτρου -q ώστε η εντολή να λειτουργεί σε silent mode και να παρουσιάζονται μόνο η αρχική γραμμή της εντολής και η γραμμή αποτελεσμάτων.

Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν για απώλεια πακέτων σε ποσοστό 2%. Όπως φαίνεται στα παρακάτω αποτελέσματα η εντολή netem λειτουργεί σωστά όταν δεν υπάρχει η παράμετρος συσχέτισης.

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 2%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
10000 packets transmitted, 9792 received, 2% packet loss, time 8969ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.496/0.551/18.576/0.380 ms, pipe 2, ipg/ewma 0.897/0.528 ms
```

Όταν όμως συμπεριληφθεί η παράμετρος συσχέτισης, έτσι ώστε η πιθανότητα απώλειας του κάθε πακέτου να εξαρτάται κατά ένα μικρό ποσοστό 1% από την κατάσταση του προηγούμενου πακέτου, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα δεν είναι τα αναμενόμενα. Το συνολικό ποσοστό απώλειας πακέτων είναι περίπου 1% αντί για 2% όπως ορίστηκε στην εντολή netem.

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 2% 1%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
10000 packets transmitted, 9844 received, 1% packet loss, time 8082ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.517/0.553/12.165/0.254 ms, pipe 2, ipg/ewma 0.808/0.532 ms
```

Αν αυξηθεί το ποσοστό συσχέτισης στο 10%, τα αποτελέσματα είναι ακόμη χειρότερα. Παρατηρείται δηλαδή μεγαλύτερη μείωση του συνολικού ποσοστού απώλειας πακέτων το οποίο πρακτικά μηδενίζεται.

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 2% 10%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
10000 packets transmitted, 9988 received, 0% packet loss, time 5813ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.502/0.541/8.234/0.167 ms, ipg/ewma 0.581/0.537 ms
```

Όταν δε το ποσοστό συσχέτισης ανέλθει στο 50%, τότε βλέπουμε ότι η απώλεια πακέτων εκμηδενίζεται πλήρως καθώς το σύνολο των 10000 πακέτων επιστρέφουν.

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 2% 50%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
10000 packets transmitted, 10000 received, 0% packet loss, time 5934ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.515/0.571/12.224/0.238 ms, pipe 2, ipg/ewma 0.593/0.549 ms
```

Στη συνέχεια επιχειρήθηκε η αύξηση του ποσοστού απώλειας στο 10%. Όπως φαίνεται στις μετρήσεις του Παραρτήματος Β, η εντολή netem λειτούργησε και πάλι σωστά όταν δεν υπήρχε η παράμετρος συσχέτισης απορρίπτοντας ένα ποσοστό 10% των πακέτων. Με την παράμετρο συσχέτισης στο 1% το ποσοστό απώλειας μειώθηκε στο 9% και με την παράμετρο συσχέτισης στο 10% το αντίστοιχο ποσοστό μειώθηκε στο μισό (5%). Όταν δε η παράμετρος συσχέτισης ανήλθε στο 50%, το ποσοστό απώλειας των πακέτων ήταν πρακτικά μηδέν.

Αντίθετα, όταν το ποσοστό απώλειας ρυθμίστηκε στο 50% τα αποτελέσματα ήταν σωστά ανεξάρτητα από το ποσοστό συσχέτισης. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα, το ποσοστό απώλειας ήταν πάντα γύρω στο 50% για όλα τα ποσοστά συσχέτισης 0%, 1%, 10%, 20%, 50%, 70% και 90% που δοκιμάστηκαν.

Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό ότι η λειτουργία του μοντέλου συσχέτισης για την προσομοίωση της συνεχόμενης απώλειας πακέτων (packet burst loss) που χρησιμοποιεί η εντολή netem είναι προβληματική.

Εδώ και πολλά χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί διάφορα μοντέλα απώλειας πακέτων. Το πιο διαδεδομένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι το μοντέλο Bernoulli στο οποίο η πιθανότητα απώλειας για κάθε πακέτο είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση του προηγούμενου πακέτου. Καθώς όμως η απώλεια πακέτων στα δίκτυα των υπολογιστών γίνεται με ξεσπάσματα (burst packet loss) έχουν αναπτυχθεί άλλα μοντέλα που μπορούν να πετύχουν καλύτερη προσομοίωση. Τα πιο διαδεδομένα στην βιβλιογραφία είναι το μοντέλο του Gilbert και η παραλλαγή αυτού που αναφέρεται σαν Gilbert-Elliot. Είναι μοντέλα δύο καταστάσεων στα οποία η μετάβαση από την μία κατάσταση (0 ή 1) στην άλλη γίνεται βάσει πιθανοτήτων. Καλύτερη όμως προσομοίωση μπορεί να επιτευχθεί με μοντέλα περισσότερων καταστάσεων βασισμένα στις σειρές Markov και με τον συνδυασμό των μοντέλων Markov και Gilbert.

Για την διόρθωση της προβληματικής λειτουργίας της εντολής netem έχει ήδη προταθεί από ερευνητές του πανεπιστημίου Tor Vergata της Ρώμης ένα μοντέλο Markov τεσσάρων καταστάσεων [85].

9.3.5 Διπλά πακέτα (packet duplication)

Η διπλή αποστολή πακέτων καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως η απώλεια πακέτων, δηλαδή σαν ποσοστό επί τοις εκατόν.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem duplicate 2%
```

9.3.6 Αλλοίωση πακέτων (packet corruption)

Καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο σαν ποσοστό επί τοις εκατόν.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem corrupt 0.2%
```

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσομοιωθεί ο τυχαίος θόρυβος του δικτύου που έχει σαν αποτέλεσμα κάποια πακέτα να φθάνουν στον παραλήπτη αλλοιωμένα. Η εντολή εισάγει σφάλμα σε ένα μοναδικό bit σε μια τυχαία θέση του πακέτου.

9.3.7 Αναδιάταξη πακέτων (Packet re-ordering)

Υποστηρίζονται δύο διαφορετικοί τρόποι για τον προσδιορισμό της αναδιάταξης των πακέτων. Η πρώτη μέθοδος, μέσω της παραμέτρου `gap`, χρησιμοποιεί μια σταθερή ακολουθία και αναδιατάσσει κάθε n -οστό πακέτο. Η σύνταξη της εντολής είναι

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem gap 5 delay 10ms
```

Έχει σαν αποτέλεσμα το κάθε 5ο πακέτο (5ο, 10ο, 15ο, ...) να αποστέλλεται άμεσα και τα υπόλοιπα με καθυστέρηση 10 ms. Η προβλέψιμη αυτή ακολουθία πακέτων είναι χρήσιμη για βασικές δοκιμές πρωτοκόλλων όπως η ανα-συναρμολόγηση των δεδομένων.

Η δεύτερη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί την παράμετρο `reorder`, προσομοιώνει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στα WAN. Προκαλεί την αναδιάταξη ενός συγκεκριμένου ποσοστού πακέτων.

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 10ms reorder 25% 50%
```

Στο προηγούμενο παράδειγμα το 25% των πακέτων (με συσχέτιση 50%) αποστέλλονται άμεσα ενώ τα υπόλοιπα με καθυστέρηση 10 ms.

Οι νεώτερες εκδόσεις του `netem` αναδιατάσσουν τα πακέτα όταν οι τυχαίες τιμές της καθυστέρησης είναι εκτός σειράς. Το παρακάτω παράδειγμα θα προκαλέσει κάποια αναδιάταξη

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 75ms
```

Αν το πρώτο πακέτο λάβει καθυστέρηση 100 ms (100 ms βασική καθυστέρηση + 0 ms jitter) και το δεύτερο αποσταλεί 1 ms αργότερα και λάβει καθυστέρηση 50 ms (100 ms βασική καθυστέρηση - 50 ms jitter), τότε το δεύτερο πακέτο θα αποσταλεί πρώτο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πειθαρχία της ουράς (queue discipline) εσωτερικά του `netem` λειτουργεί με τη μέθοδο TFIFO (Transmit FIFO) και έτσι τα πακέτα ταξινομούνται βάσει του χρόνου που θα αποσταλούν.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η αν η καθυστέρηση, η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της αναδιάταξης, είναι μικρότερη από τον χρόνο άφιξης των πακέτων, τότε δεν θα

υλοποιηθεί καμία αναδιάταξη. Επίσης πρέπει να αποφεύγεται η συνδυασμένη χρήση των διαφορετικών μεθόδων αναδιάταξης γιατί είναι πιθανό τα αποτελέσματα να είναι απρόβλεπτα.

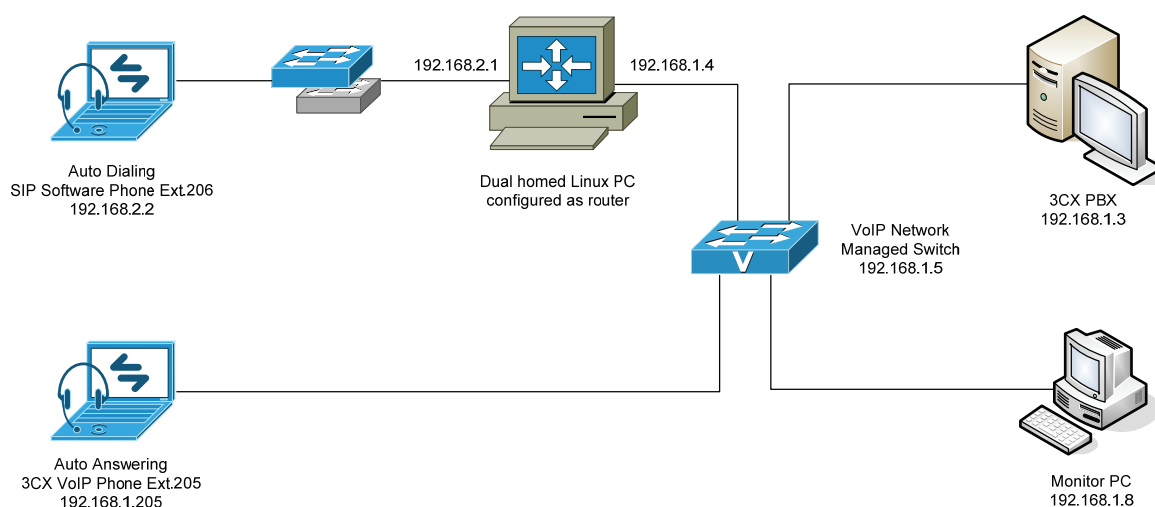
9.4 Εργαστηριακή εγκατάσταση δικτύου VoIP

Για τις σχετικές με την ποιότητα παραμέτρων της τηλεφωνίας VoIP πειραματικές μετρήσεις υλοποιήθηκε η εγκατάσταση της Εικ. 9.3 στο δίκτυο του γραφείου.

Για την καταγραφή χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος υπολογιστής (Monitor PC) και το λογισμικό CommView που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των πραγματικών κλήσεων.

Για την προσομοίωση του δικτύου WAN χρησιμοποιήθηκε υπολογιστής με λειτουργικό σύστημα Linux διαμορφωμένος έτσι ώστε να λειτουργεί ως router (βλ. 9.2 Ρύθμιση δρομολογητή Linux).

Εγκαταστάθηκαν επίσης δύο φορητοί υπολογιστές με λειτουργικό σύστημα Windows XP για την υλοποίηση των κλήσεων. Η κάρτα δικτύου του πρώτου, που θα πραγματοποιούσε τις κλήσεις, ρυθμίστηκε με IP address 192.168.2.2 και Gateway address την διεύθυνση της κάρτας δικτύου eth1 του Linux PC 192.168.2.1. Συνδέθηκε δε με το Linux PC (router) μέσω ενός switch. Στον ίδιο φορητό υπολογιστή εγκαταστάθηκε το λογισμικό Voice2Phone Auto Dialer [93], με σκοπό την αυτοματοποίηση των κλήσεων. Η διαθέσιμη shareware έκδοση, χωρίς δηλαδή την άδεια χρήσης, περιλαμβάνει ένα διαφημιστικό μήνυμα σε κάθε κλήση και επιτρέπει μέχρι 20 κλήσεις ακόμη και στον ίδιο αριθμό τηλεφώνου. Το πρόγραμμα ρυθμίστηκε σαν εσωτερικό τηλέφωνο του τηλεφωνικού κέντρου 3CX (Ext. 206).



Εικ. 9.3: Πειραματική εγκατάσταση δικτύου VoIP

Ο δεύτερος φορητός υπολογιστής συνδέθηκε στο υφιστάμενο δίκτυο του γραφείου (IP address 192.168.1.205). Σε αυτόν εγκαταστάθηκε το λογισμικό 3CX VoIP Phone ως εσωτερικό τηλέφωνο του τηλεφωνικού κέντρου (Ext. 205) το οποίο ρυθμίστηκε έτσι ώστε να απαντά αυτομάτως τις εισερχόμενες κλήσεις.

9.5 Μετρήσεις παραμέτρων ποιότητας VoIP

Για κάθε διαφορετική ρύθμιση των παραμέτρων της εντολής netem υλοποιήθηκαν 20 κλήσεις. Η διάρκεια της κάθε κλήσης ήταν σταθερή στα 17 s και ο συνολικός αριθμός των κλήσεων ήταν περί τις 4000. Για όλες τις κλήσεις καταγράφηκε και αναλύθηκε το RTP stream από το πρόγραμμα Voice2Phone Auto Dialer (Ext. 206) προς το 3CX VoIP Phone (Ext. 205). Όλες οι κλήσεις έγιναν με χρήση του codec G.711 μ-law καθώς το πρόγραμμα των αυτόματων κλήσεων δεν υποστηρίζει άλλον codec.

9.5.1 Σταθερή καθυστέρηση

Στην αρχή έγιναν μετρήσεις για διαφορετικές τιμές σταθερής καθυστέρησης οι οποίες δεν είχαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Το πρόγραμμα CommView αξιολογεί και βαθμολογεί το κάθε stream της τηλεφωνικής συνδιάλεξης ξεχωριστά έχοντας ως συνέπεια την καλή βαθμολόγηση του μετρούμενου RTP stream καθώς η καθυστέρηση δεν επηρεάζει την ποιότητα μιας μονόδρομης επικοινωνίας. Ακόμη και για τιμές καθυστέρησης της τάξης του 1 s η αξιολόγηση MOS ήταν στη μέγιστη τιμή του codec G.711.

Καθώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν μη αξιοποιήσιμα, όλες οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν για τις ίδιες τιμές καθυστέρησης και έγινε ανάλυση και αξιολόγηση της ποιότητας με άλλο λογισμικό. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ManageEngine VQManager [72]. Τα αποτελέσματα όμως ήταν τα ίδια και έτσι κρίθηκε σκόπιμο οι μετρήσεις που αφορούν σε σταθερές τιμές καθυστέρησης να παραλειφθούν από την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

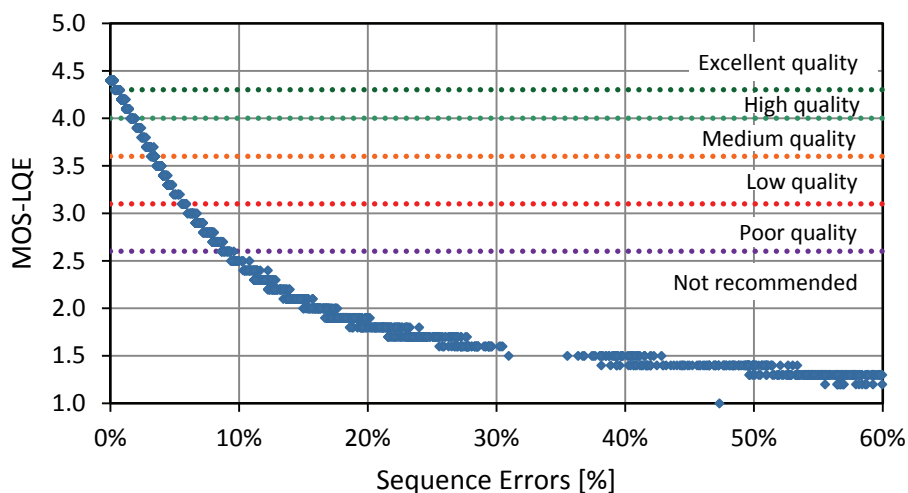
9.5.2 Μεταβαλλόμενη καθυστέρηση

Έγιναν μετρήσεις για διάφορες τιμές καθυστέρησης και για διάφορες τιμές διακύμανσης οι οποίες φαίνονται στον Πίν. 9.1 που ακολουθεί. Σε όλες τις μετρήσεις η κατανομή της διακύμανσης ήταν κανονική.

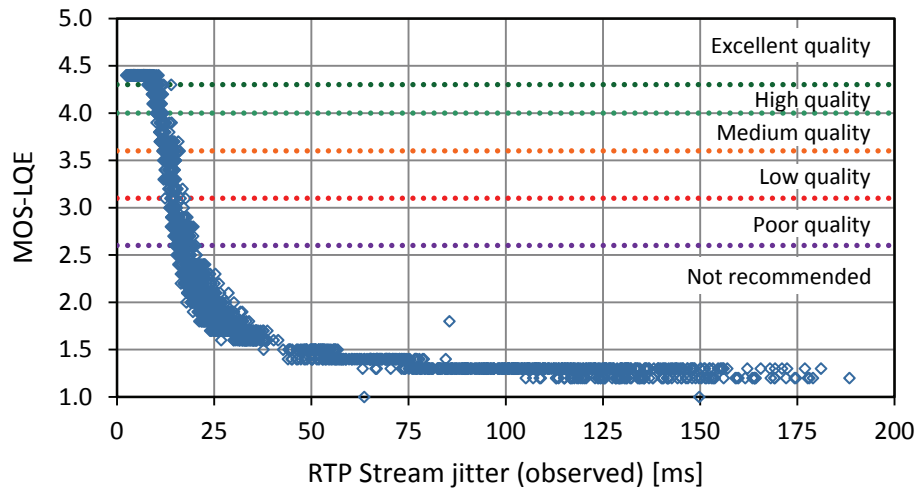
Καθυστέρηση	Τιμές διακύμανσης της καθυστέρησης
10 ms	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 ms
20 ms	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 ms
50 ms	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ms
100 ms	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ms
150 ms	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ms
200 ms	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ms

Πίν. 9.1: Τιμές καθυστέρησης και διακύμανσης αυτής

Η διακύμανση της καθυστέρησης έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να φθάνουν στον παραλήπτη με διαφορετική σειρά από αυτή που εστάλησαν. Προκύπτουν επομένως σφάλματα ακολουθίας τα οποία έχουν επίπτωση στην ποιότητα των κλήσεων VoIP. Το γράφημα της Εικ. 9.4, που προέκυψε από το σύνολο των μετρήσεων, δείχνει την επίδραση των σφαλμάτων ακολουθίας στο Mean Opinion Score όπου φαίνεται ότι όταν τα εκτός σειράς πακέτα υπερβούν σε ποσοστό το 6% η επικοινωνία αρχίζει να γίνεται προβληματική (MOS < 3.1).

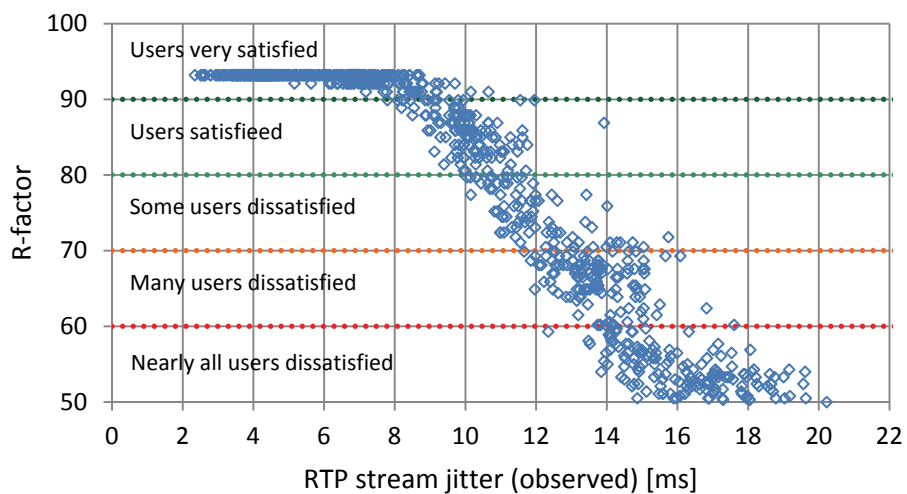


Εικ. 9.4: Επίδραση του ποσοστού σφαλμάτων ακολουθίας πακέτων στο MOS

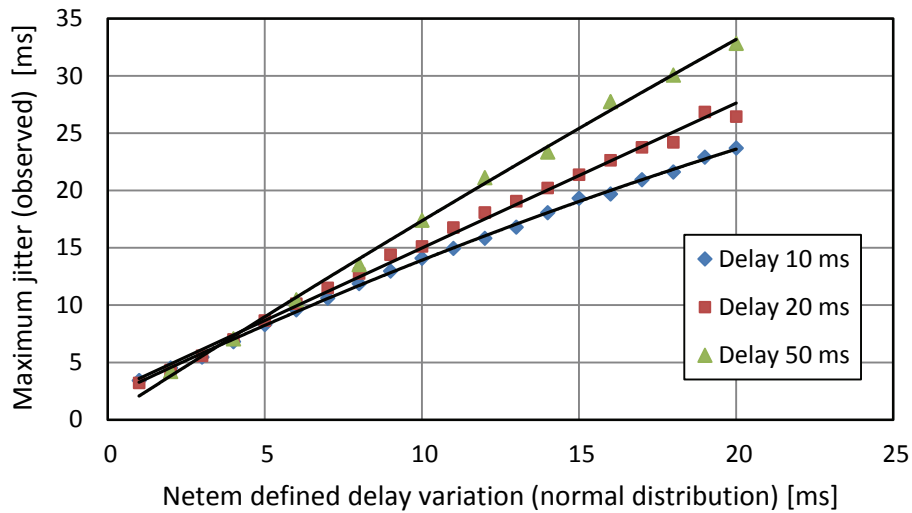


Εικ. 9.5: Συσχέτιση MOS με Jitter

Η επίδραση της διακύμανσης της καθυστέρησης του RTP stream στην ποιότητα της επικοινωνίας παρουσιάζεται στα διαγράμματα των Εικ. 9.5 και Εικ. 9.6. Στα δύο αυτά διαγράμματα των δεικτών MOS και R-factor φαίνεται ότι όταν το jitter είναι έως 9 ms η ποιότητα είναι εξαιρετική και οι χρήστες πολύ ικανοποιημένοι. Για τιμές 9 – 11 ms η ποιότητα παραμένει υψηλή και οι χρήστες ικανοποιημένοι. Όταν η διακύμανση ανέλθει στα 11 – 13 ms τότε η ποιότητα της επικοινωνίας είναι μέτρια με αποτέλεσμα κάποιοι χρήστες να μην είναι ικανοποιημένοι. Η επικοινωνία αρχίζει να γίνεται προβληματική όταν η διακύμανση της καθυστέρησης είναι μεγαλύτερη από 13 ms (R-factor < 70 και MOS < 3.6).

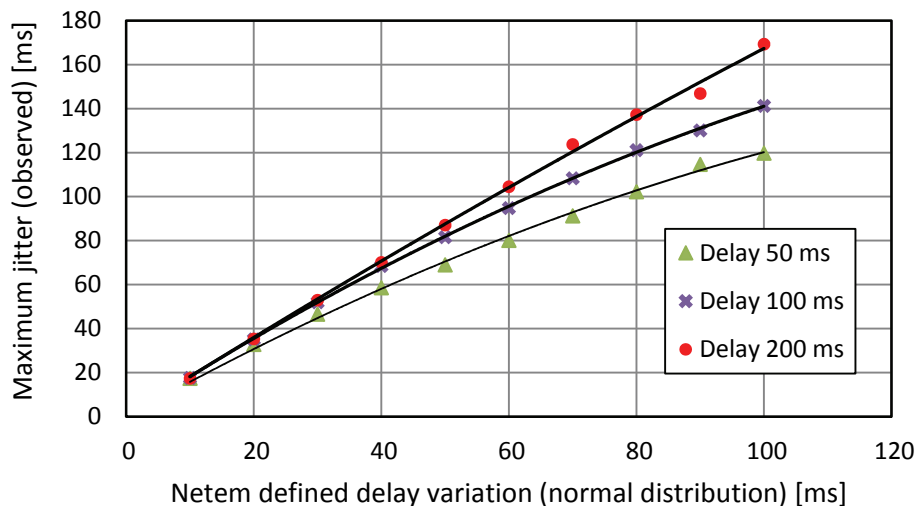


Εικ. 9.6: Συσχέτιση R-factor με Jitter



Εικ. 9.7: Συσχέτιση του μετρηθέντος max jitter με την ορισθείσα διακύμανση μέσω netem. Καθυστερήσεις βάσης 10 ms, 20 ms, 50 ms και κανονική κατανομή διακύμανσης

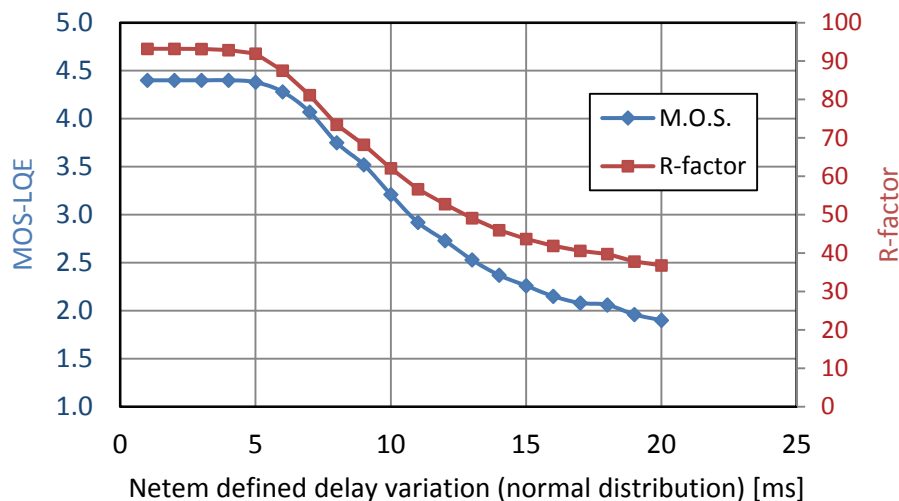
Η διαφοροποίηση της ορισθείσης, μέσω netem, διακύμανσης της καθυστέρησης και του καταγραφέντος jitter που φαίνεται στις Εικ. 9.7 και Εικ. 9.8 οφείλεται στο γεγονός ότι στο netem ορίστηκε η μέση τιμή της διακύμανσης (βάσει κανονικής κατανομής) ενώ το λογισμικό κατέγραφε τη μέγιστη τιμή της διακύμανσης για κάθε stream. Τα διαγράμματα αφορούν σε καθυστερήσεις βάσης 10 ms, 20 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms και διακύμανση από 1 – 100 ms.



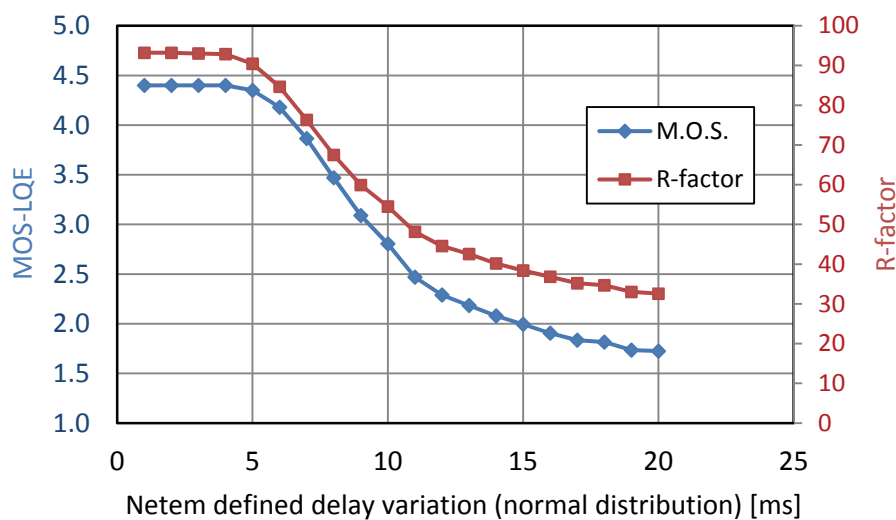
Εικ. 9.8: Συσχέτιση του μετρηθέντος max jitter με την ορισθείσα διακύμανση μέσω netem. Καθυστερήσεις βάσης 50 ms, 100 ms, 200 ms και κανονική κατανομή διακύμανσης

Στα επόμενα δύο διαγράμματα (Εικ. 9.9 και Εικ. 9.10) καταγράφεται η επίδραση της διακύμανσης της καθυστέρησης στους δείκτες R-factor και MOS Και στα δύο διαγράμματα, που

αφορούν σε καθυστέρηση 10 ms και 20 ms αντίστοιχα, φαίνεται ότι όταν η διακύμανση είναι μεγαλύτερη από περίπου 7 ms η τιμή του συντελεστή R-factor πέφτει κάτω από την τιμή 80 με αποτέλεσμα ο δείκτης ποιότητας της φωνής MOS να πέφτει κάτω από την τιμή 4.

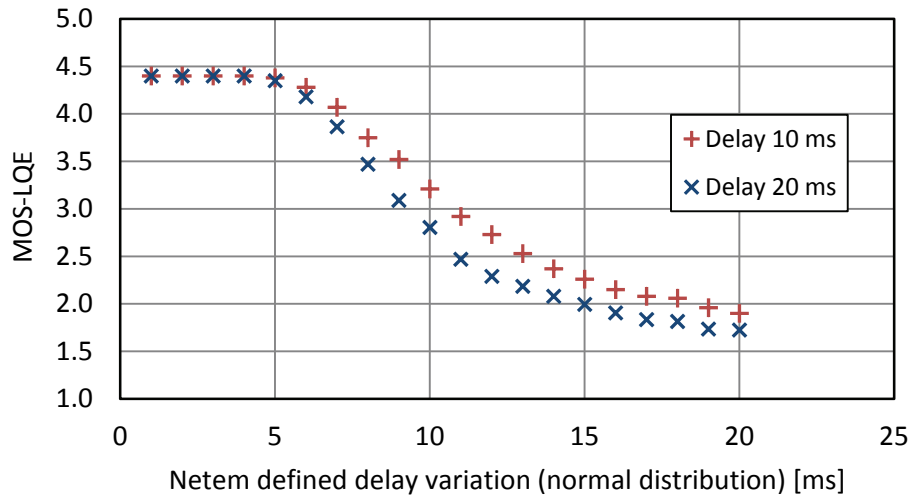


Εικ. 9.9: Επίδραση της ορισθείσης στο netem διακύμανσης της καθυστέρησης στο MOS και στο R-factor. Βασική καθυστέρηση 10 ms και κανονική κατανομή διακύμανσης



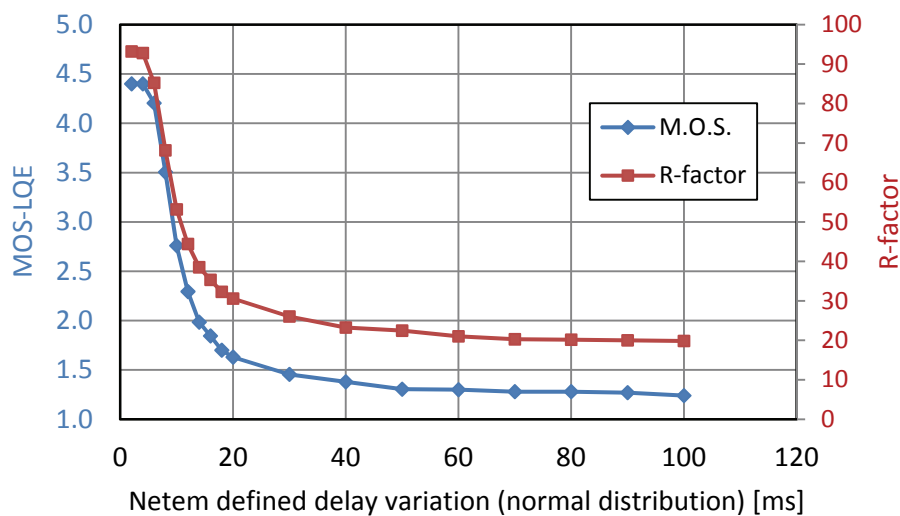
Εικ. 9.10: Επίδραση της ορισθείσης στο netem διακύμανσης της καθυστέρησης στο MOS και στο R-factor. Βασική καθυστέρηση 20 ms και κανονική κατανομή διακύμανσης

Η σύγκριση των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων έδειξε ότι η διακύμανση έχει μεγαλύτερη επίδραση στον δείκτη MOS όταν η τιμή της καθυστέρησης είναι μεγαλύτερη (Εικ. 9.11).

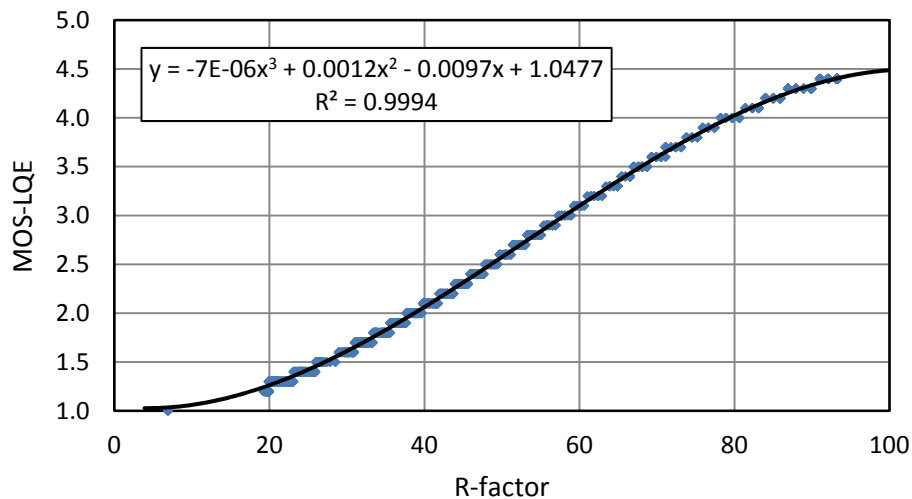


Εικ. 9.11: Σύγκριση καμπυλών μεταβολής MOS βάσει της διακύμανσης της καθυστέρησης για καθυστερήσεις βάσης 10 ms και 20 ms

Η ίδια επίδραση της διακύμανσης της καθυστέρησης καταγράφηκε και για τις μεγαλύτερες τιμές καθυστέρησης που δοκιμάστηκαν. Αυτές ήταν 50 ms, 100 ms, 150 ms και 200 ms (βλ. Πίν. 9.1). Στο γράφημα της Εικ. 9.12 που αφορά σε καθυστέρηση 100 ms και διακύμανση της καθυστέρησης από 2 ms έως και 100 ms φαίνεται ότι η τιμή του δείκτη MOS πέφτει κάτω από 4 όταν η διακύμανση υπερβεί την τιμή 7 ms περίπου, όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα των 10 ms και 20 ms. Τιμές διακύμανσης μεγαλύτερες των 10 ms ρίχνουν τον δείκτη MOS κάτω από την τιμή 3 με αποτέλεσμα οι κλήσεις να θεωρούνται προβληματικές.



Εικ. 9.12: Επίδραση της διακύμανσης της καθυστέρησης στο MOS Βασική καθυστέρηση 100 ms και κανονική κατανομή διακύμανσης



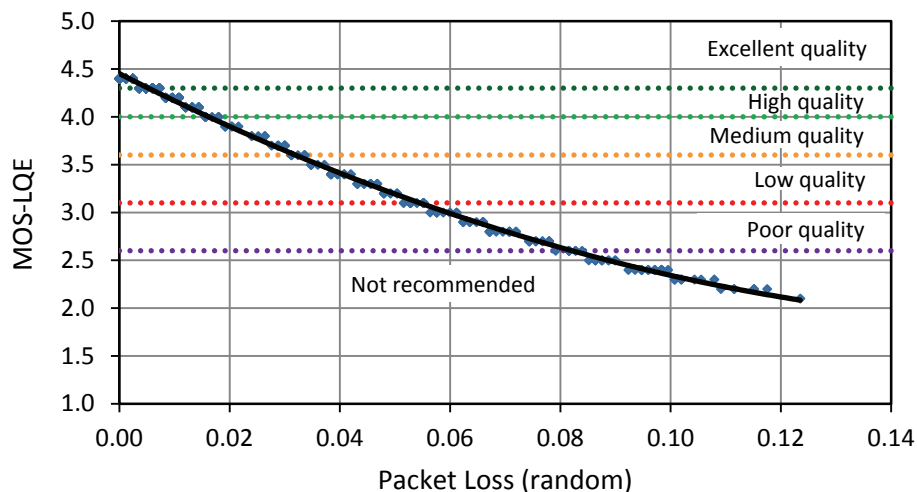
Εικ. 9.13: Συσχέτιση Mean Opinion Score και R-factor

Από το σύνολο των καταγεγραμμένων μετρήσεων προέκυψε το διάγραμμα της Εικ. 9.13 όπου φαίνεται η σχέση του συντελεστή R-factor με το Mean Opinion Score. Αν και το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού για τον υπολογισμό του δείκτη MOS συναρτήσει του R-factor είναι δεδομένο (βλ. σελ. 104), η προσαρμογή της καμπύλης τάσης που προκύπτει από τα δεδομένα των εργαστηριακών μετρήσεων είναι πάρα πολύ καλή ($R^2 = 0.994$).

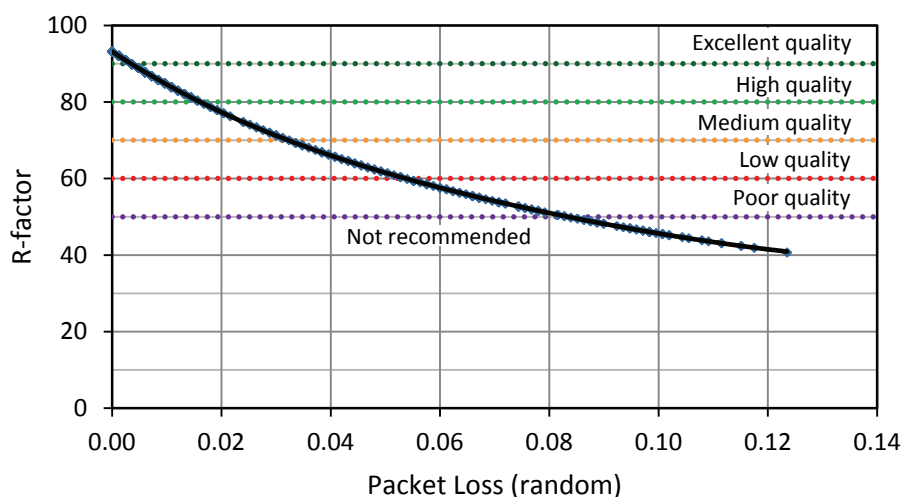
9.5.3 Τυχαία Απώλεια πακέτων

Έγιναν μετρήσεις για τυχαία απώλεια πακέτων σε μικρά ποσοστά από 0.1% έως και 10% και στη συνέχεια μετρήσεις σε μεγαλύτερα ποσοστά από 15% έως και 50%. Στα διαγράμματα που ακολουθούν χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της πρώτης σειράς μετρήσεων καθώς τα δεδομένα των μετρήσεων με τα μεγαλύτερα ποσοστά απώλειας πακέτων δεν προσφέρουν κάτι που να αξίζει να αναφερθεί.

Τα επόμενα δύο διαγράμματα δείχνουν την επίδραση του ποσοστού απώλειας πακέτων στον δείκτη MOS (Εικ. 9.14) και στον συντελεστή R-factor (Εικ. 9.15). Από αυτά προκύπτει ότι η απώλεια πακέτων σε ποσοστό έως 1.7% έχει μεν αρνητική επίδραση αλλά η ποιότητα της φωνής παραμένει σε καλά επίπεδα. Για ποσοστό απώλειας πακέτων από 1.7% έως 3.2% η ποιότητα είναι ακόμη σε αποδεκτά επίπεδα ($R\text{-factor} > 70$ και $MOS > 3.6$). Όταν δε το ποσοστό υπερβεί το 5.3%, τότε η ποιότητα κρίνεται φτωχή.

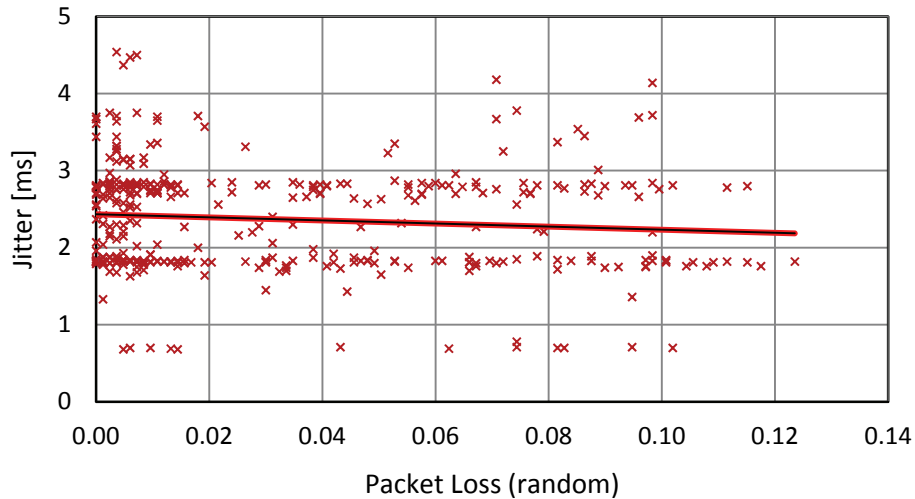


Εικ. 9.14: Επίδραση της απώλειας πακέτων στον δείκτη MOS

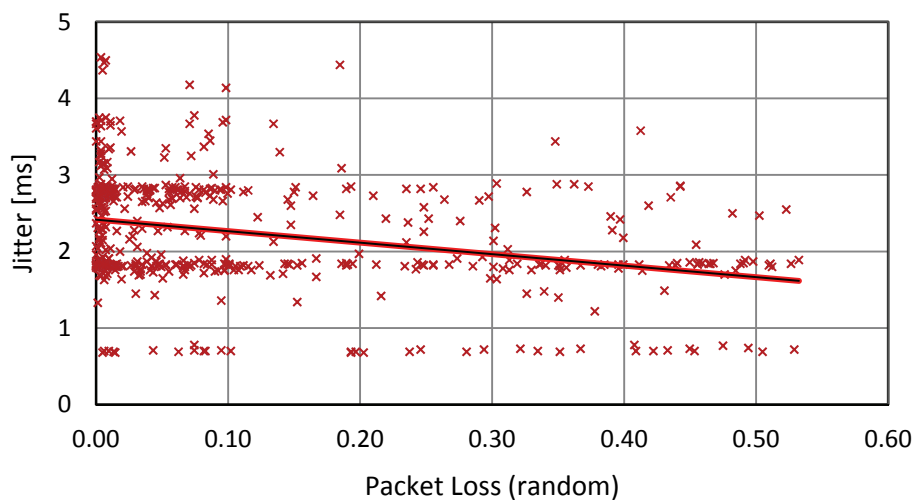


Εικ. 9.15: Επίδραση της απώλειας πακέτων στο R-factor

Σε όλες τις μετρήσεις, που έγιναν με τυχαία απώλεια πακέτων, το μέγιστο jitter των RTP streams διατηρήθηκε σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικ. 9.16, οι τιμές του maximum jitter κυμάνθηκαν από 0.68 ms έως 4.54 ms με μια μέση τιμή 2.24 ms. Στο ίδιο διάγραμμα έγινε προσπάθεια συσχέτισης του jitter με το ποσοστό απώλειας πακέτων. Διακρίνεται μια ελαφριά τάση μείωσης του jitter με την αύξηση του ποσοστού απώλειας πακέτων. Η τάση αυτή είναι πιο εμφανής στο διάγραμμα της Εικ. 9.17 όπου περιλήφθησαν και τα δεδομένα των μετρήσεων με τα μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών.



Εικ. 9.16: Επίδραση της απώλειας πακέτων στο Jitter (1)



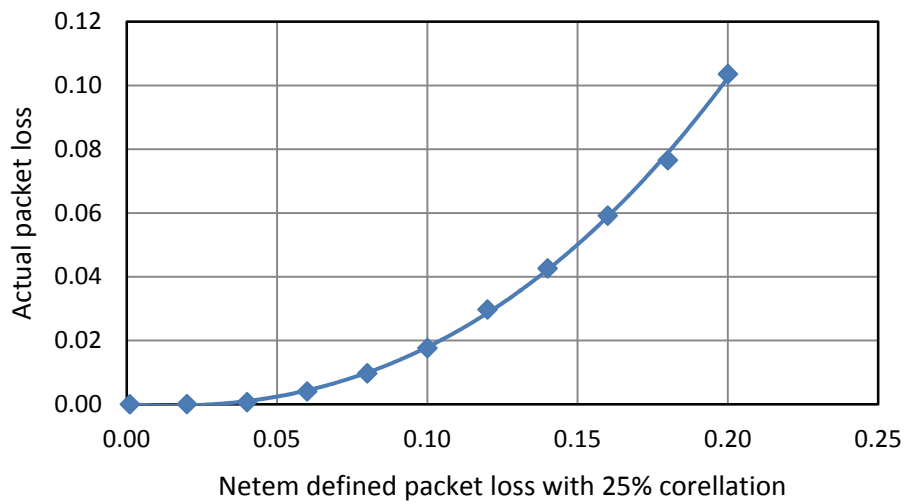
Εικ. 9.17: Επίδραση της απώλειας πακέτων στο Jitter (2)

Η μείωση των μέγιστων τιμών του jitter πρέπει να οφείλεται στην μείωση της κίνησης του δικτύου λόγω της απόρριψης και μη μετάδοσης από τον router (Linux PC) του προκαθορισμένου ποσοστού πακέτων.

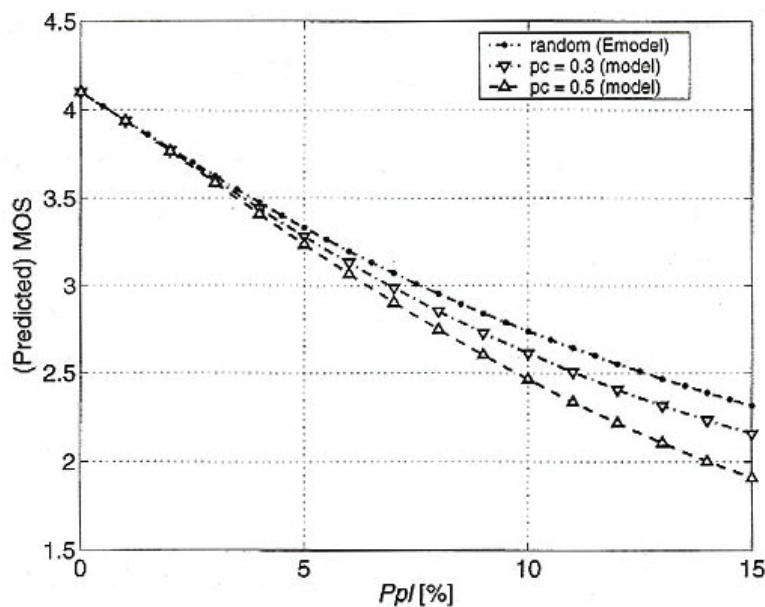
Η απώλεια πακέτων επηρεάζει και το ποσοστό των επιτυχών κλήσεων. Είναι προφανές ότι αν απολεσθεί κάποιο από τα αρχικά πακέτα του πρωτοκόλλου SIP, τότε η διαδικασία εγκαθίδρυσης της συνόδου δεν μπορεί να επιτευχθεί και η κλήση δεν ολοκληρώνεται επιτυχώς. Το ποσοστό των ανεπιτυχών κλήσεων εξαρτάται άμεσα από το προκαθορισμένο ποσοστό απώλειας πακέτων.

9.5.4 Συσχετισμένη απώλεια πακέτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η προσομοίωση του netem για απώλειες τύπου burst loss (βλ. παρ. 9.3.4) παρουσιάζει προβλήματα στην εφαρμογή της. Η μη σωστή λειτουργία του διαπιστώθηκε όταν ελήφθησαν μετρήσεις για ονομαστικές απώλειες πακέτων από 0.1% έως 20% με συσχέτιση 25%. Τα ποσοστά των απωλειών που καταγράφηκαν ήταν μικρότερα των καθορισθέντων με την εντολή netem όπως φαίνονται στο διάγραμμα της Εικ. 9.18.

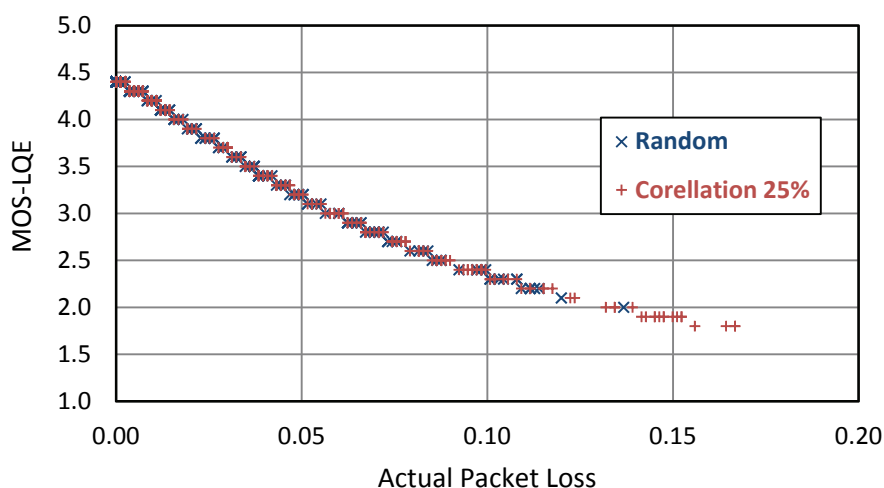


Εικ. 9.18: Καταγραφέντα ποσοστά απωλειών σε σχέση με τα αναμενόμενα προκαθορισθέντα μέσω της εντολής netem με συσχέτιση 25%



Εικ. 9.19: Σύγκριση της επίδρασης στον δείκτη MOS των συσχετισμένων κατά 30% και 50% απωλειών με τις τυχαίες απώλειες πακέτων (Raake [83])

Καθώς η τυπική απώλεια πακέτων στο Internet λαμβάνει χώρα με ξεσπάσματα διάρκειας 1 - 3 s με ποσοστό απώλειας 20 - 30%, η επίδραση στην ποιότητα της φωνής είναι σημαντική παρ' όλο που το συνολικό ποσοστό των απολεσθέντων πακέτων είναι ενδεχομένως πολύ χαμηλό. Για τον λόγο αυτό το E-model περιλαμβάνει την παράμετρο $BurstR$ στον τύπο υπολογισμού του R-factor (βλ. 7.8.1 Υπολογισμός του παράγοντα αξιολόγησης της μετάδοσης, R).

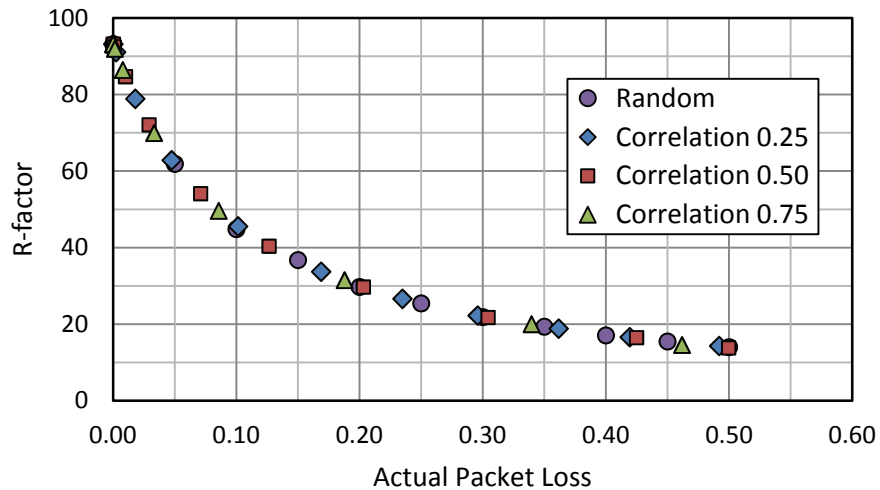


Εικ. 9.20: Καταγραφείσα επίδραση των συσχετισμένων απωλειών πακέτων στον δείκτη MOS και σύγκριση με τις τυχαίες απώλειες

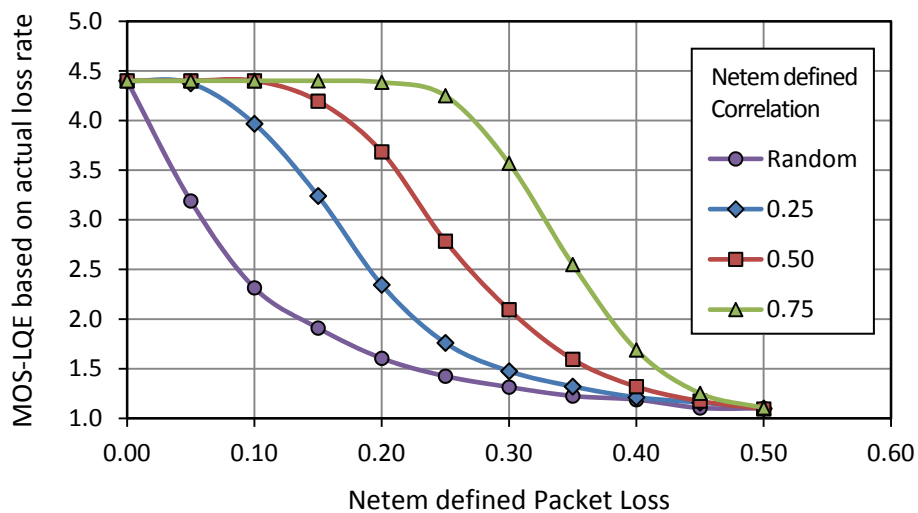
Θα ανέμενε λοιπόν κανείς ότι, για τα ίδια ποσοστά απώλειας πακέτων, το MOS score θα ήταν χαμηλότερο στην περίπτωση των συσχετισμένων απωλειών σε σύγκριση με τις τυχαίες απώλειες, όπως δείχνει και το διάγραμμα της Εικ. 9.19 (Raake [83]). Επιχειρήθηκε λοιπόν η σύγκριση των καταγεγραμμένων MOS μέσω του διαγράμματος της Εικ. 9.20. Όμως, στο διάγραμμα δεν φαίνεται κάποια διαφοροποίηση του MOS score στην περίπτωση των συσχετισμένων απωλειών. Προφανώς, το λογισμικό αξιολόγησης κατά τον υπολογισμό του συντελεστή $le-eff$ του R-factor χρησιμοποιεί τιμή $BurstR = 1$, που ισχύει για την τυχαία απώλεια πακέτων. Υπενθυμίζεται ότι η παράμετρος $BurstR$ εκφράζει την υπό συνθήκες πιθανότητα απώλειας πακέτων (βλ. παρ. 7.8.1).

Προς επιβεβαίωση των παραπάνω, ελήφθησαν συμπληρωματικές μετρήσεις με ποσοστά συσχέτισης 25%, 50% και 75% για απώλειες 5% - 50% με βήμα 5%. Τα αποτελέσματα που φαίνονται στο διάγραμμα της Εικ. 9.21 είναι σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα των αρχικών μετρήσεων και επιβεβαιώνουν τον προηγούμενο ισχυρισμό.

Τα προφανώς εσφαλμένα αποτελέσματα του δείκτη MOS παρουσιάζονται στο γράφημα της Εικ. 9.22. Η αύξηση του ποσοστού συσχέτισης μείωσε στην πραγματικότητα το συνολικό ποσοστό απωλειών γι' αυτό και μετρήθηκαν αυξημένες τιμές MOS



Εικ. 9.21: Ο υπολογισμός του R-factor από το πρόγραμμα CommView δεν λαμβάνει υπ' όψη την συσχέτιση των απωλειών



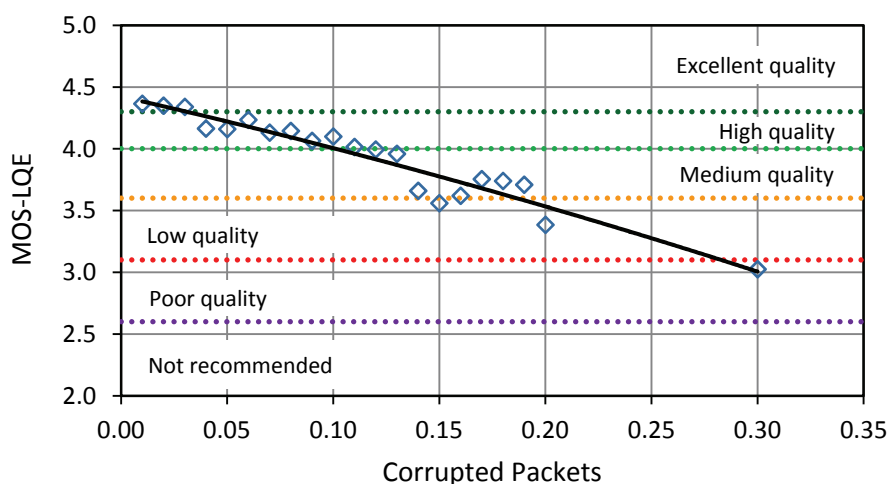
Εικ. 9.22: Η μη σωστή λειτουργία του netem στον καθορισμό συσχετισμένων απωλειών μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα.

9.5.5 Επίδραση στην ποιότητα των διπλών πακέτων

Τα διπλά πακέτα, όπως άλλωστε αναμενόταν, δεν έχουν καμία επίπτωση στην ποιότητα της φωνής και για το λόγο αυτό δεν παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

9.5.6 Επίδραση αλλοιωμένων πακέτων

Στο διάγραμμα της Εικ. 9.23 φαίνεται η επίδραση των αλλοιωμένων πακέτων στον δείκτη MOS. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όταν το ποσοστό είναι μικρότερο από 10% η ποιότητα είναι καλή (MOS > 4.0) ενώ για ποσοστό αλλοιωμένων πακέτων από 10% έως 18% η ποιότητα είναι αποδεκτή (MOS > 3.6). Όταν το ποσοστό αλλοιωμένων πακέτων υπερβεί το 18% η υποβάθμιση της ποιότητας είναι σημαντική.

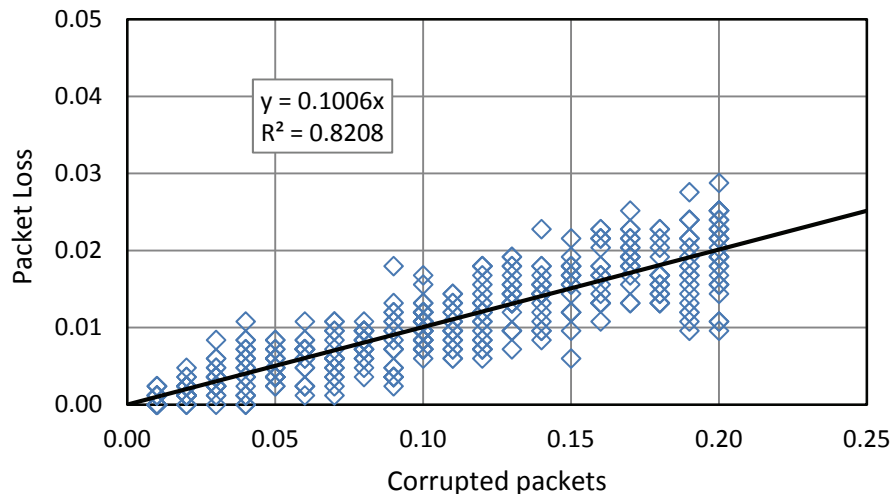


Εικ. 9.23: Επίδραση αλλοιωμένων πακέτων στον δείκτη MOS

Η αλλοίωση των πακέτων μπορεί να προκαλέσει την απώλειά τους λόγω σφάλματος στην επικεφαλίδα IP. Στο διάγραμμα της Εικ. 9.24 φαίνεται ότι η σχέση αλλοιωμένων και απολεσθέντων πακέτων είναι γραμμική και ότι το ποσοστό των απολεσθέντων πακέτων ανέρχεται στο 10% του ποσοστού των αλλοιωθέντων. Πρέπει να αναφερθεί ότι για το συγκεκριμένο διάγραμμα και μόνο έγινε διαγραφή των έκτοπων σημείων (outlier data).

Οι απώλειες πακέτων οφείλονται προφανώς στην εισαγωγή σφάλματος από το netem στην επικεφαλίδα IP. Εσφαλμένο bit σε οποιαδήποτε θέση της επικεφαλίδας του πακέτου IP έχει σαν αποτέλεσμα την ανίχνευση σφάλματος CRC από τον παραλήπτη και την απόρριψη του πακέτου.

Το μέγεθος του IP header είναι 20 bytes ενώ το συνολικό μέγεθος του πακέτου μετάδοσης φωνής με χρήση του codec G.711 έχει μέγεθος 200 bytes (βλ. Πίν. 8.2). Η πιθανότητα επομένως να εισαχθεί το σφάλμα από το netem στην επικεφαλίδα IP είναι 10%.



Εικ. 9.24: Απώλειες πακέτων λόγω αλλοίωσης

9.5.7 Επίδραση αναδιάταξης πακέτων

Παρόλο που οι επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής λόγω αναδιάταξης των πακέτων μελετήθηκαν ήδη, μέσω των μετρήσεων με εισαγωγή καθυστέρησης με διακύμανση (βλ. παρ. 9.5.2), η εισαγωγή συσχέτισης στην παράμετρο της αναδιάταξης των πακέτων παρουσίαζε ενδιαφέρον. Όμως, κατά τις πρώτες δοκιμαστικές μετρήσεις έγινε φανερό ότι η λειτουργία της παρουσιάζει το ίδιο πρόβλημα με τη συσχέτιση των απωλειών. Για τους δύο αυτούς λόγους δεν κρίθηκε απαραίτητο να ληφθούν και να αναλυθούν μετρήσεις με την παράμετρο της αναδιάταξης.

9.6 Συμπεράσματα εργαστηριακών μετρήσεων

Τα συμπεράσματα που ακολουθούν αναφέρονται τόσο στα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις όσο και για στις ίδιες τις μετρήσεις των παραμέτρων που επιδρούν στην ποιότητα της τηλεφωνίας VoIP.

9.6.1 Συμπεράσματα για το χρησιμοποιηθέν λογισμικό

Το λειτουργικό σύστημα Linux, ένα σύστημα ανοικτού κώδικα, προσφέρει πληθώρα εργαλείων δικτύου όπως το Netem που χρησιμοποιήθηκε. Το εργαλείο έχει αρκετές δυνατότητες αλλά και το σημαντικό μειονέκτημα του αλγορίθμου συσχέτισης των παραμέτρων ο οποίος αποδείχθηκε ότι δεν λειτουργεί σωστά. Το πρόβλημα αφορά στον καθορισμό συσχετισμένων ποσοστών απωλειών πακέτων, όπως επίσης και στον καθορισμό συσχετισμένων ποσοστών αναδιάταξης πακέτων.

Το πρόγραμμα καταγραφής και ανάλυσης δικτύων CommView παρά τις πολλές δυνατότητες και την ευκολία χρήσης που προσφέρει έχει και σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, δεν υπολογίζει την καθυστέρηση των πακέτων που συλλαμβάνει με συνέπεια ο υπολογισμός του R-factor και κατ' επέκταση του MOS να μην είναι ακριβής. Και δεύτερον, δεν κάνει ανάλυση συσχέτισης των απωλειών. Εισάγει δηλαδή το ποσοστό των απολεσθέντων πακέτων στον υπολογισμό του R-factor χωρίς να αναλύσει την κατανομή τους για τυχόν συνεχόμενες απώλειες οι οποίες είναι γνωστό ότι επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα της φωνής. Άλλα παρόμοια εργαλεία αποδείχθηκε ότι παρουσιάζουν και αυτά μειονεκτήματα.

9.6.2 Συμπεράσματα μετρήσεων παραμέτρων ποιότητας

Η ποιότητα των μετρήσεων ήταν πάρα πολύ καλή, γεγονός που αποδεικνύεται από τις υπολογισθείσες τυπικές αποκλίσεις και επί πλέον φαίνεται στα διαγράμματα και στις προσαρμογές των καμπυλών στα δεδομένα.

Η απόκλιση της διακύμανσης της καθυστέρησης, μεταξύ της καταγραφείσας μέσω του προγράμματος CommView και της ορισθείσας μέσω του netem, οφείλεται στα γεγονότα ότι η τιμή που εξήγαγε το πρόγραμμα παρακολούθησης και καταγραφής αφορούσε στην μέγιστη τιμή jitter κάθε RTP stream, ενώ η τιμή που εισαγόταν στο netem αφορούσε στη μέση τιμή του jitter βάσει της κανονικής κατανομής.

Οι μετρήσεις της επίδρασης της διακύμανσης της καθυστέρησης στην ποιότητα της φωνής έδειξαν ότι, όταν αυτή είναι έως 9 ms η ποιότητα είναι εξαιρετική και παραμένει υψηλή μέχρι τα 11 ms. Όταν το jitter είναι στην περιοχή 11 – 13 ms τότε η ποιότητα της φωνής χαρακτηρίζεται μέτρια και για τιμές μεγαλύτερες από 13 ms η επικοινωνία αρχίζει να γίνεται προβληματική.

Τα σφάλματα ακολουθίας που οφείλονται στη διακύμανση της καθυστέρησης έχουν σημαντική επίπτωση στην ποιότητα της φωνής. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι όταν το ποσοστό τους είναι κάτω από 2% η ποιότητα της φωνής με τον codec G.711 είναι υψηλή έως εξαιρετική. Για ποσοστό σφαλμάτων ακολουθίας 2 – 4% η ποιότητα είναι μέτρια ενώ για 4 – 6% χαμηλή. Τέλος όταν το ποσοστό τους υπερβεί το 6%, τότε η ποιότητα χαρακτηρίζεται από φτωχή έως κακή.

Οι ίδιες απόλυτες τιμές διακύμανσης έχουν σοβαρότερες επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής όταν η καθυστέρηση βάσης είναι μεγαλύτερη. Οι μετρήσεις με καθυστέρηση βάσης 100 ms, που είχαν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς η καθυστέρηση προς τον server της OmniVoice είναι αυτής της τάξης μεγέθους, έδειξαν ότι, όταν η διακύμανση υπερβεί την τιμή των περίπου 7 ms, η τιμή του δείκτη MOS πέφτει κάτω από το 4 και όταν αυτή υπερβεί τα 10 ms, τότε πέφτει κάτω από το 3.

Συμπεράσματα για συσχετισμένες απώλειες δεν μπορούν να εξαχθούν λόγω των περιορισμών του netem και του CommView. Οι μετρήσεις για την επίδραση στην ποιότητα των κλήσεων των τυχαίων απωλειών με χρήση του codec G.711 χωρίς PLC έδειξαν ότι ποσοστά απωλειών έως 1.7% δεν έχουν μεγάλη επίπτωση και η ποιότητα παραμένει σε υψηλά επίπεδα με MOS > 4. Απώλειες σε ποσοστό από 1.7% έως 3.2% υποβαθμίζουν την ποιότητα σε μέτρια επίπεδα. Μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών έχουν σαν συνέπεια την περαιτέρω υποβάθμισή της, και όταν αυτά υπερβούν το 5.3% τότε η ποιότητα των κλήσεων είναι από φτωχή έως κακή.

Σχετικά με την επίδραση των αλλοιωμένων πακέτων στον δείκτη MOS, οι μετρήσεις έδειξαν ότι, όταν το ποσοστό είναι μικρότερο από 10% η ποιότητα είναι καλή (MOS > 4.0) ενώ για ποσοστό αλλοιωμένων πακέτων από 10% έως 18% η ποιότητα είναι αποδεκτή (MOS > 3.6). Όταν δε το ποσοστό αλλοιωμένων πακέτων υπερβεί το 18%, τότε η υποβάθμιση της ποιότητας είναι σημαντική.

Τέλος, καταγράφηκε ότι τα διπλά πακέτα δεν έχουν καμία επίπτωση στην ποιότητα της φωνής καθώς αυτά απορρίπτονται.

Κεφάλαιο 10

Στατιστικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνονται στατιστικά στοιχεία από τη λειτουργία του τηλεφωνικού κέντρου όπως η διαθεσιμότητα αλλά και θέματα ασφαλείας και ιδιωτικότητας.

10.1 Διαθεσιμότητα τηλεφωνικού κέντρου

Η διαθεσιμότητα του τηλεφωνικού κέντρου για κλήσεις VoIP μετρηθείσα το εξάμηνο από τον Νοέμβριο 2011 έως τον Απρίλιο 2012 ήταν 98.1%. Το ποσοστό είναι πολύ χαμηλό σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των συνδεδεμένων με γραμμές PSTN συμβατικών τηλεφωνικών κέντρων. Αυτό οφείλεται αφ' ενός στο χαμηλότερο ποσοστό διαθεσιμότητας των υπηρεσιών τηλεφωνίας VoIP σε σύγκριση με αυτό των υπηρεσιών τηλεφωνίας PSTN και αφ' ετέρου στο χαμηλότερο ποσοστό διαθεσιμότητας των software IP PBX σε σχέση με τα συμβατικά PBX.

Η μέτρηση της διαθεσιμότητας έγινε αναλύοντας τα αυτόματα e-mail που έστειλε ο server του VoIP provider για κάθε αποσύνδεση και επανασύνδεση όπως το παρακάτω.

```
Monitored 2xxxxx  
has changed status
```

from Unregistered (29/02/2012 03:30:15)

to Registered(UDP) (29/02/2012 03:40:01)

Η υπηρεσία τηλεφωνίας VoIP της εταιρείας OmniVoice διακόπτεται επί καθημερινής βάσης για 5 – 10 min για λόγους συντήρησης. Αυτό βέβαια συμβαίνει κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και συγκεκριμένα στις 03:30 αλλά η καθημερινή διακοπή μειώνει τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας στο 99.6% για διακοπές 5 min και στο 99.3% για διακοπές 10 min. Η περαιτέρω μείωση του ποσοστού διαθεσιμότητας οφείλεται σε έκτακτα προβλήματα του παρόχου ή του 3CX PBX, σε αναβαθμίσεις του λειτουργικού συστήματος του Η/Υ του τηλεφωνικού κέντρου και σε προληπτικές επανεκκινήσεις του συστήματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

10.2 Επιθέσεις στο τηλεφωνικό κέντρο

Σε διάστημα 9 μηνών, από 08/08/2011 έως 07/05/2012, καταγράφηκαν 100 συστηματικές επιθέσεις στο τηλεφωνικό κέντρο του γραφείου προερχόμενες από 13 διαφορετικές χώρες. Στον Πίν. 10.1 φαίνεται ο αριθμός των επιθέσεων ανά χώρα προέλευσης.

α/α	ISO Code	Χώρα	Αριθμός επιθέσεων
1	PSE	Palestinian Territory	35
2	USA	United States	26
3	DEU	Germany	11
4	EGY	Egypt	6
5	CHN	China	5
6	CAN	Canada	5
7	GBR	United Kingdom	3
8	KOR	Korea, Republic of	2
9	NLD	Netherlands	2
10	RUS	Russian Federation	2
11	ISR	Israel	1
12	POL	Poland	1
13	CHE	Switzerland	1
		Σύνολο	100

Πίν. 10.1: Αριθμός επιθέσεων ανά χώρα προέλευσης

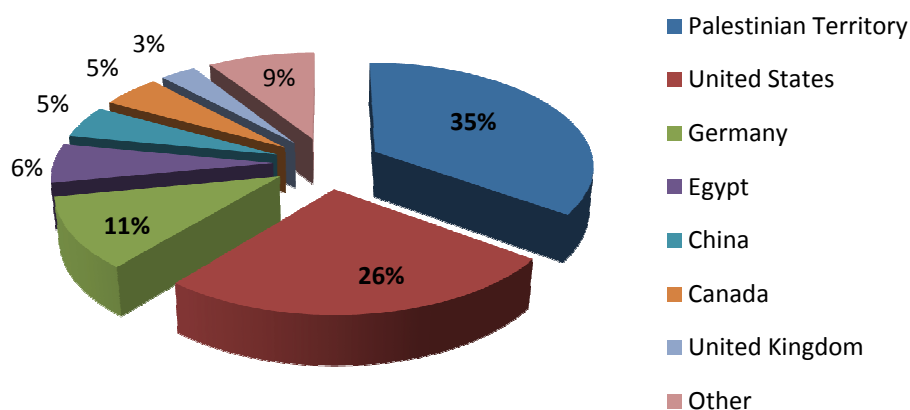
Το τηλεφωνικό κέντρο 3CX, μετά από έναν προκαθορισμένο αριθμό αποτυχημένων authentication, καταχωρεί την διεύθυνση IP από την οποία έγινε η αποτυχημένη προσπάθεια σε black list και στη συνέχεια απορρίπτει οποιαδήποτε άλλη αίτηση προερχόμενη από αυτή. Επίσης, αν εντοπίσει πολύ μεγάλο ρυθμό αιτημάτων, τότε και πάλι καταχωρεί την διεύθυνση προέλευσης των αιτημάτων. Έτσι προστατεύεται από επιθέσεις τύπου άρνησης υπηρεσίας (DoS, Denial of Service).

Ο γεωγραφικός εντοπισμός των καταγεγραμμένων διευθύνσεων IP στην blacklist του 3CX πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του web site Batch IP Locator [3]. Το συγκεκριμένο site, εκτός της αποτύπωσης σε χάρτη της τοποθεσίας μιας διεύθυνσης IP, έχει τη δυνατότητα αναζήτησης πολλαπλών διευθύνσεων. Χρησιμοποιεί τη βάση δεδομένων GeoLite City η οποία είναι διαθέσιμη δωρεάν στο web site της εταιρείας MaxMind, Inc [73]. Σύμφωνα με την εταιρεία, η ακρίβεια του GeoLite είναι 99.5% σε επίπεδο χώρας και 79% σε επίπεδο πόλης για τις Ηνωμένες Πολιτείες.

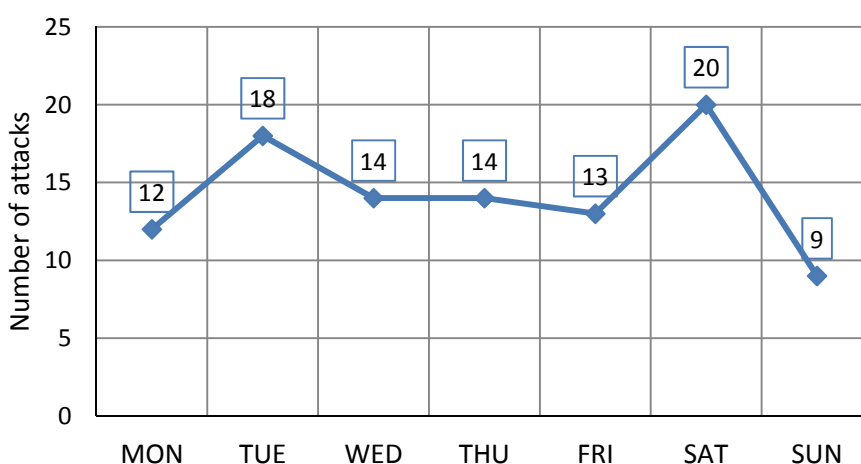


Εικ. 10.1: Απεικόνιση της προέλευσης των επιθέσεων σε χάρτη

Παρά την σχετικά μεγάλη ακρίβεια που έχει η βάση δεδομένων της MaxMind, ο γεωγραφικός προσδιορισμός του εισβολέα ενδεχομένως να μην είναι ακριβής, καθώς αυτός μπορεί να έχει χρησιμοποιήσει κάποιον proxy server ή και να έχει παραχαράξει την πραγματική του IP διεύθυνση. Στο γράφημα της Εικ. 10.2 φαίνονται τα ποσοστά των επιθέσεων ανά χώρα προέλευσης ενώ σε αυτό της Εικ. 10.3 η ημερήσια διακύμανση των επιθέσεων.



Εικ. 10.2: Κατανομή επιθέσεων ανά χώρα προέλευσης



Εικ. 10.3: Αριθμός επιθέσεων ανά ημέρα της εβδομάδος

Οι συστηματικές επιθέσεις στη μεγάλη τους πλειονότητα έγιναν με χρήση του λογισμικού SIPVicious Tools Suite. Είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο εργαλείο επιθέσεων σε τηλεφωνικά κέντρα και συσκευές VoIP. Η λειτουργία του περιλαμβάνει τη σάρωση δημοσίων IP διευθύνσεων με σκοπό να εντοπίσει κάποιον host που να έχει ανοιχτή τη θύρα 5060 που χρησιμοποιείται για SIP Registration. Αφού εντοπίσει μια τέτοια διεύθυνση, στη συνέχεια εξαπολύει επίθεση τύπου “brute force” κατά προτίμηση βασισμένη σε λεξικό προσπαθώντας να κάνει registration ένα εσωτερικό τηλέφωνο. Αν το επιτύχει, τότε μπορεί να πραγματοποιήσει κλήσεις δωρεάν χρεώνοντας το παραβιασμένο τηλέφωνο ή τηλεφωνικό κέντρο.

Το εργαλείο SIPVicious τρέχει σε υπολογιστές με λειτουργικό σύστημα Unix ή Linux και είναι διαθέσιμο από την ιστοσελίδα <http://code.google.com/p/sipvicious/>

Παρόλα τα μέσα προστασίας που μπορεί να λάβει ο διαχειριστής του δικτύου τηλεφωνίας VoIP, παραμένει το πρόβλημα κορεσμού του εύρους ζώνης (bandwidth saturation) κατά την εξέλιξη μιας επίθεσης.

Κεφάλαιο 11

Επίλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση και εφαρμογή μετρικών ποιότητας εμπειρίας (QoE) και υπηρεσίας (QoS) σε ένα τηλεφωνικό κέντρο VoIP αποσκοπώντας στη βελτιστοποίηση της ποιότητας των κλήσεων. Σε γενικές γραμμές ο στόχος επιτεύχθηκε. Επί πλέον, η συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής συνετέλεσε στην κατανόηση της λειτουργίας της τηλεφωνίας VoIP και των επιπτώσεων που έχουν στην ποιότητα της φωνής οι σχετικές παράμετροι.

Στο πρώτο κεφάλαιο, την εισαγωγή, έγινε μια σύντομη αναφορά στην τηλεφωνία VoIP, στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα των τηλεφωνικών κλήσεων και στην ανάγκη εξασφάλισης της καλύτερης δυνατής ποιότητας η οποία ήταν και η αφορμή για την έρευνα. Καταγράφηκε επίσης ο στόχος και η διάρθρωση της μεταπτυχιακής διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε μία σύντομη αναφορά στην εξέλιξη της τηλεφωνίας, από τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων, καταγράφηκαν αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τηλεφωνίας VoIP και έγινε μια σύντομη αναφορά στα σύγχρονα τηλεφωνικά κέντρα λογισμικού που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP και μπορούν να εγκατασταθούν σε κοινούς υπολογιστές.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορούσε στο κυρίαρχο σήμερα στην τηλεφωνία VoIP πρωτόκολλο σηματοδοσίας SIP. Παρουσιάστηκαν οι λειτουργίες και οι δυνατότητές του, επεξηγήθηκαν οι αιτήσεις και αποκρίσεις του πρωτοκόλλου και έγινε αναφορά στους τύπους των διακομιστών SIP. Τέλος, η ακολουθία μηνυμάτων που λαμβάνει χώρα από την αρχική κλήση έως την εγκατάσταση και τον τερματισμό της συνόδου επεξηγήθηκε αναλυτικά με δύο παραδείγματα.

Το αντικείμενο του τετάρτου κεφαλαίου ήταν τα άλλα βασικά στην τηλεφωνία VoIP πρωτόκολλα. Παρουσιάστηκε ο σκοπός και η λειτουργία του πρωτοκόλλου STUN, ενός πρωτοκόλλου που βοηθά στη σωστή δρομολόγηση των πακέτων όταν οι συσκευές VoIP βρίσκονται σε τοπικά δίκτυα πίσω από NAT. Έγινε αναφορά στο πρωτόκολλο SDP το οποίο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των λεπτομερειών της συνόδου όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης και ο κωδικοποιητής που θα χρησιμοποιηθούν στα πακέτα της φωνής. Υπεύθυνο για τη μεταφορά των πακέτων είναι το πρωτόκολλο RTP που εξετάστηκε αναλυτικά. Παρουσιάστηκε εν συντομία το πρωτόκολλο ελέγχου RTCP το οποίο παρέχει περιοδικές αναφορές σχετικά με τους συμμετέχοντες στη σύνοδο και την ποιότητα της μετάδοσης. Τέλος, έγινε μια σύντομη αναφορά στα πρωτόκολλα συμπίεσης των επικεφαλίδων CRTP και ROHC καθώς επίσης στα πρωτόκολλα SRTP και SRTCP τα οποία παρέχουν εμπιστευτικότητα και πιστοποίηση στα RTP και RTCP.

Το πέμπτο κεφάλαιο, το οποίο εν μέρει ξεφεύγει από το κυρίως θέμα της μεταπτυχιακής διατριβής, αναφέρεται εν συντομία στα θέματα ιδιωτικότητας της τηλεφωνίας VoIP. Έγινε καταγραφή των προσωπικών πληροφοριών που μπορεί να αποκαλύψουν τα πρωτόκολλα SIP και SDP και μια σύντομη αναφορά στους τρόπους προστασίας από υποκλοπές του πρωτοκόλλου RTP. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στα θέματα ιδιωτικότητας που αφορούν στο πρόγραμμα Skype, καθώς είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό VoIP. Αναλύθηκε το πως κάποιος μπορεί να εκμεταλλευτεί το κενό ασφαλείας, που δημοσιοποιήθηκε στα τέλη 2011, έτσι ώστε να αποκομίσει πληροφορίες που άπτονται της ιδιωτικότητας των ατόμων.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ποιότητα υπηρεσίας QoS η οποία προσπαθεί να δώσει απαντήσεις στις ανησυχίες χρηστών σχετικά με την ποιότητα της φωνής στην τηλεφωνία VoIP. Αναλύθηκαν τα στοιχεία που έχουν άμεση επίδραση στην ποιότητα, όπως, το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση, το jitter, οι απώλειες πακέτων, το μέγεθος των πακέτων, τα πακέτα που φθάνουν εκτός σειράς, τα σφάλματα bit στα πακέτα, η ηχώ, η ανίχνευση φωνητικής δραστηριότητας, η

αποκοπή της φωνής και οι codec. Παρουσιάστηκαν επίσης οι διάφορες τεχνικές εφαρμογής QoS σε δίκτυα IP με κυριότερες τα εικονικά δίκτυα VLAN και τις διαφοροποιημένες υπηρεσίες.

Αντικείμενο του εβδόμου κεφαλαίου ήταν η ποιότητα υπηρεσίας QoS. Αφού δόθηκαν οι απαραίτητοι ορισμοί και έγινε αναφορά στους παράγοντες που επιδρούν στην QoS, αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας τηλεφωνικών κλήσεων που διακρίνονται σε υποκειμενικές και αντικειμενικές. Αφού έγινε σύγκριση των δύο κατηγοριών, στη συνέχεια παρουσιάστηκαν εν συντομία οι υποκειμενικές μέθοδοι και πιο αναλυτικά οι αντικειμενικές που διακρίνονται σε παρεμβατικές και μη παρεμβατικές. Περιγράφηκαν εν συντομία οι παρεμβατικές μέθοδοι PSQM, PESQ, PSQM+, PAMS, PEAQ, POLQA και η μοναδική τυποποιημένη από την ITU μη παρεμβατική μέθοδος P.563. Μεγαλύτερη έκταση δόθηκε στον επίσης τυποποιημένο από την ITU αλγόριθμο E-model, ο οποίος είναι εύκολα εφαρμόσιμος και κατάλληλος για αξιολόγηση της ποιότητας στην τηλεφωνία VoIP. Τέλος, έγινε αναφορά στη σχετική με το δείκτη MOS σύσταση της ITU και στο απλοποιημένο E-model για χρήση VoIP.

Τα επόμενα τρία κεφάλαια αφορούν στο ερευνητικό μέρος της διπλωματικής διατριβής. Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφηκε το hardware και παρουσιάστηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης της τοπολογίας του δικτύου με την ταυτόχρονη εφαρμογή ποιότητας υπηρεσίας. Αναπτύχθηκε η μεθοδολογία των μετρήσεων που αφορούσαν σε πραγματικές κλήσεις VoIP οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μέσω του τηλεφωνικού κέντρου 3CX και παρουσιάστηκε το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων. Καταγράφηκαν συνολικά 1324 streams και χρησιμοποιήθηκαν 6 διαφορετικοί codecs.

Το ένατο κεφάλαιο αναφέρεται σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την περαιτέρω διερεύνηση των επιπτώσεων που έχουν οι διάφορες παράμετροι στην ποιότητα της φωνής. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κάτω από ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, μέσω πειραματικής εγκατάστασης VoIP που υλοποιήθηκε στο LAN. Για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών του Internet χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής Linux που ρυθμίστηκε να λειτουργεί ως router και ο περιλαμβανόμενος στο λειτουργικό σύστημα προσομοιωτής δικτύου netem. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν περί τις 4000 κλήσεις με αυτοματοποιημένο τρόπο.

Στο τελευταίο κεφάλαιο έγινε αναφορά στη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας VoIP η οποία ήταν 98.1%, ποσοστό μικρό σε σύγκριση με τη διαθεσιμότητα της σταθερής τηλεφωνίας PSTN. Παρουσιάστηκαν επίσης στατιστικά στοιχεία από επιθέσεις που δέχτηκε το τηλεφωνικό κέντρο.

11.1.1 Αποτελέσματα και συμπεράσματα μεθοδολογίας

Το λειτουργικό σύστημα Linux, ένα σύστημα ανοικτού κώδικα, προσφέρει πληθώρα εργαλείων δικτύου όπως το Netem που χρησιμοποιήθηκε. Το εργαλείο έχει αρκετές δυνατότητες αλλά και το σημαντικό μειονέκτημα του αλγορίθμου συσχέτισης των παραμέτρων ο οποίος αποδείχθηκε ότι δεν λειτουργεί σωστά. Το πρόβλημα αφορά στον καθορισμό συσχετισμένων ποσοστών απωλειών πακέτων, όπως επίσης και στον καθορισμό συσχετισμένων ποσοστών αναδιάταξης πακέτων.

Το πρόγραμμα καταγραφής και ανάλυσης δικτύων CommView παρά τις πολλές δυνατότητες και την ευκολία χρήσης που προσφέρει έχει και σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, δεν υπολογίζει την καθυστέρηση των πακέτων που συλλαμβάνει με συνέπεια ο υπολογισμός του R-factor και κατ' επέκταση του MOS να μην είναι ακριβής. Και δεύτερον, δεν κάνει ανάλυση συσχέτισης των απωλειών. Εισάγει δηλαδή το ποσοστό των απολεσθέντων πακέτων στον υπολογισμό του R-factor χωρίς να αναλύσει την κατανομή τους για τυχόν συνεχόμενες απώλειες οι οποίες είναι γνωστό ότι επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα της φωνής. Άλλα παρόμοια εργαλεία αποδείχθηκε ότι παρουσιάζουν και αυτά μειονεκτήματα.

Η αξιολόγηση της ποιότητας μέσω του αλγορίθμου E-model υλοποιείται για την κάθε κατεύθυνση της συνομιλίας ξεχωριστά εξάγοντας έναν εκτιμώμενο βαθμό ποιότητας MOS-LQE (Mean Opinion Score – Listening Quality, Estimated). Δεν αξιολογείται δηλαδή η ποιότητα της αμφίδρομης τηλεφωνικής συνδιάλεξης.

11.1.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα μετρήσεων παραμέτρων ποιότητας

Διαπιστώθηκε διαφορά στη δρομολόγηση των πακέτων από την πόλη της Θεσσαλονίκης προς την OmniVoice (Γερμανία) εξαρτώμενη από το αν η παρεχόμενη από την Otenet διεύθυνση IP είναι δυναμική ή στατική. Η διαφορά αφορά στη δρομολόγηση εντός του δικτύου υποδομής (backbone) του ΟΤΕ εντός της Ελλάδος, με αποτέλεσμα το RTT να είναι 55 – 65 ms από δυναμική διεύθυνση και 95 – 108 ms από την στατική διεύθυνση του γραφείου.

Από τους 6 codec που δοκιμάστηκαν οι G.711 a-law, G.711 μ-law και G.722 αποδείχθηκαν πολύ πιο απαιτητικοί σε bandwidth από τους GSM, iLBC και Speex. Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης μπορεί να μειωθούν στο 1/3 αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ο codec iLBC αντί των G.711 ή

G.722. Όμως, υπάρχουν επιπτώσεις στην ποιότητα του ήχου, καθώς η μείωση του bandwidth επιτυγχάνεται με τη μείωση του bit rate.

Η μειωμένη χρήση bandwidth των εισερχομένων σε σύγκριση με τα εξερχόμενα streams, οφείλεται στη λειτουργία VAD καθώς μεγάλο ποσοστό των κλήσεων ήταν προς και από συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Η λειτουργία VAD αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της κινητής τηλεφωνίας GSM για δύο λόγους. Πρώτον για εξοικονόμηση bandwidth και κατά συνέπεια αύξηση χωρητικότητας κλήσεων του δικτύου και δεύτερον για εξοικονόμηση ενέργειας στις φορητές συσκευές της κινητής τηλεφωνίας. Η μέση διαφορά που καταγράφηκε για το σύνολο των κλήσεων ήταν 12.4%. Το ποσοστό αυτό θα ήταν σαφώς μεγαλύτερο αν όλες οι κλήσεις αφορούσαν σε κινητά τηλέφωνα.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο codec iLBC παρέχει καλύτερη ποιότητα φωνής από τον G.711 όταν το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι μεγαλύτερο από 2.5% με απενεργοποιημένη τη λειτουργία απόκρυψης απολεσθέντων πακέτων και στους δύο codec. Σε μικρότερα ποσοστά απωλειών υπερτερεί ο G.711 λόγω του κατά πολύ μεγαλύτερου bit rate (64 Kbps έναντι 13.33 Kbps).

Η έως και δέκα φορές μεγαλύτερη διακύμανση της καθυστέρησης των εισερχομένων σε σχέση με τα εξερχόμενα stream δεν είχε καμία επίπτωση στην ποιότητα της φωνής από τι στιγμή που αυτή ήταν μικρότερη των 50 ms και στην μεγάλη πλειονότητα των κλήσεων μικρότερη των 30 ms.

Οι εργαστηριακές μετρήσεις της επίδρασης της διακύμανσης της καθυστέρησης στην ποιότητα της φωνής έδειξαν ότι, όταν αυτή είναι έως 9 ms η ποιότητα είναι εξαιρετική και παραμένει υψηλή μέχρι τα 11 ms. Όταν το jitter είναι στην περιοχή 11 – 13 ms τότε η ποιότητα της φωνής χαρακτηρίζεται μέτρια και για τιμές μεγαλύτερες από 13 ms η επικοινωνία αρχίζει να γίνεται προβληματική. Η διαφορά με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πραγματικών κλήσεων οφείλεται αφ' ενός στον τρόπο που υλοποιείται η διακύμανση στον προσομοιωτή Netem και αφ' ετέρου στον τρόπο καταγραφής της διακύμανσης της καθυστέρησης και στον τρόπο υπολογισμού του R-factor από το πρόγραμμα καταγραφής CommView.

Τα σφάλματα ακολουθίας που οφείλονται στη διακύμανση της καθυστέρησης έχουν σημαντική επίπτωση στην ποιότητα της φωνής. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι όταν το ποσοστό τους είναι κάτω από 2% η ποιότητα της φωνής με τον codec G.711 είναι υψηλή έως εξαιρετική. Για ποσοστό

σφαλμάτων ακολουθίας 2 – 4% η ποιότητα είναι μέτρια ενώ για 4 – 6% χαμηλή. Τέλος όταν το ποσοστό τους υπερβεί το 6%, τότε η ποιότητα χαρακτηρίζεται από φτωχή έως κακή.

Οι ίδιες απόλυτες τιμές διακύμανσης έχουν σοβαρότερες επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής όταν η καθυστέρηση βάσης είναι μεγαλύτερη. Οι μετρήσεις με καθυστέρηση βάσης 100 ms, που είχαν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς η καθυστέρηση προς τον server της OmniVoice είναι αυτής της τάξης μεγέθους, έδειξαν ότι, όταν η διακύμανση υπερβεί την τιμή των περίπου 7 ms, η τιμή του δείκτη MOS πέφτει κάτω από το 4 και όταν αυτή υπερβεί τα 10 ms, τότε πέφτει κάτω από το 3.

Οι μετρήσεις για την επίδραση στην ποιότητα των κλήσεων των τυχαίων απωλειών με χρήση του codec G.711 χωρίς PLC έδειξαν ότι ποσοστά απωλειών έως 1.7% δεν έχουν μεγάλη επίπτωση και η ποιότητα παραμένει σε υψηλά επίπεδα με MOS > 4. Απώλειες σε ποσοστό από 1.7% έως 3.2% υποβαθμίζουν την ποιότητα σε μέτρια επίπεδα. Μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών έχουν σαν συνέπεια την περαιτέρω υποβάθμισή της, και όταν αυτά υπερβούν το 5.3% τότε η ποιότητα των κλήσεων είναι από φτωχή έως κακή.

Σχετικά με την επίδραση των αλλοιωμένων πακέτων στον δείκτη MOS, οι μετρήσεις έδειξαν ότι, όταν το ποσοστό είναι μικρότερο από 10% η ποιότητα είναι καλή (MOS > 4.0) ενώ για ποσοστό αλλοιωμένων πακέτων από 10% έως 18% η ποιότητα είναι αποδεκτή (MOS > 3.6). Όταν δε το ποσοστό αλλοιωμένων πακέτων υπερβεί το 18%, τότε η υποβάθμιση της ποιότητας είναι σημαντική.

11.1.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η πραγματοποίηση μετρήσεων μεταξύ δύο συνδρομητών του ιδίου παρόχου, με δεδομένο ότι οι μεταξύ τους κλήσεις δεν χρεώνονται, θα έδινε τη δυνατότητα μελέτης και άλλων codec, όπως G729, G726, siren7 και siren14.

Θα μπορούσε επίσης να μελετηθεί η επίδραση της κρυπτογράφησης της φωνής με χρήση του πρωτοκόλλου SRTP και διαφορετικούς αλγόριθμους κρυπτογράφησης.

Πραγματοποίηση εργαστηριακών μετρήσεων με χρήση του Trace Control for Netem (TCN) που επεκτείνει τις δυνατότητες παραμετροποίησης του Netem αλλά και του NetemCLG (Correlated Loss Generator) το οποίο διορθώνει το πρόβλημα των συσχετισμένων απωλειών.

Βιβλιογραφία

- [1] 3CX Phone System - Software Based VoIP IP PBX / PABX for Windows, 2012. [Online]. <http://www.3cx.com/>
- [2] Asterisk - The Open Source Telephony Projects, 2012. [Online]. <http://www.asterisk.org/>
- [3] Batch IP Locator, 2012. [Online]. <http://batchiplocator.webatu.com/>
- [4] Blackboard collaborate. Online Collaboration Software for Engaging Collaborative Learning, 2012. [Online]. <http://www.blackboard.com/platforms/collaborate/overview.aspx>
- [5] CIO Report - Wall Street Journal. Skype Knew of Security Flaw Since November 2010, Researchers say, 2012. [Online]. <http://blogs.wsj.com/cio/2012/05/01/skype-knew-of-security-flaw-since-november-2010-researchers-say/>
- [6] Cisco, Cisco TelePresence Secure Communications, 2009.
- [7] Cisco, DiffServ - The scalable end-to-end Quality of Service model, 2006.
- [8] Cisco, Voice Over IP – Per Call Bandwidth Consumption, 2006, Document ID: 7934.
- [9] Cisco, Wideband Audio and IP Telephony: Experience Higher-Quality Media, 2007.
- [10] R. Cole and J. Rosenbluth, "Voice over IP Performance Monitoring," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. Volume 31, no. 2, pp. 9-24, April 2001.
- [11] I. Cotanis, Voice Service Quality Evaluation Techniques and the New Technology, POLQA, 2010.
- [12] CRC - Communications Research Centre Canada. PEAQ - The ITU Standard for Objective Measurement of Audio Quality, 2012. [Online]. <http://www.crc.gc.ca/en/html/aas/home/peaq/peaq>
- [13] J. Doyle, *CCIE Professional Development Routing TCPIP*. Indianapolis, IN, USA: Cisco Press, 2005, vol. I.
- [14] Economist, "How the internet killed the phone business," *The Economist*, September 2005.
- [15] ETSI TR 102 643 V1.0.2, Human Factors (HF); Quality of Experience (QoE) requirements for real-time communication services, 2010.

- [16] Global IP Solutions, GIPS iLBC: Enabling robust telephony with a low-bit rate code, 2007.
- [17] B. L. Hanson, "A Brief History of Applied Behavioral Science at Bell Laboratories," *The Bell System Technical Journal*, vol. 62, no. 6, pp. 1571-1590, July-August 1983.
- [18] D. Hardman, "Noise and Voice Quality in VoIP Environments," Agilent Technologies, Inc., White Paper 2003.
- [19] W. C. Hardy, *VoIP Service Quality: Measuring and Evaluating Packet-Switched Voice*. New York: McGraw-Hill Professional, 2003.
- [20] A. Heravi and S. Mubarak, "Evaluation of Users Perspective on VoIP Security Vulnerabilities," in *Proceedings of The 9th Australian Information Security Management Conference*, Perth, Australia, 2011.
- [21] T. Hossfeld, D. Hock, P. Tran-Gia, K. Tutschku, and M. Fiedler, "Testing the IQX Hypothesis for Exponential Interdependency between QoS and QoE of Voice Codecs iLBC and G.711," University of Wurzburg Institute of Computer Science, Research Report Series 2008.
- [22] IEEE Std 802.1Q, Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridge Local Area Networks, 2011.
- [23] IETF RFC 2205, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification," 1997.
- [24] IETF RFC 2474, Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers, 1998.
- [25] IETF RFC 2475, An Architecture for Differentiated Services, 1998.
- [26] IETF RFC 2508, Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links, 1999.
- [27] IETF RFC 3031, Multiprotocol Label Switching Architecture, 2001.
- [28] IETF RFC 3095, RObust Header Compression (ROHC): Framework and four profiles: RTP, UDP, ESP, and uncompressed, 2001.
- [29] IETF RFC 3261, SIP: Session Initiation Protocol, 2002.
- [30] IETF RFC 3262, Reliability of Provisional Responses in the Session Initiation Protocol (SIP), 2002.
- [31] IETF RFC 3265, Session Initiation Protocol (SIP)-Specific Event Notification, 2002.

- [32] IETF RFC 3311, The Session Initiation Protocol (SIP) UPDATE Method, 2002.
- [33] IETF RFC 3323, A Privacy Mechanism for the Session Initiation Protocol (SIP), 2002.
- [34] IETF RFC 3428, "Session Initiation Protocol (SIP) Extension for Instant Messaging," 2002.
- [35] IETF RFC 3489, STUN - Simple Traversal of User Datagram Protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs), 2003.
- [36] IETF RFC 3515, The Session Initiation Protocol (SIP) Refer Method, 2003.
- [37] IETF RFC 3550, RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, 2003.
- [38] IETF RFC 3711, The Secure Real-time Transport Protocol (SRTP), 2004.
- [39] IETF RFC 3951, Internet Low Bit Rate Codec (iLBC), 2004.
- [40] IETF RFC 4566, SDP: Session Description Protocol, 2006.
- [41] IETF RFC 5367, Subscriptions to Request-Contained Resource Lists in the Session Initiation Protocol (SIP), 2008.
- [42] IETF RFC 5389, Session Traversal Utilities for NAT (STUN), 2008.
- [43] IETF RFC 6086, Session Initiation Protocol (SIP) INFO Method and Package Framework, 2011.
- [44] IETF RFC 6189, ZRTP: Media Path Key Agreement for Unicast Secure RTP, 2011, Informational.
- [45] ITU-R BS.1387-1 Recommendation, Method for objective measurements of perceived audio quality, 2001.
- [46] ITU-T Recommendation G.107, The E-model: a computational model for use in transmission planning, 2009.
- [47] ITU-T Recommendation G.109, Definition of categories of speech transmission, 1999.
- [48] ITU-T Recommendation G.113, Transmission impairments due to speech processing, 2007.
- [49] ITU-T Recommendation G.114, One-way transmission time, 2003.
- [50] ITU-T Recommendation G.131, Control of Talker Echo, 1996.

- [51] ITU-T Recommendation G.821, Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network, 2002.
- [52] ITU-T Recommendation H.323, Packet-based multimedia communications systems, 2009.
- [53] ITU-T Recommendation P.10/G.100, Amendment 2: New definitions for inclusion in Recommendation ITU-T P.10/G.100, 2006.
- [54] ITU-T Recommendation P.562, Analysis and interpretation of INMD voice-service measurements, 2004.
- [55] ITU-T Recommendation P.563, Single-ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephony applications, 2004.
- [56] ITU-T Recommendation P.80, Methods for Subjective Determination of Transmission Quality, 1993.
- [57] ITU-T Recommendation P.800, Methods for subjective determination of transmission quality, 1996.
- [58] ITU-T Recommendation P.800.1, Mean Opinion Score (MOS) terminology, 2006.
- [59] ITU-T Recommendation P.82, Method of evaluation of service from the standpoint of speech transmission quality, 1993.
- [60] ITU-T Recommendation P.830, Subjective Performance Assessment of Telephone-Band and Wideband Digital Codecs, 1996.
- [61] ITU-T Recommendation P.861, Objective Quality Measurement of Telephone-Band (300-3400 Hz) Speech Codecs, 1998.
- [62] ITU-T Recommendation P.862, Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs, 2001.
- [64] ITU-T Recommendation P.863, Perceptual Objective Listening Quality Assessment, 2011.
- [63] ITU-T Recommendation P.863, Perceptual objective listening quality assessment, 2011.
- [65] ITU-T Study Group 12. E-model Calculation Tool, 2012. [Online].
<http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/index.htm>

- [66] ITU-T Supplement 11 (Series P), Some effect of Sidetone, 1993.
- [67] Javvin Technologies, *Network Protocols Handbook*, 2nd ed. Saratoga, CA: Javvin Technologies Inc., 2005.
- [68] A. Johnston, *SIP: Understanding the Session Initiation Protocol*, 2nd ed. Norwood, MA, U.S.A.: Artech House, Inc., 2004.
- [69] W. Kabaciński, "Fundamentals of Communication Systems," in *Telecommunication Systems and Technologies*, Paolo Bellavista, Ed.: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2009, vol. I.
- [70] J. Kurose and K. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach*, 5th ed. New York: Addison Wesley, 2010.
- [71] S. Le Blond, C. Zhang, A. Legout, K. Ross, and W. Dabbous, "I know where you are and what you are sharing: exploiting P2P communications to invade users' privacy," in *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, Berlin, Germany, 2011, pp. 45-60.
- [72] ManageEngine VQManager - VoIP Monitoring software solution, 2011. [Online]. <http://www.manageengine.com/products/vqmanager/>
- [73] MaxMind GeoLite City - Free Geolocation Database, 2012. [Online]. <http://www.maxmind.com/app/geolitecity>
- [74] S. Mohamed, Evaluation automatique de la qualité des flux multimédias en temps réel: une approche par réseaux de neurones, Thèse de doctorat, 2003, Université de Rennes 1.
- [75] OPTICOM GmbH. P.563 – Single Sided Speech Quality Measure, 2005. [Online]. <http://www.opticom.de>
- [76] pastebin. Skype user IP-address disclosure. [Online]. <http://pastebin.com/rBu4jDm8>
- [77] R. M. Perea, *Internet Multimedia Communications Using SIP: A Modern Approach Including Java® Practice.*: Morgan Kaufmann, 2008.
- [78] C. Perkins, *RTP Audio and Video for the Internet.*: Addison-Wesley, 2008.
- [79] POLQA Coalition, POLQA: Perceptual Objective Listening Quality Analysis, 2011.
- [80] Providers List and directory, 2012. [Online]. <http://www.voipproviderslist.com>
- [81] Psytechnics, Estimating E-model Id within a VoIP network, 2002, Technical Note.

- [82] Psytechnics, PAMS: Measuring speech quality over networks.as the customers hear it, 2001, White Paper.
- [83] A. Raake, *Speech Quality of VoIP: Assessment and Prediction*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [84] A. Rix and M. Hollier, "The perceptual analysis measurement system for robust end-to-end speech quality assessment," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP '00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on*, vol. III, Istanbul, Turkey, 2000, pp. 1515-1518.
- [85] S. Salsano, F. Ludovici, A. Ordine, and D. Giannuzzi, "Definition of a general and intuitive loss model for packet networks and its implementation in the Netem module in the Linux kernel," University of Rome "Tor Vergata", Rome, 2012.
- [86] C. Shen and H. Schulzrinne, A VoIP Privacy Mechanism and its Application in VoIP Peering for Voice Service Provider Topology and Identity Hiding, 2008, arXiv:0807.1169v1 [cs.NI].
- [87] H. Sinnreich and A. Johnston, *Internet communications using SIP : delivering VoIP and multimedia services with Session Initiation Protocol*, 2nd ed. Indianapolis, IN: Wiley Publishing, Inc., 2006.
- [88] Skype. Guide to Skype logging. [Online].
<http://developer.skype.com/SkypeGarage/LogFile>
- [89] Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2012. [Online].
<http://plato.stanford.edu/entries/privacy/>
- [90] TamoSoft - Wired and Wireless Network Analysis Software, 2012. [Online].
<http://www.tamos.com/>
- [91] A. Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2003.
- [92] T. Thiede et al., "PEAQ - The ITU Standard for Objective Measurement of Perceived Audio Quality," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 48, no. 1/2, pp. 3-29, January/February 2000.
- [93] Voice2Phone Auto Dialer - Voice Broadcasting Software by Phone using VoIP. [Online]. <http://voice2phone.com/auto-dialer>
- [94] VoIP Troubleshooter OnLine Diagnostic Tools: VoIP Quality and Bandwidth Calculator, 2012. [Online].
<http://www.voiptroubleshooter.com/diagnosis/emodel.html>
- [95] VOIPSA. A Tour Through Zfone, Voice of VOIPSA, 2006. [Online].

<http://voipsa.org/blog/2006/06/19/a-tour-through-zfone/>

[96] T. Wallingford, *Switching to VoIP*. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2005.

[97] Zfone. The Zfone project, 2006. [Online]. <http://zfoneproject.com/>

[98] G. Zhang, "An Analysis for Anonymity and Unlinkability for a VoIP Conversation," in *Privacy and Identity Management for Life*, M. Bezzi et al., Eds. Boston: Springer, 2010, vol. 320, pp. 198-212.

[99] ΦΕΚ 1301B/12.04.2012, Εφημερίδα της Κυβέρνησης, 2012.

Παράρτημα Α

Παράδειγμα συνόδου SIP

A.1 Σύνοδος SIP με χρήση proxy server

	Bob 192.168.1.202	IP PBX 192.168.1.3	Alice 192.168.1.201
1	UDP-5060----INVITE---5060->		
2	<-5060-407 Proxy A-5060-UDP		
3	UDP-5060-----ACK-----5060->		
4	UDP-5060----INVITE---5060->		
5	<-5060-100 Trying/-5060-UDP		
6		UDP-5060----INVITE---5060->	
7		<-5060-100 Trying/-5060-UDP	
8		<-5060-180 Ringing-5060-UDP	
9	<-5060-180 Ringing-5060-UDP		
10		<-5060-200 OK/INVI-5060-UDP	
11		UDP-5060-----ACK-----5060->	
12	<-5060-200 OK/INVI-5060-UDP		
13	UDP-5060-----ACK-----5060->		
14	UDP-16446-----audio/PCMU(0)-----16408->		
15	<-16446-----audio/PCMU(0)-----16408-UDP		
16	UDP-5060-----BYE-----5060->		
17	<-5060--200 OK/BYE-5060-UDP		
18		UDP-5060-----BYE-----5060->	
19		<-5060--200 OK/BYE-5060-UDP	

Msg #1 / 192.168.1.202:5060 --> 192.168.1.3:5060
INVITE sip:201@192.168.1.3 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-25f40652
From: "Bob" <sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
To: "Alice" <sip:201@192.168.1.3>
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 101 INVITE
Max-Forwards: 70
Contact: "Bob" <sip:202@192.168.1.202:5060>
Expires: 240
User-Agent: Linksys/SPA941-5.1.8
Content-Length: 403
Allow: ACK, BYE, CANCEL, INFO, INVITE, NOTIFY, OPTIONS, REFER
Supported: replaces
Content-Type: application/sdp

v=0
o=- 114442329 114442329 IN IP4 192.168.1.202
s=-
c=IN IP4 192.168.1.202
t=0 0
m=audio 16446 RTP/AVP 0 2 4 8 18 96 97 98 101
a=rtpmap:0 PCMU/8000
a=rtpmap:2 G726-32/8000
a=rtpmap:4 G723/8000
a=rtpmap:8 PCMA/8000
a=rtpmap:18 G729a/8000
a=rtpmap:96 G726-40/8000
a=rtpmap:97 G726-24/8000
a=rtpmap:98 G726-16/8000
a=rtpmap:101 telephone-event/8000
a=fmtp:101 0-15
a=ptime:20
a=sendrecv

Msg #2 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.202:5060
SIP/2.0 407 Proxy Authentication Required

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-25f40652
Proxy-Authenticate: Digest
nonce="414d535c05322be788:d7ea25b60256f38b12b31b96fd5828ef",algorithm=MD5,realm="3CXPhoneSystem"
To: "Alice"<sip:201@192.168.1.3>;tag=e47d8075
From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 101 INVITE
User-Agent: 3CXPhoneSystem 10.0.22539.0
Content-Length: 0

Msg #3 / 192.168.1.202:5060 --> 192.168.1.3:5060

ACK sip:201@192.168.1.3 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-25f40652
From: "Bob" <sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
To: "Alice" <sip:201@192.168.1.3>;tag=e47d8075
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 101 ACK
Max-Forwards: 70
Contact: "Bob" <sip:202@192.168.1.202:5060>
User-Agent: Linksys/SPA941-5.1.8
Content-Length: 0

Msg #4 / 192.168.1.202:5060 --> 192.168.1.3:5060

INVITE sip:201@192.168.1.3 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-cf544972
From: "Bob" <sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
To: "Alice" <sip:201@192.168.1.3>
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 102 INVITE
Max-Forwards: 70
Proxy-Authorization: Digest
username="Robert",realm="3CXPhoneSystem",nonce="414d535c05322be788:d7ea25b60256f38b12b31b96fd5828ef",uri="sip:201@192.168.1.3",algorithm=MD5,response="b1a1dee339fd232b37a8e99d425226de"
Contact: "Bob" <sip:202@192.168.1.202:5060>
Expires: 240
User-Agent: Linksys/SPA941-5.1.8

Content-Length: 403
Allow: ACK, BYE, CANCEL, INFO, INVITE, NOTIFY, OPTIONS, REFER
Supported: replaces
Content-Type: application/sdp

v=0
o=- 114442329 114442329 IN IP4 192.168.1.202
s=-
c=IN IP4 192.168.1.202
t=0 0
m=audio 16446 RTP/AVP 0 2 4 8 18 96 97 98 101
a=rtpmap:0 PCMU/8000
a=rtpmap:2 G726-32/8000
a=rtpmap:4 G723/8000
a=rtpmap:8 PCMA/8000
a=rtpmap:18 G729a/8000
a=rtpmap:96 G726-40/8000
a=rtpmap:97 G726-24/8000
a=rtpmap:98 G726-16/8000
a=rtpmap:101 telephone-event/8000
a=fmtp:101 0-15
a=ptime:20
a=sendrecv

Msg #5 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.202:5060

SIP/2.0 100 Trying
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-cf544972
To: "Alice" <sip:201@192.168.1.3>
From: "Bob" <sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 102 INVITE
Content-Length: 0

Msg #6 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.201:5060

INVITE sip:201@192.168.1.201:5060 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-b1432c242534345c-1---d8754z-
;rport
Max-Forwards: 70

Contact: <sip:202@192.168.1.3:5060>
To: <sip:201@192.168.1.3>
From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02
Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.
CSeq: 1 INVITE
Allow: INVITE, ACK, CANCEL, OPTIONS, BYE, REGISTER, SUBSCRIBE, NOTIFY, REFER, INFO,
MESSAGE
Content-Type: application/sdp
Supported: replaces
User-Agent: 3CPhoneSystem 10.0.22539.0
Content-Length: 426

v=0
o=3cxPS 301520125952 278032023553 IN IP4 192.168.1.3
s=3cxPS Audio call
c=IN IP4 192.168.1.202
t=0 0
m=audio 16446 RTP/AVP 0 2 4 8 18 96 97 98 101
a=rtpmap:0 PCMU/8000
a=rtpmap:2 G726-32/8000
a=rtpmap:4 G723/8000
a=rtpmap:8 PCMA/8000
a=rtpmap:18 G729a/8000
a=rtpmap:96 G726-40/8000
a=rtpmap:97 G726-24/8000
a=rtpmap:98 G726-16/8000
a=rtpmap:101 telephone-event/8000
a=fmtp:101 0-15
a=ptime:20
a=sendrecv

Msg #7 / 192.168.1.201:5060 --> 192.168.1.3:5060
SIP/2.0 100 Trying
To: <sip:201@192.168.1.3>
From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02
Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.
CSeq: 1 INVITE
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-b1432c242534345c-1---d8754z-

Server: Linksys/SPA941-5.1.8

Content-Length: 0

Msg #8 / 192.168.1.201:5060 --> 192.168.1.3:5060

SIP/2.0 180 Ringing

To: <sip:201@192.168.1.3>;tag=da723b64ac0efd43i0

From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02

Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.

CSeq: 1 INVITE

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-b1432c242534345c-1---d8754z-

Server: Linksys/SPA941-5.1.8

Content-Length: 0

Msg #9 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.202:5060

SIP/2.0 180 Ringing

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-cf544972

Contact: <sip:201@192.168.1.3>

To: "Alice"<sip:201@192.168.1.3>;tag=7f5a4a64

From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0

Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202

CSeq: 102 INVITE

User-Agent: 3CXPhoneSystem 10.0.22539.0

Content-Length: 0

Msg #10 / 192.168.1.201:5060 --> 192.168.1.3:5060

SIP/2.0 200 OK

To: <sip:201@192.168.1.3>;tag=da723b64ac0efd43i0

From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02

Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.

CSeq: 1 INVITE

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-b1432c242534345c-1---d8754z-

Contact: "Alice" <sip:201@192.168.1.201:5060>

Server: Linksys/SPA941-5.1.8

Content-Length: 212

Allow: ACK, BYE, CANCEL, INFO, INVITE, NOTIFY, OPTIONS, REFER

Supported: replaces

Content-Type: application/sdp

v=0
o=- 88567512 88567512 IN IP4 192.168.1.201
s=-
c=IN IP4 192.168.1.201
t=0 0
m=audio 16408 RTP/AVP 0 101
a=rtpmap:0 PCMU/8000
a=rtpmap:101 telephone-event/8000
a=fmtp:101 0-15
aptime:20
a=sendrecv

Msg #11 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.201:5060

ACK sip:201@192.168.1.201:5060 SIP/2.0

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-5d07b15bc9728f5c-1---d8754z-
;rport

Max-Forwards: 70

Contact: <sip:202@192.168.1.3:5060>

To: <sip:201@192.168.1.3>;tag=da723b64ac0efd43i0

From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02

Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.

CSeq: 1 ACK

User-Agent: 3CXPhoneSystem 10.0.22539.0

Content-Length: 0

Msg #12 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.202:5060

SIP/2.0 200 OK

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-cf544972

Contact: <sip:201@192.168.1.3:5060>

To: "Alice"<sip:201@192.168.1.3>;tag=7f5a4a64

From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0

Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202

CSeq: 102 INVITE

Allow: INVITE, ACK, CANCEL, OPTIONS, BYE, REGISTER, SUBSCRIBE, NOTIFY, REFER, INFO,
MESSAGE

Content-Type: application/sdp

Supported: replaces

User-Agent: 3CXPhoneSystem 10.0.22539.0

Content-Length: 236

v=0

o=3cxPS 72427241472 485264195585 IN IP4 192.168.1.3

s=3cxPS Audio call

c=IN IP4 192.168.1.201

t=0 0

m=audio 16408 RTP/AVP 0 101

a=rtpmap:0 PCMU/8000

a=rtpmap:101 telephone-event/8000

a=fmtp:101 0-15

aptime:20

a=sendrecv

Msg #13 / 192.168.1.202:5060 --> 192.168.1.3:5060

ACK sip:201@192.168.1.3:5060 SIP/2.0

Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-3d1694d

From: "Bob" <sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0

To: "Alice" <sip:201@192.168.1.3>;tag=7f5a4a64

Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202

CSeq: 102 ACK

Max-Forwards: 70

Proxy-Authorization: Digest

username="Robert",realm="3CXPhoneSystem",nonce="414d535c05322be788:d7ea25b60256f38b12b31b96fd5828ef",uri="sip:201@192.168.1.3",algorithm=MD5,response="b1a1dee339fd232b37a8e99d425226de"

Contact: "Bob" <sip:202@192.168.1.202:5060>

User-Agent: Linksys/SPA941-5.1.8

Content-Length: 0

Msg #14 / 192.168.1.202:16446 --> 192.168.1.201:16408

Payload: audio/PCMU(0)

Source : 192.168.1.202:16446

Destination : 192.168.1.201:16408

Total Packets : 392

Out of Order Packets : 0

Dropped Packets : 0

Elapsed time (s) : 7.818380

Total Bytes : 83888
Average KBytes/Sec : 10.48
Average Jitter (ms) : 19.93
Start/End Packet # : 57/1621

Msg #15 / 192.168.1.201:16408 --> 192.168.1.202:16446

Payload: audio/PCMU(0)
Source : 192.168.1.201:16408
Destination : 192.168.1.202:16446
Total Packets : 404
Out of Order Packets : 0
Dropped Packets : 0
Elapsed time (s) : 8.060360
Total Bytes : 86456
Average KBytes/Sec : 10.47
Average Jitter (ms) : 19.99
Start/End Packet # : 59/1676

Msg #16 / 192.168.1.202:5060 --> 192.168.1.3:5060

BYE sip:201@192.168.1.3:5060 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-fca9d640
From: "Bob" <sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
To: "Alice" <sip:201@192.168.1.3>;tag=7f5a4a64
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 103 BYE
Max-Forwards: 70
Proxy-Authorization: Digest
username="Robert",realm="3CXPhoneSystem",nonce="414d535c05322be788:d7ea25b60256f38b12b31b96fd5828ef",uri="sip:201@192.168.1.3:5060",algorithm=MD5,response="e3331044e83c9f0df008c9acfb9bc2f2"
User-Agent: Linksys/SPA941-5.1.8
Content-Length: 0

Msg #17 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.202:5060

SIP/2.0 200 OK
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.202:5060;branch=z9hG4bK-fca9d640
Contact: <sip:201@192.168.1.3:5060>
To: "Alice"<sip:201@192.168.1.3>;tag=7f5a4a64

From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3>;tag=da3e777e67483172o0
Call-ID: 4403896e-d63cc842@192.168.1.202
CSeq: 103 BYE
User-Agent: 3CXPhoneSystem 10.0.22539.0
Content-Length: 0

Msg #18 / 192.168.1.3:5060 --> 192.168.1.201:5060

BYE sip:201@192.168.1.201:5060 SIP/2.0
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-d2646f3f7f20e113-1---d8754z-
;rport
Max-Forwards: 70
Contact: <sip:202@192.168.1.3:5060>
To: <sip:201@192.168.1.3>;tag=da723b64ac0efd43i0
From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02
Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.
CSeq: 2 BYE
User-Agent: 3CXPhoneSystem 10.0.22539.0
Content-Length: 0

Msg #19 / 192.168.1.201:5060 --> 192.168.1.3:5060

SIP/2.0 200 OK
To: <sip:201@192.168.1.3>;tag=da723b64ac0efd43i0
From: "Bob"<sip:202@192.168.1.3:5060>;tag=146e6d02
Call-ID: MDBiOGFhYjQxNzU3OTIwZGE2ZjEwMmM3NzFkNzAzOTI.
CSeq: 2 BYE
Via: SIP/2.0/UDP 192.168.1.3:5060;branch=z9hG4bK-d8754z-d2646f3f7f20e113-1---d8754z-
Server: Linksys/SPA941-5.1.8
Content-Length: 0

Παράρτημα Β

Μετρήσεις netem loss

B.1 Μέτρηση απωλειών 10%

B.1.1 Χωρίς συσχέτιση (random)

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 10%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 8993 received, 10% packet loss, time 20431ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.511/0.562/8.144/0.178 ms, ipg/ewma 2.043/0.562 ms
```

B.1.2 Με συσχέτιση 1%, 10% και 50%

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 10% 1%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 9049 received, 9% packet loss, time 19467ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.497/0.551/4.923/0.102 ms, ipg/ewma 1.946/0.543 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 10% 10%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 9464 received, 5% packet loss, time 13796ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.515/0.562/13.017/0.177 ms, pipe 2, ipg/ewma 1.379/0.580 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 10% 50%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 9988 received, 0% packet loss, time 6155ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.515/0.571/12.598/0.288 ms, pipe 2, ipg/ewma 0.615/0.536 ms
```

B.2 Μέτρηση απωλειών 50%

B.2.1 Χωρίς συσχέτιση (random)

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 4994 received, 50% packet loss, time 79692ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.508/3.577/54.810/5.647 ms, pipe 5, ipg/ewma 7.970/0.591 ms
```

B.2.2 Με συσχέτιση 1%, 10%, 20%, 50%, 70% και 90%

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50% 1%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 4971 received, 50% packet loss, time 66962ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.509/1.109/44.825/2.513 ms, pipe 4, ipg/ewma 6.696/0.737 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50% 10%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 4941 received, 50% packet loss, time 64898ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.509/0.624/161.346/2.546 ms, pipe 14, ipg/ewma 6.490/0.600 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50% 20%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 5036 received, 49% packet loss, time 63966ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.511/0.556/7.167/0.117 ms, ipg/ewma 6.397/0.541 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50% 50%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 5000 received, 50% packet loss, time 71752ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.502/2.042/129.107/5.445 ms, pipe 11, ipg/ewma 7.175/0.560 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50% 70%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 4992 received, 50% packet loss, time 65344ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.512/0.566/18.585/0.414 ms, pipe 2, ipg/ewma 6.535/0.577 ms
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 50% 90%
```

```
root@Linux-PC:/home/merkouris# ping -i 0.0001 -c 10000 -q 192.168.1.1
```

```
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
```

```
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
```

```
10000 packets transmitted, 4726 received, 52% packet loss, time 67725ms
```

```
rtt min/avg/max/mdev = 0.509/0.577/23.279/0.540 ms, pipe 2, ipg/ewma 6.773/0.544 ms
```