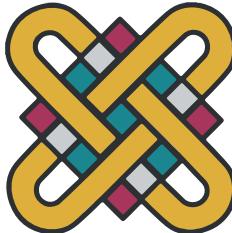


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία

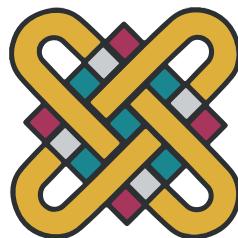
Σχεδιασμός Μηχανισμού Αγοράς για
Δυναμική Κατανομή Εύρους Ζώνης στα
XG-PON

Χρήστος ΔΑΛΑΜΑΓΚΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Επίκουρος Καθηγητής Παναγιώτης
ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΙΔΗΣ

Κοζάνη, Νοέμβριος 2017

UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
DEPARTMENT OF INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING



Diploma Thesis

Design of Market Mechanism for Dynamic Bandwidth Allocation on XG-PON

Christos DALAMAGKAS

Supervisor: Assistant Professor Panagiotis SARIGIANNIDIS

Kozani, November 2017

Δήλωση πνευματικών δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Σχεδιασμός Μηχανισμού Αγοράς για Δυναμική Κατανομή Εύρους Ζώνης στα XG-PON» καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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

Copyright © Χρήστος Δαλαμάγκας, Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, 2017, Κοζάνη.

Περίληψη

Τα παθητικά δίκτυα νέας γενιάς (NG-PON) αναφαίνονται ως πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για την εξυπηρέτηση απαιτητικών υπηρεσιών για τα δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς. Το πρότυπο παθητικών οπτικών δικτύων νέας γενιάς με χωρητικότητα 10 Gbit/s (XG-PON) έχει προταθεί ως μια αρχιτεκτονική υψηλής διεκπεραιωτικότητας, που υλοποιεί το παράδειγμα Ίνας μέχρι το X (FTTx), όπου x η καμπίνα (FTTC), το κτήριο (FTTB) ή το σπίτι (FTTH).

Το XG-PON είναι μια υποσχόμενη τεχνολογία, ικανή να υποστηρίζει 10 Gbit/s στο κανάλι καθόδου και 2.5 Gbit/s στην άνοδο. Η βέλτιστη αξιοποίηση αυτού του εύρους ζώνης απαιτεί ένα εκλεπτυσμένο σχήμα Δυναμικής Κατανομής Εύρους Ζώνης (ΔΚΕΖ), ικανό να συντονίσει επαρκώς τις ευκαιρίες μετάδοσης των εμπλεκομένων δικτυακών οντοτήτων με βάση τις πραγματικές ανάγκες του καθενός. Πλήθος σχετικών τεχνικών και σχημάτων έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια από την ερευνητική κοινότητα, ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία αυτών βασίζεται σε ευριστικές συναρτήσεις και κανένα από αυτά δεν απαντά επαρκώς στο πρόβλημα κορεσμού, στην περίπτωση δηλαδή που η αθροιστική απαίτηση των χρηστών σε εύρος ζώνης υπερβαίνει το διαθέσιμο. Από την άλλη πλευρά, η θεωρία παιγνίων και ο σχεδιασμός μηχανισμών υφίστανται ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, ξεπερνώντας τα όρια της παραδοσιακής οικονομικής θεωρίας και επινοώντας λύσεις σε προβλήματα από διαφορετικά επιστημονικά πεδία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ένα καινούργιο σχήμα ΔΚΕΖ για συστήματα XG-PON, εμπνευσμένο από τη θεωρία της τραγωδίας των κοινών. Η λογική πίσω από την εργασία βασίζεται στη δυνατότητα εφαρμογής της ισορροπίας Nash στο πλαίσιο ενός προβλήματος κατανομής πόρων σε ένα XG-PON, με σκοπό την παροχή δίκαιης και αποδοτικής κατανομής πόρων μεταξύ των τελικών χρηστών. Το προτεινόμενο σχήμα ΔΚΕΖ αξιολογείται διεξοδικά από άποψη δικαιοσύνης, καθυστέρησης και διεκπεραιωτικότητας ωφέλιμης πληροφορίας μέσω ενός συμβατού προσομοιωτή MATLAB. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης υποδεικνύουν μια ισχυρή προοπτική του προτεινόμενου σχήματος, δεδομένου ότι κατορθώνει να εξασφαλίσει μια δίκαιη διαδικασία ΔΚΕΖ, βελτιώνοντας παράλληλα ελαφρώς μετρικές δικτυακής απόδοσης (καθυστέρηση και διεκπεραιωτικότητα) σε σύγκριση με τη συμβατική διαδικασία ΔΚΕΖ.

Λέξεις κλειδιά: παθητικά οπτικά δίκτυα, XG-PON, δυναμική κατανομή εύρους ζώνης, μηχανισμός κατανομής πόρων, θεωρία παιγνίων, σχεδιασμός μηχανισμών, ωφέλεια.

Abstract

New generation passive optical networks (NG-PONs) are emerged as promising technologies for delivering bandwidth-demanding services in modern access networks. The 10-gigabit-capable passive optical network (XG-PON) standard has been proposed as a high-throughput architecture that realizes the Fiber-To-The-x (FTTx) paradigm, where x stands for curb (FTTC), building (FTTB) or home (FTTH).

XG-PON is a promising technology, capable of supporting 10 Gbit/s in the downstream and 2.5 Gbit/s in the upstream direction. The optimal utilization of that huge bandwidth needs a sophisticated Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) scheme, able to adequately coordinate the transmission opportunities of the involved network entities based on their real bandwidth demands. A multitude of techniques and schemes have been presented over the last few years aiming at providing dynamic bandwidth distribution in PONs and NG-PONs systems. However, the vast majority of those techniques are based on heuristics and none of those faces adequately the problem of saturation i.e. when the aggregated bandwidth demand of users overwhelms the available bandwidth. On the other hand, game theory and mechanism design have witnessed an explosive growth over the last years, breaking the barriers of traditional economic theory, and therefore devising solutions is a wide research fields.

In this diploma thesis a novel DBA scheme for XG-PON systems is introduced, which is inspired by the tragedy of the commons theory. The rationale behind this thesis lies in the potential of applying the Nash equilibrium to an XG-PON resource allocation framework towards providing a fair and efficient bandwidth distribution amongst final users. The proposed game-based DBA scheme is thoroughly evaluated in terms of fairness, delay and goodput in a standard-compatible simulator in MATLAB. The acquired evaluation results indicate a strong potential of the applied game theoretic scheme since it succeeds to ensure a fair bandwidth distribution framework while keeping slightly better performance metrics (delay and goodput) compared to the conventional bandwidth allocation process.

Keywords: passive optical networks, XG-PON, dynamic bandwidth allocation, resource allocation mechanism, game theory, mechanism design, utility.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, κ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη, για την καθοδήγηση που παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω εις βάθος δύο συναρπαστικούς τομείς της πληροφορικής και των μαθηματικών, τα οπτικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών και τη θεωρία παιγνίων αντίστοιχα.

Ακόμη, σημαντική ήταν η συνδρομή του κ. Μηνά Δασυγένη, λέκτορα του Τμήματος και υπεύθυνο του Εργαστηρίου Ψηφιακών Συστημάτων και Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών, ο οποίος μου παρείχε τεχνική υποστήριξη για τη χρήση των υπολογιστικών πόρων του εργαστηρίου και την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς το σύνολο των καθηγητών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι, ο καθένας με τη δική του συνεισφορά, μου έμαθαν να σκέφτομαι και να αντιλαμβάνομαι τον κόσμο ως μηχανικός και επιστήμονας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Κατάλογος σχημάτων	xi
Κατάλογος πινάκων	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σχετική βιβλιογραφία	2
1.2 Κίνητρο και στόχοι της εργασίας	4
1.3 Διάρθρωση του βιβλίου	4
2 Δίκτυα Οπτικών Ινών	7
2.1 Ιστορική ανασκόπηση	7
2.2 Ενσύρματα Δίκτυα Πρόσβασης	10
2.3 Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων (FTTx)	13
2.3.1 Ένα μέχρι την Καμπίνα	13
2.3.2 Ένα μέχρι το Κτήριο	15
2.3.3 Ένα μέχρι την Οικία	16
2.4 Τεχνολογίες Πρόσβασης	17
2.4.1 ISDN	17
2.4.2 xDSL	19
2.4.3 Τεχνολογίες ethernet και ΠΟΔ	21
3 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα	23
3.1 Αρχιτεκτονική των ΠΟΔ	25
3.2 Τεχνικές Πολυπλεξίας και Πολλαπλής Πρόσβασης	26
3.2.1 Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος	27
3.2.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου	29
3.2.3 Πολυπλεξία Ορθογωνιακής Διαίρεσης Συγχύτητας και Διαίρεσης Κώδικα	30
3.3 Πρότυπα της ITU-T για ΠΟΔ	31
3.3.1 A-PON/B-PON	32
3.3.2 G-PON	33
3.3.3 XG-PON	35
3.3.4 NG-PON2	35
3.3.5 XGS-PON και μελλοντικά σχέδια	36
3.4 Πρότυπα της IEEE για PON	38

3.4.1	EPON	38
3.4.2	10G-EPON	39
3.4.3	25/50/100G-EPON και μελλοντικά σχέδια	39
4	Το πρότυπο XG-PON	41
4.1	Επισκόπηση της διαστρωμάτωσης του XGTC	42
4.1.1	Υπόστρωμα Προσαρμογής Υπηρεσιών	44
4.1.2	Υπόστρωμα Πλαισίωσης	44
4.1.3	Υπόστρωμα Προσαρμογής Φυσικού Επιπέδου	45
4.2	Αρχιτεκτονική πολυπλεξίας πλαισίων	46
4.3	Κανάλια σηματοδοσίας και ελέγχου	47
4.3.1	Ενσωματωμένο OAM και OMCC	48
4.3.2	PLOAM	48
4.4	Κατανομή πόρων και ποιότητα υπηρεσιών	49
4.4.1	Διαδικασία ανάθεσης εύρους ζώνης	53
4.4.2	Ανάθεση μη εγγυημένου εύρους ζώνης	55
4.5	Δομή πλαισίων στο XG-PON	57
4.5.1	Το πλαίσιο XGEM	58
4.5.2	Το πλαίσιο XGTC	60
4.5.3	Το πλαίσιο PHY	63
5	Θεωρία παιγνίων και Μηχανισμοί Αγοράς	67
5.1	Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων	69
5.1.1	Η ισορροπία Nash	71
5.1.2	Μελέτη περίπτωσης: Το δίλημμα του φυλακισμένου	72
5.1.3	Η αναποτελεσματικότητα της ισορροπίας Nash	73
5.1.4	Ζητήματα υπολογισμού ισορροπίας Nash	74
5.2	Σχεδιασμός μηχανισμών και αγορές	75
5.2.1	Αγορές και θεωρία παιγνίων	76
5.2.2	Ισορροπία στις αγορές	77
5.3	Η Τραγωδία των Κοινών	80
6	Προτεινόμενο Σχήμα Δυναμικής Κατανομής Εύρους Ζώνης στα XG-PON	83
6.1	Ο Μηχανισμός Αναλογικής Κατανομής Πόρων	84
6.1.1	Ορισμός και επίλυση του παιγνίου	85
6.1.2	Υπολογισμός του Τιμήματος της Αναρχίας	88
6.2	Ο ψευδοκώδικας του ΣΑΚΠ	91
6.3	Προσομοίωση του ΣΑΚΠ	92
6.3.1	Παραμετροποίηση και συμβάσεις	92
6.3.2	Αριθμητικό παράδειγμα	93
6.3.3	Αποτελέσματα και συζήτηση	97
7	Συμπεράσματα	103
Παράρτημα Α Ο προσομοιωτής XG-PON	107	
A.1	Συμβάσεις και αποκλίσεις από το πρότυπο G.987.3	107
A.2	XGPON_Simulation.m	109
A.3	XGPON.m	111
A.4	Event1.m	115

A.5 DBA.m	116
A.6 Guaranteed_BA.m	120
A.7 Event2.m	121
A.8 Event3.m	124
A.9 Event4.m	125
A.10 Event6.m	126
A.11 Event7.m	127
A.12 Extract_Distribution.m	128
A.13 Form_Traffic.m	130
A.14 RNG.m	131
A.15 Set_PDT.m	132
A.16 PHY_Payload.m	133
A.17 Jain_Index.m	134
Βιβλιογραφία	135
Κατάλογος συντομομορφών	145
Κατάλογος μεταφράσεων	151

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Οι φρυκτωρίες στο λογότυπο του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας	8
2.2	Η δομή του δικτύου πρόσβασης	11
2.3	Η αρχιτεκτονική FTTC	14
2.4	Η αρχιτεκτονική FTTB	15
2.5	Η αρχιτεκτονική FTTH	16
2.6	Η χρήση του φάσματος από τις τεχνολογίες DSL	20
2.7	Οι τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις EFM	22
3.1	Οι οργανισμοί που δημιουργούν και δημοσιεύουν πρότυπα ΠΟΔ	24
3.2	Η γενική αρχιτεκτονική των ΠΟΔ.	25
3.3	Αναπαράσταση της τεχνικής ΠΔΜΚ	27
3.4	Αναπαράσταση της τεχνικής ΠΔΧ	29
3.5	Αναπαράσταση της τεχνικής ΠΟΔΣ	30
3.6	Η μορφή των πλαισίων στο B-PON	32
3.7	Η στοίβα πρωτοκόλλων GTC	33
3.8	Τα πλαίσια καθόδου και ανόδου GTC	34
3.9	Η αρχιτεκτονική του NG-PON2	36
3.10	Το χρονοδιάγραμμα της εξέλιξης των ΠΟΔ από την FSAN	37
3.11	Η δομή του πλαισίου ethernet	38
4.1	Η διάρθρωση του στρώματος XGTC	43
4.2	Περίγραμμα της ροής πληροφορίας στο στρώμα XGTC	45
4.3	Πολυπλεξία πλαισίων XGEM	46
4.4	Το σχέδιο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για το XGTC	47
4.5	Η δομή ενός μηνύματος PLOAM	49
4.6	Η ιεραρχία των αναθέσεων εύρους ζώνης	51
4.7	Η αφαίρεση του μηχανισμού ΔΚΕΖ	53
4.8	Η αναλογία του αποδιδόμενου εύρους ζώνης με τον προσφερόμενο φόρτο για ένα Alloc-ID	55
4.9	Το ωφέλιμο φορτίο ενός πλαισίου XGEM	58
4.10	Η επικεφαλίδα ενός πλαισίου XGEM	58
4.11	Ο τεμαχισμός ΜΔΕ	59
4.12	Η δομή του πλαισίου καθόδου XGTC	60
4.13	Η δομή του πεδίου BWmap	61
4.14	Η δομή του πλαισίου XGTC ανόδου	62
4.15	Το πλαίσιο καθόδου PHY	63
4.16	Το πεδίο PSBd	64

4.17	Η διαδικασία μετατροπής πλαισίου καθόδου XGTC σε PHY στην κάθοδο	64
4.18	Πλαίσια και ριπές PHY στο κανάλι ανόδου	65
4.19	Το τμήμα PSBu	66
4.20	Η διαδικασία μετατροπής πλαισίου XGTC σε PHY στην άνοδο	66
5.1	Η τιμή ισορροπίας μιας αγοράς	77
5.2	Η γενική μορφή της συνάρτησης ωφελείας των αγοραστών.	80
6.1	Αριθμητικό παράδειγμα λειτουργίας XG-PON	94
6.2	Τα αποτελέσματα του σεναρίου προσομοίωσης	97
6.3	Η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης για 20, 24 και 28 ΜΟΔ	101

Κατάλογος πινάκων

1.1	Ιστορική αναφορά της Cisco για απαιτήσεις σε εύρος ζώνης	2
2.1	Οι παραλλαγές της τεχνολογίας DSL.	20
4.1	Η αντιστοίχιση των T-CONT σε εύρη ζώνης	52
5.1	Ο πίνακας κόστους των φυλακισμένων	73
6.1	Οι βασικές παράμετροι του σεναρίου προσομοίωσης	92
6.2	Αναλυτικά αποτελέσματα του σεναρίου προσομοίωσης	100
A.1	Τα σενάρια που συνθέτουν τον προσομοιωτή XG-PON	108

The Internet is the first thing that humanity has built that humanity doesn't understand, the largest experiment in anarchy that we have ever had.

Eric Schmidt, Πρόεδρος της Alphabet Inc.

1

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή της πληροφορίας και της ψηφιακής σύγκλισης η πρόσβαση στο Διαδίκτυο θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα δικαιώματα κάθε ανθρώπου, καθώς και μέσο πληροφόρησης, ψυχαγωγίας, μόρφωσης και διαμόρφωσης προσωπικοτήτων. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υπηρεσιών που βασίζονται στη διάθεση και διακίνηση ψηφιακών πολυμέσων υψηλής ποιότητας, καθώς και η εμφάνιση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), δηλαδή συσκευών που διασυνδέονται μεταξύ τους με σκοπό την παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών, δημιουργούν συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και υπηρεσίες με χαμηλές καθυστερήσεις.

Την εικόνα για τις αυξανόμενες ανάγκες σε ευρυζωνικότητα δίνει η εταιρεία Cisco, η οποία σε έρευνά της εκτιμά τον τριπλασιασμό της παγκόσμιας δικτυακής κίνησης μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια [1]. Ο πίνακας 1.1 απεικονίζει μια ιστορική αποτίμηση της αύξησης σε ζήτηση εύρους ζώνης, όπως αυτός παρέχεται από την έρευνα της Cisco.

Για την κάλυψη ενός τέτοιου ρυθμού αύξησης της ζήτησης για ευρυζωνικές υπηρεσίες, τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (ΠΟΔ) αναδεικνύονται ως η μόνη ρεαλιστική λύση για την εξέλιξη των Δικτύων Πρόσβασης (ΔΠ). Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότεροι Πάροχοι Υπηρεσιών Διαδικτύου (ΠΥΔ, Internet Service Providers – ISPs) αναβαθμίζουν τα δίκτυά τους σε τεχνολογίες ΠΟΔ, με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας και την αναβάθμιση των υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο.

Η δυναμικότητα και ιδιαιτερότητα στις απαιτήσεις των σύγχρονων διαδικτυακών υπηρεσιών απαιτούν τη διαμόρφωση προσαρμοστικών και ευέλικτων συστημάτων οπτικών δικτύων που

Έτος Παγκόσμια Διαδικτυακή Κίνηση	
1992	100 GB ανά ημέρα
1997	100 GB ανά ώρα
2002	100 GB ανά δευτερόλεπτο
2007	2000 GB ανά δευτερόλεπτο
2016	26600 GB ανά δευτερόλεπτο
2021	105800 GB ανά δευτερόλεπτο

Πίνακας 1.1: Ιστορική αναφορά της Cisco για απαιτήσεις σε εύρος ζώνης [1]

λαμβάνουν υπόψιν αυτά τα χαρακτηριστικά, με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων για την παροχή των βέλτιστων δυνατών υπηρεσιών. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η κατασκευή και μελέτη τέτοιων συστημάτων για δίκτυα τύπου XG-PON, τα οποία εστιάζουν στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας Δυναμικής Κατανομής Εύρους Ζώνης (ΔΚΕΖ) με τελικό σκοπό τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των υπαρχόντων πόρων και της ικανοποίησης των τελικών χρηστών.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη εισαγωγή στο πρόβλημα της δυναμικής κατανομής πόρων που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα εργασία, αρχικά, με την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφικής επισκόπησης πάνω στο ζήτημα αυτό εστιάζοντας στα δίκτυα τύπου (X)G-PON, και καταλήγει με τον ορισμό των στόχων της εργασίας και της διάρθρωσης του βιβλίου.

1.1 Σχετική βιβλιογραφία

Το πρώτο σχήμα ΔΚΕΖ που δημοσιεύτηκε για δίκτυα G-PON ήταν το GIANT [2], το οποίο με χρήση κατάλληλα σχεδιασμένου υλικού ταξινομούσε την κίνηση των χρηστών (Alloc-ID) σε κατηγορίες (T-CONTs) διαφόρων προτεραιοτήτων και όριζε συγκεκριμένους ρυθμούς μετάδοσης για την κάθε μια, με κύριο στόχο τη μείωση της καθυστέρησης. Αν και το σχήμα GIANT θεωρήθηκε αρκετά αποδοτικό, δέχθηκε πληθώρα βελτιώσεων από σχήματα όπως τα IACG [3], EBU [4] και IBU [5], τα οποία εστίασαν στην αύξηση της αξιοποίησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης και την περαιτέρω μείωση της καθυστέρησης με βελτιστοποιήσεις τόσο στον αλγόριθμο ΔΚΕΖ του GIANT όσο και στο αντίστοιχο υλικό.

Μια εναλλακτική προσέγγιση στο ζήτημα της κατανομής πόρων αποτέλεσε αυτή με όρους

χρονοπρογραμματισμού. Το πρόβλημα της πολλαπλής πρόσβασης χρηστών σε ένα κοινό μέσο που παρουσιάζεται στα ΠΟΔ και σχετίζεται άμεσα με την κατανομή πόρων, κατά το οποίο μόνο ένας χρήστης μπορεί να μεταδίδει δεδομένα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, έχει κοινά σημεία με το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού διεργασιών ενός λειτουργικού συστήματος, κατά το οποίο πολλές διεργασίες χρησιμοποιούν ένα κοινό υπολογιστικό νήμα για την εκτέλεσή τους. Η ομοιότητα αυτή οδήγησε σε σχήματα, όπως τα BUDA [6], SFDBA [7] και DBAHU [8], τα οποία αν και βασισμένα σε παραλλαγές του σχήματος GIANT (όπως το IACG [3]), χρονοπρογραμματίζουν τις αποστολές στο κανάλι ανόδου με τις αρχές χρονοπρογραμματισμού εκ περιτροπής (round-robin scheduling) και δίκαιης αναμονής (fair queuing). Τα σχήματα αυτά παρέχουν σχετικά μικρότερη καθυστέρηση και υψηλότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, συγκριτικά με τα σχήματα τύπου GIANT.

Κοινό χαρακτηριστικό των προαναφερθέντων σχημάτων ΔΚΕΖ αποτελεί η ανάθεση πόρων με βάση Αναφορές Κατάστασης (ANK), οι οποίες στέλνονται συχνά από τους χρήστες προς τον ΠΥΔ και περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις που έχουν σε εύρος ζώνης, ώστε να τους ανατεθούν οι αντίστοιχοι πόροι. Τα σύγχρονα σχήματα κατανομής πόρων δεν αρκεί να βασίζονται μόνο σε τέτοιου είδους αναφορές, αλλά πρέπει να παρατηρούν την κίνηση των χρηστών, δηλαδή να διαθέτουν λειτουργία Παρακολούθησης Κίνησης (ΠΚ), και με βάση κάποιο ιστορικό που διατηρείται και κάποιον σχετικό μηχανισμό να προβλέπουν μελλοντικές απαιτήσεις, ώστε να προ-δεσμεύουν τους απαραίτητους πόρους [9].

Βασικός παράγοντας ο οποίος αυξάνει τις καθυστέρησεις πακέτων σε ένα δίκτυο οπτικών ινών είναι η καθυστέρηση διάδοσης, λόγω μεγάλης απόστασης των χρηστών από το κτήριο του ΠΥΔ, η οποία μπορεί να φτάνει μέχρι και τα 60 χιλιόμετρα. Σχήματα μηχανικής μάθησης, όπως το DAMA που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο k -πλησιέστερων γειτόνων, βασίζονται στην τεχνική νοημοσύνη και προβλέπουν τις απαιτήσεις των χρηστών, προ-δεσμεύοντας το αντίστοιχο εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα την αισθητή μείωση της καθυστέρησης για τις υπηρεσίες χαμηλότερης προτεραιότητας [10].

Ακόμη, σχήματα πρόβλεψης βασισμένα στην τεχνική νοημοσύνη, όπως τα ARES και HYRA, στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων του δικτύου απομονώνοντας τους αδρανείς χρήστες και αναπροσαρμόζοντας το πάγιο εγγυημένο εύρος ζώνης που παρέχεται σε κάθε χρήστη, ανεξάρτητα από τις ανάγκες του. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων έδειξαν ότι οι μηχανισμοί πρόβλεψης βελτίωσαν τη διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput) του δικτύου και αύξησαν την αξιοποίηση του πάγιου εύρους ζώνης κατά 75% [11], [12].

1.2 Κίνητρο και στόχοι της εργασίας

Τα σχήματα ΔΚΕΖ που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα επιτυγχάνουν στο σύνολό τους εξαιρετικές επιδόσεις ως προς τις μετρικές καθυστέρησης και αποδοτικότητας της χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου. Ωστόσο, κανένα από τα προαναφερθέντα σχήματα δεν δίνει ικανοποιητική απάντηση στο πρόβλημα του κορεσμού ενός XG-PON, πως δηλαδή θα αντιμετωπιστεί η κατάσταση στην οποία οι απαιτήσεις των χρηστών υπερβαίνουν τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αντιμετώπιση του προβλήματος κορεσμού στα XG-PON με την κατασκευή ενός μηχανισμού ΔΚΕΖ, ο οποίος βασίζεται στις αρχές της μικροοικονομίας και της Θεωρίας Παιγνίων (ΘΠ) και αποδίδει το διαθέσιμο εύρος ζώνης με σκοπό τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ωφελείας. Αφορμή για την κατασκευή του μηχανισμού της εργασίας αποτελεί η θεωρία της Τραγωδίας των Κοινών (ΤτΚ), η οποία διατυπώθηκε το 1968 από τον Garrett Hardin και διαπραγματεύεται το ζήτημα του υπερπληθυσμού και των συνεπειών από την υπερεκμετάλλευση πόρων.

Ευρύτεροι στόχοι της διπλωματικής εργασίας αποτελούν, καταρχάς, η μελέτη των Δικτύων Πρόσβασης (ΔΠ), των ΠΟΔ και η λειτουργία του προτύπου XG-PON, πάνω στο οποίο εφαρμόζεται το προτεινόμενο σχήμα. Για την εξέταση του προτεινόμενου σχήματος έχει αναπτυχθεί προσομοιωτής στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος επιτυγχάνει την προσομοίωση ενός τέτοιου δικτύου παρέχοντας αξιόπιστα αποτελέσματα από κοινές μετρικές δικτυακής απόδοσης. Παράλληλα, στόχος της εργασίας είναι η θεωρητική μελέτη πτυχών της μικροοικονομίας, της ΘΠ και του σχεδιασμού μηχανισμών, πεδία ιδιαίτερα χρήσιμα για την ανάπτυξη δίκαιων μηχανισμών κατανομής πόρων που προσανατολίζονται στη μεγιστοποίηση της ωφέλειας των συμμετεχόντων.

1.3 Διάρθρωση του βιβλίου

Το κεφάλαιο 2 αποτελεί εισαγωγή στα δίκτυα οπτικών ινών και των αρχιτεκτονικών τους, με έμφαση στο ΔΠ. Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο ξεκινά με μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση στην ιστορία των οπτικών επικοινωνιών και τα πεδία εφαρμογών τους από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Στη συνέχεια, εστιάζοντας στα ΔΠ, παρουσιάζεται η δομή αυτών, οι αρχιτεκτονικές Ίνα μέχρι το X (FTTx), καθώς και πώς εφαρμόζονται αυτές για τη διαμόρφωση του οπτικού

δικτύου πρόσβασης του μέλλοντος. Τέλος, παρατίθενται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των ΔΠ, μια εκ των οποίων είναι τα ΠΟΔ, με τα οποία διαπραγματεύεται η εργασία.

Το κεφάλαιο 3 εστιάζει στην αρχιτεκτονική και τη δομή των ΠΟΔ, καθώς και στις τεχνολογίες πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται σε αυτά. Ακόμη, στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις που αφορούν τόσο το σύνολο των τυποποιημένων τεχνολογιών ΠΟΔ που εκδίδονται από τους οργανισμούς ITU και IEEE όσο και σε μελλοντικά σχέδια του κάθε οργανισμού.

Το κεφάλαιο 4 αφιερώνεται στην εκτενή παρουσίαση του προτύπου XG-PON, το οποίο βασίζεται στο έγγραφο ITU-T G.987.3. Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο ξεκινά με μια σύντομη παρουσίαση της διαστρωμάτωσης του XGTC και της διαδικασίας πλαισίωσης και απο-πλαισίωσης που εφαρμόζεται στα δεδομένα των χρηστών και τα ειδικά διαμορφωμένα πλαίσια του XG-PON. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά στην αρχιτεκτονική πολυπλεξίας των ροών δεδομένων, καθώς και στη διαδικασία ΔΚΕΖ που εφαρμόζεται στο δίκτυο. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση της αναλυτικής δομής των πλαισίων, η οποία υιοθετείται στο μεγαλύτερό της ποσοστό για την υλοποίηση του προσομοιωτή.

Το κεφάλαιο 5 παρέχει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από το προτεινόμενο σχήμα της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη ενότητα αφορά την εισαγωγή σε βασικές έννοιες και αρχές της ΘΠ, όπως το παίγνιο, η λύση ενός παιγνίου και η Ισορροπία Nash (IN). Στην επόμενη ενότητα η ΘΠ συνδέεται με τη μικροοικονομία και τις αγορές, από τα οποία προκύπτει ο κλάδος του σχεδιασμού μηχανισμών. Στην τελευταία ενότητα γίνεται εκτενής αναφορά στο πρόβλημα της ΤτΚ και εξετάζονται οι τρόποι αντιμετώπισής του.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το προτεινόμενο σχήμα της εργασίας, το οποίο ονομάζεται «Σχήμα Αναλογικής Κατανομής Πόρων (ΣΑΚΠ)». Αρχικά, γίνεται η αντιστοίχιση του προβλήματος της ΤτΚ με το πρόβλημα κορεσμού που δύναται να αντιμετωπίσουν τα XG-PON και πραγματοποιείται η μοντελοποίησή του με όρους ΘΠ. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται εκτενώς η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος, με την κατάστρωση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που δίνει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα. Παράλληλα, μελετάται και η Τιμή της Αναρχίας (ΤτΑ) του προβλήματος, δηλαδή η μέγιστη απώλεια ωφελείας των χρηστών, όταν το δίκτυο εισέρχεται σε κατάσταση κορεσμού και ενεργοποιείται ο μηχανισμός. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και μελετάται η επίδοση του ΣΑΚΠ σε γνωστές μετρικές δικτυακής απόδοσης.

Η εργασία καταλήγει στο κεφάλαιο 7 με την ανασκόπηση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, καθώς και με την πρόταση βελτιώσεων και μελλοντικών επεκτάσεων που μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στο μαθηματικό μοντέλο του προτεινόμενου μηχανισμού όσο και στον προσομοιωτή XG-PON. Ακόμη, στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις επιστημονικές δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, το παράρτημα Α προορίζεται για την τεκμηρίωση του προσομοιωτή. Συγκεκριμένα, παρατίθεται ο πλήρης κώδικας του προσομοιωτή XG-PON, καθώς και αντίστοιχη τεκμηρίωση, με κάθε ενότητα να αντιστοιχεί σε ένα αρχείο/συνάρτηση που συνθέτει τον προσομοιωτή.

*Ἡραιστος, Ἰδης λαμπρὸν ἐκπέμπων σέλας· φρυκτὸς δὲ
φρυκτῷ δεῦρ' ἀπ' ἀγγάρου πυρὸς ἔπειπεν.*

Αισχύλος, «Αγαμέμνων», 458 π.Χ.

2

Δίκτυα Οπτικών Ινών

Οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν μια σύγχρονη τεχνολογική επανάσταση στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, η οποία έχει επιτρέψει την υποστήριξη πολύ μεγάλων ταχυτήτων για την επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων δικτυακών οντοτήτων. Ως μέσο σταθερών επικοινωνιών, οι οπτικές ίνες έχουν καταφέρει να συνδυάσουν πολύ υψηλή χωρητικότητα, αξιοπιστία των μεταδιδόμενων δεδομένων και εξαιρετικά χαμηλό κόστος. Τα χαρακτηριστικά τους, λοιπόν, καθίστανται ιδανικά για την ικανοποίηση των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών σε ευρυζωνικότητα [13].

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται, αρχικά, μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση στην εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών και τα πεδία εφαρμογών τους από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η δομή των ΔΠ, οι αρχιτεκτονικές Ίνας μέχρι το x (FTTx) και οι σχετικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από τα οπτικά δίκτυα.

2.1 Ιστορική ανασκόπηση

Η ιστορία των οπτικών επικοινωνιών ξεκινάει από την αρχαιότητα και, συγκεκριμένα, από την αρχαία Ελλάδα. Τα πρώτα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που χρησιμοποίησαν το φως για τη μετάδοση πληροφορίας ήταν οι φρυκτωρίες, ένα σύστημα που αναπτύχθηκε τον 11^ο αιώνα π.Χ. και μεταβίβαζε οπτικά σήματα από περιοχή σε περιοχή με τη χρήση πυρσών κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ενδεικτική είναι η αναφορά του Αισχύλου στο έργο «Αγαμέμνων», όπου ο

Βασιλιάς των Μυκηνών αναγγέλλει την πτώση της Τροίας από το Ίλιον στην Κλυταιμνήστρα που βρίσκονταν στις Μυκήνες, μέσω των φρυκτωριών [14].



Σχήμα 2.1: Οι φρυκτωρίες στο λογότυπο του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Οι οπτικές επικοινωνίες παρέμειναν διαχρονικά ένας δημοφιλής τρόπος μετάδοσης μηνυμάτων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, ο οποίος όμως περιοριζόταν στην παραγωγή φωτός με τη χρήση φωτιάς. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και, κυρίως, η εφεύρεση των μεθόδων παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος επέτρεψε στους επιστήμονες να ερευνήσουν την παραγωγή και οδήγηση φωτός μέσω γυαλιού.

Έτσι, λοιπόν, η ιστορία των οπτικών ινών ξεκίνησε τη δεκαετία του 1840, όταν οι Daniel Colladon και Jacques Babinet παρουσίασαν στο Παρίσι ότι είναι δυνατή η οδήγηση φωτός με τη χρήση διάθλασης. Σαράντα χρόνια αργότερα, το 1880, ο Alexander Graham Bell εφηύρε το φωτόφωνο, μια ηλεκτρική συσκευή η οποία επέτρεψε τη μετάδοση της φωνής, υπό μορφή ακτίνας φωτός [15], [16]. Τις επόμενες δεκαετίες ακολούθησαν προσπάθειες πολλών ερευνητών για ανάπτυξη συστημάτων οπτικών ινών, ικανά να μεταφέρουν το οπτικό σήμα με ανεκτές απώλειες και υψηλή διεκπεραιωτικότητα.

Πρώτη γενιά οπτικών δικτύων

Έπειτα από μια ερευνητική προσπάθεια που ξεκίνησε το 1975, η πρώτη επιτυχημένη ανάπτυξη και εμπορική διάθεση συστημάτων οπτικών ινών συνέβη το 1977, οπότε και σηματοδοτήθηκε η έναρξη της πρώτης γενιάς συστημάτων οπτικών δικτύων. Το σύστημα που αναπτύχθηκε χρησιμοποίησε το κανάλι των $0.8 \text{ } \mu\text{m}$, αποτελούνταν από λέιζερ ημιαγωγών αρσενιδίου γαλλίου (gallium arsenide - GaAs) και υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης στα 45 Mbit/s με χρήση επαναληπτών ανά 10 χλιόμετρα . Στις 22 Απριλίου 1977 η εταιρεία «General Telephone & Electric Corporation» δρομολόγησε την πρώτη ροή τηλεφωνικής κίνησης μέσω οπτικών ινών με ρυθμό 6 Mbit/s στο Long Beach της Καλιφόρνια [17].

Λίγους μήνες αργότερα, τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους, οι εταιρίες Corning Glass Works, CSELT και Pirelli, έπειτα από δοκιμές που ξεκίνησαν το 1973, κατάφεραν να αναπτύξουν δυο οπτικές ζεύξεις 9 χιλιομέτρων στο Τορίνο της Ιταλίας, για πρώτη φορά σε μεγάλη πόλη, οι οποίες υποστήριζαν ταχύτητες που έφταναν τα 140 Mbit/s [18].

Δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων

Η έναρξη της δεύτερης γενιάς σηματοδοτήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980, όταν αναπτύχθηκαν συστήματα για εμπορική χρήση που λειτουργούσαν στην μπάντα των 1.3 μμ με χρήση λέιζερ ημιαγωγών από φωσφίδιο αρσενιδίου ινδίου γαλλίου (Indium gallium arsenide phosphide - GaInAsP) και απώλειες της τάξεως των 20 dB/km. Ωστόσο, η ανάπτυξή τους ήταν περιορισμένη λόγω του φαινομένου της διασποράς, αν και η εισαγωγή των μονότροπων οπτικών ινών (single-mode fibre) βελτίωσε σημαντικά την απόδοση των συστημάτων. Το 1984 είχε προχωρήσει αρκετά η ανάπτυξη των οπτικών ινών, ώστε διαφαινόταν εφικτός ο στόχος για τη δημιουργία καλωδίων που θα μπορούσαν να συνδέσουν όλη την υφήλιο. Η καναδέζικη εταιρεία SaskTel είχε ολοκληρώσει την κατασκευή του μεγαλύτερου για την εποχή οπτικού δικτύου, το οποίο κάλυψε 3268 χιλιόμετρα και συνέδεσε 52 κοινότητες, λειτουργώντας στην μπάντα των 850 nm και απαιτώντας επαναλήπτες κάθε 5 με 9 χιλιόμετρα. Μέχρι το 1987 τα συστήματα οπτικών ινών λειτουργούσαν σε ταχύτητες των 1.7 Gbit/s και η απόσταση των επαναληπτών έφτανε τα 50 χιλιόμετρα [19], [20].

Τρίτη γενιά οπτικών δικτύων

Η ευρεία ανάπτυξη των ημιαγωγών GaInAsP και η υιοθέτηση της οπτικής ίνας με μετατόπιση διασποράς (dispersion-shifted optical fibre – DSF) οδήγησε στον δραστικό περιορισμό του φαινομένου της διασποράς και την επίτευξη απωλειών που έφταναν τα 0.2 dB/km. Οι αλλαγές αυτές έδωσαν ώθηση στην ανάπτυξη συστημάτων τρίτης γενιάς, τα οποία χρησιμοποίησαν την μπάντα των 1.55 μμ για να υποστηρίξουν ταχύτητες των 2.5 Gbit/s, με τους επαναλήπτες να απέχουν το πολύ 100 χιλιόμετρα [21].

Τέταρτη γενιά οπτικών δικτύων

Η τέταρτη γενιά οπτικών δικτύων χαρακτηρίστηκε από τη χρήση ενισχυτών οπτικού σήματος (optical amplifiers), οι οποίοι μείωσαν την ανάγκη χρήσης αναμεταδοτών σήματος, και την

εισαγωγή της Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (ΠΔΜΚ) για την αύξηση της χωρητικότητας των οπτικών δικτύων. Ξεκινώντας από το 1992, οι τεχνολογίες αυτές οδήγησαν σε διπλασιασμό των υποστηριζόμενων ρυθμών μετάδοσης, με σημαντικά ορόσημα την επίτευξη 10 Tbit/s το 2001 και 14 Tbit/s το 2006. Οι οπτικές ίνες έφτασαν σε μήκος τα 160 χιλιόμετρα, με τοποθέτηση ενισχυτών [22]–[24].

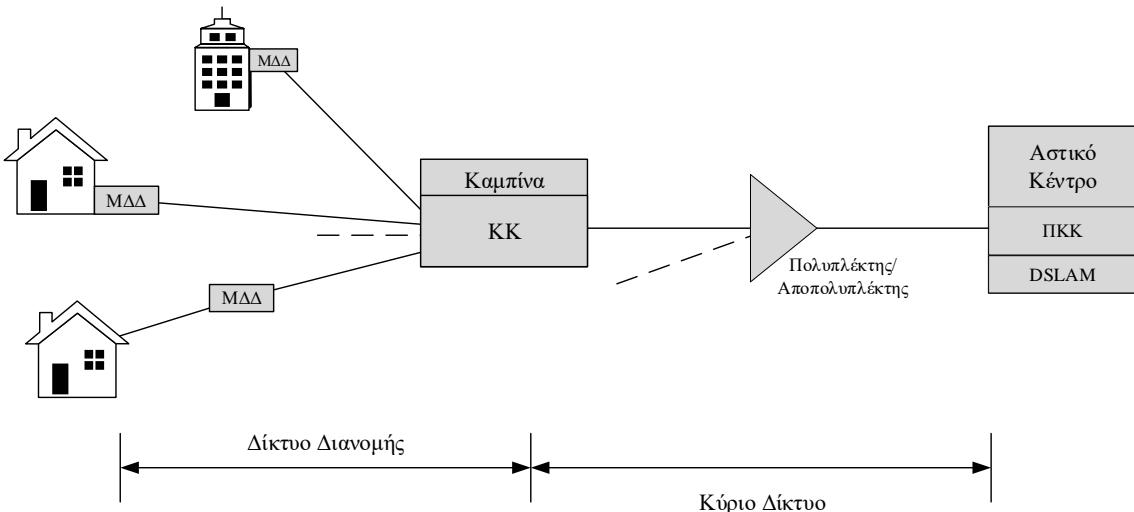
Πέμπτη γενιά οπτικών δικτύων

Η επόμενη γενιά οπτικών δικτύων εστιάζει στην επέκταση των μηκών κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα σύστημα για ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων, καθώς και στην περαιτέρω επέκταση των δυνατοτήτων κάθε καναλιού με πληθώρα βελτιώσεων στο φυσικό επίπεδο. Χαρακτηριστικά της τρέχουσας γενιάς αποτελεί η Πυκνή Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (ΠΠΔΜΚ), η οποία επιτρέπει τη μετάδοση στην μπάντα C και σε κανάλια εύρους 1.53 μέχρι 1.57 μμ, η ενίσχυση Raman, καθώς και ένα νέο είδος οπτικής ίνας, γνωστό ως «στεγνή ίνα» (dry fibre), που έχει την ιδιότητα να παρουσιάζει μικρές απώλειες στο εύρος 1.30 μέχρι 1.65 μμ [24]. Οι πιο πρόσφατες ερευνητικές δοκιμές έχουν κάνει εφικτή την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης που αγγίζουν τα 2.5 Pbit/s [25], [26].

Σήμερα, τα συστήματα οπτικών ινών έχουν καθιερωθεί για τις επικοινωνίες των δικτύων κορμού (core/backbone networks), αυτών δηλαδή που χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλές χωρητικότητες, ώστε να διασυνδέουν Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής (Metropolitan Area Networks - MANs) και Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (Wide Area Networks - WANs) μεταξύ τους και με το Διαδίκτυο. Ωστόσο, η χρήση των οπτικών ινών επεκτείνεται τις τελευταίες δεκαετίες και προς τα ΔΠ και το Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής (ΔΤΔΜ, Public Switched Telephone Network – PSTN).

2.2 Ενσύρματα Δίκτυα Πρόσβασης

Βασικός περιορισμός για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πρόσβασης στο Διαδίκτυο αποτελεί το Δίκτυο Πρόσβασης (ΔΠ, Access Network – AN), ονομαζόμενο και ως «τελευταίο μίλι» από τη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών. Το δίκτυο αυτό καλύπτει κατοικημένες περιοχές και οριοθετείται από το Αστικό Κέντρο (AK, Central Office – CO), δηλαδή το κτήριο του Παρόχου Υπηρεσιών Διαδικτύου (ΠΥΔ) μέχρι τα κτήρια των συνδρομητών. Στο σχήμα 2.2 απεικονίζεται η δομή του ΔΠ.



Σχήμα 2.2: Η δομή του δικτύου πρόσβασης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, κάθε συνδρομητής συνδέεται με μια Μονάδα Διεπαφής Δικτύου (ΜΔΔ, Network Interface Unit – NIU), η οποία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το ΑΚ και την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από τον ΠΥΔ. Οι συσκευές αυτές, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται είτε μέσα στο κτήριο είτε σε εξωτερικό χώρο, αποτελούν το σημείο οριοθέτησης (demarcation point) του ΔΠ με το ιδιωτικό δίκτυο του συνδρομητή. Οι ΜΔΔ επικοινωνούν με το ΑΚ μέσω των Κατανεμητών Καλωδίων (ΚΚ, Kabelverteiler – KV), οι οποίοι βρίσκονται σε καμπίνες (cabinets) και εξυπηρετούν τη συλλογή και πολύπλεξη των συνδρομητών στο γεωγραφικό εύρος μιας γειτονιάς ή ενός μεγάλου κτηρίου. Το τμήμα του δικτύου μέχρι τις καμπίνες ονομάζεται δίκτυο διανομής και η υποδομή του αποτελείται κυρίως από χάλκινα καλώδια [27]. Χαρακτηριστικό του δικτύου διανομής αποτελεί η τοπολογία δέντρου που διαθέτει, γεγονός που καθιστά δύσκολο έργο τη συντήρηση και αναβάθμισή του.

Το σύνολο των καμπίνων του δικτύου διανομής καταλήγει, απευθείας ή με την παρεμβολή ενδιάμεσων πολυπλεκτών, στο Πλαίσιο Κύριου Κατανεμητή (ΠΙΚΚ, Main Distribution Frame – MDF), το οποίο βρίσκεται στον χώρο του ΑΚ και συλλέγει τις συνδέσεις όλων των συνδρομητών του δικτύου. Τέλος, οι συνδέσεις αυτές καταλήγουν στον Πολυπλέκτη Πρόσβασης Ψηφιακής Συνδρομητικής Γραμμής (Digital Subscriber Line Access Multiplexer – DSLAM), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παροχή Υπηρεσιών Κοινής Τηλεφωνίας (YKT, Plain Old Telephone Service – POTS) και υπηρεσιών τύπου xDSL. Το κύκλωμα που συνδέει το ΜΔΔ ενός συνδρομητή με το ΑΚ αποτελεί μια συνδρομητική γραμμή (subscriber line). Το τμήμα του δικτύου από τις καμπίνες μέχρι το ΠΙΚΚ ονομάζεται κύριο δίκτυο και η υποδομή του χαρακτηρίζε-

ται από ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας [27]. Η τοπολογία του καθίσταται λιγότερο περίπλοκη από αυτή του δικτύου διανομής, αφού το πλήθος των καμπίνων που καταλήγουν στο ΑΚ είναι σαφώς μικρότερο από το πλήθος των συνδρομητών.

Αρχικός σκοπός του ΔΠ ήταν η παροχή YKT προς τους συνδρομητές (ιδιώτες, επιχειρήσεις και οργανισμοί), ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιείται για την πρόσθετη παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών xDSL ή/και ISDN. Η χρήση χάλκινων καλωδίων σε αυτά τα δίκτυα αποτελεί παράγοντας που υποβαθμίζει δραματικά την ποιότητα των υπηρεσιών Διαδικτύου, αφού τα χάλκινα καλώδια, λόγω των φυσικών τους ιδιοτήτων, διαθέτουν χαμηλή χωρητικότητα και υψηλές απώλειες [28].

Λόγω της μεγάλης ζήτησης για εύρος ζώνης, η αγορά των τηλεπικοινωνιών δέχεται αυξανόμενη πίεση, αφού στο πλαίσιο του ελεύθερου ανταγωνισμού μεταξύ των ΠΥΔ, οι τελευταίοισ καλούνται να προτείνουν στους συνδρομητές νέες και οικονομικές λύσεις πρόσβασης υψηλών ταχυτήων στο Διαδίκτυο, ανταποκρινόμενες σε αντίστοιχων προδιαγραφών Συμβόλαια Επιπέδου Υπηρεσιών (ΣΕΥ, Service Level Agreements – SLAs). Τα ΣΕΥ είναι συμφωνίες που υπογράφονται μεταξύ ΠΥΔ και συνδρομητών, τα οποία δεσμεύουν τους πρώτους για παροχή ορισμένης Ποιότητας Υπηρεσιών (ΠτΥ, Quality of Service – QoS) πρόσβασης στο Διαδίκτυο προς τους συνδρομητές. Η ΠτΥ αφορά την εξασφάλιση μιας δεδομένης αξιοπιστίας της συνδρομητικής σύνδεσης, καθώς και την εγγύηση διάφορων μετρικών δικτυακής απόδοσης, όπως η ταχύτητα πρόσβασης, ο σηματοθορυβικός λόγος, οι ανεκτές καθυστερήσεις κλπ. [27], [28].

Υπό αυτό το ανταγωνιστικό πλαίσιο, οι ΠΥΔ προσανατολίζονται στην αναβάθμιση των ΔΠ που διατηρούν, επιδιώκοντας την πλήρη αντικατάσταση της υποδομής χάλκινων καλωδίων με οπτικές ίνες. Σημαντική παράμετρος της διαδικασίας αναβάθμισης είναι η ελαχιστοποίηση των Κεφαλαιουχικών Δαπανών (ΚΕΔΑ, CAPital EXPenditures – CAPEX), ώστε οι ΠΥΔ να είναι σε θέση να παρέχουν πιο ανταγωνιστικά ΣΕΥ και να καλύπτονται στο μέγιστο δυνατό οι σύγχρονες ανάγκες των συνδρομητών. Ταυτόχρονα, απαιτείται και η ελαχιστοποίηση των Λειτουργικών Δαπανών (ΛΕΙΔΑ, OPerational EXPenditures – OPEX) των νέων επενδύσεων, ώστε οι ΠΥΔ να μεγιστοποιούν τα κέρδη τους και να συνεχίζουν την επέκταση και αναβάθμιση των δικτύων τους, ακολουθώντας τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις. Παράγοντας καθυστέρησης της αναβάθμισης αυτής αποτελούν οι υψηλές ΚΕΔΑ που απαιτούνται, λόγω του ότι η υφιστάμενη υποδομή του ΔΠ αποτελείται στο σύνολο της από καλώδια χαλκού και η αντικατάσταση της από οπτικά συστήματα κρίνεται εξαιρετικά δαπανηρή. Γι' αυτό οι ΠΥΔ επιχειρούν την τμηματική αναβάθμισή του, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο αρχιτεκτονικών οπτικών δικτύων [29], [30].

2.3 Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων (FTTx)

Οι τεχνοοικονομικές δυσκολίες που προκύπτουν από την αναβάθμιση του ΔΠ σε αμιγώς οπτικό έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση αρχιτεκτονικών, με τις οποίες η οπτική ίνα διεισδύει σταδιακά στο ΔΠ. Η οικογένεια αυτών των αρχιτεκτονικών είναι γνωστή ως **[Ινα μέχρι το X – Fiber To The x – FTTx]**. Παρόλο που δεν υπάρχουν τυποποιημένες κατηγορίες αρχιτεκτονικών FTTx, μπορούν να αναφερθούν οι σημαντικότερες εξ αυτών, η υιοθέτηση των οποίων συμβαδίζει με τα στάδια για τη μετάβαση σε ένα αμιγώς **[Οπτικό Δίκτυο Πρόσβασης (ΟΔΠ, Optical Access Network – OAN)]**:

FTTC: Η αρχιτεκτονική **[Ινας μέχρι την Καμπίνα]** αφορά την τοποθέτηση οπτικής ίνας μέχρι την **καμπίνα** του ΔΠ.

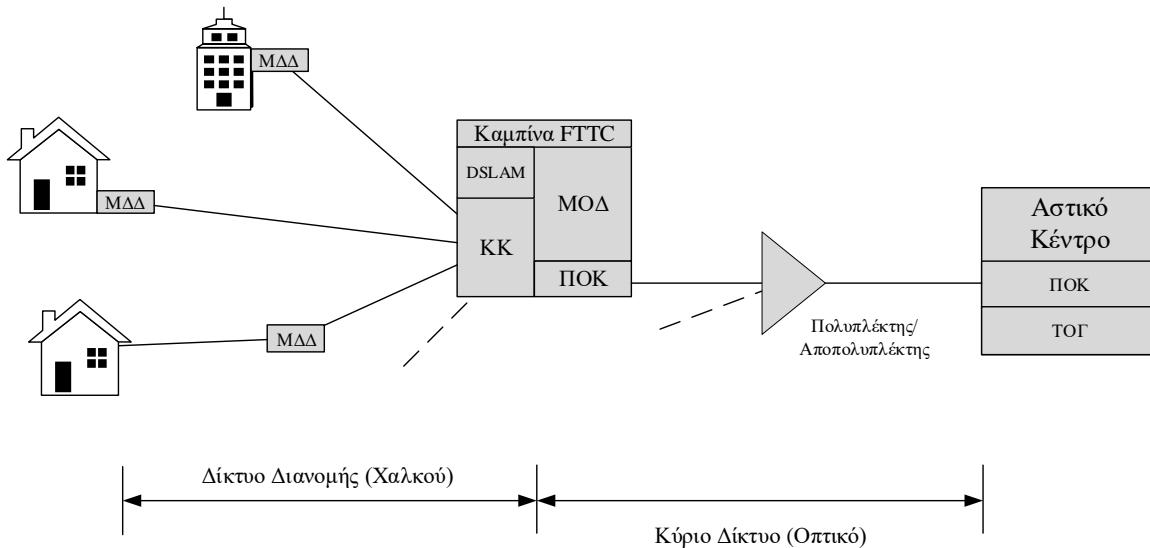
FTTB: Η αρχιτεκτονική **[Ινας μέχρι το Κτήριο]** αναφέρεται στην επέκταση της οπτικής ίνας μέχρι το κτήριο.

FTTH: Η αρχιτεκτονική **[Ινας μέχρι την Οικία]** επεκτείνει την οπτική ίνα μέχρι το **θημείο οριοθέτησης**.

Παρόλο που οι προαναφερθείσες αρχιτεκτονικές δεν έχουν τυποποιηθεί, η χρήση τους έχει καθιερωθεί από την επιστημονική κοινότητα και την αγορά. Παράλληλα, υπάρχουν κι άλλες παραλλαγές **FTTx** που συναντώνται λιγότερο συχνά, όπως οι εξής: FTTN (Fiber to the Neighborhood - ίνα μέχρι τη γειτονιά), FTTO (Fiber to the Office - ίνα μέχρι το γραφείο), FTTP (Fiber to the premises - ίνα μέχρι το χώρο του συνδρομητή), FTTU (Fiber to the user - ίνα μέχρι τον χρήστη), FTTD (Fiber to the Desk - ίνα μέχρι τη θέση εργασίας), κλπ [31].

2.3.1 Ινα μέχρι την Καμπίνα

Η αρχιτεκτονική **[Ινας μέχρι την Καμπίνα (Fiber to the Cabinet – FTTC)]** αφορά το πρώτο στάδιο διείσδυσης της οπτικής ίνας στο ΔΠ, κατά το οποίο τα χάλκινα καλώδια που βρίσκονται στο κύριο δίκτυο και καλύπτουν την επικοινωνία του ΑΚ με τις **καμπίνες** αντικαθίστανται από οπτικές ίνες, με τη χάλκινη υποδομή στο δίκτυο διανομής να παραμένει ως έχει [27], [30]. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται η μορφή αυτής της αρχιτεκτονικής, κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η προσθήκη **[Πλαισίου Οπτικού Κατανεμητή (ΠΟΚ, Optical Distribution Frame – ODF)]**, κάτι το οποίο επεκτείνει τη διείσδυση των οπτικών δικτύων στο κύριο δίκτυο. Ο ρόλος του **ΠΟΚ** είναι παρόμοιος με αυτόν του **ΠΚΚ** για το δίκτυο χαλκού, δηλαδή εξυπηρετεί ως συλλέκτης ή ως άκρο συνδέσεων οπτικών ινών.



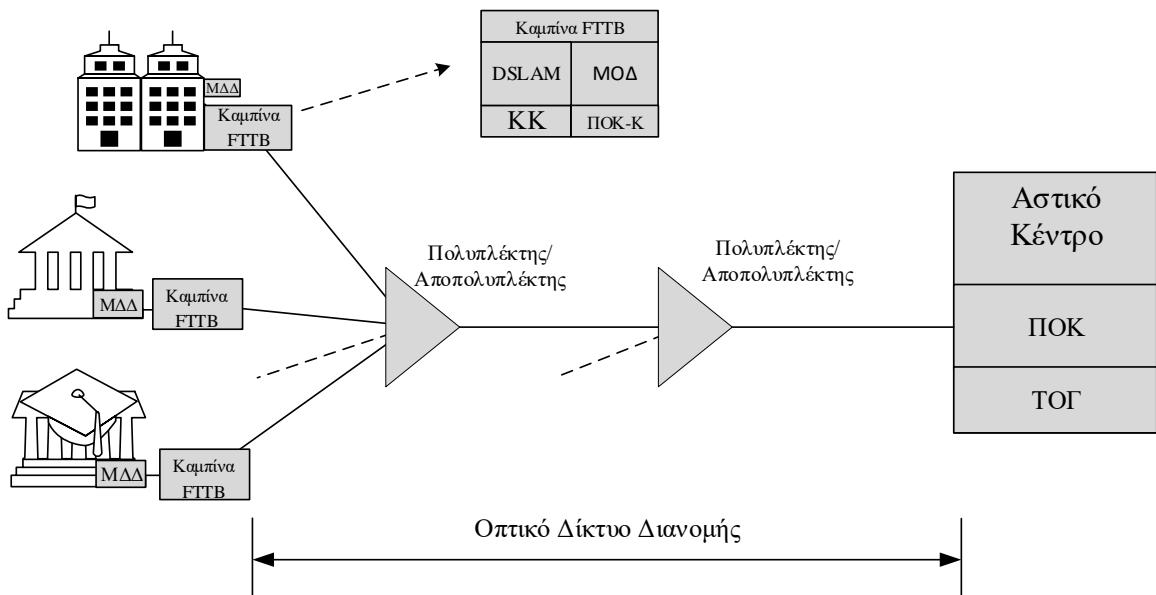
Σχήμα 2.3: Η αρχιτεκτονική FTTx

Ο ρόλος της καμπίνας σε αυτή την αρχιτεκτονική αναβαθμίζεται σημαντικά, αφού αυτή καλείται να «γεφυρώσει» τις τεχνολογίες xDSL που λειτουργούν στο δίκτυο διανομής με τις νέες στο αναβαθμισμένο οπτικό δίκτυο του κύριου τμήματος του ΔΠ. Για να γίνει εφικτή αυτή η «γεφύρωση» απαιτείται η κατάλληλη αναβάθμιση της καμπίνας, ώστε αυτή να υποστηρίζει ταυτόχρονα επικοινωνίες χαλκού και οπτικής ίνας. Πιο συγκεκριμένα, μια καμπίνα FTTx πρέπει να περιλαμβάνει έναν πολυπλέκτη για YKT ή/και ISDN, ένα DSLAM για την παροχή υπηρεσιών xDSL, ένα POK για τον τερματισμό των οπτικών ινών, μια Μονάδα Οπτικού Δικτύου (MOA) της οποίας ο ρόλος ταυτίζεται με αυτόν της ΜΔΔ για το δίκτυο χαλκού, καθώς και πρόσθετο εξοπλισμό για την τροφοδοσία και τον έλεγχο των κλιματικών συνθηκών στην καμπίνα (θερμοκρασία και υγρασία), δεδομένου ότι αυτή είναι υπαίθρια. Ακόμη, στο ΑΚ εγκαθίσταται ένα Τερματικό Οπτικής Γραμμής (ΤΟΓ), το οποίο παρέχει τις υπηρεσίες του ΠΥΔ στο δίκτυο οπτικών ινών [27].

Συνήθως, η αρχιτεκτονική FTTx αποτελεί την πρώτη επιλογή των ΠΥΔ, ειδικά σε περιοχές στις οποίες η χρήση χάλκινων καλωδίων είναι εκτεταμένη και πυκνή (όπως μεγάλες πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές) και τα χαρακτηριστικά των περιοχών αυτών δυσκολεύουν ή κάνουν αδύνατη την αντικατάσταση των χάλκινων καλωδίων. Η εγκατάσταση ή αναβάθμιση προς καμπίνες FTTx απαιτεί λιγότερες ΚΕΔΑ, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αρχιτεκτονικές FTTx, αφού χρειάζονται τεχνικές επεμβάσεις μόνο κατά μήκος του κύριου δικτύου, το οποίο έχει απλούστερη τοπολογία από αυτήν του δικτύου διανομής [27].

2.3.2 Τια μέχρι το Κτήριο

Επόμενο στάδιο διείσδυσης της οπτικής ίνας στο ΔΠ αποτελεί η αρχιτεκτονική Ίνας μέχρι το Κτήριο (Fiber to the Building – FTTB), κατά την οποία η οπτική ίνα φτάνει μέχρι το κτήριο του συνδρομητή. Επισημαίνεται ότι με τον όρο «κτήριο» εννοείται μια πολυκατοικία ή ένα συγκρότημα κτηρίων και όχι μονοκατοικία, αφού η μονοκατοικία θα ταυτίζόταν με αναφορά σε FTTH [27], [32].



Σχήμα 2.4: Η αρχιτεκτονική FTTB

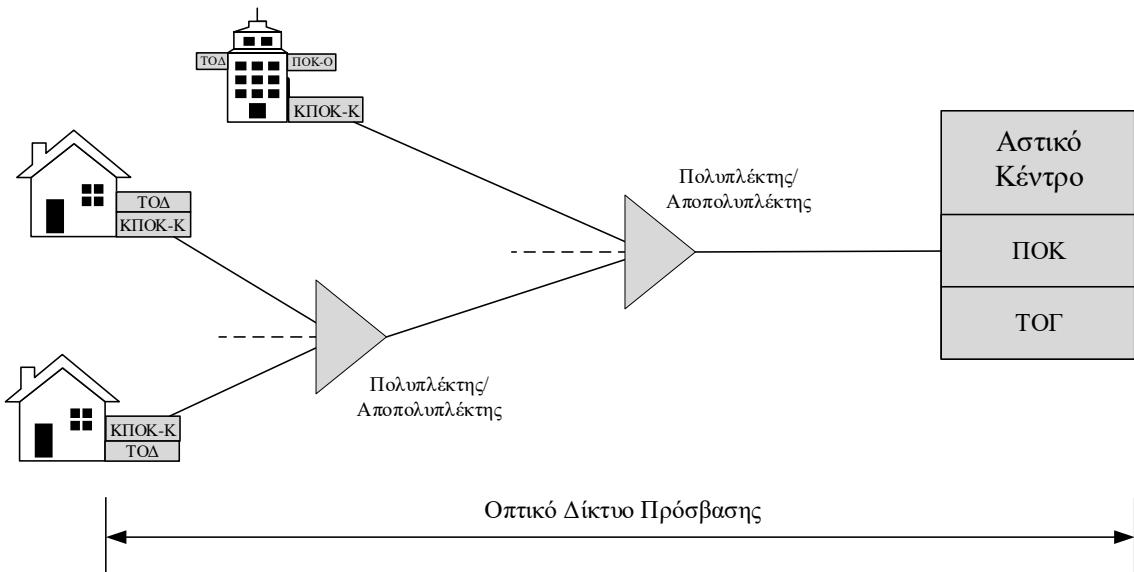
Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, τα δυο τμήματα του ΔΠ αντικαθίστανται από το Οπτικό Δίκτυο Διανομής (ΟΔΔ), το οποίο οριοθετείται ανάμεσα στο ΑΚ και τις καμπίνες. Σύμφωνα με την υλοποίηση FTTB, η οπτική ίνα του ΑΚ τερματίζει στο Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή Κτηρίου (ΠΟΚ-Κ, Building ODF – B-ODF), ο οποίος συμπεριλαμβάνεται στην αντίστοιχη καμπίνα του κτηρίου. Ο ρόλος της καμπίνας είναι παρόμοιος με αυτόν της αρχιτεκτονικής FTTC, δηλαδή ενσωματώνει τον κατάλληλο ενεργό εξοπλισμό (DSLAM, ΜΟΔ, πολυπλέκτες για YKT/ISDN, τροφοδοσία) ώστε να κάνει εφικτή την ταυτόχρονη επικοινωνία με τεχνολογίες xDSL και πρωτοκόλλων οπτικής επικοινωνίας [27], [33].

Η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής FTTB συναντά διάφορα πρακτικά προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με το πλήθος των πελατών που χρησιμοποιούν την υποδομή FTTB, τον τρόπο επιμερισμού του κόστους ηλεκτρικής τροφοδότησης του εξοπλισμού, στην περίπτωση που αυτός βρίσκεται εντός του κτηρίου, καθώς και τις τεχνικές δυσκολίες που προκύπτουν όταν πολλοί

ΠΥΔ παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες σε συνδρομητές του ίδιου κτηρίου. Ακόμη, το κόστος υλοποίησης είναι σημαντικά αυξημένο από αυτό του FTTC, κυρίως διότι οι ΠΥΔ πρέπει να εγκαταστήσουν περισσότερους ενεργούς εξοπλισμούς στα κτήρια των συνδρομητών και, ταυτόχρονα, οι ίδιοι εξοπλισμοί εξυπηρετούν μικρότερο πλήθος συνδρομητών, σε σύγκριση με την αρχιτεκτονική FTTC, ο εξοπλισμός της οποίας απευθυνόταν σε περισσότερους συνδρομητές [27], [29], [34].

2.3.3 Ίνα μέχρι την Οικία

Τελευταίο στάδιο διείσδυσης της οπτικής ίνας στο ΔΠ αποτελεί η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής Ίνα μέχρι το Σπίτι (Fiber to the Home – FTTH), κατά την οποία το ΔΠ έχει μετατραπεί σε ΟΔΠ, με την οπτική ίνα να φτάνει μέχρι την οικία¹ του συνδρομητή και, πιο συγκεκριμένα, μέχρι το μεταξύ του ΔΠ και του ιδιωτικού δικτύου του πελάτη. Τα ΜΔΔ που διέθεταν οι συνδρομητές για πρόσβαση στο δίκτυο χαλκού αντικαθίστανται από Τερματικά Οπτικού Δικτύου (ΤΟΔ), τα οποία εξυπηρετούν ως κόμβοι του ΟΔΠ και οι λειτουργίες του ταυτίζονται με αυτές των ΜΟΔ [27], [31], [33].



Σχήμα 2.5: Η αρχιτεκτονική FTTH

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, η οπτική ίνα τερματίζει στο Κύριο Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή Κτηρίου (ΚΠΟΚ-Κ, Main Building ODF – MB-ODF). Από το ΚΠΟΚ-Κ ακολουθούν δύο εναλλακτικοί τρόποι υλοποίησης του εσωτερικού δικτύου: Στην πρώτη περίπτωση το ΤΟΔ

¹Ως «οικία» ορίζεται ένα διαμέρισμα σε μια πολυκατοικία ή οικοδομικό συγκρότημα ή μια μονοκατοικία.

κάθε διαμερίσματος συνδέεται απευθείας με το **ΚΠΟΚ-Κ**, ενώ στη δεύτερη περίπτωση τα **ΤΟΔ** συνδέονται στον αντίστοιχο **Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή Ορόφου (ΠΟΚ-Ο, Floor ODF – F-ODF)**, με αυτούς να συνδέονται απευθείας στο **ΚΠΟΚ-Κ** [27], [33].

Η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής **FTTH** καθίσταται πιο εύκολη σε νέα κτήρια, στα οποία έχει προιγθεί η εγκατάσταση δομημένης οπτικής καλωδίωσης, και πολύ πιο δύσκολη και δαπανηρή σε κτήρια που δεν διαθέτουν ούτε οπτική καλωδίωση ούτε ελεύθερες σωληνώσεις για τοποθέτηση οπτικών ινών. Μεγάλο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής είναι πως δεν υπάρχει ενεργός εξοπλισμός του **ΠΥΔ** σε κανένα σημείο του **ΔΠ**, κάτιο το οποίο μειώνει σημαντικά τις **ΛΕΙΔΑ** του **ΟΔΠ**. Η **ΜΟΔ** που απαιτούνταν στην αρχιτεκτονική **FTTC** για τη σύνδεση στο **ΔΠ** μεταφέρεται προς την πλευρά του συνδρομητή και λαμβάνει τη μορφή ιδιόκτητου οπτικού διαποδιαμορφωτή - δρομολογητή, το οποίο μπορεί να παρέχεται είτε με χρησιδάνειο είτε να το αγοράζει ελεύθερα ο καταναλωτής από την αγορά [27].

Η αρχιτεκτονική **FTTH** αποτελεί τον τελικό στόχο των **ΠΥΔ**, η επίτευξή του οποίου θα ανοίξει νέους ορίζοντες στην αγορά τηλεπικοινωνιών και την ευρυζωνικότητα, δίνοντας τη δυνατότητα για παροχή περισσότερο ανταγωνιστικών ευρυζωνικών υπηρεσιών. Ωστόσο, η μετάβαση στην **FTTH** αρχιτεκτονική αποδεικνύεται εξαιρετικά χρονοβόρα και η μέχρι στιγμής εφαρμογή της αφορά, κυρίως, περιπτώσεις οικοδόμησης νέων κτηρίων και οικισμών, καθώς και χώρες του πρώην ανατολικού μπλοκ που δεν διέθεταν εκτεταμένο δίκτυο χαλκού [27], [31].

2.4 Τεχνολογίες Πρόσβασης

Οι αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων καθορίζουν κατά κύριο λόγο την υποδομή και τα μέσα μετάδοσης για την επίτευξη των επικοινωνιών. Ωστόσο, τα μέρη μιας επικοινωνίας χρησιμοποιούν ένα σύνολο τεχνολογιών, ώστε να μπορέσουν να επικοινωνήσουν πάνω σε μια δεδομένη υποδομή. Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται οι βασικότερες τεχνολογίες που συναντώνται στα ενσύρματα δίκτυα πρόσβασης.

2.4.1 ISDN

Το **Ψηφιακό Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών (Integrated Services Digital Network – ISDN)** αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια της Συμβουλευτικής Επιτροπής Διεθνούς Τηλεφωνίας και Τηλεγραφίας (Consultative Committee for International Telephony and Telegraphy - CCITT), νων **ITU-T**, για την επέκταση και αναβάθμιση της απλής αναλογικής γραμμής του **ΔΤΔΜ** σε ψη-

φιακή για την υποστήριξη πολλαπλών ψηφιακών υπηρεσιών. Η πρώτη τυποποίηση της CCITT για το ISDN δημοσιεύτηκε το 1984 στην «κόκκινη βίβλο» (red book) του οργανισμού και συνεχίστηκε μέχρι τα πρώτα χρόνια του 21^{ου} αιώνα, μέσω της σειράς εγγράφων ITU-T I.x [35], [36]. Κύριο γνώρισμα της τεχνολογίας είναι η υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, όπως κλήσεις ομιλίας και βίντεο, μετάδοση δεδομένων και τηλεομοιοτυπία (fax), από μια ενιαία τηλεφωνική γραμμή με τυπικό ρυθμό μετάδοσης τα 128 kbit/s. Ακόμη, χαρακτηριστικό του δικτύου είναι ότι όλα τα σήματα μεταδίδονται αποκλειστικά σε ψηφιακή μορφή, σε αντίθεση με το ΔΤΔΜ.

Αν και η τεχνολογία ISDN προσφέρει χαμηλές ταχύτητες πρόσβασης για τη σημερινή εποχή, έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής τις προηγούμενες δεκαετίες, διότι έδινε τη δυνατότητα, κυρίως, στις επιχειρήσεις να διεξάγουν τηλεδιασκέψεις, να μεταδίδουν δεδομένα και έγγραφα τηλεομοιοτυπικά μέσω μιας ενιαίας συνδρομητικής γραμμής². Η ταυτόχρονη υποστήριξη των υπηρεσιών γίνεται μέσω του χωρισμού της φυσικής γραμμής του συνδρομητή στα εξής κανάλια επικοινωνίας [37]:

- Κανάλι B (bearer, φορέας) των 64 kbit/s. Το κανάλι ακολουθεί τη συμβατή κωδικοποίηση σήματος φωνής (8 bit δειγματοληπτούνται στα 8 KHz), όπως ορίζεται στο έγγραφο ITU-T G.711, και χρησιμοποιείται τόσο για σηματοδοσία κοινού καναλιού (Common-Channel Signaling – CCS) όσο και για μετάδοση δεδομένων υπηρεσιών. Μέσω του καναλιού είναι δυνατή η εγκαθίδρυση των εξής τύπου συνδέσεων:
 - Μεταγωγής κυκλώματος: Ο γνωστός τύπου σύνδεση για ΥΚΤ στο ΔΤΔΜ, με το κανάλι D να εξυπηρετεί την απαραίτητη σηματοδοσία.
 - Μεταγωγής πακέτου: Οι συνδρομητές συνδέονται σε έναν κόμβο μεταγωγής, με τα δεδομένα τους να μετάγονται ως πακέτα σύμφωνα με το πρωτόκολλο X.25.
 - Ημιμόνιμες: Προσωρινές συνδέσεις Σ-Σ μεταξύ του ΠΥΔ και του συνδρομητή.
- Κανάλι D (δέλτα) των 16 ή 64 kbit/s. Το κανάλι χρησιμοποιείται για σηματοδοσία των κλήσεων του καναλιού B για συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος και για δεδομένα χαμηλού ρυθμού.
- Κανάλι H (high speed) των 384, 1536 ή 1920 kbit/s (H0, H10, H11 και H12 αντίστοιχα). Το κανάλι εξυπηρετεί υπηρεσίες που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, όπως οι

²Η ταυτόχρονη υποστήριξη τηλεομοιοτυπικών υπηρεσιών από το ΔΤΔΜ απαιτεί είτε η εγκατάσταση πρόσθετης συνδρομητικής γραμμής είτε τη χρήση μιας ήδη υπάρχουσας, για την οποία να αποκλείεται η ταυτόχρονη χρήση για οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία (δεδομένα ή κλήσεις φωνής).

τηλεδιασκέψεις, ήχος υψηλής ποιότητας κλπ.

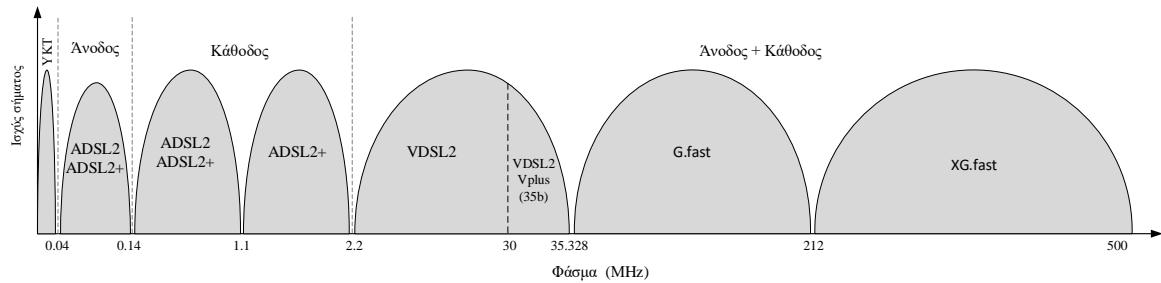
Τα προαναφερθέντα κανάλια χρησιμοποιούνται από ένα σύνολο διεπαφών, οι οποίες παρέχουν στον συνδρομητή τις επιθυμητές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Οι διεπαφές του **ISDN** συνοψίζονται στις ακόλουθες [37]:

- Διεπαφή Βασικού Ρυθμού (Basic Rate Interface – BRI): Προορίζεται για οικιακούς συνδρομητές και μικρές επιχειρήσεις, προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης 128 kbit/s για ωφέλιμη πληροφορία, συνδυάζοντας τη χωρητικότητα ενός ζεύγους χάλκινων καλωδίων, τα οποία αποτελούν δυο κανάλια B. Η μικτή χωρητικότητα των 144 kbit/s προκύπτει από την πρόσθετη χρήση του καναλιού D στα 16 kbit/s για σηματοδοσία. Λόγω του συνδυασμού των καναλιών που χρησιμοποιούνται, η διεπαφή αναφέρεται συχνά και ως 2B+D. Ο τύπος της συγκεκριμένης διεπαφής υλοποιεί τις δικτυακές διεπαφές U, T, S/T και R.
- Διεπαφή Πρωτεύοντος Ρυθμού (Primary Rate Interface – PRI): Η διεπαφή προορίζεται για μεγάλες επιχειρήσεις/οργανισμούς και παρέχει το αμερικανικό σύστημα φέρουσας T1 στα 1.544 Mbit/s, συνδυάζοντας 23 κανάλια B και 1 τύπου D, καθώς και το ευρωπαϊκό σύστημα E1, το οποίο συνδυάζει 30 κανάλια τύπου B και 2 D για επίτευξη ρυθμού μετάδοσης 2.048 Mbit/s.

Οι προβλέψεις για ραγδαία αύξηση σε απαιτήσεις εύρους ζώνης, καθώς και η ευρεία ανάπτυξη οπτικών συστημάτων οδήγησε την **ITU-T** στην ανάπτυξη του ευρυζωνικού ISDN (B-ISDN – Broadband ISDN), το οποίο υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης από 150 έως και 622 Mbit/s. Το B-ISDN, το οποίο ορίζεται από ένα σύνολο εγγράφων της σειράς I, προορίζεται για συστήματα οπτικών ινών και χρησιμοποιεί τη μέθοδο **ATM** για την ενθυλάκωση και πλαισίωση των δεδομένων [37].

2.4.2 xDSL

Η ανεπάρκεια της τεχνολογίας **ISDN** και των dial-up συνδέσεων μέσω διαποδιαμορφωτών (modem) στην παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, λόγω των εξαιρετικά χαμηλών ρυθμών μετάδοσης, οδήγησε στην τυποποίηση των τεχνολογιών **Ψηφιακής Συνδρομητικής Γραμμής** (**Digital Subscriber Line – DSL**), οι οποίες επιχειρούν να μεγιστοποιήσουν την αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος των χάλκινων καλωδίων πέραν της φωνόσυχνης περιοχής (300 - 3400 Hz). Στο σχήμα 2.6 απεικονίζεται η χρήση του φάσματος από τις τεχνολογίες τύπου **DSL**. Οι



Σχήμα 2.6: Η χρήση των φάσματος από τις τεχνολογίες DSL

τεχνολογίες **DSL** αποτελούν την πλέον κυρίαρχη επιλογή για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω του υφιστάμενου δικτύου χαλκού, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους ανάπτυξης, αφού χρησιμοποιείται η υπάρχουσα δικτυακή υποδομή του **ΔΠΙ**, αλλά και των εξαιρετικών επιδόσεων, αφού είναι εφικτή η επίτευξη ταχυτήτων πρόσβασης της τάξεως των δεκάδων Mbit/s [27]. Το σύνολο των τεχνολογιών που ανήκουν στην οικογένεια **DSL** φαίνονται στον πίνακα 2.1³.

Ονομασία	Τυποποίηση ITU-T	Ρυθμός μετάδοσης	Έτος πρώτης έκδοσης
HDSL	G.991.1, G.991.2	2.048 Mbit/s	1998
ADSL	G.992.1, G.992.2	8/1 Mbit/s	1999
VDSL	G.993.1	52/16 Mbit/s	2001
ADSL2	G.992.3, G.992.4	12/1 Mbit/s	2002
ADSL2+	G.992.5	24/1 Mbit/s	2003
VDSL2	G.993.2	100 Mbit/s	2006
G.fast	G.9700, G.9701	1000/150 Mbit/s	2014
VDSL2-Vplus	G.993.2 Amendment 1	300/100 Mbit/s	2015
XG-FAST [38], [39]	Δ/Y	10 Gbit/s	Δ/Y

Πίνακας 2.1: Οι παραλλαγές της τεχνολογίας DSL.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6, η εξέλιξη των τεχνολογιών **DSL** συμβαδίζει με την επέκταση της χρήσης του διαθέσιμου φάσματος του δισύρματου χαλκού, η οποία γίνεται εφικτή με ένα πλήθος τεχνικών διαμόρφωσης και επεξεργασίας σήματος, όπως η **Διακριτή Πολυτονική** (**ΔΠΤ**, Discrete Multi-Tone – DMT). Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι υψηλές ταχυτήτες επιτυγχάνονται με κόστος ως προς την εξασθένιση, αφού όσο υψηλότερες συχνότητες

³Ο συμβολισμός X/Y Mbit/s σημαίνει X Mbit/s στην κάθοδο και Y Mbit/s στην άνοδο.

χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων στο χαλκό, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση που υφίσταται το σήμα λόγω του επιδερμικού φαινομένου [27].

Ο περιορισμός στην απόσταση από το ΑΚ που εισάγει το επιδερμικό φαινόμενο δεν αποτελεί περιοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών DSL, αφού αυτή μπορεί να συνδυαστεί με την επέκταση των αρχιτεκτονικών FTTx, η οποία μειώνει την τελική απόσταση του συνδρομητή από το DSLAM. Πιο συγκεκριμένα, η αναβάθμιση των καμπίνων σε καμπίνες τύπου FTTC και FTTB συνοδεύεται αναγκαία, πλέον, με την προσθήκη DSLAM, τα οποία υποστηρίζουν τις τελευταίες τεχνολογίες DSL, όπως η VDSL2 (Very-high-bit-rate DSL 2) και η G.fast, ώστε οι τελικοί χρήστες να απολαμβάνουν στο μέγιστο τις υψηλές ταχύτητες των νέων τεχνολογιών, όντας ταυτόχρονα πιο κοντά στα DSLAM [27], [40], [41].

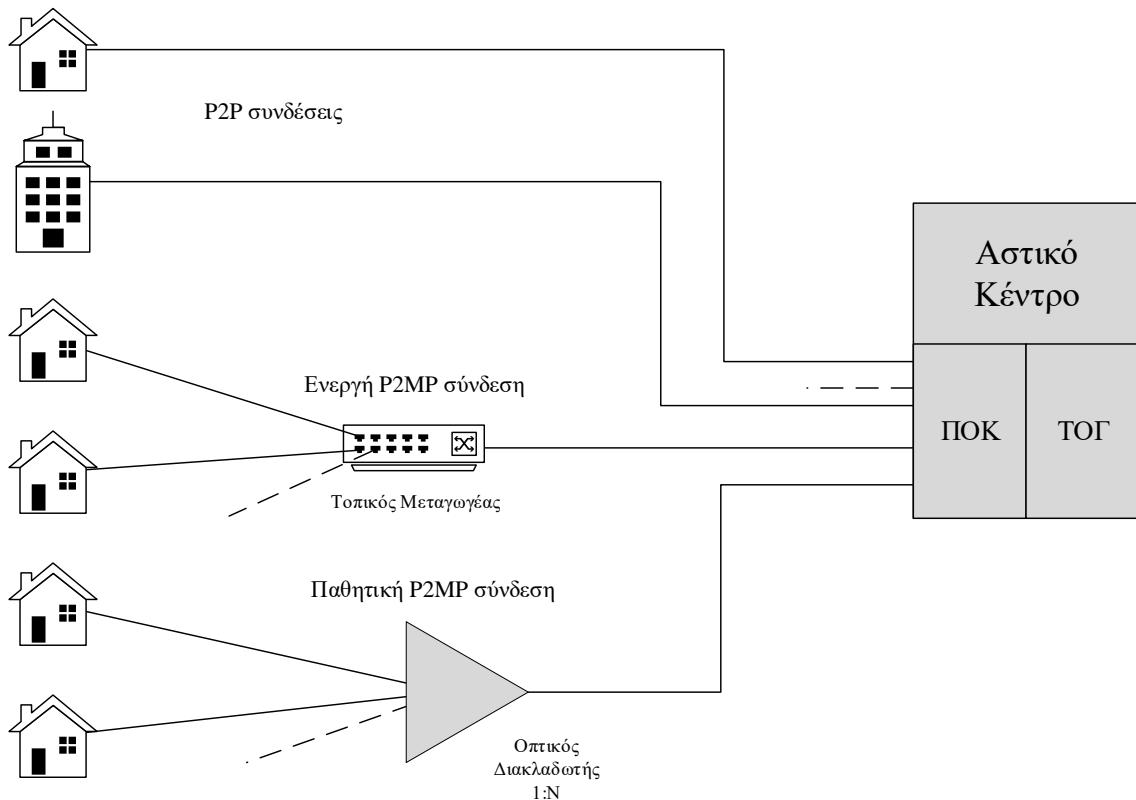
2.4.3 Τεχνολογίες ethernet και ΠΟΔ

Το ethernet αποτελεί μια από τις πιο γνωστές οικογένειες δίκτυων πρωτοκόλλων του επιπέδου ζεύξης δεδομένων, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την επικοινωνία υπολογιστών σε ένα τοπικό δίκτυο. Ωστόσο, η χρήση των πρωτοκόλλων αυτών έχει επεκταθεί και στο ΔΠ, για την επικοινωνία των συνδρομητών με το ΑΚ.

Οι διάφοροι τρόποι, με τους οποίους η οικογένεια των πρωτοκόλλων ethernet μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ΔΠ, συμπεριλαμβάνονται στην «οιμπρέλα» τεχνολογίαν Ethernet στο Πρώτο Μίλι (Ethernet in the First Mile – EFM). Στο σχήμα 2.7 απεικονίζονται οι τρεις διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους το ethernet μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ΔΠ.

Η πρώτη κατά σειρά υλοποίηση EFM αφορά την εγκαθίδρυση συνδέσεων Σημείο προς Σημείο ($\Sigma-\Sigma$, Point to Point – P2P) από τον εξοπλισμό των συνδρομητών απευθείας προς το ΔΠ. Το σενάριο αυτό προβλέπει ότι κάθε συνδρομητής διαθέτει μια δική του οπτική ζεύξη για την απευθείας σύνδεσή του με το ΠΟΚ, χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου ενδιάμεσου εξοπλισμού ή τη χρήση κάποιου κοινού μέσου μετάδοσης. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί μεγάλο πλήθος οπτικών ινών και το δίκτυο που προκύπτει καθίσταται αρκετά περίπλοκο αλλά και ακριβό στην εγκατάσταση και τη συντήρησή του. Συνήθως, η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται από επιχειρήσεις και οργανισμούς που έχουν απαιτητικά ΣΕΥ και επιθυμούν την πλήρη αξιοποίηση της χωρητικότητας της οπτικής ίνας [27].

Εναλλακτική υλοποίηση EFM προβλέπει την εγκαθίδρυση συνδέσεων Σημείο προς Πολλαπλά Σημεία ($\Sigma-\Pi\Sigma$, Point to Point – P2MP) με χρήση ενεργού εξοπλισμού. Οι συνδρομητές συνδέονται απευθείας με τον εξοπλισμό αυτό, ο οποίος βρίσκεται στην καμπίνα και μπορεί να



Σχήμα 2.7: Οι τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις EFM [27]

είναι ένας οπτικός μεταγωγέας, με χρήση ανεξάρτητου ζεύγους οπτικών ινών. Η επιλογή αυτή μειώνει σημαντικά το πλήθος των οπτικών ζεύξεων που τερματίζει στο ΑΚ, ωστόσο, περιορίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης που αναλογεί σε κάθε συνδρομητή, αφού πολλοί συνδρομητές πρέπει να μοιραστούν την ίδια οπτική ζεύξη που συνδέει την καμπίνα τους και τον εξοπλισμό μεταγωγής με το ΔΠ. Ένα τέτοιο δίκτυο ονομάζεται Ενεργό Οπτικό Δίκτυο (ΕΟΔ, Active Optical Network – AON) [27].

Η τρίτη και ιδιαίτερα δημοφιλής υλοποίηση EFM είναι η παθητική σύνδεση Σ-ΠΣ, η οποία διαμορφώνει μια αρχιτεκτονική Παθητικού Οπτικού Δικτύου (ΠΟΔ). Ένα ΠΟΔ χαρακτηρίζεται από ευελιξία και χαμηλές ΛΕΙΔΑ, συγκρινόμενο με τις υπόλοιπες αρχιτεκτονικές, αφού κατά μήκος του ΔΠ δεν χρησιμοποιούνται ενεργές συσκευές, αλλά οπτικοί διακλαδωτές που διασύνδέουν τους συνδρομητές με το ΔΠ. Οι τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ενός ΠΟΔ περιλαμβάνουν τόσο το ethernet, όσο και ένα πλήθος τεχνολογιών υπό την τυποποίηση της ITU-T. Η αρχιτεκτονική αυτών των δικτύων, καθώς και το σύνολο των τεχνολογιών που τις καθιστούν λειτουργικές περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Fibre optic is becoming like electricity. If you look at how electricity spread around the globe 100 years ago, that's what's happening now.

Reed Hastings, Γενικός Διεθυντής της Netflix

3

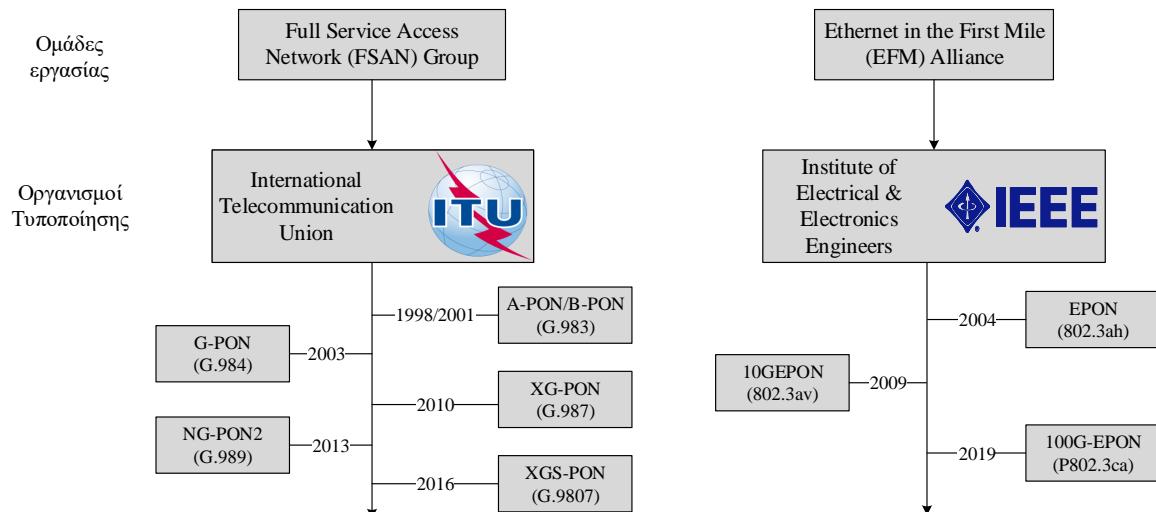
Παθητικά Οπτικά Δίκτυα

Η κυρίαρχη αρχιτεκτονική οπτικών δικτύων, που εκτιμάται να διατηρήσει δεσπόζουσα θέση στην υποδομή των δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς, είναι τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (ΠΟΔ, Passive Optical Networks – PONs). Πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική Σ-ΠΣ, τα χαρακτηριστικά της οποίας επιτρέπουν την αξιοποίηση των δυνατοτήτων και πλεονεκτημάτων των οπτικών ινών σε μεγαλύτερο βαθμό από κάθε άλλη αρχιτεκτονική, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το οικονομικό κόστος. Πιο συγκεκριμένα, τα πλεονεκτήματα των ΠΟΔ συνοψίζονται στα εξής σημεία [27], [31], [42]:

- Απουσιάζει ενεργός εξοπλισμός σε όλο το μήκος του ΟΔΔ. Η οδήγηση των πλαισίων από το ΑΚ στους συνδρομητές και αντιστρόφως πραγματοποιείται με τη χρήση παθητικών διατάξεων (διακλαδωτές), οι οποίοι ευρυεκπέμπουν το οπτικό σήμα που λαμβάνουν.
- Αν και ως αρχιτεκτονική Σ-ΠΣ έχει το μειονέκτημα ότι πολλοί χρήστες μοιράζονται τους πόρους μιας κοινόχρηστης οπτικής ίνας, τεχνικές πολυπλεξίας μπορούν να αυξήσουν τη διαθέσιμη χωρητικότητα των κοινών οπτικών ζεύξεων.
- Κάθε οπτικός διακλαδωτής μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 32 οπτικές μονάδες, οι οποίες μπορούν να βρίσκονται σε απόσταση μέχρι και 60 χιλιόμετρα από το αστικό κέντρο.
- Οι ΛΕΙΔΑ των ΠΟΔ είναι σημαντικά μειωμένες και εστιάζονται στη συντήρηση των οπτικών ζεύξεων και του παθητικού εξοπλισμού.

- Η ανάπτυξη και η τυποποίησή τους επιτρέπει στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους την εύκολη και οικονομική επέκταση των ΠΟΔ που εγκαθιστούν, αφού υπάρχει η στόχευση να διατίθεται συμβατότητα προς τα πίσω για κάθε πρότυπο που αναπτύσσεται.

Η αρχιτεκτονική των ΠΟΔ έχει συγκεκριμένη μορφή, η οποία ορίστηκε το 1996 από το έγγραφο ITU-T G.982 [43], ωστόσο η λειτουργία τους καθίσταται εφικτή από τον συνδυασμό ενός πλήθους διαφορετικών πρωτοκόλλων, τα οποία ρυθμίζουν τη μορφή των μεταδιδόμενων δεδομένων, καθώς και κανόνες επικοινωνίας μεταξύ των μερών που επικοινωνούν. Το σύνολο αυτών των κανόνων και πρωτοκόλλων συγκεκριμενοποιείται σε ένα έγγραφο (ή σειρά εγγράφων) που ονομάζεται πρότυπο (standard). Όσον αφορά τα ΠΟΔ, αντικείμενο των εγγράφων αυτών είναι ο πλήρης ορισμός μιας τεχνολογίας ΠΟΔ, με σκοπό την υιοθέτησή του από κατασκευαστές (vendors) και ΠΥΔ. Οι κυρίαρχοι οργανισμοί που εμπλέκονται στην τυποποίηση προτύπων είναι η ITU και η IEEE, με εισηγητές την FSAN και την EFM αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η συνεισφορά του κάθε οργανισμού στην παραγωγή και δημοσίευση προτύπων.

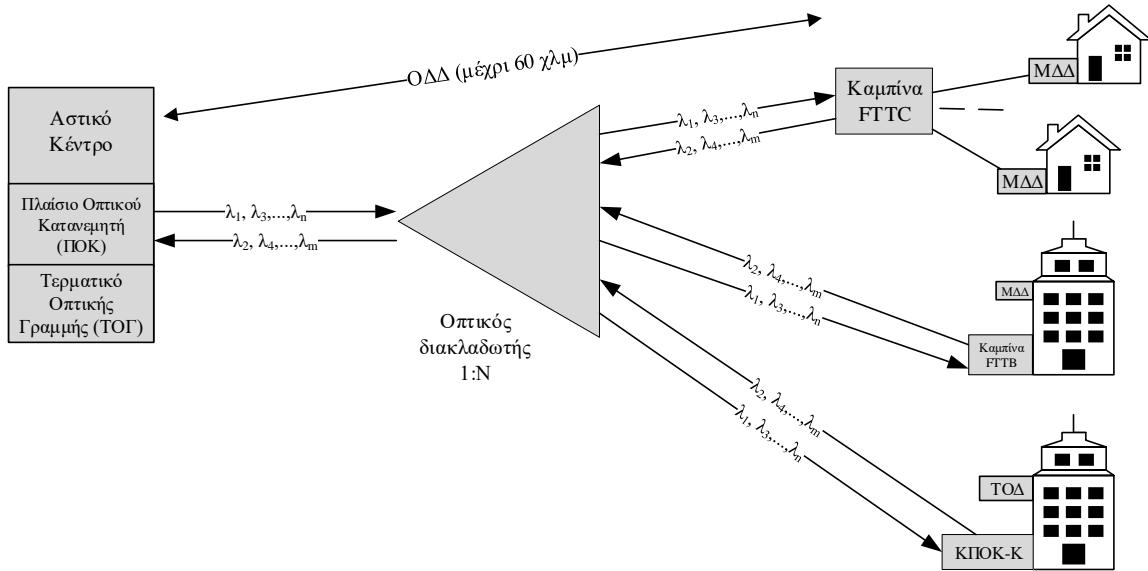


Σχήμα 3.1: Οι οργανισμοί που δημιουργούν και δημοσιεύουν πρότυπα ΠΟΔ

Η διάρθρωση του παρόντος κεφαλαίου έχει ως εξής: Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφεται αναλυτικά η δομή των ΠΟΔ, στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις διάφορες τεχνολογίες πολυπλεξίας που εφαρμόζονται και πως αυτές μεγιστοποιούν τις αποδόσεις των ΠΟΔ. Τέλος, παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή των προτύπων ΠΟΔ που έχουν δημοσιευτεί από την IEEE και το τμήμα τυποποίησης της ITU, καθώς και τα μελλοντικά σχέδια του κάθε οργανισμού.

3.1 Αρχιτεκτονική των ΠΟΔ

Το σχήμα 3.2 απεικονίζει τη γενική αρχιτεκτονική των ΠΟΔ, όπως αυτή έχει οριστεί από την ITU και εφαρμόζεται στην πράξη [31], [43].



Σχήμα 3.2: Η γενική αρχιτεκτονική των ΠΟΔ.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, στο ΑΚ στεγάζεται, μαζί με το ΠΟΚ, το Τερματικό Οπτικής Γραμμής (ΤΟΓ, Optical Line Terminal – OLT). Το ΤΟΓ είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή των σημάτων μεταξύ ηλεκτρονικής και οπτικής μορφής, την αποστολή και τη λήψη δεδομένων από και προς τις συσκευές των συνδρομητών και την εφαρμογή της τεχνολογίας που έχει επιλεγεί από τον ΠΥΔ ή τον κατασκευαστή του ΤΟΓ για τη λειτουργία του ΠΟΔ, στο οποίο δραστηριοποιείται το ΤΟΓ. Αν και οι λειτουργίες ενός ΤΟΓ συγκεκριμένοποιούνται από την τεχνολογία ΠΟΔ που εφαρμόζει, μια από τις σημαντικότερες εξ αυτών είναι η Δυναμική Κατανομή Ευρος Ζώνης (ΔΚΕΖ), η υλοποίηση της οποίας αφήνεται κατά μεγάλο βαθμό στην ευχέρεια του ΠΥΔ ή του κατασκευαστή. Συνοπτικά, το ΤΟΓ είναι η «καρδιά» ενός ΠΟΔ, καθώς επιτελεί όλες εκείνες τις λειτουργίες που καθιστούν το δίκτυο λειτουργικό [27], [31].

Οι οπτικές ίνες που προέρχονται από το ΑΚ καταλήγουν σε παθητικές συσκευές, τους οπτικούς διακλαδωτές (optical splitter). Ο ρόλος των διακλαδωτών είναι να διαμερίζουν την ισχύ του οπτικού σήματος που λαμβάνουν στις εξόδους τους, οι οποίες μπορεί να είναι από 2 μέχρι 64, με συνηθέστερες τιμές τις 8, 16 και 32. Το πλήθος των εξόδων ενός διακλαδωτή συναντάται ως λόγος διακλάδωσης 1:N, όπου N το πλήθος των εξόδων. Για υποστήριξη περισσότερων

εξόδων δύναται να συνδυαστούν πολλοί διακλαδωτές, συνδέοντας την είσοδο του ενός σε μια από τις εξόδους του άλλου. Αυτό, βέβαια, δεν σημαίνει ότι μπορεί να εξυπηρετηθεί ακαθόριστο πλήθος χρηστών σε ένα ΠΟΔ, το μέγεθος αυτό οριοθετείται από την τεχνολογία ΠΟΔ που χρησιμοποιεί το ΤΟΓ. Επίσης, αυτές οι διακλαδώσεις περιορίζονται και από τη «διαφορική απόσταση» (differential fibre distance, η απόσταση μεταξύ της κοντινότερης και τις μακρινότερης ΜΟΔ από το ΤΟΓ), η οποία δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 20 χιλιόμετρα [27], [31], [44].

Κάθε έξοδος του οπτικού διακλαδωτή καταλήγει είτε σε έναν άλλον διακλαδωτή είτε σε μια Μονάδα Οπτικού Δικτύου (ΜΟΔ, Optical Network Unit – ONU) ή Τερματικό Οπτικού Δικτύου (ΤΟΔ, Optical Network Terminal – ONT).¹. Η ΜΟΔ είναι η ενεργή συσκευή στην οποία τερματίζει το έτερο άκρο του οπτικού δικτύου και είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή σημάτων μεταξύ ηλεκτρονικής και οπτικής μορφής, καθώς και για την αποστολή και λήψη δεδομένων εκ μέρους του ή των συνδρομητών που εξυπηρετούνται από τη μονάδα. Η μορφή της ΜΟΔ πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένη τυποποίηση και να συμβαδίζει με αυτή του ΤΟΓ, με το οποίο επικοινωνεί [27], [31].

Οι ΜΟΔ και το ΤΟΓ μεταδίδουν τα δεδομένα τους μέσω ενός Οπτικού Δικτύου Διανομής (ΟΔΔ, Optical Distribution Network – ODN), το οποίο περιλαμβάνει την παθητική τηλεπικοινωνιακή υποδομή (οπτικές ίνες και οπτικοί διακλαδωτές) και δεν μπορεί να υπερβαίνει σε έκταση τα 60 χιλιόμετρα. Πολλά ΟΔΔ που εξυπηρετούνται από το ίδιο ΤΟΓ σχηματίζουν ένα ΟΔΠ [33].

3.2 Τεχνικές Πολυπλεξίας και Πολλαπλής Πρόσβασης

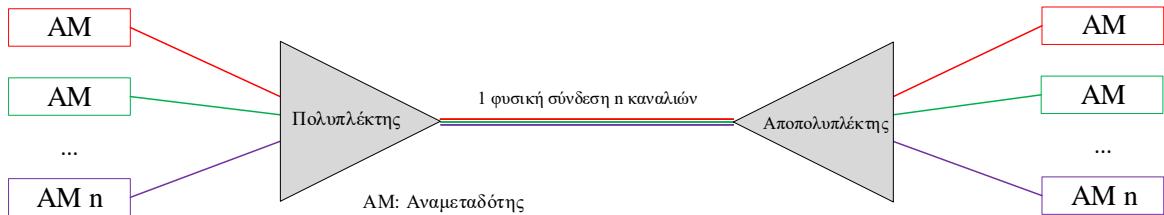
Λόγω του γεγονότος ότι οι διακλαδωτές είναι παθητικές συσκευές, δηλαδή δεν διαθέτουν μνήμη προσωρινής αποθήκευσης (buffer), και οι ΜΟΔ μοιράζονται μεταξύ τους τη ζεύξη που διαθέτει ο διακλαδωτής με το ΤΟΓ, δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων από πολλές ΜΟΔ. Συνεπώς, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και σε ένα κανάλι, αποκλειστικά μια ΜΟΔ μπορεί να μεταδίδει δεδομένα. Ακόμη, λόγω του ότι η παθητική συσκευή δεν έχει τη δυνατότητα μεταγωγής πλαισίων, τα δεδομένα που αποστέλλει το ΤΟΓ ευρυεκπέμπονται προς όλες τις ΜΟΔ. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, που προκύπτουν από τη δομή των ΠΟΔ, οδηγούν στο συμπέρασμα πως χρειάζονται τεχνικές, οι οποίες να επιτρέπουν την πολύπλεξη δεδομένων

¹Οι όροι ΜΟΔ και ΤΟΔ είναι σχετικά ταυτόσημοι, με τον πρώτο να έχει εισαχθεί από την IEEE και τον δεύτερο από την ITU-T. Ωστόσο, συνηθίζεται ο όρος της ITU-T να αναφέρεται στις συσκευές που βρίσκονται στο χώρο του συνδρομητή (FTTH). Στο πλαίσιο του παρόντος συγγράμματος δεν έχει πρακτικό νόημα ο διαχωρισμός ΜΟΔ/ΤΟΔ, γι' αυτό θα χρησιμοποιείται και για τα δύο ο όρος ΜΟΔ.

και την πολλαπλή πρόσβαση των ΜΟΔ στο κοινόχρηστο μέσο μετάδοσης, με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων δικτυακών υποδομών.²

3.2.1 Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος

Η Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (ΠΔΜΚ, Wavelength Division Multiplexing – WDM) είναι μια τεχνική πολυπλεξίας που συναντάται αποκλειστικά στα οπτικά δίκτυα, θεωρητικά ταυτίζεται με την Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (ΠΔΣ, Frequency Division Multiplexing – FDM), και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση οπτικών σημάτων με διαφορετικό μήκος κύματος μέσω μιας κοινής οπτικής ζεύξης [45]. Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται μια αφηρημένη αναπαράσταση της συγκεκριμένης πολυπλεξίας.



Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση της τεχνικής ΠΔΜΚ

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, κάθε αναμεταδότης μεταδίδει σήμα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (διακρινόμενο ως διαφορετικό χρώμα στο σχήμα), τα σήματα των οποίων συνδυάζονται στον πολυπλέκτη. Στο άλλο άκρο της επικοινωνίας, λαμβάνονται τα οπτικά σήματα διαφορετικού μήκους κύματος, διαχωρίζονται από τον αποπολυπλέκτη και διανέμονται στον κατάλληλο αναμεταδότη. Το πλήθος των διαφορετικών οπτικών σημάτων που μπορούν να πολυπλεκτούν και να μεταδοθούν ταυτόχρονα στο κοινό μέσο μετάδοσης εξαρτάται από την τεχνική ΠΔΜΚ που εφαρμόζεται. Οι συνηθέστερες τεχνικές που βρίσκουν εφαρμογή στα ΠΟΔ συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Η Βασική Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (ΒΠΔΜΚ, Basic Wavelength Division Multiplexing – BWDM) μπορεί να πολυπλέξει σήματα τα οποία μεταδίδονται σε δύο μήκη κύματος, 1310 nm και 1550 nm [46].

² Διεκυρινίζεται ότι η κατεύθυνση επικοινωνίας από το ΤΟΓ προς τις ΜΟΔ ονομάζεται καθοδική ή συρρευματική, ενώ η αντίθετη επικοινωνία ανοδική ή αντιρρευματική. Με αντίστοιχους επιθετικούς προσδιορισμούς χαρακτηρίζονται τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία στις δύο κατευθύνσεις.

- Η Μαζική Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (ΜΠΔΜΚ, Coarse Wavelength Division Multiplexing – CWDM), όπως ορίζεται στο πρότυπο ITU-T G.694.2, επιτρέπει τον χωρισμό του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας σε 16 κανάλια. Η τεχνική χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης από 1270 nm μέχρι 1610 nm, με εύρος κάθε καναλιού τα 20 nm [47].
- Η Πυκνή Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (ΠΠΔΜΚ, Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM), όπως ορίζεται στο πρότυπο ITU-T G.694.1, αναφέρεται στην πολυπλεξία σημάτων γύρω από τα 1550 nm. Συγκεκριμένα, τα σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν τις μπάντες C (1530–1565 nm) και L (1570–1610 nm), οι οποίες θεωρούνται αρκετά δημοφιλείς, αφού το ίδιο εύρος χρησιμοποιούν και οι ενισχυτές ινών ενισχυμένες με έρβιο (Erbium Doped Fiber Amplifiers - EDFA). Η τεχνική παρέχει μέχρι και 160 κανάλια, χρησιμοποιώντας πολύ μικρότερο εύρος για κάθε κανάλι [48].

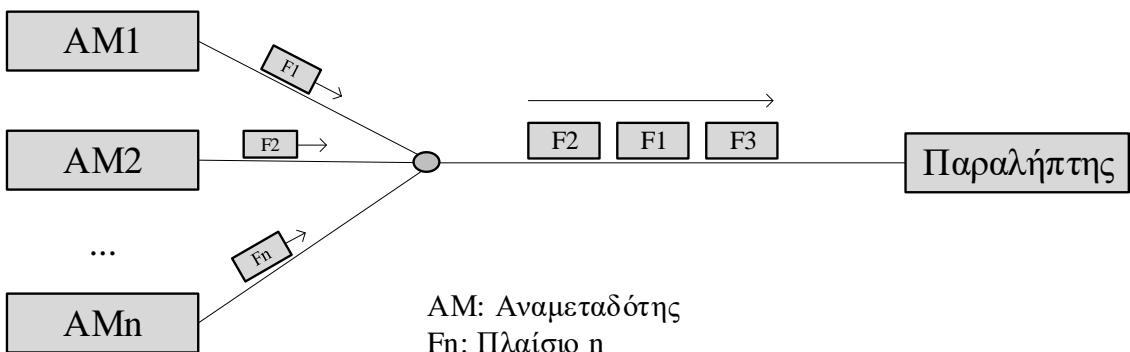
Οι τεχνικές ΠΔΜΚ βρίσκουν πλήθος εφαρμογών στα ΠΟΔ. Μέσω της διαδικασίας διαίρεσης κύματος είναι δυνατή η ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων στο κανάλι καθόδου και ανόδου, με χρήση διαφορετικών μηκών κύματος για τις δυο κατευθύνσεις. Αυτή η ιδιότητα χαρακτηρίζει το ΠΟΔ ως πλήρως αμφίδρομο σύστημα (full-duplex), αφού επιτρέπεται η ταυτόχρονη επικοινωνία προς και τις δυο κατευθύνσεις.

Ακόμη, τεχνικές ΠΔΜΚ στα ΠΟΔ δύναται να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση της χωρητικότητας των καναλιών καθόδου και ανόδου. Σε κάποια πρότυπα ΠΟΔ, όπως το NG-PON2 και το EPON, δίνεται η δυνατότητα στα ΤΟΓ να μοιράζουν τον φόρτο κίνησης των ΜΟΔ σε πολλά μήκη κύματος, τα οποία λειτουργούν ως ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας, τα οποία δύναται να παρέχουν διαφορετικές πολιτικές προτεραιότητας στις υπηρεσίες που εξυπηρετούν. Έτσι, είναι δυνατός ο διπλασιασμός ή τετραπλασιασμός της χωρητικότητας ενός δικτύου ΠΟΔ πάνω στην ίδια υποδομή και η εξασφάλιση καλύτερης ΠτΥ, κάτι που οδηγεί σε αυξημένη ικανοποίηση περισσότερων συνδρομητών [49], [50].

Τέλος, επισημαίνεται ότι οι τεχνικές ΠΔΜΚ αυξάνουν τη χωρητικότητα ενός δικτύου, με κόστος τις υψηλές ΚΕΔΑ. Οι εξειδικευμένες τεχνικές ΠΔΜΚ, όπως η ΠΠΔΜΚ, που διαμερίζουν το εύρος ζώνης σε περισσότερα αλλά μικρότερου εύρους κανάλια απαιτούν πιο εξελιγμένο και ακριβό τεχνολογικό εξοπλισμό [27].

3.2.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου

Θεμελιώδης τεχνική πολυπλεξίας με πληθώρα εφαρμογών στις τηλεπικοινωνίες είναι η Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (ΠΔΧ, Time Division Multiplexing – TDM), η οποία επιτρέπει τη χρονική πολύπλεξη πολλαπλών ροών δεδομένων στο ίδιο μέσο μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική χωρίζει το κοινό κανάλι μετάδοσης σε χρονοθυρίδες, με κάθε θυρίδα να ανατίθεται σε κάθε ροή για την εξυπηρέτηση των δεδομένων της. Στο σχήμα 3.4 απεικονίζεται μια γενική αναπαράσταση της τεχνικής ΠΔΧ.



Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση της τεχνικής ΠΔΧ

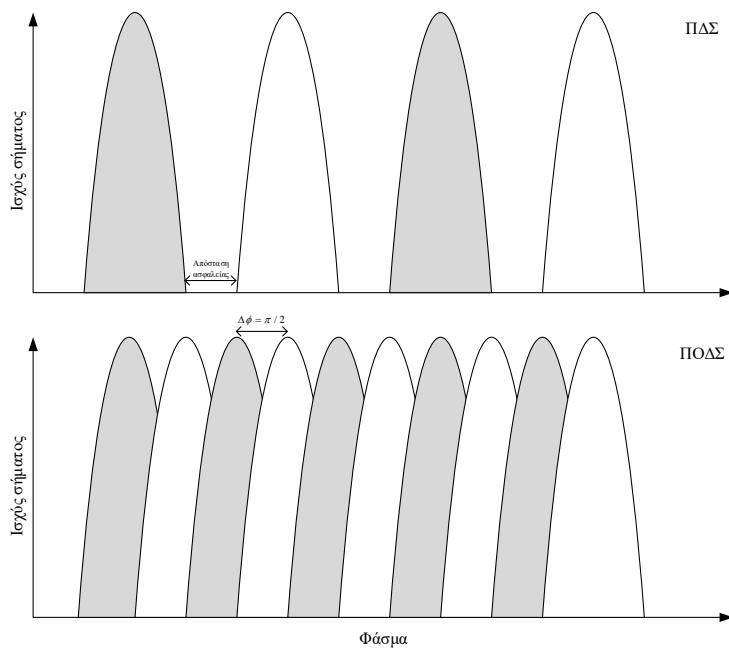
Κάθε αναμεταδότης (AM) του σχήματος 3.4 μεταδίδει μια ξεχωριστή ροή δεδομένων. Το πλαίσιο F_x της ροής x πολυπλέκεται στο κοινό μέσο μετάδοσης, με την έννοια ότι ο αποστολέας του το μεταδίδει σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή με βάση κάποιο χρονοδιάγραμμα που δημιουργεί μια κεντρική δικτυακή οντότητα. Σημαντική παράμετρος στη δημιουργία του χρονοδιαγράμματος είναι η εισαγωγή μιας απόστασης ασφαλείας (guard time) μεταξύ των μεταδόσεων, ώστε να αποφευχθεί ενδεχόμενο σύγκρουσης μεταξύ των δεδομένων που περιέχονται στις χρονοθυρίδες. Από το άλλο άκρο της επικοινωνίας, ο παραλήπτης λαμβάνει τα πλαίσια με τη σειρά που προγραμματίστηκαν.

Η συμβατική τεχνική ΠΔΧ προβλέπει σταθερό μέγεθος για κάθε χρονοθυρίδα, ωστόσο στην πράξη απαιτείται δυναμικός καθορισμός του μεγέθους των χρονοθυρίδων, με βάση τις απαιτήσεις της κάθε ροής. Η βελτιωμένη αυτή τεχνική ονομάζεται Στατιστική Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (ΣΠΔΧ, Statistical Time Division Multiplexing – STDM) [28], αν και στη βιβλιογραφία η ονομασία αυτή ταυτίζεται με τη ΠΔΧ. Στο πλαίσιο του παρόντος συγγράμματος, η αναφορά στην ΠΔΧ παραπέμπει στη ΣΠΔΧ.

Βασική εφαρμογή της τεχνικής ΠΔΧ στα ΠΟΔ είναι ο χρονοπρογραμματισμός των μεταδό-

σεων των ΜΟΔ στο ανοδικό κανάλι επικοινωνίας, ώστε πολλές ΜΟΔ να έχουν πρόσβαση στο κοινό μέσο μετάδοσης. Η τεχνική ΠΔΧ που εφαρμόζεται με σκοπό την πολλαπλή πρόσβαση χρηστών αποκαλείται Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου (ΠΠΔΧ, Time Division Multiple Access – TDMA). Η ΠΔΧ δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, σε αντίθεση με τις τεχνικές ΠΔΜΚ, ωστόσο απαιτείται ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού, ο οποίος να κατασκευάζει με δυναμικό τρόπο τα χρονοδιαγράμματα των χρονοθυρίδων, ώστε να μεγιστοποιείται η αξιοποίηση των πόρων του δικτύου και η ικανοποίηση των τελικών χρηστών. Ένας τέτοιος αλγόριθμος αποτελεί τμήμα μιας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (ΕΠΜ) που διαθέτει κάθε τεχνολογία ΠΟΔ.

3.2.3 Πολυπλεξία Ορθογωνιακής Διαίρεσης Συχνότητας και Διαίρεσης Κώδικα



Σχήμα 3.5: Αναπαράσταση της τεχνικής ΠΟΔΣ

Αν και η απλότητα και η αποτελεσματικότητα των τεχνικών ΠΔΧ και ΠΔΜΚ τις έχουν καταστήσει κυρίαρχες για την κατασκευή ΠΟΔ, έχουν υπάρξει ερευνητικές προσπάθειες για υλοποίηση εναλλακτικών τεχνικών πολυπλεξίας στα ΠΟΔ. Ως τεχνολογία με πολλές προοπτικές αναδεικνύεται η Πολυπλεξία Ορθογωνιακής Διαίρεσης Συχνότητας (ΠΟΔΣ, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – OFDM), κύριο πλεονέκτημα της οποίας είναι η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος. Πιο συγκεκριμένα, η ΠΟΔΣ επιτρέπει την ταυτόχρονη

μετάδοση πολλών σημάτων σε διαφορετικές υποφέρουσες ή κανάλια, όπως η ΠΔΣ, με την κύρια διαφορά ότι οι υποφέρουσες τοποθετούνται σε πολύ παραπλήσιες συχνότητες, χωρίς ωστόσο να παρεμβάλλουν μεταξύ τους, αφού είναι ορθογώνιες [37]. Στο σχήμα 3.5 απεικονίζεται μια γενική αναπαράσταση της τεχνικής, σε σύγκριση με την ΠΔΣ.

Άλλη τεχνική πολυπλεξίας με πλήθος εφαρμογών, κυρίως, στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η ΠΔΚ. Η τεχνική μπορεί να συνδυαστεί με την ΠΟΔΣ [51], [52] και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών ροών δεδομένων στο ίδιο κανάλι, χρησιμοποιώντας διαφορετική κωδικοποίηση για την κάθε μια. Για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των χρηστών χρησιμοποιείται η μέθοδος εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum), δηλαδή η ενέργεια του σήματος μοιράζεται σε μεγαλύτερο φασματικό εύρος από αυτό που πραγματικά καταλαμβάνει [45].

Οι εφαρμογές των δυο τεχνικών έχουν επιτύχει αύξηση της διεκπεραιωτικής ικανότητας, υποστήριξη αποστάσεις άνω των 60 χιλιομέτρων [51], χαμηλότερο Λόγο Δυφιακών Σφαλμάτων (ΛΔΣ, Bit Error Rate – BER) και σηματοθορυβικό λόγο [52], ωστόσο οι τεχνικές ΠΟΔΣ και ΠΔΚ προσθέτουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό ολοκληρωμένων συστημάτων ΠΟΔ, αν και η εφαρμογή τους εξετάζεται για μελλοντικά πρότυπα ΠΟΔ, όπως το 25G-EPOON.

3.3 Πρότυπα της ITU-T για ΠΟΔ

Ο συνδυασμός των τεχνικών πολυπλεξίας με ένα σύνολο από διάφορες τεχνολογίες και πρωτόκολλα επικοινωνιών και δεδομένων, με σκοπό την κατασκευή ενός λειτουργικού ΠΟΔ, μπορεί να οριστεί και να συγκεκριμενοποιηθεί μέσω ενός προτύπου (standard), ένα τεχνικό έγγραφο το οποίο καθορίζει το πως πρέπει να λειτουργεί ένα πρωτόκολλο.

Ένας από τους οργανισμούς που εκδίδουν τέτοια πρότυπα είναι η ITU-T, υπηρεσία η οποία υπάγεται στον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά όλα τα πρότυπα που έχει δημοσιοποιήσει η συγκεκριμένη υπηρεσία, τα οποία έχουν εισηγηθεί από την ένωση FSAN, η οποία απαρτίζεται από παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, προμηθευτές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και ανεξάρτητα εργαστήρια ανά την υφήλιο, με κοινό στόχο την υλοποίηση και διάδοση των ΟΔΠ³.

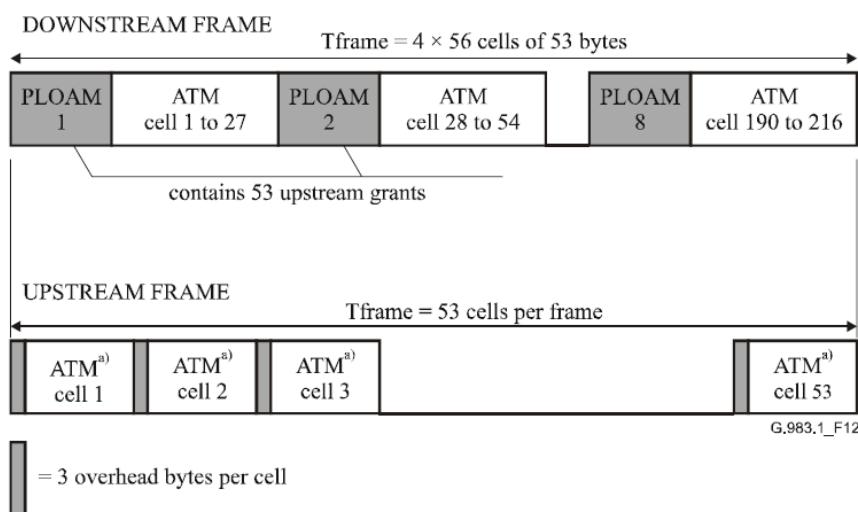
³Πηγή: <https://www.fsan.org>

3.3.1 A-PON/B-PON

Το πρώτο ΠΟΔ που τυποποιήθηκε από την ITU είναι το Broadband PON (B-PON) και περιγράφεται από τη σειρά εγγράφων G.983.x, τα πρώτα εκ των οποίων δημοσιεύτηκαν το 1998. Το πρότυπο βασίστηκε σε μια προσπάθεια της FSAN για την κατασκευή του ATM PON (A-PON), του πρώτου προτύπου για ΠΟΔ, το οποίο βασίζεται στην ενθυλάκωση πλαισίων Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς (ATM) [53].

Η αρχιτεκτονική B-PON χαρακτηρίζεται από υποστηριζόμενες ταχύτητες μετάδοσης των 155 Mbit/s και για τις δυο κατευθύνσεις ή 155 Mbit/s για την άνοδο και 622 Mbit/s για την κάθοδο. Ακόμη, είναι δυνατή η υποστήριξη μέχρι και 64 ΜΟΔ, οι οποίες χρησιμοποιούν το ζεύγος 1310/1510 nm για τα κανάλια ανόδου και καθόδου [53].

Η πρόσβαση των ΜΟΔ στο δίκτυο επιτυγχάνεται, από πλευράς του ΤΟΓ, με την ευρυεκπομπή μιας συνεχούς ροής σήματος η οποία αποτελείται από χρονικώς πολυπλεγμένα κύτταρα ATM (ATM cells) των 53 byte, τα οποία συνοδεύονται από πεδία ελέγχου και διαχείρισης (PLOAM cells). Οι ΜΟΔ αποστέλλουν τα πλαίσια τους σε μορφή ριπών χρησιμοποιώντας χρονοθυρίδες των 56 byte, οι οποίες ανατίθενται στους χρήστες από το ΤΟΓ [53], [54]. Η μορφή των κυττάρων ATM φαίνεται στο σχήμα 3.6.



^{a)} Any ATM cell slot can contain an upstream PLOAM or divided slot rate controlled by the OLT.

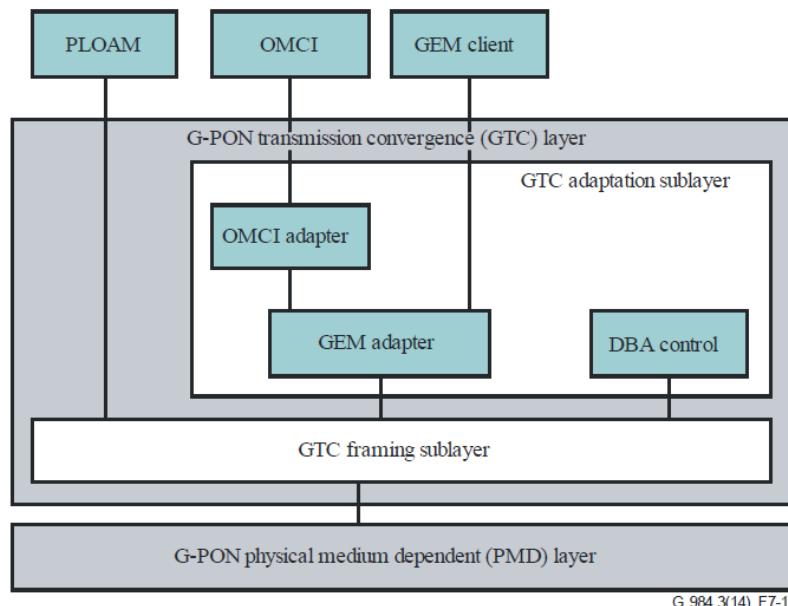
NOTE – ATM cells are transmitted in the order of ascending cell numbers.

Σχήμα 3.6: Η μορφή των πλαισίων στο B-PON [53]

3.3.2 G-PON

Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών τη δεκαετία του 2000 και η δραματική αύξηση των απαιτήσεων σε τηλεπικοινωνιακή κίνηση οδήγησε στην ανάγκη για υιοθέτηση εναλλακτικής μεθόδου ενθυλάκωσης από την ATM που χρησιμοποιούσαν τα B-PON. Το 2004 δημοσιεύτηκε η σειρά εγγράφων G.984.x, η οποία περιγράφει την αρχιτεκτονική Gigabit PON (G-PON) με ονομαστικές ταχύτητες είτε των 2.5 Gbit/s αμφίδρομα είτε 1.25 Gbit/s στην άνοδο και 2.5 Gbit/s στην κάθοδο. Από το πρότυπο προβλέπεται η χρήση του ζεύγους μήκους κύματος 1490/1310 nm για το ανοδικό και το καθοδικό κανάλι [55].

Λόγω της ευρείας χρήσης υπηρεσιών triple play (δεδομένα, φωνή και βίντεο), οι οποίες έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε καθυστέρηση και εύρος ζώνης, και λόγω της δραματικής αύξησης σε ζήτηση εύρους ζώνης, αποφασίστηκε η εγκατάλειψη του ATM ως κύρια μέθοδος ενθυλάκωσης στο G-PON και η σχεδίαση μιας νέας μεθόδου ενθυλάκωσης, της Gigabit Encapsulation Method (GEM). Η μέθοδος διαμόρφωσε τη στοίβα πρωτοκόλλων Gigabit Transmission Convergence (GTC), η οποία αποτελείται από το υπόστρωμα πλαισίωσης, το υπόστρωμα προσαρμογής και όλους εκείνους τους μηχανισμούς (PLOAM, OMCI) που είναι υπεύθυνοι για την ανταλλαγή πληροφοριών λειτουργίας και διαχείρισης του δικτύου. Η διαστρωμάτωση του GTC απεικονίζεται στο σχήμα 3.7 [56].



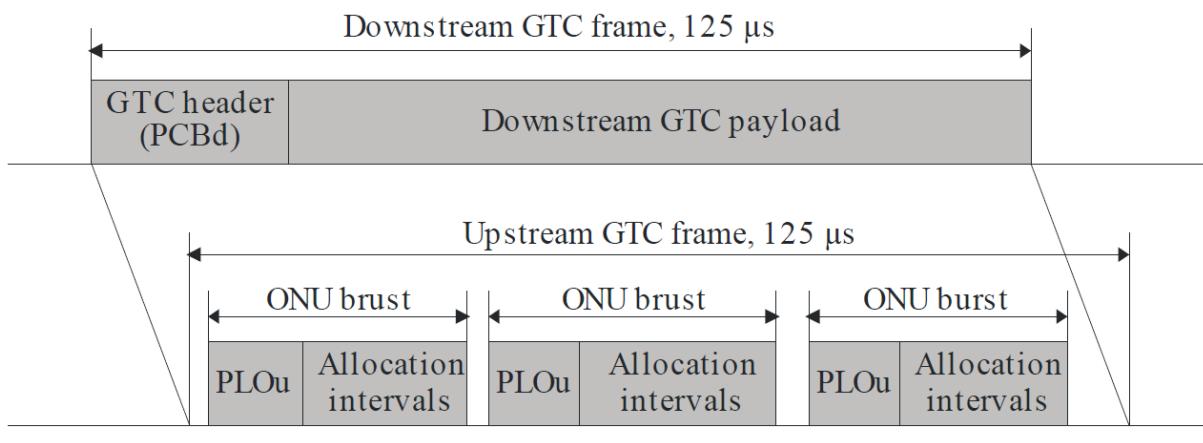
Σχήμα 3.7: Η στοίβα πρωτοκόλλων GTC [56]

Η πλαισίωση GEM παρέχει προσαρμοσμένα πεδία στις επικεφαλίδες, τα οποία επιτρέπουν την υποστήριξη πλήθους νέων λειτουργιών, όπως η πολυπλεξία ροών δεδομένων και καναλιών

ελέγχου, η παροχή ΠτΥ και η κρυπτογράφηση των δεδομένων που ευρυεκπέμπονται στην κάθοδο. Ακόμη, η τεχνική προσφέρει τη δυνατότητα ενθυλάκωσης πλαισίων από διαφορετικά πρωτόκολλα, όπως MPLS (MultiProtocol Label Switching) και ethernet [56].

Από τις σημαντικότερες λειτουργίες των δικτύων G-PON, με έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, είναι αυτή της ΔΚΕΖ. Δεδομένου ότι η πρόσβαση των ΜΟΔ στο κανάλι ανόδου πολυπλέκεται χρονικά, ο μηχανισμός ΔΚΕΖ οφείλει να κατανέμει ευκαιρίες μετάδοσης στις ΜΟΔ με τον βέλτιστο τρόπο, βάσει της δραστηριότητάς τους ή και των ΣΕΥ που έχουν υπογραφεί, ώστε οι χρήστες να λαμβάνουν τη μέγιστη ποιότητα υπηρεσιών και να διατηρείται η απόδοση του δικτύου σε υψηλό επίπεδο [57].

Η πρόσβαση των ΜΟΔ στο δίκτυο επιτυγχάνεται με παρόμοιο τρόπο με το B-PON. Συγκεκριμένα, στο κανάλι καθόδου το ΤΟΓ ευρυεκπέμπει σήμα συνεχούς ροής, το οποίο χωρίζεται σε πλαίσια καθόδου GTC διάρκειας 125 μsec. Το κάθε πλαίσιο καθόδου αποτελείται από κεφαλίδα η οποία, μεταξύ διάφορων πληροφοριών ελέγχου, περιέχει ευκαιρίες πρόσβασης στις ΜΟΔ, δηλαδή πληροφορίες για το πότε και πόσα δεδομένα μπορεί να στείλει η κάθε ΜΟΔ, μέσα σε ένα χρονικό περιθώριο 125 μsec που διαρκεί το πλαίσιο ανόδου. Στο ανοδικό κανάλι, η κάθε ΜΟΔ αποστέλλει τα δεδομένα της σε μορφή ριπών, με βάση τις οδηγίες που περιέχονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου πλαισίου καθόδου GTC. Το σύνολο των μεταδιδόμενων ριπών διαμορφώνει το πλαίσιο ανόδου GTC [58]. Η μορφή των προαναφερθέντων πλαισίων και ριπών GTC απεικονίζεται στο σχήμα 3.8.



G.984.3(14)_F8-1

Σχήμα 3.8: Τα πλαίσια καθόδου και ανόδου GTC [56]

3.3.3 XG-PON

Η ανάγκη για δίκτυα μεγαλύτερης χωρητικότητας που μπορούν να παρέχουν υψηλότερης ποιότητας υπηρεσίες οδήγησαν το 2010 στην τυποποίηση του neXt Generation PON (XG-PON), το οποίο αποτελείται από τα έγγραφα G.987.x και διαθέτει αθροιστική χωρητικότητα 10 Gbit/s στην κάθοδο και 2.5 Gbit/s στην άνοδο, χρησιμοποιώντας το ζεύγος καναλιών 1577/1270 nm [59].

Το XG-PON διαθέτει πλήρη συμβατότητα με το G-PON, κληρονομώντας τις αρχές του επιπέδου GTC, το οποίο μετονομάζεται σε XGTC, και όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά ενός ευελικτού δικτύου νέας γενιάς, όπως μηχανισμοί ΔΚΕΖ, ΠτΥ και η διαχείριση κίνησης. Το πρότυπο βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του G-PON, αφού διαθέτει αναβαθμισμένους μηχανισμούς ασφαλείας και διαχείρισης ενέργειας, καθώς και επιλογές που επιτρέπουν το οπτικό δίκτυο να αποτελέσει τον κορμό ενός υβριδικού ασύρματου/οπτικού δικτύου (Fiber-Wireless, FiWi) [60].

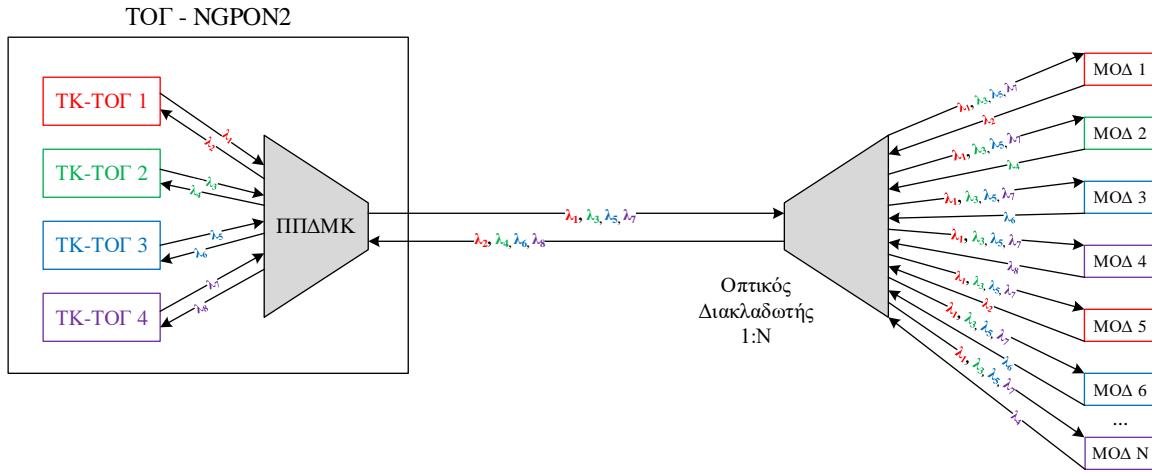
Σε μια προσπάθεια μείωσης των ΛΕΙΔΑ, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε ζητήματα ενεργειακής απόδοσης των ΜΟΔ, με ενσωμάτωση λειτουργιών «ευφυούς» αδράνειας σε χρονικές περιόδους που δεν παρατηρείται μετάδοση δεδομένων. Το ζήτημα ενεργειακής απόδοσης στα δίκτυα νέας γενιάς είναι από τα κριτιμότερα ζητήματα που απασχολούν την ερευνητική κοινότητα με πλήθος σχετικών δημοσιεύσεων [60]–[62].

Πάνω στο πρότυπο XG-PON βασίζεται το προτεινόμενο σχήμα ΔΚΕΖ, γι' αυτό στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή του προτύπου.

3.3.4 NG-PON2

Η ITU-T, ακολουθώντας την αρχή για έκδοση προτύπων με συμβατότητα προς τα πίσω, εκδίδει το 2015 τη σειρά εγγράφων G.989.x που καθορίζει το πρότυπο New Generation PON 2 (NG-PON2), το οποίο υποστηρίζει αθροιστική χωρητικότητα 40 Gbit/s στο κανάλι καθόδου και 10 Gbit/s στην άνοδο [50].

Η αύξηση της χωρητικότητας στο NG-PON2 επιτυγχάνεται με χρήση της Πολυπλεξίας Διαιρεσης Χρόνου και Μήκους Κύματος (ΠΔΧΜΚ, Time and Wavelength Division Multiplexing – TWDM), σύμφωνα την οποία η πολυπλεξία διαιρεσης κύματος και χρόνου συμβαίνουν ταυτόχρονα για τις μεταδιδόμενες ροές δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9, το ΤΟΓ ενός NG-PON2 δικτύου διαθέτει τέσσερις Τερματισμούς Καναλιών (TK-ΤΟΓ, OLT Channel Terminations – OLT CTs), κάθε ένας εξ αυτών είναι συντονισμένος σε συγκεκριμένο



Σχήμα 3.9: Η αρχιτεκτονική του NG-PON2

κανάλι για να επικοινωνήσει με τις ΜΟΔ. Οι δέκτες και μεταδότες των ΜΟΔ είναι συντονισμένοι σε συγκεκριμένο κανάλι επικοινωνώντας με αποκλειστικά ένα TK-ΤΟΓ σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ωστόσο, χαρακτηρίζονται «αχρωμάτιστες» (colorless), κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να αλλάζουν μεταξύ των καναλιών ΠΔΧΜΚ [63]–[65].

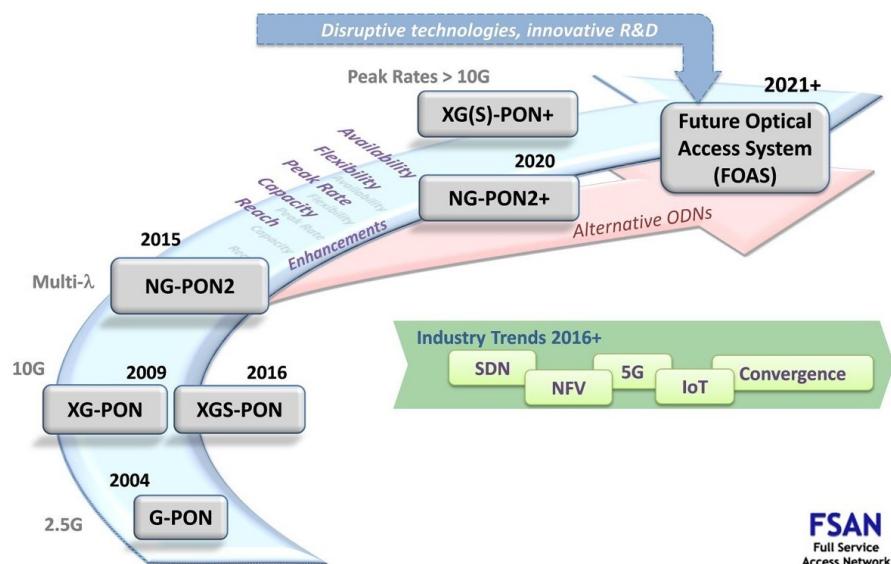
Η ανάθεση καναλιών ΠΔΧΜΚ στις ΜΟΔ γίνεται μέσω του καναλιού ελέγχου PLOAM και η απόφαση ανάθεσης είναι στην κρίση του ΤΟΓ [63]. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη ανάπτυξης μηχανισμών οι οποίοι αναθέτουν με αποδοτικό τρόπο μήκη κύματος στις ΜΟΔ, ώστε οι χρήστες να απολαμβάνουν τη βέλτιστη ΠτΥ. Με δεδομένο ότι σε κάθε ΠΔΧΜΚ κανάλι υπάρχει το πρόβλημα ΔΚΕΖ, στα δίκτυα ΠΔΧΜΚ ανακύπτει το πρόβλημα Δυναμικής Ανάθεσης Μήκους Κύματος και Εύρους Ζώνης (ΔΑΜΚΕΖ, Dynamic Wavelength Bandwidth Allocation – DWBA), το οποίο παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια [66].

3.3.5 XGS-PON και μελλοντικά σχέδια

Λόγω της αλματώδους τεχνολογικής εξέλιξης και της συχνής έκδοσης νέων προτύπων, η επιλογή συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής ΠΟΔ από μια εταιρεία τηλεπικοινωνιών μπορεί να την οδηγήσει σε «τεχνολογικό εγκλωβισμό» και μείωση της ανταγωνιστικότητάς της, λόγω απαίτησης για συχνές αναβαθμίσεις στα νέα πρότυπα, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλές ΚΕΔΑ. Η ανάγκη για υιοθέτηση μιας ενιαίας πλατφόρμας, η οποία μπορεί να δέχεται μεμονωμένες αναβαθμίσεις στα νέα πρότυπα με το ελάχιστο δυνατό κόστος, οδήγησε το 2016 στη δημοσίευση του προτύπου neXt Generation Symmetrical PON (XGS-PON), το οποίο προσδιορίζεται από το έγγραφο G.9807.1 και προσφέρει συμμετρικές ταχύτητες των 10 Gbit/s [67], [68].

Βασικό χαρακτηριστικό του XGS-PON είναι το αναβαθμισμένο φυσικό του επίπεδο, το οποίο ακολουθεί τα πιο σύγχρονα πρότυπα, NG-PON2 και 10G-EPON, κάτι το οποίο σημαίνει ότι υποστηρίζει τη χρήση μεταδοτών και ληπτών που προέρχονται και από τις δυο «οικογένειες» ΠΟΔ. Ακόμη, το στρώμα Σύγκλισης Μετάδοσης (Transmission Converge – TC) του XGS-PON βασίζεται και παρέχει πλήρη συμβατότητα με το NG-PON2 και το XG-PON. Το XGS-PON θεωρείται απλοποιημένη έκδοση του NG-PON2 και προορίζεται να αντικαταστήσει το XG-PON, λόγω του ότι προσφέρει συμμετρική ταχύτητα με μειωμένο κόστος και διαθέτει ευρεία συμβατότητα με ήδη υπάρχοντα πρότυπα, ανοίγοντας τον δρόμο για την υλοποίηση ενιαίας πλατφόρμας NG-PON που μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές τεχνολογίες τύπου G-PON [67], [68].

FSAN Standards Roadmap 2.0



Σχήμα 3.10: Το χρονοδιάγραμμα της εξέλιξης των ΠΟΔ από την FSAN⁴

Τέλος, στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται το χρονοδιάγραμμα που έχει ορίσει η FSAN για την εξέλιξη των προτύπων που εισηγείται και εκδίδει η ITU-T. Σύμφωνα με το σχήμα, την έκδοση των XGS-PON και NG-PON2 αναμένεται να ακολουθήσουν πρότυπα που θα υποστηρίζουν ταχύτητες άνω των 10 Gbit/s, η έκδοση των οποίων εκτιμάται στις αρχές του 2020. Οι βελτιώσεις των νέων προτύπων προσανατολίζονται στη διαθεσιμότητα του δικτύου υπό συνθήκες αυξημένης κίνησης, στην ευελιξία σε τεχνολογικές αναβαθμίσεις, στην αύξηση της χωρητικότητας και στην επέκταση της γεωγραφικής κάλυψης των ΟΔΔ.

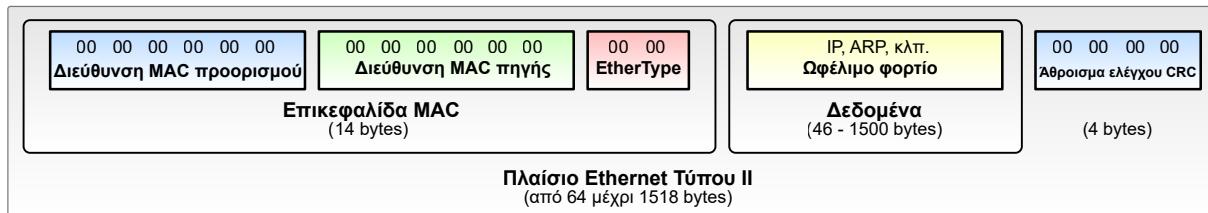
⁴Πηγή: <https://www.fsan.org>

3.4 Πρότυπα της IEEE για PON

Το Ινστιντούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) είναι ο δεύτερος οργανισμός παγκόσμιας εμβέλειας, ο οποίος έχει αναλάβει την τυποποίηση προτύπων ΠΟΔ, τα οποία εισηγείται η EFMA (EFM Alliance). Κύριο χαρακτηριστικό των δικτύων EFM που προωθεί ο οργανισμός είναι η εφαρμογή της γνωστής πλαισίωσης ethernet, η οποία έχει ήδη καθιερωθεί στα τοπικά δίκτυα, είναι ευρέως διαδεδομένη και θεωρείται πολύ αποδοτική και ευέλικτη, με μειωμένη επιβάρυνση επικεφαλίδων.

3.4.1 EPON

Το EPON δημοσιεύτηκε το 2004, περιγράφεται από το έγγραφο IEEE 802.3ah και αποτελεί το πρώτο ολοκληρωμένο πρότυπο της IEEE για ΠΟΔ και τη βασική υλοποίηση EFM για αυτά τα δίκτυα. Η αρχιτεκτονική του ακολουθεί αυτή του εγγράφου ITU-T G.982 και υποστηρίζει μέγιστο λόγο διακλάδωσης 1:128. Ακόμη, το EPON λειτουργεί σε συμμετρικές ταχύτητες 1 Gbit/s, χρησιμοποιώντας το ζεύγος καναλιών 1490/1310 nm για την κάθοδο και την άνοδο αντίστοιχα [69].



Σχήμα 3.11: Η δομή των πλαισίου ethernet⁵

Τα πλαίσια που μεταδίδονται στο EPON ακολουθούν τη γνωστή μορφή των πλαισίων ethernet που φαίνεται στο σχήμα 3.11. Η πρόσβαση των ΜΟΔ στο μέσο πραγματοποιείται μέσω του Πολυσημειακού Πρωτοκόλλου Ελέγχου (Multi-Point Control Protocol – MPCP), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη ΔΚΕΖ, τη συγκέντρωση πόρων (bandwidth pooling), την αυτόματη ανακάλυψη νέων χρηστών (auto-discovery) και τον χρονισμό αποστολών και λήψεων. Το πρωτόκολλο ανήκει στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων και εισάγει τα εξής πλαίσια ελέγχου [70]:

- GATE και REPORT για την ανάθεση και αναφορά απαίτησης εύρους ζώνης.
- REGISTER για τη διαδικασία της εγγραφής μιας ΜΟΔ στο δίκτυο.

⁵Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet_frame

Μέσω του καναλιού καθόδου, το ΤΟΓ ενρυεκπέμπει πλαίσια ethernet, με την κάθε ΜΟΔ να τα φιλτράρει με βάση τη διεύθυνση MAC προορισμού. Ευκαιρίες πρόσβασης για το κανάλι ανόδου παρέχεται στις ΜΟΔ με ασύγχρονο τρόπο, μέσω των μηνυμάτων GATE, τα οποία δίνουν οδηγίες σε μια ΜΟΔ για το πότε και πόσα δεδομένα μπορεί να μεταδώσει. Οι ΜΟΔ μπορούν να ζητήσουν ευκαιρίες πρόσβασης για μετάδοση δεδομένων στο κανάλι ανόδου μέσω πλαισίων τύπου REPORT, τα οποία περιέχουν πληροφορίες για τα δεδομένα που εκκρεμούν για μετάδοση στις ουρές των ΜΟΔ [71].

3.4.2 10G-EPON

Η έλευση του Gigabit Ethernet ήδη από το 2002 και η ταυτόχρονη αύξηση στις απαιτήσεις εύρους ζώνης οδήγησε την IEEE στην τυποποίηση του 10-Gigabit Ethernet PON (10G-EPON), με το έγγραφο 802.3av που δημοσιεύτηκε το 2009. Το πρότυπο υποστηρίζει δυο ρυθμίσεις, τη συμμετρική με ταχύτητες της τάξεως των 10 Gbit/s και στις δυο κατευθύνσεις και την ασύμμετρη με 10 Gbit/s στην κάθοδο και 1 Gbit/s στην άνοδο [72].

Η αρχιτεκτονική του 10G-EPON για την πρόσβαση των ΜΟΔ στο μέσο παραμένει ίδια με αυτή του EPON, με τις περισσότερες βελτιώσεις να παρατηρούνται στο φυσικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, προστέθηκε πιο αξιόπιστος κώδικας Εμπροσθόδοτης Διόρθωσης Λαθών (ΕΔΣ), απαραίτητος λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων, καθώς και ο κώδικας γραμμής 64B/66B, ο οποίος τυποποιήθηκε το 2002 και οδήγησε στη δημιουργία των ζεύξεων 10 Gigabit Ethernet [73].

Λόγω της ανάγκης για διαρκή υποστήριξη οικονομικών αναβαθμίσεων στις εταιρείες που υιοθετούν τα πρότυπα τύπου EPON, η IEEE έδωσε ιδιαίτερη έμφαση στην προς τα πίσω συμβατότητα του 10G-EPON με το EPON, η οποία βασίζεται στην ταυτόχρονη λειτουργία ΜΟΔ με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης. Συγκεκριμένα, για την κάθοδο είναι δυνατή η πολυπλεξία τριών καναλιών, το κανάλι για RF βίντεο (1550-1560nm), το κανάλι για 1 Gbit/s (1480-1500nm) και αυτό για την υποστήριξη 10 Gbit/s (1575-1580nm). Στην άνοδο, το ΤΟΓ δύναται να λειτουργήσει σε κατάσταση διπλού ρυθμού (dual-rate), με υποστήριξη λήψης σε ρυθμούς 1 Gbit/s στο εύρος 1260-1360 nm και 10 Gbit/s στην μπάντα 1260-1280 nm [72].

3.4.3 25/50/100G-EPON και μελλοντικά σχέδια

Το 2015 εγκρίθηκε από την IEEE η εκκίνηση των εργασιών για την ανάπτυξη του προτύπου P802.3ca, το οποίο πρόκειται να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης 25, 50 και 100 Gbit/s ανά κανάλι. Λόγω της υψηλής συχνότητας με την οποία εκδίδονται νέα πρότυπα, ένα για κάθε γενιά

ΠΟΔ, με την εκκίνηση των εργασιών για το IEEE P802.3ca αποφασίσθηκε η ανάπτυξη ενός προτύπου για την κάλυψη πολλαπλών γενιών ταυτόχρονα. Η έκδοση της πρώτης έκδοσης του προτύπου αναμένεται στο πρώτο τετράμηνο του 2019 [74].

Όπως και στην περίπτωση των 10G-EPON, το υπό διαμόρφωση πρότυπο κληρονομεί την αρχιτεκτονική των υψηλότερων στρωμάτων του EPON, εστιάζοντας σε βελτιώσεις που αφορούν το φυσικό επίπεδο. Ενδεικτικά, οι αλλαγές αυτές σχετίζονται με την εισαγωγή πιο προχωρημένων τεχνικών κώδικα γραμμής από τη Non-Return-to-Zero (NRZ), την αυξημένη χρήση ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, την υιοθέτηση τεχνικών διαμόρφωσης υποφέροντος, όπως η διακριτή πολυτονική (ΔΠΤ), καθώς και η εξέταση προχωρημένων τεχνικών πολυπλεξίας, όπως η ΠΟΔΣ [74], [75]. Ακόμη, η αύξηση των υποστηριζόμενων ρυθμών μετάδοσης απαιτεί την ισχυροποίηση του κώδικα ΕΔΣ, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της επιβάρυνσης των σχετικών κεφαλίδων και, τελικά, σε μείωση της αποδοτικότητας του δικτύου, αφού παραχωρείται περισσότερο εύρος ζώνης σε κεφαλίδες παρά σε ωφέλιμη πληροφορία.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επιλογή των μηκών κύματος που θα χρησιμοποιήσει το νέο πρότυπο, ώστε ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθούν οι ΚΕΔΑ, να καταστεί δυνατή η υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης, ενώ ταυτόχρονα να είναι εφικτή η συνύπαρξη του 25G-EPON με διαφορετικές τεχνολογίες ΠΟΔ, όπως τα (10G)-EPON, NG-PON2 και XGS-PON. Οι εταιρείες και τα εργαστήρια που συμμετέχουν στην ανάπτυξη του προτύπου έχουν καταλήξει στην αξιοποίηση της μπάντας Ο για τα κανάλια των 25 Gbit/s και των C/L για αυτά των 50 και 100 Gbit/s, ωστόσο υπό διερεύνηση είναι ακόμα ο καθορισμός των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν από αυτές τις μπάντες και ο τρόπος συνύπαρξης με τις υπόλοιπες τεχνολογίες [76].

Τέλος, η ανάγκη για υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης και το αυξημένο κόστος των καναλιών 50 Gbit/s και 100 Gbit/s οδήγησε στην εισαγωγή της τεχνολογίας δέσμισης καναλιού (channel bonding) για το πρότυπο P802.3ca. Η τεχνολογία αφορά στον συνδυασμό της χωρητικότητας πολλών καναλιών για την επίτευξη υψηλότερης διεκπεραιωτικότητας στη μετάδοση δεδομένων. Για την περίπτωση του 25G-EPON, θα μπορούσαν να συνδυαστούν μέχρι τέσσερα κανάλια των 25 Gbit/s για την επίτευξη αθροιστικών ταχυτήτων, που μπορούν να φτάσουν τα 100 Gbit/s. Ωστόσο, στα αρνητικά της δέσμισης καναλιού μπορεί να συμπεριληφθεί ο πρόσθετος χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για τον κατάλληλο τεμαχισμό των πλαισίων, ώστε τα τμήματά του να μεταδοθούν ταυτόχρονα σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια, καθώς και η πρόσθετη επιβάρυνση κεφαλίδων που εισάγει η τεχνολογία, η οποία μειώνει την αποδοτικότητα του δικτύου [74].

Just when I thought XG-PON was a dead duck of a technology, it seems the nascent European gigabit broadband market may give it a slender lease of life.

Ray Le Maistre, συντάκτης στο Light Reading

4

Το πρότυπο XG-PON

Το σχήμα ΔΚΕΖ που προτείνει η παρούσα διπλωματική αναπτύχθηκε με βάση την τυποποίηση XG-PON για τα ΠΟΔ, η οποία αποτελεί αναβάθμιση του G-PON για υποστήριξη αθροιστικής διεκπεραιωτικότητας καθόδου 10 Gbit/s και ανόδου στα 2.5 Gbit/s. Το πρότυπο αυτό εισηγήθηκε από την FSAN, εκδόθηκε από την ITU-T υπό την ονομασία G.987 και περιλαμβάνει τα εξής έγγραφα:

- G.987: Ορισμοί, συντομογραφίες και ακρωνύμια για το XG-PON.
- G.987.1: Γενικές απαιτήσεις για τα XG-PON. Περιλαμβάνει παραδείγματα υπηρεσιών, δικτυακές διεπαφές χρήστη (User Network Interfaces - UNIs) και διεπαφές υπηρεσιών κόμβου (Service Node Interfaces - SNIs), όπως και τις βασικές ρυθμίσεις ανάπτυξης του προτύπου που απαιτούνται από την πλευρά των τηλεπικοινωνιακών παρόχων.
- G.987.2: Ορίζει το PMD του XG-PON.
- G.987.3: Επεκτείνει το πρότυπο XG-PON με τον ορισμό του επιπέδου XGTC.

Το δίκτυο XG-PON ορίζεται από δύο επίπεδα, το στρώμα Εξαρτώμενο από Φυσικά Μέσα (Physical media dependent layer – PMD) και το στρώμα Σύγκλισης Μετάδοσης του XG-PON (XG-PON Transmission Convergence layer – XGTC). Το PMD αφορά τόσο τις ρυθμίσεις σε φυσικό επίπεδο που πραγματοποιούνται στους πομπούς και τους δέκτες για την αποστολή και λήψη σημάτων, όσο και τις προδιαγραφές και τις ιδιότητες που πρέπει να έχει το φυσικό μέσο μετάδοσης και οι εξοπλισμοί για τη μετάδοση των οπτικών σημάτων. Ενδεικτικά, στο PMD

ορίζονται οι ανεκτές τιμές εξασθένησης σήματος (attenuation) για το οπτικό δίκτυο, η μέγιστη γεωγραφική έκταση που μπορεί να καταλαμβάνει ένα δίκτυο XG-PON, τα μήκη κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση σημάτων στην κάθοδο και την άνοδο, τον ορισμό του ονομαστικού ρυθμού μετάδοσης (nominal bitrate) και ο κώδικας γραμμής που εφαρμόζεται στα μεταδιδόμενα σήματα.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η δομή του προτύπου XG-PON, δίνοντας έμφαση στο έγγραφο G.987.3 που ορίζει το επίπεδο XGTC, η κατανόηση του οποίου είναι απαραίτητη ώστε ο αναγνώστης να είναι σε θέση στη συνέχεια να κατανοήσει τη δομή του προσομοιωτή XG-PON και το σχήμα ΔΚΕΖ που προτείνει η διπλωματική εργασία.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά το επίπεδο XGTC και τα υποστρώματα που το αποτελούν. Πιο συγκεκριμένα, στις πρώτες ενότητες γίνεται συνοπτική αναφορά στα υποστρώματα του XGTC, στην αρχιτεκτονική πολυπλεξίας πλαισίων που εφαρμόζεται, καθώς και στα κανάλια σηματοδοσίας και ελέγχου του XG-PON. Τέλος, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στη διαδικασία ανάθεσης εύρους ζώνης που εφαρμόζει το ΤΟΓ για τους χρήστες και τη μορφή που διαθέτουν τα πλαίσια στα διάφορα στάδια πλαισίωσης του XGTC.

4.1 Επισκόπηση της διαστρωμάτωσης του XGTC

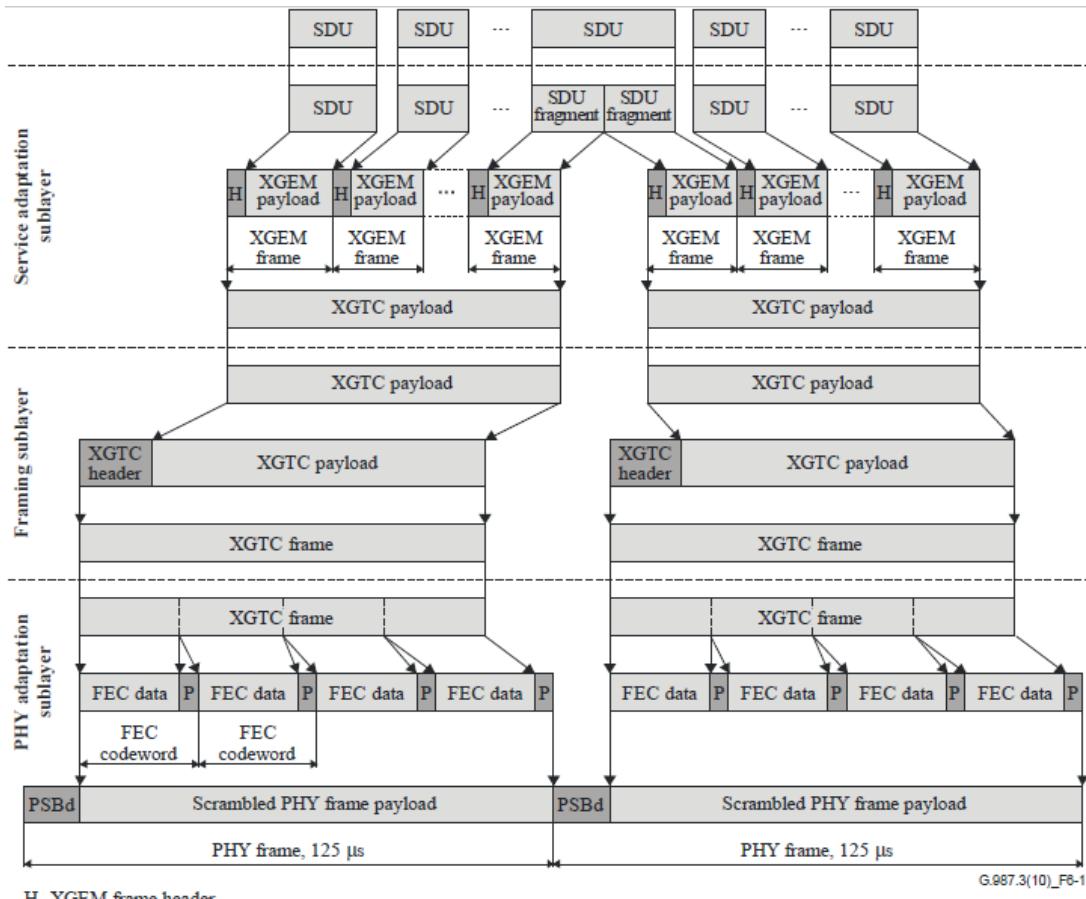
Το στρώμα Σύγκλισης Μετάδοσης του XG-PON (XG-PON Transmission Convergence layer – XGTC) ορίζει όλες εκείνες τις διαδικασίες που απαιτούνται για την αντιστοίχιση των Μονάδων Δεδομένων Υπηρεσίας (ΜΔΥ, Service Data Units – SDUs) σε πλαίσια και, τελικά, σε σήματα που διαμορφώνουν το οπτικό φέρον σήμα και επιτρέπουν τη μετάδοση των ΜΔΥ μέσα στο ΠΟΔ. Το στρώμα XGTC αποτελείται από τα εξής υποστρώματα:

- υπόστρωμα προσαρμογής υπηρεσιών (service adaptation sublayer)
- υπόστρωμα πλαισίωσης (framing sublayer)
- υπόστρωμα προσαρμογής φυσικού επιπέδου (PHY adaptation sublayer)

Βασικό χαρακτηριστικό της ροής καθόδου είναι ότι τα πλαίσια δημιουργούνται με σταθερή διάρκεια τα 125 μs, ενώ στη ροή ανόδου οι ΜΟΔ στέλνουν τα πλαίσια τους σε μορφή ριπών μέσα σε ένα αντίστοιχο πλαίσιο 125 msec ανόδου, ανάλογα με τις ευκαιρίες μετάδοσης που τους προσφέρει το ΤΟΓ.

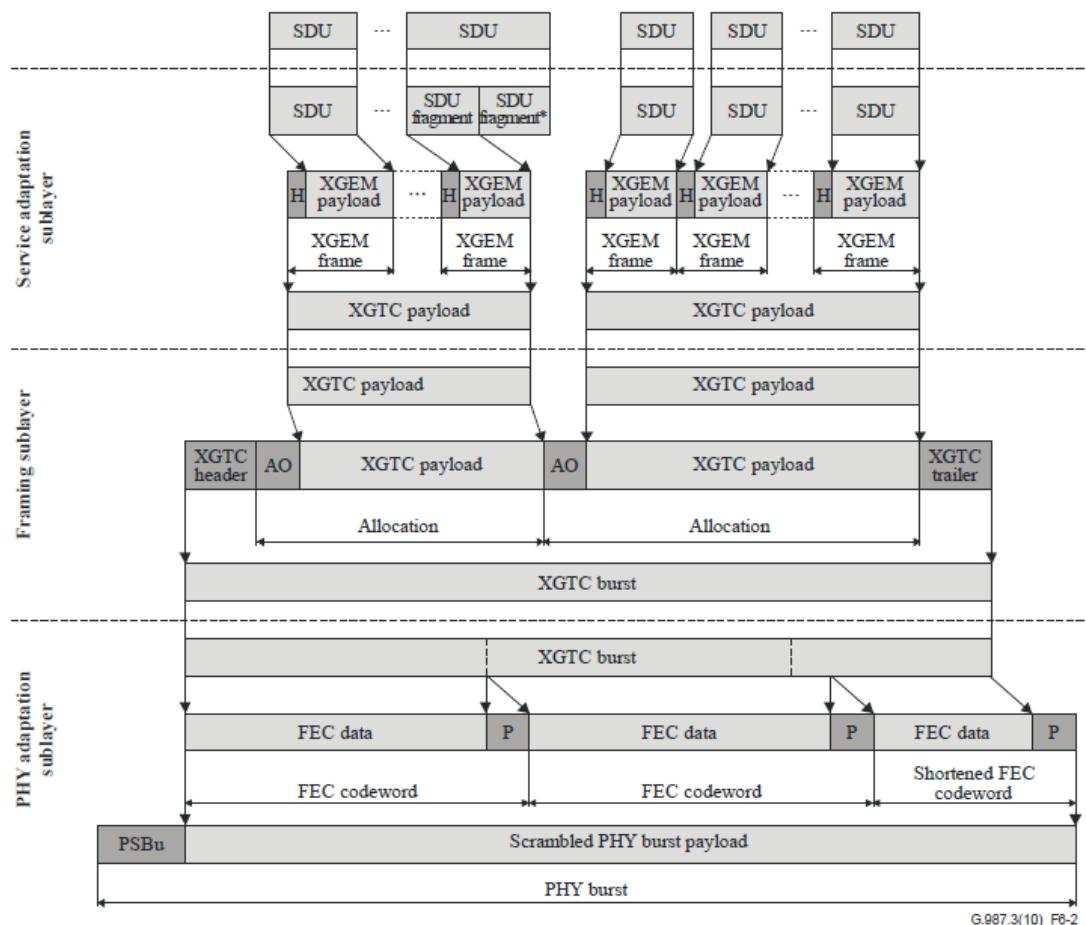
Σχήμα 4.1: Η διάρθρωση των στρώματος XGTC [9]

(a) Η αντιστοίχιση των ΜΔΥ στη ροή καθόδου



G.987.3(10)_F8-1

(b) Η αντιστοίχιση των ΜΔΥ στη ροή ανόδου



G.987.3(10)_F8-2

4.1.1 Υπόστρωμα Προσαρμογής Υπηρεσιών

Το υπόστρωμα προσαρμογής υπηρεσιών (service adaptation sublayer) είναι υπεύθυνο για την ενθυλάκωση των ΜΔΥ σε πλαίσια XGEM και την πολυπλεξία τους σε πλαίσια XGTC.

Από την πλευρά του αποστολέα, το υπόστρωμα XGTC δέχεται τις ΜΔΥ από κάποια υπηρεσία ανώτερου στρώματος, εφαρμόζει τεμαχισμό όπου είναι απαραίτητο και πλαισιώνει κάθε τεμάχιο ή μονάδα σε πλαίσιο XGEM, κάθε ένα εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από το XGEM Port-ID στο οποίο ανήκει. Σε αυτό το σημείο μπορεί να εφαρμοστεί προαιρετικά κρυπτογράφηση. Τα πλαίσια XGEM παραδίδονται στο υπόστρωμα πλαισίωσης για τη διαμόρφωση πλαισίων XGTC στην κάθοδο ή μια ριπή XGTC στην άνοδο.

Από την πλευρά του παραλήπτη, το υπόστρωμα λαμβάνει την ωφέλιμη πληροφορία των πλαισίων ή ριπών XGTC από τα κατώτερα επίπεδα, εφαρμόζει σκιαγράφηση (delineation) στα πλαίσια XGEM με βάση το XGEM Port-ID τους, αποκρυπτογραφεί τα πλαίσια, αν αυτό είναι απαραίτητο, συναρμολογεί τα τεμάχια ΜΔΥ και παραδίδει τις μονάδες δεδομένων στο σύστημα του πελάτη.

4.1.2 Υπόστρωμα Πλαισίωσης

Το υπόστρωμα πλαισίωσης (framing sublayer) είναι υπεύθυνο για την ενθυλάκωση και την ανάλυση των πεδίων επιβάρυνσης των XGTC πλαισίων, τα οποία παρέχουν τις απαραίτητες διαχειριστικές λειτουργίες του PON.

Από την πλευρά του αποστολέα, το υπόστρωμα συνθέτει πλαίσια ή ριπές XGTC διαμορφώνοντας το ωφέλιμο φορτίο τους από πλαίσια XGEM που παραδίδει το υπόστρωμα προσαρμογής υπηρεσιών και την κεφαλίδα XGTC, η οποία παρέχει πεδία για τη λειτουργία των καναλιών ελέγχου PLOAM και OAM. Η διάρκεια των πλαισίων XGTC είναι σταθερή και για τις δυο κατευθύνσεις, στα 125 μsec. Ωστόσο, ενώ στο κανάλι καθόδου το πλαίσιο XGTC αποτελείται από μια συνεχόμενη ροή, ένα ανοδικό πλαίσιο XGTC διάρκειας 125 μsec διαμορφώνεται από συντονισμένη μετάδοση ριπών, προερχόμενες από διαφορετικές ΜΟΔ. Το μέγεθος των ριπών είναι δυναμικό και καθορίζεται, κυρίως, από το πλήθος των XGEM που ενθυλακώνονται στο ωφέλιμο φορτίο της ριπής.

Από την πλευρά του παραλήπτη, το υπόστρωμα παραλαμβάνει τις ριπές ή τα πλαίσια XGTC, αναλύει τις κεφαλίδες αυτών και εξάγει τα μηνύματα ελέγχου, τα οποία διανέμονται κατάλληλα στη μηχανή επεξεργασίας PLOAM (PLOAM processor), στον ελεγκτή ΔΚΕΖ (DBA controller),

στη μηχανή XGEM (XGEM engine), καθώς και σε διάφορους άλλους μηχανισμούς, όπως αυτός για τη διαχείριση ενέργειας και των κλειδιών κρυπτογράφησης.

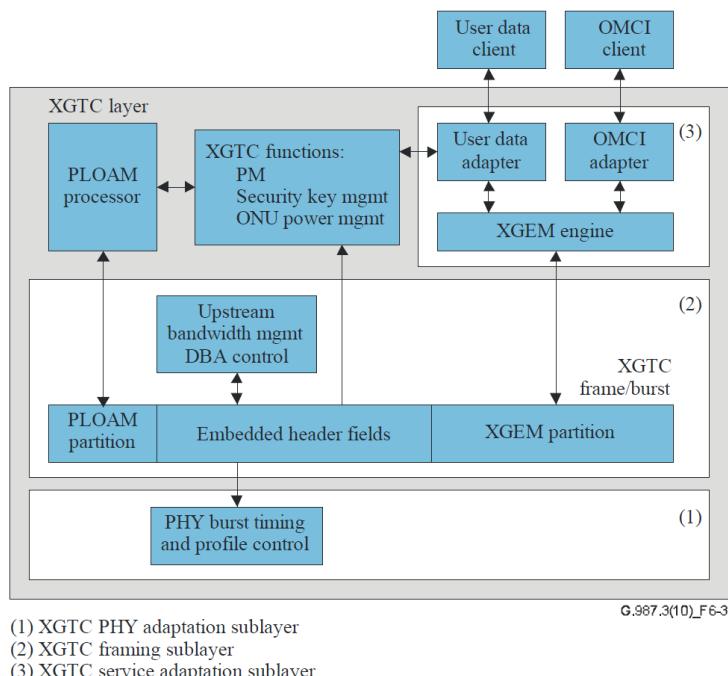
4.1.3 Υπόστρωμα Προσαρμογής Φυσικού Επιπέδου

Το υπόστρωμα προσαρμογής φυσικού επιπέδου (PHY adaptation sublayer) εμπεριέχει όλες εκείνες τις λειτουργίες που επιτρέπουν τη διαμόρφωση των δυφιορρευμάτων (bitstream), με ενσωμάτωση διαδικασιών χρονισμού μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη, καθώς και προαιρετικών λειτουργιών ΕΔΣ. Τα πλαίσια που διαμορφώνει το υπόστρωμα ονομάζονται πλαίσια φυσικού επιπέδου (PHysical Layer – PHY) και είναι αυτά που, τελικά, μεταδίδονται στην οπτική ίνα.

Από την πλευρά του αποστολέα, το υπόστρωμα δέχεται τα πλαίσια ή τις ριπές XGTC από το υποεπίπεδο πλαισίωσης, τα τεμαχίζει σε ομάδες ΕΔΣ, υπολογίζει και προσαρτεί τα byte ισοτιμίας για κάθε ομάδα ΕΔΣ και συνθέτει τα πεδία χρονισμού φυσικού επιπέδου καθόδου/ανόδου (Physical Synchronization Block downstream/upstream – PSBd/PSBu) για την παροχή χρονισμού μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη.

Από την πλευρά του παραλήπτη, το υπόστρωμα πραγματοποιεί συγχρονισμό και διαχωρισμό του εισερχόμενου δυφιορρεύματος, εκτελεί την ΕΔΣ και εξάγει τα πλαίσια ή τις ριπές XGTC.

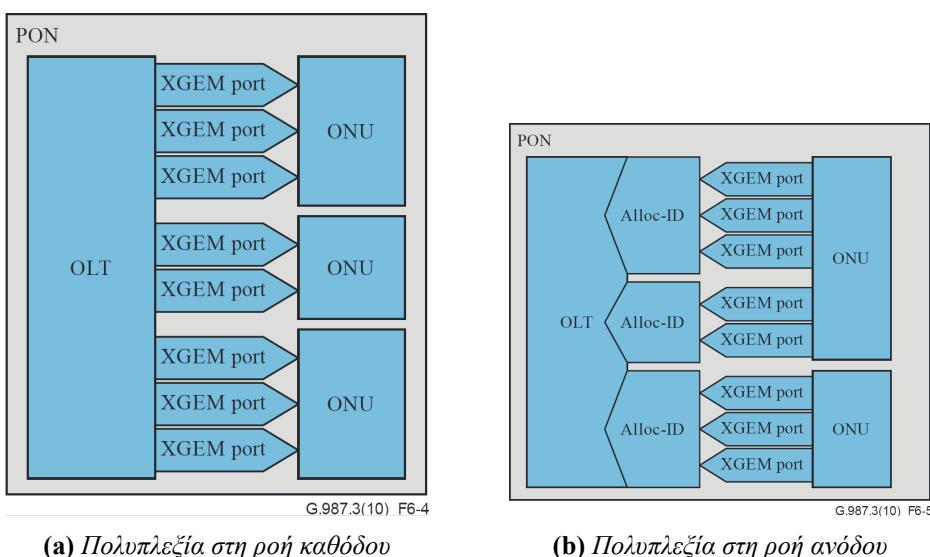
Η σχέση των προαναφερθέντων υποστρωμάτων, καθώς και οι πληροφορίες που ανταλλάσσουν μεταξύ τους συνοψίζονται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Περίγραμμα της ροής πληροφορίας στο στρώμα XGTC [9]

4.2 Αρχιτεκτονική πολυπλεξίας πλαισίων

Η πολλαπλή πρόσβαση των ΜΟΔ στο ΠΟΔ επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων πεδίων στις κεφαλίδες των πλαισίων ή ριπών XGTC. Πιο συγκεκριμένα, στο ρεύμα καθόδου χρησιμοποιούνται τα XGEM Port-ID για να αναγνωριστεί μια ξεχωριστή ροή δεδομένων, ενώ στο ρεύμα ανόδου χρησιμοποιείται συνδυασμός των XGEM Port-ID με τα Alloc-ID, με τα δεύτερα να αναγνωρίζουν μια ξεχωριστή οντότητα μιας ΜΟΔ που ζητά εύρος ζώνης στο κανάλι ανόδου. Οι σχέσεις μεταξύ των συγκεκριμένων αναγνωριστικών απεικονίζεται στο σχήμα 4.3.



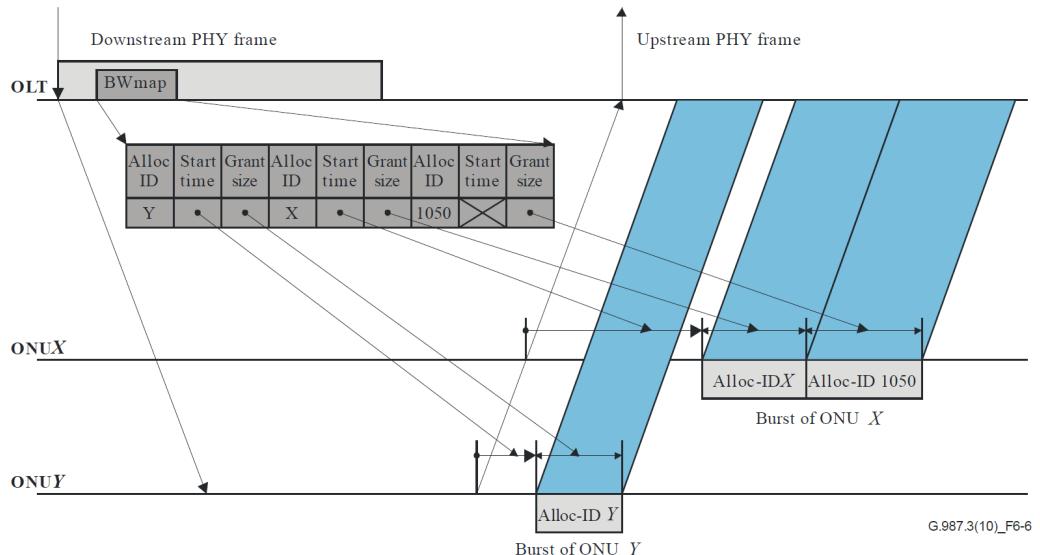
Σχήμα 4.3: Πολυπλεξία πλαισίων XGEM [9]

Αναγνωριστικό ΜΟΔ (ONU Identifier – ONU-ID) Πρόκειται για έναν αριθμό μήκους 10 bit που ανατίθεται σε κάθε ΜΟΔ από τη μονάδα ΤΟΓ κατά το στάδιο αρχικοποίησης (O1), ο οποίος είναι μοναδικός σε όλο το δίκτυο ΠΟΔ.

Αναγνωριστικό Κατανομής (Allocation Identifier – Alloc-ID) Πρόκειται για έναν αριθμό 14 bit, ο οποίος ανατίθεται σε κάθε ΜΟΔ από το ΤΟΓ και αντιπροσωπεύει μια οντότητα μέσα σε μια ΜΟΔ, η οποία ζητά εύρος ζώνης ώστε να μεταδώσει δεδομένα στο ρεύμα ανόδου. Από προεπιλογή, σε κάθε ΜΟΔ ανατίθεται ένα Alloc-ID, το οποίο ταυτίζεται με το ONU-ID και προορίζεται για τη μεταφορά κίνησης του OMCC, καθώς και για πακέτα δεδομένων των χρηστών (ΜΔΥ). Ωστόσο, ένα ΤΟΓ μπορεί να αναθέσει περισσότερα Alloc-ID σε μια ΜΟΔ μέσω του καναλιού PLOAM, με σκοπό ροές προερχόμενες από μια ΜΟΔ να αντιμετωπίζονται διαφορετικά από τον μηχανισμό ανάθεσης πόρων.

Αναγνωριστικό θύρας XGEM (XGEM Port Identifier – XGEM Port-ID) Πρόκειται για έναν αριθμό 16 bit, ο οποίος ανατίθεται από το ΤΟΓ στις ΜΟΔ μέσω του OMCC και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση μιας ξεχωριστής λογικής ροής δεδομένων. Στο ρεύμα καθόδου το αναγνωριστικό χρησιμοποιείται από κάθε ΜΟΔ για να φιλτράρει τα πλαίσια XGEM που το αφορούν, αφού τα πλαίσια καθόδου ευρυεκπέμπονται προς όλες τις ΜΟΔ του δικτύου. Στο ρεύμα ανόδου, το αναγνωριστικό χρησιμοποιείται με σκοπό να συνδυάζονται στο ίδιο Alloc-ID πολλαπλές ροές ανόδου που προέρχονται από την ίδια ΜΟΔ.

Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου (ΕΠΜ, Medium Access Control – MAC) Το ΤΟΓ ελέγχει την πρόσβαση των ΜΟΔ στο κανάλι ανόδου μέσω της αποστολής πλαισίου PHY αυστηρά κάθε 125 μsec. Η επικεφαλίδα του αντίστοιχου πλαισίου XGTC αποτελείται από το πεδίο χάρτη καταχώρισης εύρους ζώνης (bandwidth map – BWmap), το οποίο περιέχει ευκαιρίες πρόσβασης για τα Alloc-ID, δηλαδή το πότε ένα Alloc-ID μπορεί να στείλει δεδομένα από τη στιγμή που λάβει το πλαίσιο και πόσα δεδομένα του επιτρέπεται να στείλει. Η γενική ιδέα του ΕΠΜ απεικονίζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Το σχέδιο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για το XGTC [9]

4.3 Κανάλια σηματοδοσίας και ελέγχου

Η μετάδοση δεδομένων ελέγχου και διαχείρισης από και προς τις ΜΟΔ πραγματοποιείται με τη χρήση τριών καναλιών: το ενσωματωμένο κανάλι OAM, το PLOAM και το OMCC.

4.3.1 Ενσωματωμένο ΟΑΜ και ΟΜCC

Το ενσωματωμένο κανάλι Λειτουργίας, Διοίκησης και Συντήρησης (Operation, Administration and Maintenance – OAM) παρέχεται με τη χρήση πεδίων κεφαλίδας των πλαισίων και ριπών XGTC για τη μετάδοση πληροφοριών, οι οποίες σχετίζονται, μεταξύ άλλων, με τον χρονισμό των ριπών ανόδου, τις λειτουργίες αναφορών για τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (πεδία αναφοράς δυναμικού εύρους ζώνης καθόδου/ανόδου (Dynamic Bandwidth Report downstream/upstream – DBRd/DBRu)) και τη σηματοδοσία για τη ΔΚΕΖ (πεδίο BWmap).

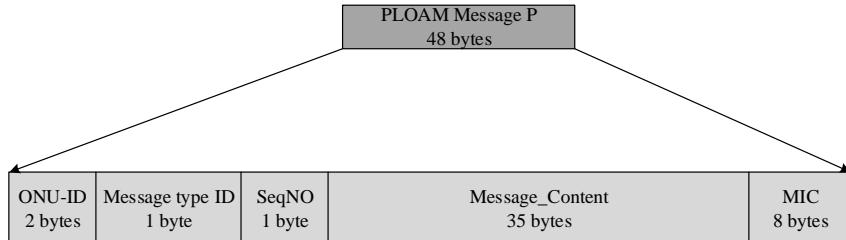
Ακόμη, κάθε ΜΟΔ διαθέτει μια Διεπαφή Διαχείρισης και Ελέγχου της ΜΟΔ (ONU Management and Control Interface – OMCI), η οποία χρησιμοποιεί το αντίστοιχο Κανάλι Διαχείρισης και Ελέγχου της ΜΟΔ (ONU Management and Control Channel – OMCC) για την ανταλλαγή δεδομένων από και προς επίπεδα υπηρεσιών, που είναι ιεραρχικά πιο πάνω από το XGTC. Αν και τα μηνύματα που ανταλλάσσονται στο συγκεκριμένο κανάλι δεν έχουν άμεση σχέση με την τυποποίηση του XG-PON, ωστόσο, το επίπεδο XGTC παρέχει τα κατάλληλα πεδία στις κεφαλίδες για τη μεταφορά μηνυμάτων από και προς τη διεπαφή διαχείρισης και ελέγχου. Ο λεπτομερής ορισμός της διεπαφής γίνεται στο έγγραφο ITU-T G.988 [77].

4.3.2 PLOAM

Το κανάλι Λειτουργίας, Διοίκησης και Συντήρησης Φυσικού Επιπέδου (Physical Layer OAM – PLOAM) διαθέτει αποκλειστικά πεδία στις κεφαλίδες των πλαισίων και ριπών XGTC και χρησιμοποιείται για όλες εκείνες τις πληροφορίες διαχείρισης των επιπέδων PMD και XGTC που δεν περιέχονται στο ΟΑΜ και το ΟΜCC. Βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου καναλιού, που το διακρίνει από τα προαναφερθέντα, είναι ότι το PLOAM παρέχει πιο ευέλικτη λειτουργικότητα και είναι ταχύτερο, αφού διαθέτονται πεδία στις κεφαλίδες XGTC αποκλειστικά για αυτό και κάθε ΜΟΔ και ΤΟΓ διαθέτει ξεχωριστή μονάδα επεξεργασίας των μηνυμάτων PLOAM. Οι λειτουργίες του καναλιού συνοψίζονται στις εξής:

- Ρύθμιση του προφίλ ριπής στις ΜΟΔ
- Ενεργοποίηση των ΜΟΔ
- Εγγραφή των ΜΟΔ στο ΠΟΔ
- Ανταλλαγή κλειδιών κρυπτογράφησης

- Σηματοδοσία
- Διαχείριση ενέργειας



Σχήμα 4.5: Η δομή ενός μηνύματος PLOAM

Τα μηνύματα PLOAM έχουν μήκος 48 bytes και αποτελούνται από τα πεδία που φαίνονται στο σχήμα 4.5. Πιο συγκεκριμένα, το πεδίο ONU-ID διατηρεί το αναγνωριστικό της ΜΟΔ στο οποίο απευθύνεται το μήνυμα PLOAM ή την τιμή 0x3FF, αν το μήνυμα ευρυεκπέμπεται προς όλες τις ΜΟΔ, το πεδίο Message type ID διατηρεί τον κωδικό αριθμό του μηνύματος και το SeqNo περιέχει τον αριθμό ακολουθίας του μηνύματος PLOAM, ο οποίος διατηρείται ξεχωριστά για κάθε ΜΟΔ από το ΤΟΓ και επαναλαμβάνεται από το 1 μέχρι το 225. Τέλος, στο πεδίο Message Content συμπεριλαμβάνεται το περιεχόμενο του μηνύματος, το οποίο ερμηνεύεται με βάση το πεδίο Message type ID, και το πεδίο MIC χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση του αποστολέα για την αποφυγή πλαστογράφησης του μηνύματος από κάποιον τρίτο.

Ενδεικτικά, κάποια είδη μηνύματος που μπορεί να μεταφερθούν μέσω του καναλιού PLOAM είναι η εντολή απενεργοποίηση κάποιας ΜΟΔ, η ανάθεση Alloc-ID σε μια ΜΟΔ ή η εγγραφή μιας ΜΟΔ στο XG-PON. Όλα τα μηνύματα, καθώς και η μορφή του Message Content για κάθε ένα από αυτά περιλαμβάνονται στην ενότητα 11 του εγγράφου ITU-T G.987.3.

4.4 Κατανομή πόρων και ποιότητα υπηρεσιών

Το πρότυπο XG-PON ενσωματώνει ένα πλήθος μηχανισμών, οι οποίοι αφορούν την αρχιτεκτονική πολυπλεξίας διαφορετικών ροών δεδομένων και την κατανομή πόρων, με σκοπό την εγγύηση παροχής ΠτΥ στους συνδρομητές που έχουν πρόσβαση στο XG-PON μέσω των ΜΟΔ.

Κάθε ΜΟΔ δύναται να παράγει διαφορετικές ροές δεδομένων, κάθε μια εξ αυτών διαθέτει συγκεκριμένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και καθυστέρηση, ώστε να ικανοποιήσει επαρκώς τους χρήστες της. Παράδειγμα τέτοιας ροής κίνησης είναι η μετάδοση βίντεο πλήρους υψηλής

ανάλυσης (Full High Definition - FHD) σε πραγματικό χρόνο (real time). Για να υποστηριχθεί επαρκώς μια τέτοια ροή, δηλαδή για να είναι σε θέση ο θεατής να την παρακολουθήσει χωρίς διακοπές, θα πρέπει η ανάθεση εύρους ζώνης να γίνει με τέτοιον τρόπο ώστε μετρικές απόδοσης δικτύου, όπως η Διακύμανση Καθυστέρησης Πακέτου (ΔΚΠ, Packet Delay Variation – PDV) και η καθυστέρηση να είναι χαμηλές και το ίδιο το εύρος ζώνης που παρέχεται επαρκές για την υποστήριξη του ρυθμού μετάδοσης της ροής.

Κάθε δικτυακή μονάδα που δρομολογεί ή μετάγει δεδομένα, όπως το ΤΟΓ, διαθέτει έναν μηχανισμό ΔΚΕΖ, ο οποίος φροντίζει να εξυπηρετεί επαρκώς πολλαπλές ροές με διαφορετικές απαιτήσεις. Οι μηχανισμοί αυτοί, ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούν για να αναθέσουν τους διαθέσιμους πόρους στις ροές δεδομένων, μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες:

- ΔΚΕΖ με Αναφορά Κατάστασης (ΑΝΚ, Status Reporting – SR): Βασίζονται αποκλειστικά σε αναφορές που λαμβάνουν από τις ΜΟΔ, για τα δεδομένα που επιθυμεί να μεταδώσει.
- ΔΚΕΖ με Παρακολούθηση Κίνησης (ΠΚ, Traffic Monitoring – TM): Βασίζονται στη διάκριση κάποιου προτύπου ως προς τις μεταδόσεις αδρανών XGEM και τη σύγκρισή αυτού με τους αντίστοιχους χάρτες εύρους ζώνης.

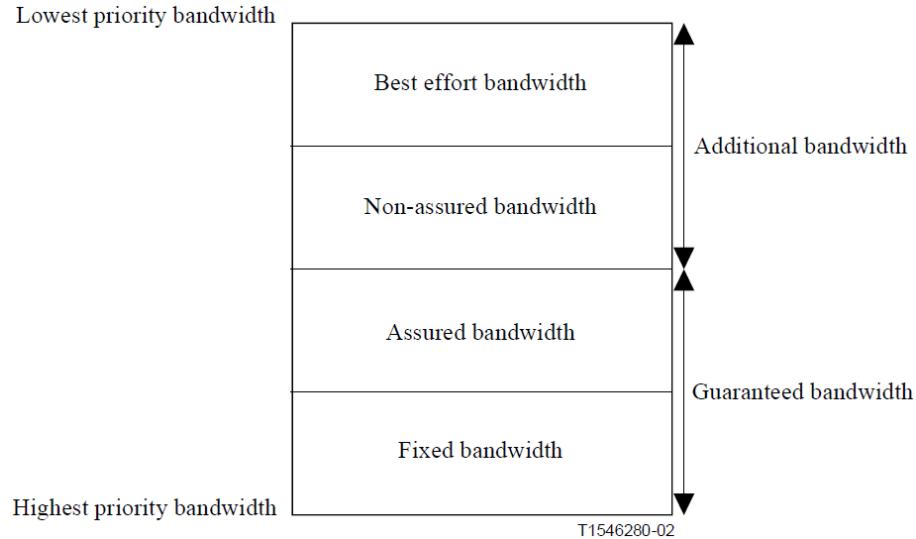
Ένα ΤΟΓ οφείλει να διαθέτει έναν μηχανισμό, ο οποίος ενσωματώνει και τις δύο κατηγορίες με τον βέλτιστο τρόπο, ώστε να αποδίδει το εύρος ζώνης με δίκαιο και αποδοτικό τρόπο. Το πρότυπο XG-PON δεν προσδιορίζει την ακριβή μορφή ενός τέτοιου μηχανισμού, η σύλληψη και υλοποίησή του είναι θέμα που αφήνεται στον κατασκευαστή του ΤΟΓ ή του διαχειριστή του δικτύου.

Τα ΠΟΔ που τυποποιούνται από την ITU-T κληρονομούν από το πρότυπο ITU-T G.983.4 μια αυστηρή ιεραρχία για τη διάθεση του εύρους ζώνης που ανατίθεται στους χρήστες, με την ανάθεση να ξεκινά από την κατηγορία υψηλότερης προτεραιότητας και να καταλήγει σε αυτήν με τη χαμηλότερη.

Με βάση την ιεραρχία που ορίζεται στο σχήμα 4.6, μια ανεξάρτητη ροή δεδομένων χαρακτηρίζεται από έναν περιγραφέα κίνησης (traffic descriptor), ο οποίος έχει την εξής μορφή:

$$D = \langle R_F, R_A, R_M, \chi_{AB}, P, \omega \rangle$$

R_F : Είναι το πάγιο εύρος ζώνης (fixed bandwidth) το οποίο ανατίθεται στη ροή ανεξάρτητα από την απαίτησή της σε εύρος ζώνης.



Σχήμα 4.6: Η ιεραρχία των αναθέσεων εύρους ζώνης [78]

R_A : Αντιπροσωπεύει το εξασφαλισμένο εύρος ζώνης (assured bandwidth) που ανατίθεται στη ροή, από τη στιγμή που δεν έχουν ικανοποιηθεί οι απαιτήσεις της.

R_M : Πρόκειται για το μέγιστο εύρος ζώνης που μπορεί να ανατεθεί στη ροή.

χ_{AB} : Τριμερής δείκτης για την ανάθεση πρόσθετου εύρους ζώνης: καθόλου (none), Μη εξασφαλισμένο εύρος ζώνης (MEEZ, Non-Assured – NA), Καλύτερο δυνατό εύρος ζώνης (KΔEZ, Best-Effort – BE).

P : Προτεραιότητα για την ανάθεση του ΚΔEZ.

ω : Βάρος για την ανάθεση του ΚΔEZ.

Οι πιθανές τιμές που μπορούν να λάβουν οι τιμές του διανύσματος D για την κάθε ροή δίνουν τη δυνατότητα στο ΤΟΓ να κατηγοριοποιήσει ροές κίνησης και να εφαρμόσει διαφορετικές πολιτικές στην κάθε μια. Για κάθε περιγραφέα D πρέπει να ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 R_M &\geq R_F + R_A \\
 \text{av } \chi_{AB} = NA, \text{ τότε } R_M &> R_F + R_A > 0 & (4.1) \\
 \text{av } \chi_{AB} = BE, \text{ τότε } R_M &> R_F + R_A \geq 0
 \end{aligned}$$

Επίσης, για το άθροισμα των συνόλου των περιγραφέων κίνησης πρέπει να ισχύει η συνθήκη βασικής σταθερότητας (4.2), όπου C το συνολικά διαθέσιμο εύρος ζώνης για το ανοδικό ή το

καθοδικό κανάλι:

$$\sum_i (R_F^i + R_A^i) \leq C \quad (4.2)$$

Αν είναι αναγκαίο, δύο ή περισσότερες ροές κίνησης με παρόμοια ή ίδια χαρακτηριστικά μπορούν να θεωρηθούν ως μια αθροισμένη ροή με ενιαίο περιγραφέα κίνησης, ο οποίος ικανοποιεί τις εξής συνθήκες (με * συμβολίζονται οι παράμετροι της αθροισμένης ροής κίνησης και με j οι παράμετροι των ροών που την αποτελούν):

$$R_F^* + R_A^* = \sum_j (R_F^j + R_A^j) \quad (4.3)$$

$$\max_j R_M^j \leq R_M^* \leq \sum_j R_M^j$$

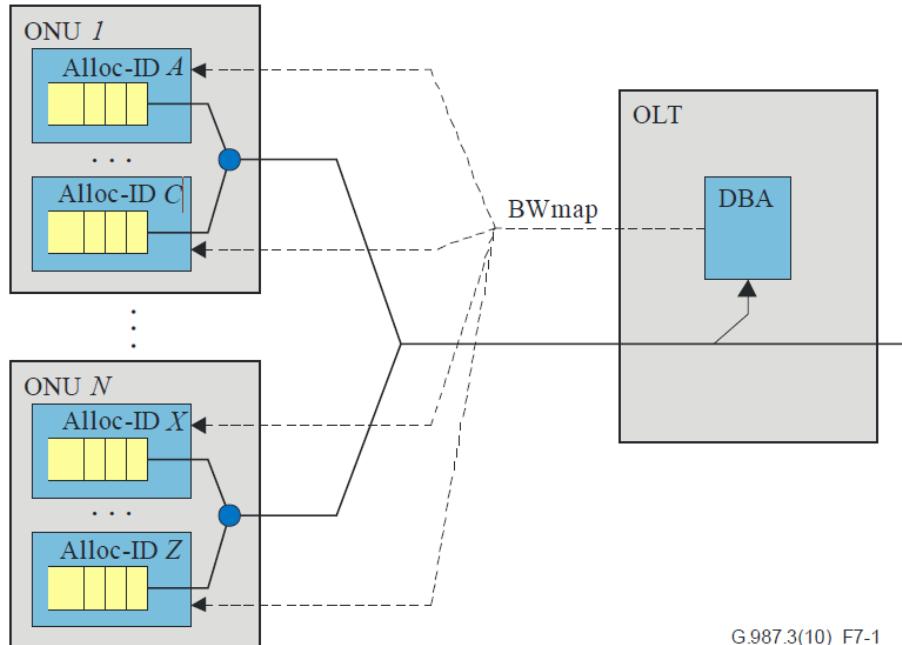
Η υπηρεσία κατανομής εύρους ζώνης παρέχεται στο καθοδικό κανάλι με τη χρήση των XGEM Port-ID, ενώ στο ανοδικό με συνδυασμό των τελευταίων με τα Alloc-ID. Το ΤΟΓ μπορεί να ομαδοποιήσει τα Alloc-ID σε περιέκτες μεταδόσεων (Transmission Containers – T-CONTs), με βάση το είδος της διαδικτυακής υπηρεσίας που υποστηρίζει το κάθε Alloc-ID, και να εφαρμόζει μαζικές πολιτικές διαχείρισης κίνησης σε κάθε T-CONT. Τα είδη των T-CONT, καθώς και οι προτεραιότητες εύρους ζώνης που μπορούν να ενσωματώσουν (βλ. σχήμα 4.6), έχουν οριστεί από το πρότυπο ITU-T G.983.4, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1:

	Εναισθησία στην καθυστέρηση	Τύπος ανάθεσης	Εφαρμόσιμο T-CONT				
			1	2	3	4	5
Πάγιο	Ναι	Προβλεπόμενος, Στατικός	✓				✓
Εξασφαλισμένο	Όχι	Προβλεπόμενος, Δυναμικός		✓	✓		✓
Μη-εξασφαλισμένο	Όχι				✓		✓
Καλύτερο δυνατό	Όχι	Μη προβλεπόμενος, Δυναμικός				✓	✓

Πίνακας 4.1: Η αντιστοίχιση των T-CONT σε εύρη ζώνης [78]

Η χρήση των Alloc-ID οδηγεί σε μια αφηρημένη και πιο ευέλικτη προσέγγιση του προβλήματος ανάθεσης εύρους ζώνης, κατά την οποία το ΤΟΓ δύναται να φιλοξενεί χρήστες που παράγουν ανεξάρτητες ροές κίνησης, οι οποίες έχουν διαφορετικές ανάγκες σε ποιότητα υπηρεσιών. Η αφηρημένη αυτή προσέγγιση οδηγεί στη θεώρηση ότι κάθε Alloc-ID διαθέτει τη δική του ουρά, η οποία ταυτίζεται με μια λογική μνήμη προσωρινής αποθήκευσης (logical buffer) των

δεδομένων που αναμένουν για μετάδοση. Η μνήμη αυτή χαρακτηρίζεται λογική, αφού αποτελεί ένα τμήμα της φυσικής μνήμης προσωρινής αποθήκευσης (buffer) μιας ΜΟΔ και αναγνωρίζεται ως ξεχωριστή ύπαρξη από το ΤΟΓ.



Σχήμα 4.7: Η αφαίρεση του μηχανισμού ΔΚΕΖ (DBA) [9]

4.4.1 Διαδικασία ανάθεσης εύρους ζώνης

Κάθε Alloc-ID μπορεί να χαρακτηριστεί, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, από το προσφερόμενο φορτίο $R_L(t)$, το οποίο ορίζεται ως ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων με τον οποίον πρέπει να εξυπηρετηθεί το Alloc-ID, ώστε να αδειάσει η ουρά του μέσα σε ένα σταθερό χρονικό διάστημα Δ :

$$R_L(t) = \frac{B(t) + A(t, t + \Delta)}{\Delta} \quad (4.4)$$

όπου $B(t)$ είναι η κατάληψη της προσωρινής μνήμης αποθήκευσης (Buffer Occupancy – BufOcc) τη στιγμή t . Ο προαιρετικός παράγοντας $A(t, t + \Delta)$ αναπαριστά νέες αφίξεις στην ουρά κατά τη διάρκεια του διαστήματος $(t, t + \Delta)$ και χρησιμοποιείται για την περίπτωση που εφαρμόζεται μέθοδος πρόβλεψης για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης που πρέπει να ανατεθεί σε ένα Alloc-ID. Το Δ είναι σταθερά του συστήματος XG-PON και έχει μέγεθος, συνήθως, διάρκειας οκτώ πλαισίων.

Ο μηχανισμός ΔΚΕΖ είναι μια αυτόνομη μονάδα ενός ΤΟΓ, στόχος του οποίου είναι η εξυπηρέτηση του φόρτου $R_L(t)$ κάθε Alloc-ID. Το εύρος ζώνης $R^i(t) > 0$ είναι αυτό που ανατίθεται

στο Alloc-ID i έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας ανάθεσης εύρους ζώνης. Το $R^i(t)$ αποτελείται από το εγγυημένο (guaranteed) $R_G^i(t)$, το οποίο διαμορφώνεται από το πάγιο και εξασφαλισμένο εύρος ζώνης, καθώς και, προαιρετικά, από το $R_{NA}^i(t)$ ή το $R_{BE}^i(t)$, που αναπαριστούν το MEEZ και το KΔEZ αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα:

$$R^i(t) = \begin{cases} R_G^i(t) + R_{NA}^i(t), & \text{αν } \chi_{AB}^i = NA \\ R_G^i(t) + R_{BE}^i(t), & \text{αν } \chi_{AB}^i = BE \\ R_G^i(t), & \text{αν } \chi_{AB}^i = \text{none} \end{cases} \quad (4.5)$$

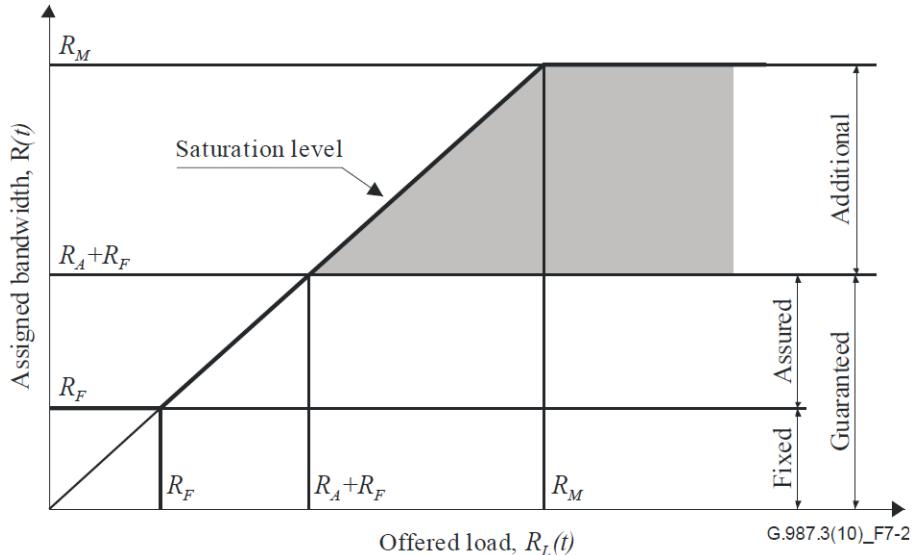
Για τα Alloc-ID στα οποία έχει ανατεθεί το πάγιο εύρος ζώνης, το αποδιδόμενο εύρος ζώνης $R^i(t)$ θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη συντήρησης (4.6), δηλαδή δεν θα πρέπει να ξεπερνά ούτε το μέγιστο δυνατό αποδιδόμενο εύρος ζώνης R_M^i , ούτε το προσφερόμενο φορτίο $R_L^i(t)$. Η συνθήκη αυτή εκφράζεται ως εξής:

$$R^i(t) \leq \min \{R_M^i(t); R_L^i(t)\} \quad (4.6)$$

Το ΤΟΓ ξεκινά με την ανάθεση του πάγιου εύρους ζώνης R_F στατικά σε όλα τα Alloc-ID του ΠΟΔ, ανεξάρτητα από το προσφερόμενο τους φορτίο και την κίνηση του δικτύου. Ο μηχανισμός ολοκληρώνει τη διανομή του εγγυημένου εύρους ζώνης με τη δυναμική κατανομή του MEEZ σε κάθε μη ικανοποιημένο Alloc-ID, είτε μέχρι να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του είτε μέχρι η ανάθεση να φτάσει το προβλεπόμενο επίπεδο R_A . Συμπερασματικά, με δεδομένο ότι ισχύει η σχέση σταθερότητας (4.2), το εγγυημένο εύρος ζώνης εκφράζεται ως εξής:

$$R_G^i(t) = \min \{R_F^i + R_A^i; \max \{R_F^i; R_L^i(t)\}\} \quad (4.7)$$

Για όσα Alloc-ID ισχύει η ανισότητα της σχέσης (4.6), δηλαδή όσα Alloc-ID παρέμειναν ανικανοποίητα από τη διάθεση του εγγυημένου εύρους ζώνης, η ανάθεση συνεχίζεται με την κατανομή του μη εγγυημένου εύρους ζώνης (non guaranteed bandwidth), το οποίο αποτελείται από δυο φάσεις, την ανάθεση του MEEZ και αυτή του KΔEZ. Συνοπτικά, η διαδικασία ανάθεσης του εύρους ζώνης για κάθε Alloc-ID φαίνεται στο σχήμα 4.8, το οποίο αναπαριστά το αποδιδόμενο εύρος ζώνης $R(t)$, ως συνάρτηση του προσφερόμενου φόρτου $R_L(t)$.



Σχήμα 4.8: Η αναλογία των αποδιδόμενου εύρους ζώνης με τον προσφερόμενο φόρτο για ένα Alloc-ID [9]

4.4.2 Ανάθεση μη εγγυημένου εύρους ζώνης

Το πρόσθετο μη εγγυημένο εύρος ζώνης μπορεί να ανατεθεί με δυο τρόπους: (i) αναλογική ανάθεση ρυθμού (rate-proportional) και (ii) με χρήση προτεραιοτήτων και βαρών. Το πρότυπο δεν ορίζει συγκεκριμένη διαδικασία για την ανάθεση του πρόσθετου εύρους ζώνης, ωστόσο, για κάθε περίπτωση διάθεσης ορίζονται κάποιες βασικές αρχές που πρέπει να τηρεί ένας αλγόριθμος ΔΚΕΖ, η σύλληψη και εφαρμογή του οποίου είναι ευθύνη του διαχειριστή του δικτύου XG-PON ή του κατασκευαστή του ΤΟΓ.

Αναλογική ανάθεση ρυθμού

Στην περίπτωση της αναλογικής ανάθεσης ρυθμού, πρώτα ανατίθεται το MEEZ R_{NA} , το οποίο διατίθεται για κάθε Alloc-ID που ισχύει $\chi_{AB} = NA$ και είναι ανάλογο με το άθροισμα του R_F και του R_A του κάθε Alloc-ID. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης για ανάθεση S_{NA} είναι αυτό που απομένει από τη διάθεση του εγγυημένου εύρους ζώνης και εκφράζεται ως εξής:

$$S_{NA}(t) = C - \sum_i R_G^i(t) \quad (4.8)$$

Η ανάθεση πραγματοποιείται έτσι ώστε:

- Ισχύει η συνθήκη διατήρησης του εύρους ζώνης (4.6)
- Ισχύει ένα από τα εξής:

- Για κάθε Alloc-ID i ικανοποιείται η συνθήκη κορεσμού:

$$R_i(t) = \min \{ R_M^i; \max \{ R_L^i(t); R_F^i \} \} \quad (4.9)$$

- Το $S_{NA}(t)$ έχει εξαντληθεί και το πολύ ένα Alloc-ID δεν έχει φτάσει σε σημείο κορεσμού.
- Το $S_{NA}(t)$ έχει εξαντληθεί και για κάθε δυο Alloc-ID i, j που δικαιούνται μη εξασφαλισμένο εύρος ζώνης ικανοποιείται η εξής συνθήκη δικαιοσύνης:

$$\frac{R_{NA}^i(t)}{R_F^i + R_A^i} = \frac{R_{NA}^j(t)}{R_F^j + R_A^j} \quad (4.10)$$

Για τα Alloc-ID που έχουν ακόμα ανικανοποίητες ανάγκες, η διαδικασία ανάθεσης μη εγγυημένου εύρους ζώνης ολοκληρώνεται με τη διάθεση του ΚΔΕΖ, το οποίο είναι ανάλογο του μη εγγυημένου τμήματος εύρους ζώνης που δικαιούται κάθε Alloc-ID. Το εύρος ζώνης που απομένει για διάθεση εκφράζεται από τον εξής τύπο:

$$S_{BE}(t) = C - \sum_{i \in \{\chi_{AB}^i = NA\}} R^i(t) - \sum_{i \in \{\chi_{AB}^i \neq NA\}} R_G^i(t) \quad (4.11)$$

Το καλύτερο δυνατό εύρος ζώνης S_{BE} μοιράζεται στα Alloc-ID με $\chi_{AB} = BE$ έτσι ώστε:

- Ισχύει η συνθήκη διατήρησης του εύρους ζώνης (4.6)
- Ισχύει ένα από τα εξής:
 - Ικανοποιείται η συνθήκη κορεσμού (4.9) για κάθε Alloc-ID.
 - Το $S_{BE}(t)$ έχει εξαντληθεί και το πολύ ένα Alloc-ID δεν έχει φτάσει σε σημείο κορεσμού
 - Το $S_{BE}(t)$ έχει εξαντληθεί και για κάθε δυο Alloc-ID i, j που συμμετείχαν στην ανάθεση ικανοποιείται η συνθήκη δικαιοσύνης:

$$\frac{R_{BE}^i(t)}{R_M^i - (R_F^i + R_A^i)} = \frac{R_{NA}^j(t)}{R_M^j - (R_F^j + R_A^j)} \quad (4.12)$$

Ανάθεση με προτεραιότητες και βάρη

Για την περίπτωση που η ανάθεση του μη εγγυημένου εύρους ζώνης γίνεται με βάρη και προτεραιότητες, τότε πραγματοποιείται μόνο ανάθεση του ΚΔΕΖ στα Alloc-ID για τα οποία ισχύει $\chi_{AB} = BE$. Το εύρος ζώνης που διατίθεται για τη συγκεκριμένη διαδικασία ανάθεσης είναι αυτό που απομένει από τη διάθεση του εγγυημένου εύρους ζώνης και εκφράζεται ως εξής:

$$S_{BE}(t) = C - \sum_i R_G^i(t) \quad (4.13)$$

Το S_{BE} ανατίθεται με τέτοιον τρόπο ώστε:

- Ισχύει η συνθήκη διατήρησης του εύρους ζώνης (4.6)
- Ικανοποιείται η συνθήκη κορεσμού((4.9) για κάθε Alloc-ID ή
- Το S_{BE} να εξαντληθεί με τα εξής να ισχύουν:
 - αν τουλάχιστον ένα Alloc-ID i με προτεραιότητα P_i δεν έχει ικανοποιηθεί πλήρως, τότε η ανάθεση ΚΔΕΖ για τα Alloc-ID χαμηλότερης προτεραιότητας είναι μηδενική. Δηλαδή: $R_{BE}^j = 0, \forall j : P_j < P_i$.
 - Για όσα Alloc-ID i, j παραμένουν ανικανοποίητα και έχουν την ίδια προτεραιότητα ($P_i = P_j$) ισχύει η εξής συνθήκη δικαιοσύνης:

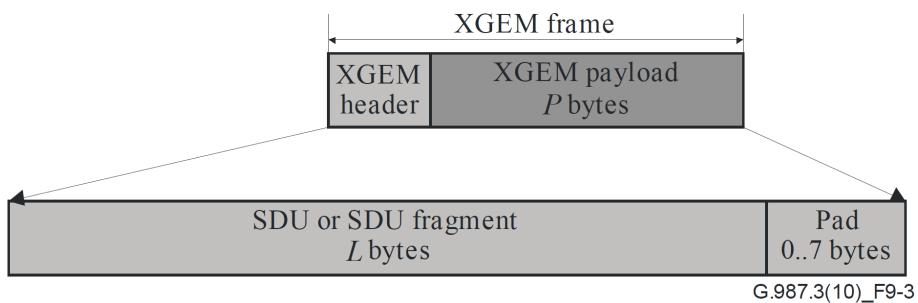
$$\frac{R_{BE}^i(t)}{\omega_i} = \frac{R_{BE}^j(t)}{\omega_j} \quad (4.14)$$

4.5 Δομή πλαισίων στο XG-PON

Στην ενότητα αυτή παρατίθεται με εκτενέστερη ανάλυση οι διαδικασίες ενθυλάκωσης και πλαισίωσης που πραγματοποιούνται στο XG-PON, καθώς και η δομή των πλαισίων XGTC, XGEM και PHY, όπως αυτά παρουσιάζονται στο πρότυπο της ITU-T. Μεγάλο τμήμα από τη μορφή των πλαισίων, τις διαδικασίες πλαισίωσης και της εφαρμογής κώδικα ΕΔΣ που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα έχει υιοθετηθεί για την υλοποίηση του προσομοιωτή XG-PON.

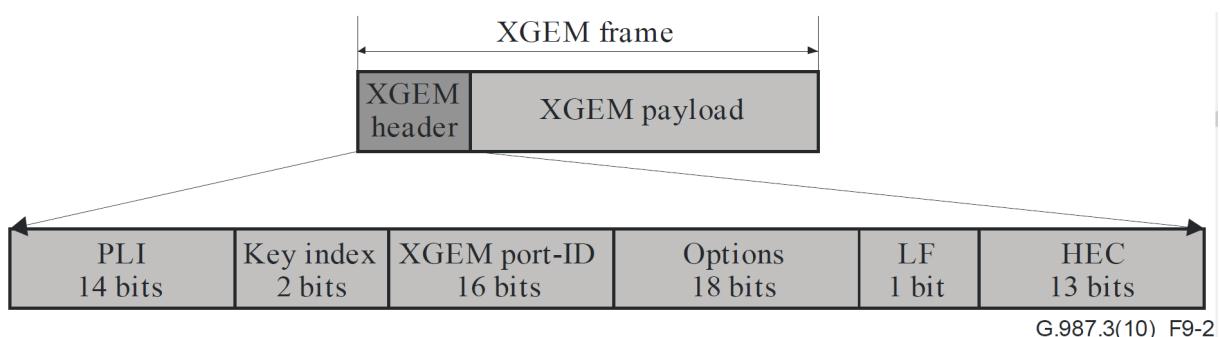
4.5.1 Το πλαίσιο XGEM

Το πλαίσιο XGEM ενθυλακώνει ένα ΜΔΥ ή τμήμα ΜΔΥ που πρέπει να λάβει μια δικτυακή οντότητα του XG-PON (σχήμα 4.9) και υποστηρίζει πληθώρα λειτουργιών που προσθέτουν ευελιξία και ασφάλεια στο δίκτυο, όπως δυνατότητα τεμαχισμού, πολυπλεξία ανεξάρτητων ροών δεδομένων στα ρεύματα ανόδου και καθόδου με βάση το XGEM Port-ID, αλλά και προαιρετική κρυπτογράφηση AES (Advanced Encryption Standard), ώστε οι ΜΔΥ να είναι ασφαλείς. Παρόλο που η κρυπτογράφηση είναι προαιρετική, καθίσταται σημαντική για ένα δίκτυο ΠΟΔ, αφού ως Σ-ΠΣ τα δεδομένα από το ΤΟΓ ευρυεκπέμπονται προς όλες τις ΜΟΔ του δικτύου.



Σχήμα 4.9: Το ωφέλιμο φορτίο ενός πλαισίου XGEM [9]

Οι παράμετροι των λειτουργιών τεμαχισμού και της κρυπτογράφησης καθορίζονται από τα περιεχόμενα της κεφαλίδας XGEM, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 4.10, η οποία έχει σταθερό μήκος 8 byte. Στην κεφαλίδα, μεταξύ άλλων πεδίων, διακρίνεται το πεδίο PLI (payload length indicator), το οποίο δείχνει το μέγεθος της ΜΔΥ σε byte που ενθυλακώνεται (L), το Key index που διατηρεί το είδος του κλειδιού κρυπτογράφησης που χρησιμοποιείται, το XGEM Port-ID στο οποίο ανήκει το πλαίσιο, καθώς και το πεδίο LF που έχει την τιμή 1 αν το πλαίσιο XGEM ενθυλακώνει το τελευταίο ή το μοναδικό τεμάχιο μιας διαδικασίας τεμαχισμού και την τιμή 0, αν η ΜΔΥ έχει υποστεί τεμαχισμό και ακολουθούν περισσότερα τεμάχια της ΜΔΥ, ενθυλακωμένα στα επόμενα πλαίσια XGEM.



Σχήμα 4.10: Η επικεφαλίδα ενός πλαισίου XGEM [9]

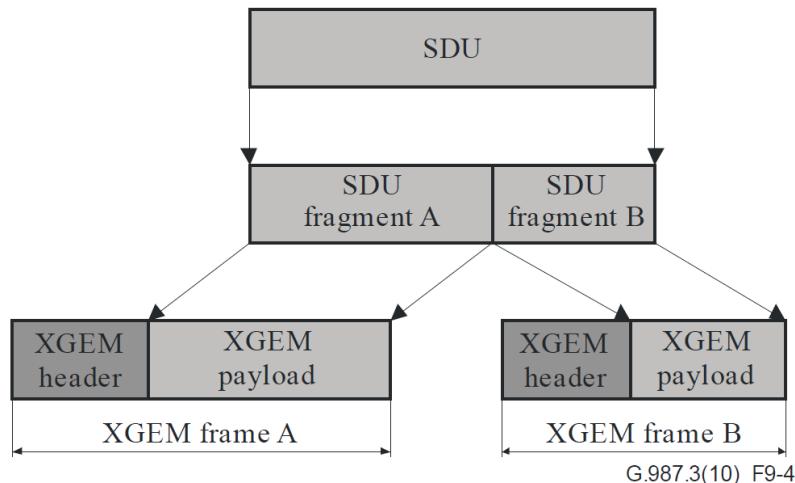
Σε αντίθεση με την κεφαλίδα, το μήκος του αντίστοιχου ωφέλιμου φορτίου, δηλαδή της τεμαχισμένης ή μη ΜΔΥ που ενθυλακώνεται, δεν είναι σταθερό αλλά ορίζεται μέσω του πεδίου PLI της κεφαλίδας. Το μήκος αυτό (P) ανάλογα με την τιμή L του πεδίου PLI διαμορφώνεται ως εξής:

$$P = \begin{cases} 4 \cdot \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil, & \text{αν } L \geq 8 \\ 8, & \text{αν } 0 < L < 8 \\ 0, & \text{αν } L = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Ο αποστολέας έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει αδρανή πλαίσια XGEM (idle XGEM frame), το ωφέλιμο φορτίο των οποίων είναι 0 και το XGEM Port-ID ίσο με 0xFFFF. Ένας αποστολέας μεταδίδει αδρανές πλαίσιο αν δεν υπάρχουν διαθέσιμες ΜΔΥ προς μετάδοση ή κάποια ΜΔΥ υπερβαίνει το μέγιστο μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του πλαισίου XGTC και δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατακερματισμός σε αυτή.

Τεμαχισμός ΜΔΥ

Όταν μια ΜΔΥ δεν μπορεί να μεταδοθεί ολόκληρη μέσα στο διαθέσιμο ωφέλιμο φορτίο του πλαισίου ή της ριπής XGTC, τότε εφαρμόζεται στη ΜΔΥ τεμαχισμός σε ένα ή περισσότερα τεμάχια, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11.



Σχήμα 4.11: Ο τεμαχισμός ΜΔΥ (SDU) [9]

Αν το διαθέσιμο ωφέλιμο φορτίο XGTC είναι τουλάχιστον 16 byte και το μέγεθος της ΜΔΥ ή του τεμαχίου ΜΔΥ, μαζί με την κεφαλίδα XGEM των 8 byte, υπερβαίνουν το διαθέσιμο ωφέλιμο φορτίο, τότε εφαρμόζεται τεμαχισμός στη ΜΔΥ για την οποία ισχύει η συνθήκη, ώστε

το πρώτο τεμάχιο να καλύψει πλήρως το διαθέσιμο ωφέλιμο φορτίο XGTC, με το δεύτερο τεμάχιο να αναμένει τη μετάδοσή του σε επόμενη ευκαιρία μετάδοσης. Τέλος, η διαδικασία του τεμαχισμού ακολουθεί τους εξής πρόσθετους κανόνες:

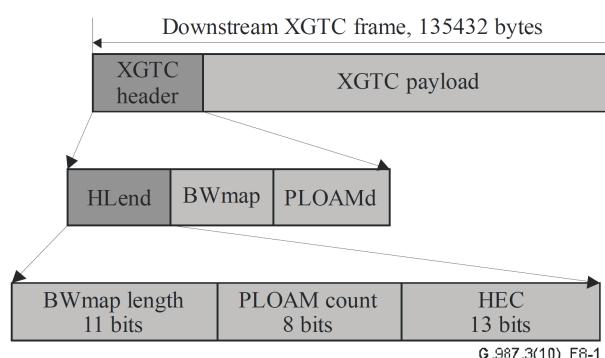
- Αν το μέγεθος μιας ΜΔΥ ή ενός τεμαχίου ΜΔΥ είναι λιγότερο από 8 byte, τότε αυτό πρέπει να συμπληρωθεί με επιβάρυνση (padding) μέχρι το ελάχιστο των 8 byte, ώστε το πλαίσιο XGEM να φτάσει στο ελάχιστο μέγεθος των 16 byte.
- Αν το μέγεθος του διαθέσιμου ωφέλιμου φορτίου XGTC είναι λιγότερο από 16 byte, τότε αυτό πρέπει να συμπληρωθεί με ένα αδρανές πλαίσιο XGEM.

4.5.2 Το πλαίσιο XGTC

Ένα σύνολο από πλαίσια XGEM διαμορφώνουν το ωφέλιμο φορτίο ενός πλαισίου XGTC, το οποίο με τη σειρά του πλαισιώνεται από κεφαλίδα XGTC, η οποία κατά κύριο λόγο παρέχει τις λειτουργίες των καναλιών ελέγχου OAM/PLOAM, καθώς και ευκαιρίες πρόσβασης στις ΜΟΔ για το κανάλι ανόδου. Σε αντίθεση με τα πλαίσια XGEM, λόγω της διαφορετικού τρόπου μετάδοσης δεδομένων στην άνοδο και την κάθοδο, το πλαίσιο XGTC έχει διαφορετική μορφή σε κάθε κατεύθυνση μετάδοσης.

Το πλαίσιο καθόδου XGTC

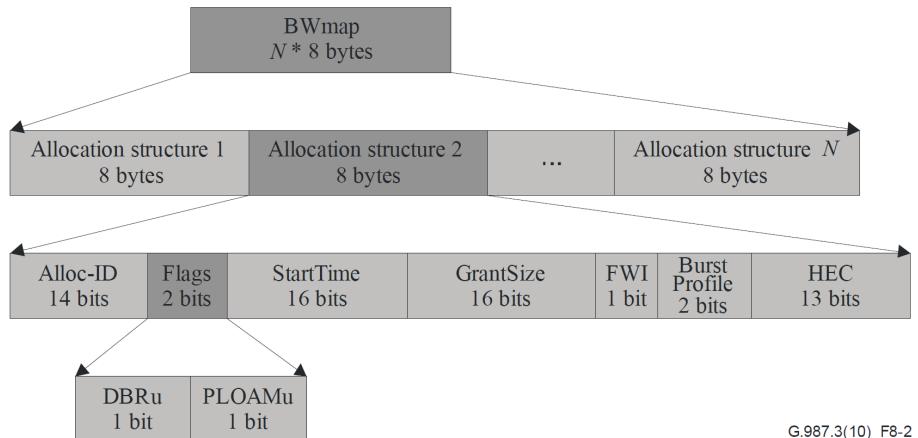
Το πλαίσιο καθόδου XGTC έχει σταθερό μέγεθος 135432 byte και διαμορφώνεται από το ωφέλιμο φορτίο, που περιέχει τα XGEM που αποστέλλει το ΤΟΓ, καθώς και από την κεφαλίδα XGTC, η μορφή της οποίας φαίνεται στο σχήμα 4.12. Τα βασικότερα πεδία της κεφαλίδας που διακρίνονται στο σχήμα είναι τα HLend, BWmap και PLOAMd.



Σχήμα 4.12: Η δομή του πλαισίου καθόδου XGTC[9]

Το πεδίο HLend ορίζει τα μεγέθη των πεδίων BWmap και PLOAMd, το μέγεθος των οποίων δεν είναι μεν σταθερό αλλά δεν υπερβαίνει το συνολικό μέγεθος του πλαισίου. Επίσης, περιλαμβάνει και ένα τμήμα HEC (Hybrid Error Correction, Υβριδική Διόρθωση Λαθών) για τον εντοπισμό και τη διόρθωση λαθών, στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται ΕΔΣ.

Το πεδίο BWmap έπεται του HLend και αποτελείται από μια σειρά δομών κατανομής (allocation structure), με την κάθε μια να έχει μήκος 8 byte. Κάθε δομή αντιστοιχεί σε μια άδεια μετάδοσης (grant) του ΤΟΓ προς ένα Alloc-ID για μετάδοση στο ανοδικό κανάλι. Το πλήθος των δομών, από το οποίο εξαρτάται το μέγεθος του πεδίου BWmap, δίνεται από το πεδίο HLend. Γίνεται κατανοητό ότι κάθε δομή κατανομής αντιστοιχεί σε μια ριπή ή τμήμα μιας ριπής ανόδου μιας ΜΟΔ.



Σχήμα 4.13: Η δομή του πεδίου BWmap [9]

Τα πιο σημαντικά τμήματα του πεδίου BWmap συνοψίζονται στα εξής:

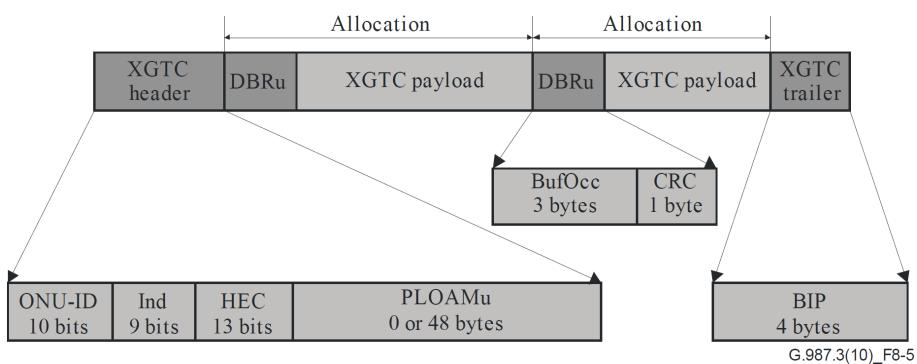
- **Alloc-ID:** Περιέχει το αναγνωριστικό του αποδέκτη της δομής κατανομής.
- **DBRu:** Αν οριστεί η σημαία, τότε η ΜΟΔ πρέπει να συμπεριλάβει αναφορά DBRu για το παρόν Alloc-ID, η οποία περιλαμβάνει το μέγεθος των δεδομένων που αναμένουν στη λογική ουρά του Alloc-ID.
- **StartTime:** Η τιμή του ορίζει την τοποθεσία του πρώτου byte της ριπής ανόδου XGTC μέσα στο πλαίσιο ανόδου PHY, εκφράζεται σε λέξεις (words), με 1 λέξη να ισοδυναμεί με 4 byte, και λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 9719. Με άλλα λόγια, το πεδίο εκφράζει το πόσο πρέπει να καθυστερήσει η ΜΟΔ τη μετάδοση της ριπής ανόδου.
- **GrantSize:** Το τμήμα ορίζει το πλήθος των δεδομένων (σε λέξεις) που το ΤΟΓ επιτρέπει στο Alloc-ID να μεταδώσει για την αντίστοιχη ριπή ανόδου XGTC. Το μέγεθος αυτό

λαμβάνει υπόψιν τόσο το ωφέλιμο φορτίο XGTC όσο και το μήκος του πεδίου DBRu. Μια μηδενική τιμή στο τμήμα επιτρέπει στη ΜΟΔ μόνο μετάδοση μηνυμάτων PLOAM και η ελάχιστη μη-μηδενική τιμή είναι 1 λέξη, που αντιστοιχεί σε μετάδοση μόνο της τιμής του πεδίου DBRu, το μέγεθος του οποίου είναι 4 byte.

Την επικεφαλίδα XGTC των πλαισίων καθόδου συμπληρώνει το πεδίο PLOAMd, το οποίο περιέχει πολλαπλά μηνύματα μήκους 48 byte για το κανάλι PLOAM. Το πλήθος των μηνυμάτων αυτών καθορίζεται από το πεδίο HLend.

Το πλαίσιο XGTC ανόδου

Οι δομές κατανομής (allocation structure) που περιέχει το BWmap ενός πλαισίου καθόδου XGTC αντιστοιχούν σε τμήματα κατανομής, τα οποία διαμορφώνουν ριπές XGTC που μεταδίδονται από τις ΜΟΔ. Το σύνολο των ριπών που αντιστοιχούν σε ένα BWmap συμπληρώνει ένα πλαίσιο XGTC σε χρόνο 125 μsec.



Σχήμα 4.14: Η δομή του πλαισίου XGTC ανόδου [9]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.14, οι ριπές XGTC έχουν δυναμικά καθοριζόμενο μέγεθος, το οποίο εξαρτάται από τις κατανομές που καταλαμβάνουν τα Alloc-ID της ΜΟΔ που διαμορφώνει τη ριπή.

Η επικεφαλίδα XGTC έχει ελάχιστο μέγεθος 4 byte και μπορεί να επεκταθεί στα 52 byte, αν στη ΜΟΔ έχει επιτραπεί η μετάδοση αποκλειστικά ενός μηνύματος PLOAM μέσω του πεδίου PLOAMd. Στην περίπτωση που έχει επιτραπεί η μετάδοση αυτή, η ΜΟΔ μπορεί να συμπεριλάβει στη ριπή μόνο ένα μήνυμα PLOAM, το οποίο τοποθετείται στο πεδίο PLOAMu.

Κάθε κατανομή του σχήματος 4.14 περιέχει το ωφέλιμο φορτίο XGTC και το πεδίο DBRu, το οποίο αποκαλείται επιβάρυνση της κατανομής. Το πεδίο αυτό περιέχει το τμήμα BufOcc, το οποίο αποτελεί την αναφορά του Alloc-ID για το συνολικό μέγεθος, σε λέξεις, των ΜΔΥ που

περιμένουν να μεταδοθούν στη λογική ουρά του. Αν μια ΜΔΥ έχει μήκος L bytes, η συνεισφορά του (W) στην τιμή του BufOcc υπολογίζεται ως εξής:

$$W = \begin{cases} \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil, & \text{αν } L > 8 \\ 2, & \text{αν } 0 < L \leq 8 \end{cases} \quad (4.16)$$

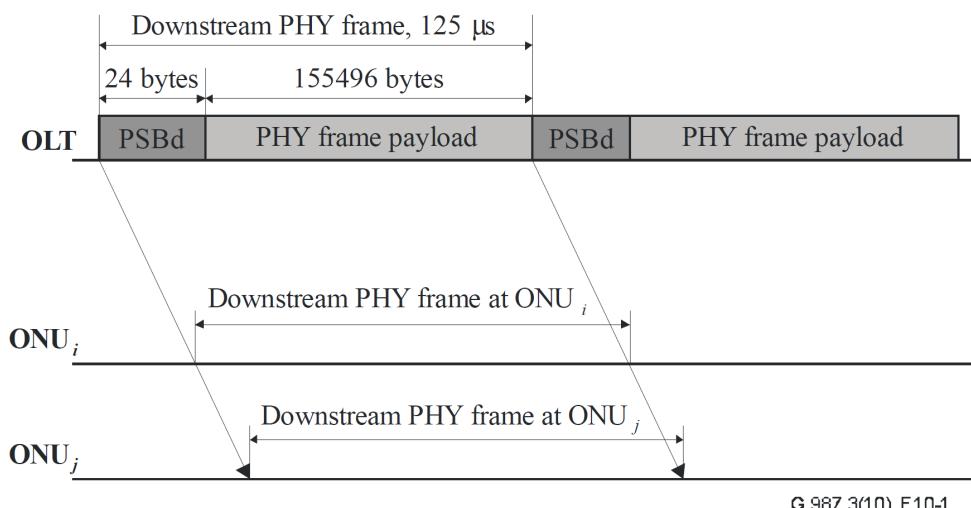
Τέλος, στη ριπή XGTC προσαρτάται μια ουρά (trailer), η οποία περιέχει 4 byte άρτιας ισοτιμίας (Bit-Interleaved even Parity - BIP) και υπολογίζεται για όλα τα δεδομένα της ριπής. Στην περίπτωση που η εφαρμογή κώδικα ΕΔΣ είναι απενεργοποιημένη για το κανάλι ανόδου, το πεδίο BIP αξιοποιείται από το ΤΟΓ για τον υπολογισμό του ΛΔΣ στο κανάλι ανόδου.

4.5.3 Το πλαίσιο PHY

Στο κατώτερο επίπεδο του XGTC λειτουργεί το υπόστρωμα προσαρμογής PHY, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον χρονισμό αποστολέα και λήπτη, τον διαχωρισμό των πλαισίων και την εφαρμογή κώδικα Εμπροσθόδοτης Διόρθωσης Σφαλμάτων (ΕΔΣ, Forward Error Correction – FEC) στα πλαίσια και τις ριπές XGTC.

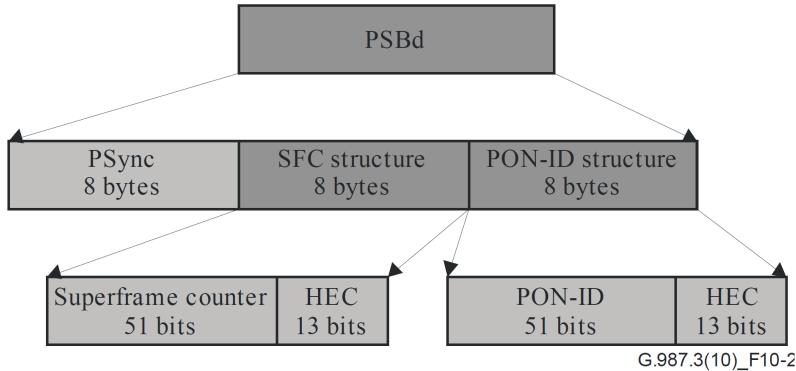
Πλαίσιο καθόδου PHY

Στο κανάλι καθόδου, το ΤΟΓ μεταδίδει ένα συνεχές δυφιόρρευμα προς τις ΜΟΔ με ρυθμό μετάδοσης 9.95328 Gbit/s, το οποίο χωρίζεται σε πλαίσια PHY διάρκειας 125 μsec, μεγέθους 155520 byte.



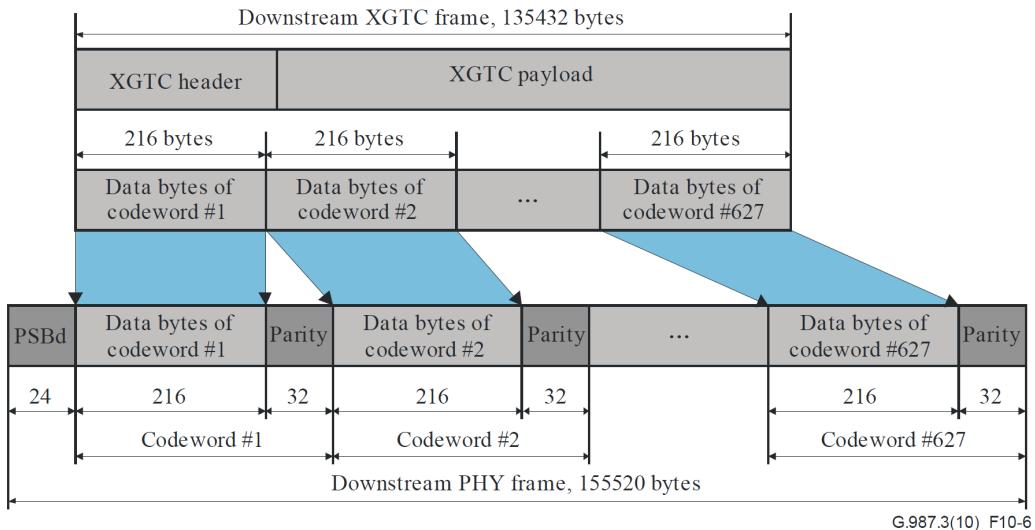
Σχήμα 4.15: Το πλαίσιο καθόδου PHY [9]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15, κάθε πλαίσιο PHY αποτελείται από το ωφέλιμο φορτίο, το οποίο περιλαμβάνει το πλαίσιο καθόδου XGTC, καθώς και την κεφαλίδα PSBd μεγέθους 24 byte.



Σχήμα 4.16: Το πεδίο PSBd [9]

Η κεφαλίδα PSBd του σχήματος 4.16 αποτελείται, μεταξύ άλλων, από το πεδίο PSync που χρησιμοποιείται για τον χρονισμό του παραλήπτη στο λαμβανόμενο πλαίσιο, και τη δομή SFC (SuperFrame Counter), η οποία αποτελείται από τον ομώνυμο μετρητή, ο οποίος αυξάνεται κατά 1 σε σύγκριση με το προηγούμενο πλαίσιο PHY και μηδενίζεται όταν φτάσει στη μέγιστη τιμή του. Επίσης, διακρίνεται και η δομή PON-ID που φέρει τον μοναδικό αριθμό ταυτότητας (ID) του ΤΟΓ που μεταδίδει το πλαίσιο.



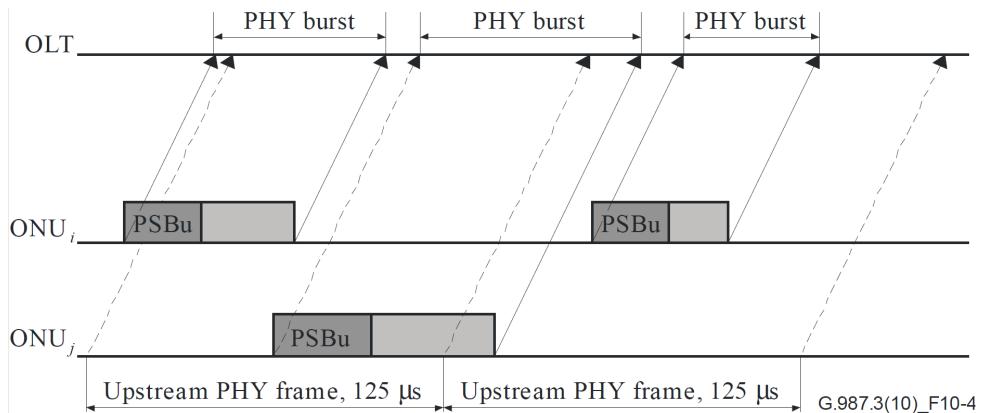
Σχήμα 4.17: Η διαδικασία μετατροπής πλαισίου καθόδου XGTC σε PHY στην κάθοδο [9]

Το ωφέλιμο φορτίο ενός πλαισίου PHY έχει μέγεθος 155496 byte και αποτελείται από ένα πλαίσιο XGTC, αφού πρώτα έχει εφαρμοστεί σε αυτό ο ΕΔΣ τύπου RS(248, 216). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.17, το πλαίσιο καθόδου XGTC τεμαχίζεται σε τμήματα των 216 byte.

Για κάθε ένα εκ των τμημάτων υπολογίζεται και προσαρτάται στο τέλος του η ισοτιμία (parity) με βάση τον κώδικα RS(248,216)¹, διαδικασία η οποία μετατρέπει τα τμήματα σε κωδικολέξεις (codeword). Τελικώς, το πλαίσιο PHY προκύπτει από το σύνολο των κωδικολέξεων και το πεδίο PSBd.

Πλαίσιο ανόδου PHY

Σε αντίθεση με το κανάλι καθόδου, τα πλαίσια PHY στη ροή ανόδου διαμορφώνονται από τη μετάδοση κατάλληλα συγχρονισμένων ριπών. Κάθε πλαίσιο PHY διαρκεί επίσης 125 μsec και έχει μέγεθος 38880 byte, δεδομένα που αντιστοιχούν σε ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης 2.48832 Gbit/s.

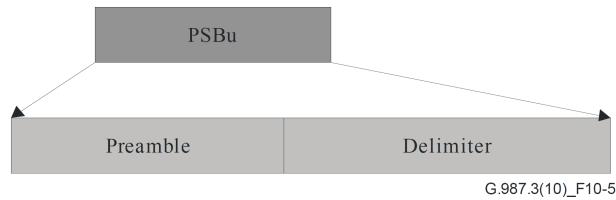


Σχήμα 4.18: Πλαίσια και ριπές PHY στο κανάλι ανόδου [9]

Στο σχήμα 4.18 φαίνεται η σχέση του χρόνου έναρξης των ριπών με τη διάρκεια του κάθε λαμβανόμενου πλαισίου PHY. Υπενθυμίζεται ότι κάθε πλαίσιο καθόδου PHY ενθυλακώνει ένα πλαίσιο XGTC, το οποίο στην κεφαλίδα του περιέχει το πεδίο BWmap και ένα σύνολο από δομές κατανομής, μια για κάθε Alloc-ID. Στο τμήμα StartTime του Alloc-ID που ανήκει ο παραλήπτης αναφέρεται, ουσιαστικά, η στιγμή έναρξης αποστολής της ριπής μέσα στη διάρκεια του λαμβανόμενου πλαισίου PHY. Η στιγμή αυτή είναι σχετική και εκφράζεται ως μετατόπιση σε byte από την αρχή του λαμβανόμενου πλαισίου PHY.

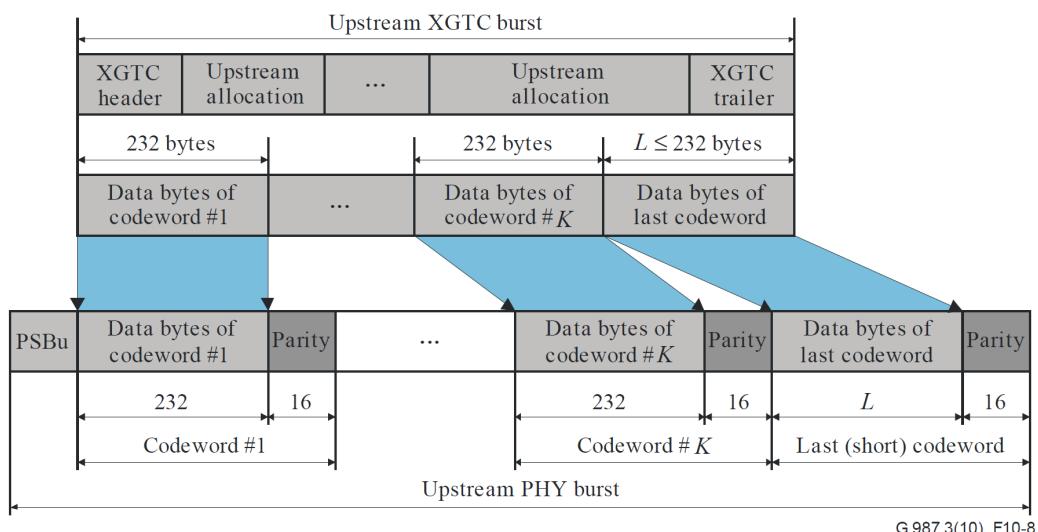
Κάθε ριπή PHY αποτελείται από τη κεφαλίδα PSBu, η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του ΤΟΓ στη λήψη της ριπής PHY και αποτελείται από τα πεδία preamble και delimiter. Το παράρτημα III του G.987.3 προτείνει για τα πεδία αυτά, να έχουν μέγεθος 160 και 32 bit αντίστοιχα, δηλαδή, σύνολο 24 byte για την κεφαλίδα PSBu.

¹Ο συμβολισμός RS(X,Y) σημαίνει «εφαρμογή του κώδικα Reed-Solomon (RS) με μέγεθος κωδικολέξης X byte και byte ισοτιμίας ίσο με X-Y».



Σχήμα 4.19: Το τμήμα PSBu [9]

Για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ ριπών που φτάνουν στο ΤΟΓ από διαφορετικές ΜΟΔ, το ΤΟΓ κατασκευάζει το BWmap με τέτοιον τρόπο ώστε οι αφίξεις από διαφορετικές ΜΟΔ να απέχουν τουλάχιστον 64 bit. Από άποψη χρόνου, η απόσταση αυτή ισοδυναμεί με τον χρόνο που χρειάζεται η μετάδοση των 64 bit στο κανάλι ανόδου ταχύτητας 2.48832 Gbit/s. Ο χρόνος αυτός ισούται με 2.57201646 nsec και ονομάζεται απόσταση ασφαλείας (guard time).



Σχήμα 4.20: Η διαδικασία μετατροπής πλαισίου XGTC σε PHY στην άνοδο [9]

Τέλος, για τη διαμόρφωση της ωφέλιμης πληροφορίας του πλαισίου ανόδου PHY, η ΜΟΔ εφαρμόζει τον κώδικα RS(248, 232) στο πλαίσιο XGTC που ενθυλακώνει. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.20, το πλαίσιο XGTC ανόδου τεμαχίζεται σε τμήματα των 232 byte, για τα οποία υπολογίζεται και προσαρτάται ομάδα από 16 byte ισοτιμίας. Λόγω του γεγονότος ότι το μέγεθος της κάθε ριπής είναι δυναμικό, το ΤΟΓ πρέπει να λαμβάνει υπόψιν του τον υπολογισμό της επιβάρυνσης ΕΔΣ και της πλαισίωσης XGTC για τον ορθό σχηματισμό του BWmap.

An equilibrium is not always an optimum; it might not even be good. This may be the most important discovery of game theory.

Ivar Ekeland, Γάλλος μαθηματικός

5

Θεωρία παιγνίων και Μηχανισμοί Αγοράς

Το ζήτημα ΔΚΕΖ είναι ένα πρόβλημα που, όπως φάνηκε από την παρουσίαση της ερευνητικής βιβλιογραφίας στην ενότητα 1.1, δέχεται πληθώρα προσεγγίσεων από πολλά επιστημονικά πεδία, όπως η θεωρία χρονοπρογραμματισμού και η μηχανική μάθηση. Τα τελευταία χρόνια, όλο και μεγαλύτερη δημοφιλία αποκτά η μοντελοποίηση συστημάτων κατανομής πόρων με βάση τη μικροοικονομία και τη θεωρία παιγνίων.

Αντικείμενο της οικονομικής επιστήμης και, συγκεκριμένα, της μικροοικονομίας είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης οικονομικών οντοτήτων, όπως μια επιχείρηση και ένας καταναλωτής, βασική επιδίωξη των οποίων είναι η ικανοποίηση ιδιοτελών τους αναγκών. Οι οικονομικές οντότητες αλληλεπιδρούν στο πλαίσιο ενός μηχανισμού, ο οποίος ονομάζεται *αγορά* και παρέχει όλους εκείνους τους κανόνες και τις διαδικασίες που εξασφαλίζουν τη διεξαγωγή όσο το δυνατόν πιο επωφελών συναλλαγών. Ακόμη, η μικροοικονομική θεωρία παρέχει μοντέλα, όπως αυτό της προσφοράς και της ζήτησης, τα οποία μελετούν τις διάφορες εκβάσεις που προκύπτουν σε μια αγορά.

Ένα άλλο πεδίο, το οποίο σχετίζεται στενά με τη λειτουργία της μικροοικονομίας και των ελεύθερων αγορών, είναι αυτό της Θεωρίας Παιγνίων (ΘΠ, Game Theory). Η ΘΠ είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο, το οποίο εξετάζει τις μεθόδους λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αλληλεξάρτησης· ποια είναι η βέλτιστη απόφαση για κάποιον, λαμβάνοντας υπόψιν τις αποφάσεις των ανταγωνιστών του και δεδομένου ότι ο καθένας επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του προσωπικού του οφέλους. Σήμερα η ΘΠ, αν και αποτελεί ένα ανεξάρτητο επιστημονικό πεδίο με πληθώρα εφαρμογών στην οικονομία, στην πολιτική, στη ψυχολογία, στην κοινωνιολογία και την εξελι-

κτική βιολογία, ξεκίνησε ως κλάδος των μικροοικονομικών και αυτό διότι αποτελεί θεμελιώδες μαθηματικό εργαλείο για τη μελέτη της συμπεριφοράς των οικονομικών οντοτήτων σε μια ελεύθερη αγορά.

Η σχεδίαση και μοντελοποίηση συστημάτων που έχουν τη δομή αγορών, των οποίων τα μέλη βρίσκονται σε ανταγωνισμό και συμπεριφέρονται ωφελιμιστικά, καλύπτεται από το επιστημονικό πεδίο του σχεδιασμού μηχανισμών (mechanism design). Ένα παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού αναπτύσσεται στη δημοσίευση [79], στην οποία κατασκευάζεται ένα σύστημα διπλών δημοπρασιών για την κατανομή πόρων σε συστήματα νέφους. Οι αγορές διπλών δημοπρασιών αποτελούνται από πολλούς πωλητές, οι οποίοι παρέχουν προς δημοπράτηση τα προϊόντα τους σε ένα πλήθος υποψήφιων πλειοδοτών, με έναν ενδιάμεσο δημοπράτη να καθορίζει τους κανόνες της αγοράς, αφήνοντας τις τιμές πώλησης να προσαρμόζονται ελεύθερα από τους νόμους προσφοράς και ζήτησης. Σε αυτή την περίπλοκη κατάσταση, ένα σύνολο από μηχανισμούς μπορεί να εξασφαλίσει την αποδοτική λειτουργία της ελεύθερης αγοράς. Πιο συγκεκριμένα, ένας μηχανισμός για κάθε υποψήφιο πλειοδότη πρέπει να επιλέγει την κατάλληλη τιμή προσφοράς, ώστε αυτός να αγοράζει τα προϊόντα της επιθυμίας του με το χαμηλότερο δυνατό κόστος, δεδομένων των εκτιμήσεων για τις προσφορές που είναι διατεθειμένοι να κάνουν οι υπόλοιποι υποψήφιοι πλειοδότες, αφού ο πωλητής θα επιλέξει αυτόν με τη χαμηλότερη προσφορά. Ταυτόχρονα, ένας μηχανισμός για κάθε πωλητή θα πρέπει να επιλέγει την κατάλληλη τιμή εκκίνησης δημοπράτησης των προϊόντων του, ώστε ταυτόχρονα ο καθένας να πωλεί τα προϊόντα του σε συμφέρουσες τιμές και να είναι όσο το δυνατόν πιο ανταγωνιστικός. Φυσικά, η διαδικασία διαμόρφωσης των τιμών εκκίνησης θα πρέπει να λάβει υπόψιν εκτιμήσεις για τις αντίστοιχες τιμές των ανταγωνιστών.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που πλαισιώνει τον μηχανισμό ΔΚΕΖ που προτείνει η παρούσα διπλωματική εργασία. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα 5.1 αναπτύσσονται οι βασικές πτυχές της ΘΠ, ορίζεται η έννοια των παιγνίων, καθώς και οι λύσεις που μπορούν να υπολογιστούν σε αυτά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λύση Ισορροπίας κατά Nash (IN) και σε ζητήματα υπολογισμού της. Στη συνέχεια, στην ενότητα 5.2 συνδέεται η ΘΠ και η έννοια της IN με τη μικροοικονομική θεωρία, τις αγορές και τον σχεδιασμό μηχανισμών. Τέλος, στην ενότητα 5.3 γίνεται αναφορά στη μεταφορά του αόρατου χεριού που διατυπώθηκε από τον Ανταμ Σμίθ, καθώς και στην Τραγωδία των Κοινών, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα της αποτυχίας μιας αγοράς, πάνω στην οποία βασίζεται το προτεινόμενο σχήμα της διπλωματικής εργασίας.

5.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων

Η μελέτη συστημάτων στα οποία εφαρμόζεται η ΘΠ, όπως αυτά των αγορών, στηρίζεται στην κατασκευή ενός προβλήματος, το οποίο ονομάζεται *παιγνίο* (game) και περιλαμβάνει τα εξής χαρακτηριστικά [80]:

- τους λήπτες των αποφάσεων ή αλλιώς *τους παίκτες* (players)
- τις διαθέσιμες ενέργειες των παικτών, δηλαδή τις *στρατηγικές* τους (strategies)
- την πληροφόρηση που ενδεχομένως διαθέτουν οι παίκτες για διάφορα στοιχεία του προβλήματος
- τις *αποδόσεις* (payoffs) και τις *ωφέλειες* (utilities) που αποκομίζουν οι παίκτες από την επιλογή μιας στρατηγικής, οι οποίες εξαρτώνται από τις επιλογές των υπολοίπων παικτών. Αν και οι δυο όροι συχνά ταυτίζονται, στο πλαίσιο του παρόντος συγγράμματος, η αναφορά στον όρο «*ωφέλεια*» σχετίζεται με την ευχαρίστηση που λαμβάνει ένας παίκτης από μια στρατηγική, μη λαμβάνοντας απαραίτητα υπόψιν τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Αντίθετα, ο όρος «*απόδοση*» αναφέρεται στην ευχαρίστηση που λαμβάνει κάποιος από την επιλογή κάποιας στρατηγικής, λαμβάνοντας υπόψιν τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών.

Τα παιγνία, ανάλογα με τη συμπεριφορά των παικτών τους και τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, μπορούν να ταξινομηθούν σε πολλές κατηγορίες. Μερικές από τις πιο βασικές κατηγορίες συνοψίζονται στις εξής [80], [81]:

- *Κανονικής* ή *εκτεταμένης μορφής*: Αν οι παίκτες αποφασίζουν τις στρατηγικές τους ταυτόχρονα, χωρίς ο ένας να γνωρίζει την επιλογή του άλλου, τότε γίνεται αναφορά σε ένα παιγνίο κανονικής μορφής. Σε διαφορετική περίπτωση, το παιγνίο έχει εκτεταμένη μορφή. Σε αυτή τη περίπτωση, κάθε παίκτης γνωρίζει τις στρατηγικές επιλογές των παικτών που έδρασαν πριν τον ίδιο και τα δεδομένα για τη λήψη των αποφάσεων είναι διαφορετικά.
- *Συνεργατικά* ή *μη συνεργατικά*: Τα παιγνία στα οποία δίνεται η δυνατότητα στους παίκτες να συγκροτούν ομάδες συνεργασίας, ανταλλάσσοντας πληροφορίες και συνάπτοντας συμφωνίες, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή τους, ονομάζονται συνεργατικά. Σε αντίθετη περίπτωση, τα παιγνία είναι μη συνεργατικά.

- **Πλήρους ή ελλιπούς πληροφόρηση:** Όταν οι παίκτες έχουν πλήρη ενημέρωση για τις στρατηγικές που επιλέγουν οι ανταγωνιστές τους πριν από τους ίδιους, τότε συμμετέχουν σε ένα παιγνιο πλήρους πληροφόρησης. Σε αντίθετη περίπτωση, τα παιγνια χαρακτηρίζονται ελλιπούς πληροφόρησης.
- **Σταθερού ή μη σταθερού αθροίσματος:** Τα παιγνια στα οποία η απόδοση ενός παίκτη είναι ίση με την απώλεια των ανταγωνιστών του ονομάζονται παιγνια σταθερού αθροίσματος. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των παιγνίων είναι ότι το άθροισμα των αποδόσεων όλων των παικτών είναι ίσο με μηδέν, κάτι το οποίο αποτρέπει συνεργασίες μεταξύ παικτών. Σε διαφορετική περίπτωση, τα παιγνια αποκαλούνται μη σταθερού αθροίσματος
- **Πεπερασμένα ή μη πεπερασμένα:** Τα παιγνια στα οποία οι παίκτες αντλούν τις στρατηγικές τους από ένα πεπερασμένο σύνολο διαθέσιμων στρατηγικών ονομάζονται πεπερασμένα, ενώ τα παιγνια στα οποία οι διαθέσιμες στρατηγικές των παικτών είναι άπειρες ονομάζονται μη πεπερασμένα.
- **Μεικτής και Αγνής στρατηγικής:** Αν οι παίκτες ενός παιγνίου επιλέγουν τη στρατηγική τους ντετερμινιστικά, τότε το παιγνιο ονομάζεται αγνής στρατηγικής (pure strategy). Σε αντίθετη περίπτωση, αν η επιλογή της κάθε στρατηγικής είναι στοχαστική, τότε το παιγνιο ονομάζεται μεικτής στρατηγικής (mixed strategy).

Αν και η ΘΠ αποτελεί διεπιστημονικό επιστημονικό πεδίο, με προεκτάσεις τόσο σε θεωρητικές και ανθρωπιστικές επιστήμες όσο σε τεχνολογικές και θετικές, μολαταύτα χρησιμοποιεί μαθηματικές εκφράσεις για την επίσημη διατύπωση των ιδεών της. Τα μαθηματικά κάνουν εύκολο τον ακριβή ορισμό των εννοιών και την επαλήθευση της ορθότητας των ισχυρισμών.

Πιο επίσημα, λοιπόν, ένα παιγνιο $G(\mathcal{N}, \mathcal{S}, \mathcal{U})$ αποτελείται από ένα σύνολο n παικτών, $\mathcal{N} = [1, 2, \dots, n]$. Κάθε παίκτης i επιλέγει μια στρατηγική s_i από ένα σύνολο στρατηγικών \mathcal{S} , με $s_i \in \mathcal{S}$. Μια λύση ενός τέτοιου παιγνίου ορίζεται από ένα διάνυσμα $\mathbf{s} \in \mathcal{S}$, το οποίο προκύπτει από έναν συνδυασμό στρατηγικών επιλογών των παικτών. Κάθε παίκτης διαθέτει μια συνάρτηση ωφελείας $U_i \in \mathcal{U}$, η οποία αποδίδει την ωφέλεια $U_i(s_i)$ που απολαμβάνει ο χρήστη i , από τη στρατηγική επιλογή s_i .

Ακόμη, για μια λύση \mathbf{s} ορίζεται ως $\mathbf{s}_{-i} \subset \mathbf{s}$ το διάνυσμα των στρατηγικών που έχουν επιλέξει όλοι οι παίκτες πλην του παίκτη i και η συνάρτηση $P_i(s_i; s_{-i})$, η οποία εκφράζει την απόδοση της στρατηγικής s_i για τον παίκτη i , δηλαδή την ωφέλεια που απολαμβάνει ένας παίκτης, λαμβάνοντας υπόψιν τις στρατηγικές \mathbf{s}_{-i} των υπολοίπων παικτών.

Υπάρχουν διάφορες λύσεις για ένα παιγνιό, οι οποίες εξαρτώνται από τη μορφή και την πολυπλοκότητα του παιγνίου. Ως πιο ισχυρή λύση ορίζεται η κυρίαρχη στρατηγική λύση, η οποία αποτελείται από το σύνολο των κυρίαρχων στρατηγικών των παικτών [82].

Ορισμός 5.1. Μια στρατηγική s_i ονομάζεται κυρίαρχη επί του συνόλου των διαθέσιμων εναλλακτικών στρατηγικών $s_i^* \in S$, αν ισχύει η εξής σχέση:

$$P_i(s_i; \mathbf{s}_{-i}) \geq P_i(s_i^*; \mathbf{s}_{-i}) \quad (5.1)$$

Με άλλα λόγια, μια στρατηγική είναι κυρίαρχη, αν η ωφέλεια ενός παίκτη από αυτήν είναι η μέγιστη δυνατή, ανεξάρτητα από τις στρατηγικές που θα επιλέξουν οι υπόλοιποι παίκτες. Το σύνολο των παραπάνω στρατηγικών διαμορφώνει την κυρίαρχη στρατηγική λύση ενός παιγνίου:

Ορισμός 5.2. Μια λύση $\mathbf{s} \subset S$ αποτελεί κυρίαρχη στρατηγική λύση ενός παιγνίου, εάν για κάθε παίκτη i και για κάθε εναλλακτική λύση $\mathbf{s}' \in S$ ισχύει ότι:

$$P_i(s_i; \mathbf{s}'_{-i}) \geq P_i(s'_i; \mathbf{s}'_{-i}) \quad (5.2)$$

5.1.1 Η ισορροπία Nash

Αν και η κυρίαρχη λύση σε ένα πρόβλημα φαίνεται ιδανική, δεν είναι βέβαιη ούτε μπορεί να εξασφαλιστεί η ύπαρξή της. Γι' αυτό συνήθως αναζητείται η ύπαρξη λιγότερο αυστηρών λύσεων, οι οποίες να είναι εφαρμόσιμες σε περισσότερα προβλήματα. Ο John Nash πρότεινε το 1952 την Ισορροπία Nash (IN, Nash Equilibrium – NE), η οποία αποτελεί θεμελιώδης λύση στη ΘΠ και ορίζεται ως εξής:[83]

Ορισμός 5.3. Μια λύση \mathbf{s} αποτελεί ισορροπία Nash, όταν για όλους τους παίκτες i και για κάθε στρατηγική $s'_i \in S_i$ ισχύει ότι:

$$P_i(s_i; \mathbf{s}_{-i}) \geq P_i(s'_i; \mathbf{s}_{-i}) \quad (5.3)$$

Με άλλα λόγια, μια λύση αποκαλείται IN, όταν κανένας παίκτης i δεν έχει συμφέρον να αλλάξει τη στρατηγική του, και συνεπώς να βελτιώσει την ωφέλειά του, λαμβάνοντας υπόψιν τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Γίνεται κατανοητό ότι κάθε κυρίαρχη λύση αποτελεί IN χωρίς απαραίτητα να ισχύει το αντίστροφο.

Ο λόγος για τον οποίον θεωρείται τόσο σημαντική η λύση IN σε ένα παιγνιό είναι διότι περιγράφει μια κατάσταση στην οποία θα επιδιώξει να φτάσει κάθε παίκτης ενός παιγνίου που

σκέφτεται ορθολογικά, με βάση δηλαδή τη μεγιστοποίηση του προσωπικού του οφέλους, κριτήριο το οποίο κάνει την ίδια τη λύση αναμενόμενη και προβλέψιμη. Ακόμη, κρίσιμη ιδιότητα της IN είναι το γεγονός ότι αποτελεί εφικτός στόχος για κάθε πεπερασμένο παίγνιο μικτούς στρατηγικής [83]. Το ότι, δηλαδή, υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί μια ή περισσότερες IN σε κάθε πεπερασμένο παίγνιο, δίνει ουσιαστικά τη δυνατότητα σε κάποιον να προβλέψει με σχετικά μεγάλη αξιοπιστία την έκβαση ή τις πιθανές εκβάσεις αναρίθμητου πλήθος προβλημάτων που μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων.

5.1.2 Μελέτη περίπτωσης: Το δίλημμα του φυλακισμένου

Τα χαρακτηριστικά των παιγνίων μπορούν να γίνουν πιο κατανοητά στην πράξη με την παράθεση ενός παραδείγματος. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα παιγνίου που μπορεί να παρατεθεί είναι το γνωστό δίλημμα του φυλακισμένου (the prisoner's dilemma) [84]:

Το πρόβλημα Δυο κρατούμενοι είναι συνένοχοι και κατηγορούνται από τις δικαστικές αρχές με ελλιπή αποδεικτικά στοιχεία. Χωρίς την εύρεση των αποδεικτικών στοιχείων, ο κάθε κρατούμενος θα φυλακιστεί για 1 έτος, ενώ αν αποδειχθούν όλες οι κατηγορίες, η φυλάκιση θα οριστεί στα 4 έτη. Οι κατηγορούμενοι προφυλακίζονται σε χωριστά κελιά, χωρίς δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους, και καλούνται από τις δικαστικές αρχές να ομολογήσουν την ενοχή του συνεργάτη τους, με αντάλλαγμα τη μείωση της ποινής τους κατά ένα έτος. Ποια απόφαση θα πρέπει να λάβει ο κάθε φυλακισμένος;

Λύση Είναι σαφές ότι το πρόβλημα της λήψης απόφασης που αντιμετωπίζουν οι φυλακισμένοι είναι μια κατάσταση αντικρουόμενων συμφερόντων, στην οποία η απόφαση του ενός θα επηρεάσει την κατάληξη του άλλου. Συνεπώς, το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση τις αρχές της ΘΠ. Από την περιγραφή του προβλήματος προκύπτει, ότι οι παίκτες του παιγνίου είναι οι φυλακισμένοι, η απόφαση ομολογίας ή σιωπής είναι η στρατηγική του καθενός και οι ποινές σε έτη που προκύπτουν από τις επιλογές του καθενός διαμορφώνουν τη συνάρτηση απόδοσης. Σε μικρής έκτασης προβλήματα είναι χρήσιμη η κατασκευή πίνακα που απεικονίζει την απόδοση της κάθε στρατηγικής, ανάλογα με τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών.¹

Η λύση ισορροπίας του παιγνίου είναι αυτή στην οποία κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει την απόδοσή του αλλάζοντας στρατηγική, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο ανταγωνιστής του

¹Για πρακτικούς λόγους, στο συγκεκριμένο παίγνιο θεωρούμε ως μεγιστοποίηση της απόδοσης, την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Ο Β ομολογεί		Ο Β δεν ομολογεί
Ο Α ομολογεί	(3, 3)	(0, 4)
Ο Α δεν ομολογεί	(4, 0)	(1, 1)

Πίνακας 5.1: Ο πίνακας κόστους των φυλακισμένων

έχει κάνει τη βέλτιστη για τον ίδιο επιλογή και παραμένει αμετακίνητος σε αυτή. Από τα στοιχεία του πίνακα κόστους (cost matrix) 5.1 φαίνεται ότι η IN του παιγνίου είναι να ομολογήσουν και οι δύο, με κόστος (3, 3)². Σε αυτή τη λύση, ο Α δεν έχει συμφέρον να αλλάξει μονομερώς τη στρατηγική του, δεδομένου ότι ο Β επέλεξε να ομολογήσει και αφού το κόστος θα αυξανόταν από 3 σε 4, στην περίπτωση που ο ίδιος δεν ομολογούσε. Ταυτόχρονα, ούτε τον Β συμφέρει να αλλάξει μονομερώς τη στρατηγική του, αφού θα αυξάνονταν με τον ίδιο τρόπο το κόστος του. Επιλέγοντας οποιαδήποτε άλλη λύση, είναι εμφανές ότι ο κάθε παίκτης θα είχε κίνητρο να αλλάξει τη στρατηγική του και να βελτίωνε την απόδοσή του. Συνεπώς, η λύση (3, 3) είναι η μοναδική IN του παιγνίου. Ακόμη, παρατηρείται ότι η ίδια λύση είναι και λύση κυρίαρχης στρατηγικής, αφού ανεξάρτητα από τη στρατηγική επιλογή του αντιπάλου, συμφέρον του κάθε παίκτη είναι να ομολογήσει επειδή με αυτή τη στρατηγική παρατηρεί βελτίωση στην ωφέλειά του.

5.1.3 Η αναποτελεσματικότητα της ισορροπίας Nash

Η λύση του παιγνίου των φυλακισμένων υπολογίστηκε με το δεδομένο ότι οι παίκτες ήταν απομονωμένοι, δεν συνεργάζονταν και, συνεπώς, ο καθένας από αυτούς επέλεξε την κίνηση που μεγιστοποιεί το όφελός του, θεωρώντας ότι ο αντίπαλος δεν είναι αλτρουιστής. Ωστόσο, παρατηρώντας τον συσχετισμό των αποδόσεων στον πίνακα 5.1 διαπιστώνει κάποιος ότι η IN δεν είναι η βέλτιστη επιλογή και για τους δύο. Πιο συγκεκριμένα, αν οι φυλακισμένοι επέλεγαν αμοιβαία να μην ομολογήσουν, τότε το αθροιστικό κόστος και των δυο θα ήταν 2 χρόνια, ενώ στην περίπτωση της IN το αθροιστικό κόστος είναι 6 έτη φυλάκισης.

Από το παράδειγμα αυτό φαίνεται ότι η IN δεν εγγυάται το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα για τους παίκτες του παιγνίου, ενώ γίνεται σαφές ότι η εγωιστική συμπεριφορά των παικτών, ως αποτέλεσμα της απουσίας συνεννόησης ή εμπιστοσύνης μεταξύ τους, οδήγησε σε μείωση της ωφέλειάς τους, η οποία θα μπορούσε να είχε προκύψει αν και οι δύο παίκτες συμφωνούσαν σε μια πιο συμβιβαστική λύση.

²Ο συμβολισμός (a, b) αναπαριστά την απόδοση a του Α και b του Β από τις στρατηγικές που επέλεξαν.

Ο τρόπος με τον οποίον μετρήθηκε η αποτελεσματικότητα της λύσης που έφερε η ισορροπία ήταν με τον υπολογισμό της κοινωνικής ευημερίας (social welfare). Η κοινωνική ευημερία, ή απλά ευημερία, αποτελεί μια ένδειξη του πόσο ωφελήθηκε το σύνολο των παικτών από μια λύση και προκύπτει από το άθροισμα της ωφέλειας που απολαμβάνουν όλοι οι παίκτες [85].

Ορισμός 5.4. Για ένα παίγνιο $G(\mathcal{N}, \mathcal{S}, \mathcal{U})$, η κοινωνική ευημερία που προκύπτει από μια λύση s ορίζεται ως εξής:

$$W(s) = \sum_{i \in \mathcal{N}} U_i(s_i) \quad (5.4)$$

Η συνάρτηση με την οποία μετρήθηκε η αποτελεσματικότητα της λύσης ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Η ιδέα της αναποτελεσματικότητας των IN έχει συλληφθεί εδώ και αρκετά χρόνια [86], ωστόσο σχετικά πρόσφατα έχει προταθεί η Τιμή της Αναρχίας (TtA, Price of Anarchy – PoA) [87], η οποία δείχνει την αποτελεσματικότητα μιας λύσης IN που θεωρείται βέλτιστη, συγκρίνοντας το αποτέλεσμα της χειρότερης ισορροπίας με αυτό της ιδανικότερης. Το πόσο «καλή» ή «κακή» είναι μια ισορροπία εξαρτάται από την αντικειμενική συνάρτηση που έχει ορίσει κάποιος. Για την περίπτωση που η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ευημερία, η TtA ορίζεται ως εξής:

$$PoA = \frac{\max_s W(s)}{\min_s W(s)} \quad (5.5)$$

Μια εναλλακτική αντικειμενική συνάρτηση, παρόμοια στη σημασία της με αυτή της ευημερία, είναι το κοινωνικό κόστος (social cost), το οποίο μπορεί να οριστεί με τον ίδιο τρόπο όπως στη σχέση (5.4), με τη διαφορά ότι η απόδοση ισοδυναμεί με το κόστος μιας στρατηγικής επιλογής και στόχος είναι η μείωσή του. Συνεπώς, η TtA εκφράζεται από το λόγο του ελάχιστου δυνατού κόστους προς το μέγιστο δυνατό.

5.1.4 Ζητήματα υπολογισμού ισορροπίας Nash

Τα πραγματικά προβλήματα που καλείται να επιλύσει η ΘΠ αποτελούνται συνήθως από πολλούς παίκτες, καθένας εκ των οποίων διαθέτει πολλές ή αναρίθμητες στρατηγικές. Τέτοια μεγάλης έκτασης προβλήματα είναι απαραίτητο να προσομοιωθούν και να επιλυθούν με τη βοήθεια υπολογιστή, ο οποίος θα χρησιμοποιήσει κάποιον αλγόριθμο για την εύρεση της IN. Έχει υπάρξει θέμα ευρείας συζήτησης στην ερευνητική κοινότητα το αν υπάρχει αποδοτικός αλγόριθμος, ο οποίος να υπολογίζει IN για κάθε παίγνιο σε πολυωνυμικό χρόνο [88].

Για παιγνια με δυο παίκτες και μηδενικός άθροισμα, ο υπολογισμός μπορεί να γίνει αποδοτικά μέσω της κατάστρωσης και επίλυσης ενός δυϊκού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Για παιγνια μη-μηδενικού αθροίσματος μέχρι τριών παικτών, κρατώντας ως δεδομένη την απόδειξη του Nash ότι σε κάθε πεπερασμένο παιγνιο υπάρχει τουλάχιστον μια IN, έχει αποδειχθεί ότι η πολυπλοκότητα εύρεσης μιας IN είναι κλάσης PPAD, δηλαδή τόσο δύσκολη όσο ο υπολογισμός του σταθερού σημείου Brower [89].

Για πιο περίπλοκα παιγνια, η εύρεση αποδοτικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό ισορροπίας εξαρτάται από τη φύση και τα χαρακτηριστικά του παιγνίου. Για παράδειγμα, σε παιγνια εγωιστικής δρομολόγησης (selfish routing) έχει προταθεί η μέθοδος Nashification [90], στην οποία, δοθείσας μιας τυχαίας λύσης, είναι εφικτό με εγωιστικές μονομερείς κινήσεις καλύτερης απόκρισης (best-response) η τυχαία λύση να μετατραπεί σε IN, χωρίς μάλιστα να αυξηθεί το κοινωνικό κόστος. Ακόμη, για παιγνια εξισορρόπησης φόρτου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά έχει αποδειχθεί ότι ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού LPT (Longest Processing Time) αποδίδει λύση IN [91]. Αν και η θεωρητική πολυπλοκότητα υπολογισμού IN έχει οριστεί στη βιβλιογραφία, ο υπολογισμός της στην πράξη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος που μοντελοποιεί ένα παιγνιο.

5.2 Σχεδιασμός μηχανισμών και αγορές

Η ΘΠ είναι ικανή να προσομοιώσει τη συμπεριφορά ωφελιμιστικών ιδιωτών σε πολλά πλαίσια. Ένα από αυτά, με εφαρμογές και στον τομέα της πληροφορικής, είναι το πλαίσιο της αγοράς. Συγκεκριμένα, μέσω της θεωρίας του σχεδιασμού μηχανισμών, η οποία αποτελεί υποκλάδο των μικροοικονομικών και της ΘΠ, παρέχεται η δυνατότητα μελέτης και σχεδίασης μηχανισμών, οι οποίοι κατανέμουν αποδοτικά προϊόντα σε αγοραστές, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ωφέλειας για όλες τις πλευρές.

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται βασικές έννοιες που ορίζουν το πλαίσιο των αγορών, τους νόμους που αυτές διέπουν, καθώς και στις κατηγορίες που μπορούν να διακριθούν. Η κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου γύρω από τη λειτουργία των αγορών επιτρέπει την κατασκευή αποδοτικών μηχανισμών που μεγιστοποιούν τις ωφέλειες των οικονομικών οντοτήτων που συμμετέχουν αυτές.

5.2.1 Αγορές και θεωρία παιγνίων

Αγορά είναι ένα σύστημα, στο οποίο πραγματοποιείται αγοραπωλησία αγαθών και υπηρεσιών μέσω της αλληλεπίδρασης αγοραστών και πωλητών είτε απευθείας είτε μέσω αντιπροσώπων. Οι αγορές παρέχουν όλους εκείνους τους μηχανισμούς που επιτρέπουν (i) τον καθορισμό των τιμών διάθεσης αγαθών και υπηρεσιών (ii) την κοινοποίηση των τιμών στο αγοραστικό κοινό (iii) την παροχή κανονιστικού ή και νομικού πλαισίου για τη διεξαγωγή των συναλλαγών [92].

Ανάλογα με τον μηχανισμό που διαθέτει μια αγορά για τον καθορισμό των τιμών, η οικονομία της χαρακτηρίζεται ελεύθερη ή κεντρική. Στις ελεύθερες οικονομίες, οι τιμές καθορίζονται από την αλληλεπίδραση αγοραστών/πωλητών και τους νόμους προσφοράς και ζήτησης σε συνθήκες τέλειου ανταγωνισμού, ενώ στις κεντρικές οικονομίες οι τιμές καθορίζονται από κάποια κεντρική εξουσία [93].

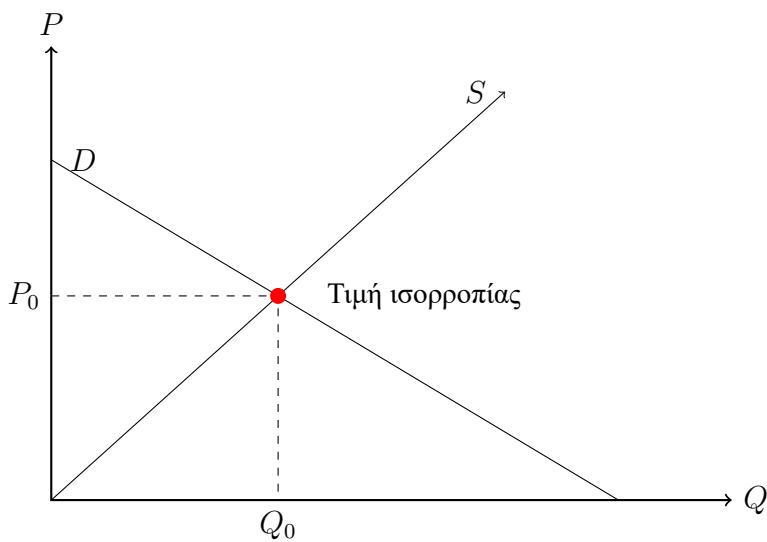
Στην περίπτωση της ελεύθερης αγοράς, ο καθορισμός των τιμών διάθεσης γίνεται από τους πωλητές, ενώ οι αγοραστές καταθέτουν προσφορές προς αυτούς για την απόκτηση των αγαθών. Εδώ είναι εμφανής μια σχέση αλληλοσυγκρουόμενων συμφερόντων: Οι πωλητές θέλουν να διαθέτουν τα προϊόντα τους σε όσο το δυνατόν υψηλότερη τιμή, ενώ οι αγοραστές να τα αποκτούν στη χαμηλότερη δυνατή τιμή. Κάποιος που θα ήθελε να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα αυτής της αγοράς θα ήθελε να βρει μια ισορροπία μεταξύ αυτών των συμφερόντων, στην οποία τόσο οι αγοραστές όσο και οι πωλητές να είναι κατά το μέγιστο ικανοποιημένοι, λαμβάνοντας υπόψιν το κατά πόσο η ωφέλεια της μιας πλευράς έρχεται σε σύγκρουση με αυτή της έτερης πλευράς.

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δεν είναι άλλη από τη μοντελοποίησή του με βάση τις αρχές της θεωρίας παιγνίων και την εύρεση της IN, η οποία θα ικανοποιήσει στο μέγιστο δυνατό όλους τους συμμετέχοντες. Ως πρώτο βήμα της μοντελοποίησης, λοιπόν, πρέπει να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του παιγνίου, δηλαδή οι παίκτες, οι στρατηγικές τους και οι συναρτήσεις ωφελείας που διαθέτουν. Οι παίκτες αποτελούνται από τους αγοραστές και τους πωλητές, με τους πρώτους να έχουν ως διαθέσιμη στρατηγική την προσφορά τους, δηλαδή πόσα χρήματα είναι διατεθειμένοι να καταβάλλουν για την απόκτηση ενός προϊόντος, και τους πωλητές να έχουν ως στρατηγική την τιμή διάθεσης των προϊόντων τους. Όσον αφορά τις συναρτήσεις ωφελείας των παικτών, αναμένεται ότι η ωφέλεια του αγοραστή είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής απόκτησης ενός προϊόντος, ενώ για τον πωλητή ισχύει το αντίστροφο. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η πλήρης μορφή της συνάρτησης ωφελείας δεν κοινοποιείται από κανέναν

παίκτη, διότι ο καθένας έχει συμφέρον να χειραγωγήσει τις τιμές διάθεσης προς το συμφέρον του.

5.2.2 Ισορροπία στις αγορές

Όσο και αν φαίνεται περίπλοκη η εύρεση της ισορροπίας ενός παιγνίου αγοράς, από τη θεωρία της μικροοικονομίας προκύπτει ότι σε κάθε οικονομία ελεύθερου ανταγωνισμού, στην οποία τα μέλη της δρουν με βάση το ηθικό κανονιστικό πλαίσιο της ωφελιμότητας, οι τιμές διάθεσης τείνουν να προσεγγίζουν το σημείο κατά το οποίο η προσφορά γίνεται ίση με τη ζήτηση [94].



Σχήμα 5.1: Η τιμή ισορροπίας μιας αγοράς

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται το σημείο στο οποίο επιτυγχάνεται η ισορροπία. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας P αναπαριστά την εξέλιξη της τιμής διάθεσης, ο Q την ποσότητα των προϊόντων που πωλούνται, η γραμμή S την προσφορά από τους πωλητές και η D τις απαιτήσεις από τους αγοραστές [92].

Είναι προφανές ότι σε συνθήκες που η ζήτηση D για προϊόντα είναι υψηλή, ενώ η προσφορά προϊόντων S χαμηλή, η τιμή διάθεσης P είναι υψηλή λόγω μεγάλου ανταγωνισμού μεταξύ των αγοραστών για τα λίγα προϊόντα που διατίθενται. Αντίθετα, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και η προσφορά για προϊόντα υψηλή, τότε η τιμή διάθεσης μειώνεται, κάτι το οποίο σημαίνει πως ο ανταγωνισμός μεταφέρεται μεταξύ των πωλητών, για την πώληση προϊόντων στους λίγους αγοραστές.

Στις δυο ακραίες περιπτώσεις που αναφέρθησαν δεν μπορεί να υπάρξει κάποια ισορροπία διότι θα υπάρχει το συμφέρον είτε, από την πλευρά των αγοραστών, να αυξήσουν τις προσφορές

τους είτε, από την πλευρά των πωλητών, να αυξήσουν τις τιμές διάθεσης, μειώνοντας η μια πλευρά την ωφέλεια της άλλης. Το σημείο στο οποίο και οι δύο πλευρές είναι ικανοποιημένες βρίσκεται εκεί που η προσφορά είναι ίση με τη ζήτηση. Σε αυτό το σημείο, η τιμή διάθεσης έχει καθοριστεί σε τέτοιο μέγεθος ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι ανάγκες της αγοράς, αφού όλα τα διαθέσιμα προϊόντα καταναλώνονται από τους αγοραστές.

Ο στόχος των παγνίων που μοντελοποιούν συστήματα αγορών είναι η εύρεση της τιμής ισορροπίας (equilibrium price), ώστε να «εκκαθαρίζεται» η αγορά από παίκτες, με τις ανάγκες των αγοραστών και των πωλητών ικανοποιημένες. Η ισορροπία σε μια αγορά οδηγεί σε μια αποδοτική κατά Παρέτο (Pareto efficient) κατανομή των προϊόντων της αγοράς, κατά την οποία δεν είναι δυνατή η ανακατανομή με σκοπό τη βελτίωση της ωφέλειας κάποιου αγοραστή, χωρίς να χειροτερεύσει η ωφέλεια κάποιου άλλου. Κατά συνέπεια, μια κατά Παρέτο βέλτιστη κίνηση ανακατανομής πόρων χαρακτηρίζεται εκείνη η ενέργεια που βελτιώνει την ωφέλεια κάποιου αγοραστή, χωρίς να μειώνεται η ωφέλεια κάποιου άλλου [95], [96].

Είδη ισορροπίας στις αγορές

Η ισορροπία που περιγράφηκε με το σχήμα 5.1 προϋποθέτει συνθήκες τέλειου ανταγωνισμού και γι' αυτό ονομάζεται ανταγωνιστική ισορροπία (competitive equilibrium). Ο συμμετέχων σε μια αγορά υπό αυτές τις συνθήκες ονομάζεται λήπτης τιμής (price taker), διότι αποδέχεται τις τιμές συναλλαγών που διαμορφώνονται από την ελεύθερη αγορά, διότι δεν έχει την ικανότητα να παρέμβει στη διαμόρφωσή τους, χειραγωγώντας τες προς το συμφέρον του. Τα χαρακτηριστικά και τις προϋποθέσεις για μια τέλεια αγορά περιγράφουν τόσο το πρώτο θεμελιώδες θεώρημα των οικονομικών της ευημερίας (fundamental theorem of welfare economics), όσο και η θεωρία του αόρατου χεριού (invisible hand) του Adam Smith, σύμφωνα με τα οποία κάθε αγορά τείνει σε μια αποδοτική κατά Παρέτο ανταγωνιστική ισορροπία, όταν ισχύουν τα εξής [97], [98]:

- (i) η αγορά είναι πλήρης, δηλαδή δεν ορίζεται κόστος για μια συναλλαγή, υπάρχει τέλεια πληροφόρηση και ορίζεται τιμή για κάθε προϊόν προς πώληση,
- (ii) οι συμμετέχοντες είναι λήπτες τιμής,
- (iii) για κάθε προϊόν υπάρχει κάποιο άλλο, το οποίο ο καταναλωτής προτιμά περισσότερο (local nonsatiation).

Σε αγορές που δεν ισχύουν οι κανόνες τις ελεύθερης αγοράς, και συγκεκριμένα σε συνθήκες μονοπωλίου, οι τιμές δεν διαμορφώνονται ελεύθερα, λόγω του γεγονότος ότι ο πωλητής έχει

τη δυνατότητα να χειραγωγήσει ακόμη και να ορίσει ο ίδιος τις τιμές διάθεσης των προϊόντων, αφού βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση επειδή η ζήτηση υπερέχει της προσφοράς. Γι' αυτό το λόγο ο πωλητής που συμμετέχει σε μια τέτοια αγορά ονομάζεται διαμορφωτής τιμής (price maker). [99], [100].

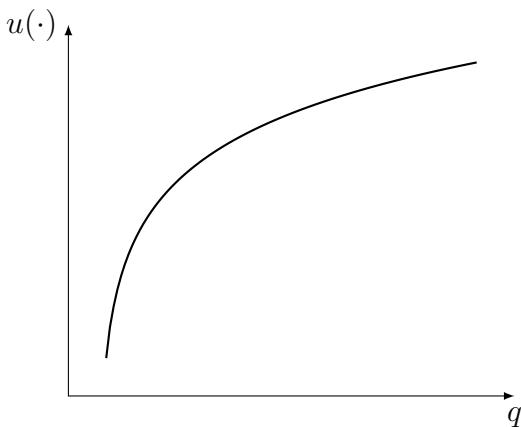
Χαρακτηριστικό στοιχείο μιας μονοπωλιακής αγοράς είναι ότι ο ανταγωνισμός μεταφέρεται από το δίπολο πωλητή/αγοραστή προς τους αγοραστές, οι οποίοι ανταγωνίζονται για την απόκτηση σπάνιων προϊόντων, ή ακόμη και ενός προϊόντος. Παρόλο που μια κατάσταση μονοπωλίου δεν είναι γενικώς θεμιτή, αφού ο πωλητής έχει ισχυρό πλεονέκτημα έναντι των αγοραστών, είναι δυνατή και σε αυτή την περίπτωση η εύρεση μιας ισορροπίας μεταξύ των ανταγωνιστών, δηλαδή τους αγοραστές. Η ισορροπία αυτή αποκαλείται ισορροπία Nash (IN), σε αντιδιαστολή με την ανταγωνιστική ισορροπία, η οποία παρουσιάζεται σε μια αγορά τέλειου ανταγωνισμού [101]. Προφανώς, από τη λύση ισορροπίας Nash συνεπάγεται η κατά Παρέτο βελτιστότητα της λύσης αυτής λόγω του ορισμού 5.3 της IN.

Διαδικασία υπολογισμού ισορροπίας

Ο λόγος για τον οποίο επιδιώκει κάποιος την ισορροπία σε μια αγορά είναι η μεγιστοποίηση της ωφέλειας του συνόλου των ανταγωνιστών, δηλαδή της κοινωνικής ωφέλειας. Ανεξάρτητα από το είδος της ισορροπίας (ανταγωνιστική ή κατά Nash) το πρόβλημα αυτό μπορεί να προσεγγιστεί με ενιαίο τρόπο: την κατάστρωση και επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, με αντικειμενική συνάρτηση την κοινωνική ευημερία και αποτέλεσμα μια κατανομή αγαθών, η οποία θα ικανοποιεί πλήρως ή κατά το βέλτιστο δυνατό τους συμμετέχοντες.

Για να λυθεί ένα τέτοιο πρόβλημα από κάποια κεντρική οντότητα, θα πρέπει αυτή να γνωρίζει τις συναρτήσεις ωφελείας των συμμετεχόντων στην αγορά. Η μορφή τους μπορεί να προκύψει από την ηθική θεωρία της ωφελιμότητας, πάνω στην οποία βασίζεται η ΘΠ και τη συμπεριφορά των ιδιωτών σε μια αγορά.

Στο σχήμα 5.2 απεικονίζεται μια πιθανή μορφή της συνάρτησης ωφελείας για τους αγοραστές, με τον άξονα Q να αναπαριστά την ποσότητα από ένα προϊόν που καταναλώνει ένας αγοραστής και τον άξονα u την αντίστοιχη ωφέλεια που λαμβάνει. Βασικό χαρακτηριστικό της συνάρτησης είναι η λογαριθμική της μορφή, ιδιότητα που την καθιστά κατάλληλη για τις περισσότερες περιπτώσεις, αφού η συνολική ωφέλεια αυξάνεται με χαμηλότερο ρυθμό για κάθε επιπλέον αύξηση της ποσότητας που καταναλώνεται. Αυτό αποτελεί βασική αρχή της θεωρίας της ωφελιμότητας των καταναλωτών, από την οποία προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός αύξησης της ωφε-



Σχήμα 5.2: Η γενική μορφή της συνάρτησης ωφελείας των αγοραστών.

λιμότητας μειώνεται για οριακή αύξηση μιας ήδη υψηλής ποσότητας καταναλωμένων αγαθών. Με άλλα λόγια, είναι εφικτή η προσέγγιση ικανοποιητικά υψηλής ωφελιμότητας, χωρίς αντίστοιχη υψηλή αύξηση της ποσότητας των καταναλωμένων αγαθών. Η ιδέα αυτή εντάσσεται στη γενικότερη έννοια της οριακής ωφελιμότητας (marginal utility) [100], [102], [103].

Με τον καθορισμό της μορφής της συνάρτησης ωφελιμότητας, η οποία είναι λογαριθμικά κούλη (log-concave), διαπιστώνεται πως το πρόβλημα που καλείται κάποιος να λύσει είναι αυτό της κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization). Για την ακρίβεια, η συνάρτηση ωφελείας δεν είναι κυρτή, ωστόσο το πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας κούλης συνάρτησης f στην κυρτή βελτιστοποίηση μπορεί να αντιμετωπιστεί ισοδύναμα ως πρόβλημα μεγιστοποίησης αυτής της συνάρτησης f ή ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης της $-f$. Υπάρχει ένα πλήθος από μεθόδους που επιλύουν προβλήματα τέτοιου είδους, όπως οι πολλαπλασιαστές Lagrange, η τμηματικά γραμμική προσέγγιση και οι μέθοδοι εσωτερικών σημείων. Η επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού εργαλείου εξαρτάται από τη μορφή του προβλήματος βελτιστοποίησης που καλείται κάποιος να λύσει [91], [100], [104], [105].

5.3 Η Τραγωδία των Κοινών

Η λειτουργία των αγορών και η δυνατότητά τους να έρθουν σε ισορροπία έχει δεχθεί πληθώρα αναλύσεων και κριτικών τόσο από οικονομολόγους όσο και φιλοσόφους της πολιτικής και οικονομικής επιστήμης. Μια από αυτές έγινε το 1968 από τον φιλόσοφο Garrett Hardin, όταν δημοσίευσε το άρθρο «The Tragedy of the Commons» (Η Τραγωδία των Κοινών) στο περιοδικό Science [106]. Με αφορμή το ζήτημα του υπερπληθυσμού, ο συγγραφέας εξέτασε τις επιπτώσεις της υπερεκμετάλλευσης κοινών πόρων από ιδιώτες. Το πρόβλημα, που αναδεικνύει

η Τραγωδία των Κοινών (ΤτΚ), γίνεται εμφανές σε μια αγορά μονοπωλίου, όταν η ζήτηση για έναν κοινό πόρο υπερβαίνει την προσφορά. Σε αυτή την περίπτωση, η επιθυμία των ιδιωτών να αυξήσουν την ωφέλειά τους εκμεταλλευόμενοι τον κοινό πόρο μπορεί να οδηγήσει σε εξάντλησή του, κάτι που έχει σημαντικές επιπτώσεις για όλους τους ιδιώτες [106].

Κλασικό παράδειγμα για την κατανόηση της ΤτΚ είναι αυτό της υπερβόσκησης. Ένας αριθμός κτηνοτρόφων έχει πρόσβαση σε ένα κοινό λιβάδι, με τον καθέναν από αυτούς να έχει τη δυνατότητα να φέρνει σε αυτό όσα περισσότερα ζώα μπορεί, ώστε να αυξήσει το κέρδος του από την εκτροφή τους. Κανένας από αυτούς δεν έχει δικαίωμα να συστήσει στον άλλο να εγκαταλείψει το λιβάδι και ο καθένας από αυτούς προσηλώνεται στη φροντίδα του δικού του κοπαδιού. Η εγωιστική συμπεριφορά που διαθέτουν και το ανταγωνιστικό κλίμα που επικρατεί δεν τους επιτρέπουν να διαπιστώσουν έγκαιρα ότι το λιβάδι υποφέρει από υπερεκμετάλλευση και δεν μπορεί να συντηρήσει τα κοπάδια τους, κάτι το οπόιο οδηγεί στην καταστροφή του με δυσάρεστες συνέπειες για όλους τους κτηνοτρόφους. Ο λόγος για τον οποίο κανένας από τους αυτούς δεν αντιλαμβάνεται τις επιπτώσεις της υπερεκμετάλλευση είναι, διότι η μείωση της ωφέλειας που προκαλείται επιμερίζεται το ίδιο σε όλους τους κτηνοτρόφους, με αποτέλεσμα κανένας να μην αντιλαμβάνεται τη διαφορά στην ωφέλεια, αφού συγκρινόμενος με τους υπόλοιπους, οι διαφορές στην ωφέλεια παραμένουν οι ίδιες.

Ο Hardin πρότεινε δυο λύσεις για τον περιορισμό του προβλήματος της υπερεκμετάλλευσης: την ιδιωτικοποίηση πόρων και την επιβολή φόρων ή κυρώσεων από κάποια αρχή. Η λύση της ιδιωτικοποίησης προβλέπει την τμηματοποίηση του κοινού πόρου και παραχώρησή τους σε ιδιώτες, με απότερο σκοπό ο καθένας να εφαρμόζει λελογισμένη χρήση πόρων που του ανήκουν αποκλειστικά. Ωστόσο η λύση αυτή δεν είναι εφαρμόσιμη για όλους τους πόρους, όπως η ατμόσφαιρα. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν η επιβολή κυρώσεων ή ο καθορισμός των τιμών διάθεσης των πόρων από μια ανώτερη ή διαχειριστική αρχή, ώστε το συμφέρον (άρα και η ωφέλεια) του κάθε ιδιώτη να προσαρμοστεί αναλόγως και να μειωθεί η τάση του για υπερεκμετάλλευση [106].

Ο μηχανισμός κατανομής πόρων που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία και παρουσιάζεται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο εδράζεται στη θεωρία της ΤτΚ και καλείται να αντιμετωπίσει το πρόβλημα υπερεκμετάλλευσης εύρους ζώνης από τους χρήστες ενός XG-PON.

*I think perfect objectivity is an unrealistic goal;
fairness, however, is not.*

Michael Pollan, Αμερικάνος συγγραφέας

6

Προτεινόμενο Σχήμα Δυναμικής Κατανομής Εύρους Ζώνης στα XG-PON

Η βιβλιογραφική επισκόπηση της ενότητας [1.1] για σχήματα ΔΚΕΖ έδειξε πως υπάρχει ένα πλήθος σχετικών σχημάτων στα XG-PON, τα οποία εμφανίζουν εξαιρετικές επιδόσεις, όντας ικανά να εξυπηρετήσουν τους χρήστες των δικτύων μοιράζοντας δίκαια το εύρος ζώνης, μειώνοντας τις καθυστερήσεις που βιώνει κάθε χρήστης και αυξάνοντας τη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Ωστόσο, οι προσομοιώσεις που έχουν εκτελεστεί για τα σχήματα αυτά δεν έχουν δοκιμαστεί επαρκώς υπό συνθήκες υψηλού φόρτου, και πιο συγκεκριμένα, όταν οι απαιτήσεις των χρηστών υπερβαίνουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε αυτή την περίπτωση, τα σχήματα δεν φαίνεται να είναι ικανά να εξασφαλίσουν τη μέγιστη δυνατή δικαιοσύνη ως προς την πρόσβαση στους πόρους του δικτύου.

Σε μια τέτοια κατάσταση κορεσμού, αυτό που φαντάζει ως ιδανικός στόχος είναι, δεδομένου ότι οι πόροι δεν επαρκούν για όλους, ο καθένας να λάβει όσο περισσότερο εύρος ζώνης γίνεται, με τέτοιο τρόπο ώστε όλοι να είναι το ίδιο ικανοποιημένοι. Με βάση τη θεωρία της ΓτΚ, προτείνεται ως λύση αυτού του προβλήματος ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού αγοράς και ενός παιγνίου, το οποίο μοντελοποιεί τη ζήτηση εύρους ζώνης από χρήστες ενός δικτύου XG-PON. Η επίλυση του παιγνίου, δηλαδή η εύρεση της IN, οδηγεί στην υλοποίηση του Σχήματος Αναλογικής Κατανομής Πόρων (ΣΑΚΠ, Proportional Allocation Scheme – PAS), το οποίο εγγυάται τη δίκαιη παροχή εύρους ζώνης υπό οποιεσδήποτε συνθήκες φόρτου.

Η δομή του παρόντος κεφαλαίου διαμορφώνεται ως εξής: Αρχικά, παρουσιάζεται η κατά-

στρωση και επίλυση του παιγνίου, μέσω του σχεδιασμού κατάλληλου μοντέλου αγοράς. Στη συνέχεια, παρατίθεται ο ψευδοκώδικας του **ΣΑΚΠ**, το οποίο προκύπτει από τη λύση του παιγνίου, καθώς και τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις που δείχνουν τη συμπεριφορά βασικών μετρικών δικτύου υπό συνθήκες υψηλού φόρτου. Τέλος, τα αποτελέσματα συνοδεύονται από ένα αριθμητικό παράδειγμα που δείχνει τη λειτουργία του δικτύου **XG-PON** και του προσομοιωτή υπό συνθήκες κανονικού φόρτου.

6.1 Ο Μηχανισμός Αναλογικής Κατανομής Πόρων

Ένα από τα κρισιμότερα προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν σε ένα **XG-PON** είναι η απαίτηση των **Alloc-ID** σε εύρος ζώνης να υπερβεί το διαθέσιμο. Με δεδομένο το ότι δεν είναι δυνατή η άμεση επέκταση των δυνατοτήτων του δικτύου και οι χρήστες αυτού δεν αντιλαμβάνονται, ούτε τους ενδιαφέρει, ότι η αυξημένη ζήτηση οδηγεί σε κατάρρευση του δικτύου, θα πρέπει ο διαχειριστής να βελτιστοποιήσει την κατανομή των υπαρχόντων πόρων ώστε η απόδοση του δικτύου να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη.

Το πρόβλημα της κατανομής πόρων έχει πολλές ομοιότητες με την κατάσταση που παρουσιάζεται στην **ΤτΚ**. Το εύρος ζώνης ανόδου είναι ένας κοινός πόρος, διαθέσιμος προς πολλούς καταναλωτές (**Alloc-ID**), καθένας εξ αυτών δικαιούται να ζητήσει όσο εύρος ζώνης επιθυμεί. Έτσι, κάθε **Alloc-ID** δύναται να συμπεριφερθεί εγωιστικά, προσπαθώντας να μονοπωλήσει τη διαδικασία ανάθεσης πόρων. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων έχει ως συνέπεια τη μη δυνατότητα εξυπηρέτησης των **Alloc-ID**, ως αποτέλεσμα της εξάντλησης του κοινού πόρου. Για το πρόβλημα της υπερεκμετάλλευσης, ο Hardin πρότεινε τις λύσεις της ιδιωτικοποίησης και επιβολής φόρων ή κυρώσεων με σκοπό τον μετριασμό των απαιτήσεων και τη μη κατάρρευση της αγοράς. Εξετάζοντας την εφαρμογή αυτών των λύσεων στο πρόβλημα υπερεκμετάλλευσης του κοινού πόρου από τα **Alloc-ID**, η «ιδιωτικοποίηση», δηλαδή η στατική απόδοση τμήματος του εύρους ζώνης σε κάθε **Alloc-ID** για την ικανοποίηση των αναγκών του, δεν ανταποκρίνεται στο κριτήριο της δυναμικότητας που πρέπει να χαρακτηρίζει ένα δίκτυο νέας γενιάς.

Η εναλλακτική λύση της επιβολής κυρώσεων ή φόρων που πρότεινε ο Hardin είναι εφικτή με την κατασκευή ενός μηχανισμού αγοράς, στον οποίον η τιμή διάθεσης των προϊόντων επηρεάζεται από τις προσφορές των αγοραστών που συμμετέχουν σε αυτήν. Βέβαια, οι χρήστες του δικτύου **XG-PON** δεν υφίστανται κάποια πραγματική χρέωση σε νομισματικές μονάδες για τη χρήση του δικτύου, ωστόσο, η εικονική χρέωση του μηχανισμού μπορεί να αναπροσαρμόσει

την ωφέλεια που απολαμβάνει ένα Alloc-ID και, τελικά, το αποδιδόμενο εύρος ζώνης.

6.1.1 Ορισμός και επίλυση του παιγνίου

Η αγορά του μηχανισμού αποτελείται από τα Alloc-ID (αγοραστές) που ζητούν εύρος ζώνης μέσω των πεδίων DBRu των ριπών ανόδου XGTC, το ΤΟΓ (πωλητής) που αναδιανέμει το εύρος ζώνης στα Alloc-ID και το προϊόν που αυτό διαθέτει, το εύρος ζώνης του ανοδικού καναλιού. Δεδομένου ότι το ΤΟΓ είναι μοναδικό σε ένα ΠΟΔ και σε μια δεδομένη στιγμή η προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση, η αγορά χαρακτηρίζεται μονοπωλιακή και το ΤΟΓ διαμορφωτής τιμής.

Με όρους θεωρίας παιγνίων, το παίγνιο που προκύπτει αποτελείται από το σύνολο \mathcal{N} των παικτών, οι οποίοι είναι τα Alloc-ID που επιθυμούν να μοιραστούν το εύρος ζώνης $C > 0$ κάθε 125 μsec. Στρατηγική κάθε παίκτη είναι το εύρος ζώνης που ζητά (s_i) και a_i η ανάθεση που προκύπτει για τον παίκτη i έπειτα από την εκτέλεση της διαδικασίας ΔΚΕΖ.

Η ισορροπία του παιγνίου εξαρτάται από τη μορφή της συνάρτησης ωφελείας. Από τη στιγμή που η ωφέλεια κάθε παίκτη προσδιορίζεται από την ποσότητα a_i που του αποδίδεται, χρειάζεται μια συνάρτηση που να περιγράφει επαρκώς τη σχέση αυτή. Η συνάρτηση ωφελείας U_i μπορεί να οριστεί με βάση τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της ελαστικής κίνησης (elastic traffic) ως εξής [103]:

Ορισμός 6.1. Η U_i είναι κοίλη, γνησίως αύξουσα και συνεχής $\forall i \in \mathcal{N} : a_i \geq 0$. Για $a_i > 0$ η συνάρτηση είναι συνεχώς διαφορίσμη και $U'_i(a_i)|_{a_i=0} \neq \infty$. Έστω \mathcal{U} το σύνολο όλων των πιθανών συναρτήσεων που ικανοποιεί τον ορισμό.

Όπως είναι φυσικό, ο διαχειριστής του δικτύου που πραγματοποιεί την ανάθεση των πόρων, δηλαδή το ΤΟΓ, επιδιώκει τη μέγιστη δυνατή ικανοποίηση των παικτών. Με άλλα λόγια, επιδιώκει την επίλυση του εξής προβλήματος βελτιστοποίησης (στο εξής Σύστημα) [107]:

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && \sum_i U_i(a_i) \\ & \text{subject to} && \sum_i a_i \leq C \\ & && a_i \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ταυτίζεται με τον ορισμό 5.4 της κοινωνικής ευημερίας του προηγούμενου κεφαλαίου. Επίσης, είναι σαφές ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό, λόγω της μορφής της συνάρτησης ωφελείας στον ορισμό 6.1. Από τη θεωρία

της κυρτής βελτιστοποίησης προκύπτει ότι, αφού η αντικειμενική συνάρτηση είναι συνεχής και η εφικτή περιοχή συμπαγής, υπάρχει βέλτιστη λύση της μορφής $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_i)$. Επίσης, αφού οι συναρτήσεις U_i είναι αυστηρώς κούλες, τότε η βέλτιστη λύση είναι μοναδική [108].

Με δεδομένο ότι η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά, ο διαχειριστής θέλει να ορίσει την τιμή διάθεσης μ , ώστε να «εκκαθαρίσει» την αγορά εξισώνοντας την προσφορά με τη ζήτηση, δηλαδή: $\sum_i a_i = C$. Επίσης, ο διαχειριστής επιβάλλει την ίδια χρέωση ώστε $a_i = s_i/\mu$. Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω σχέσεις προκύπτει $\sum_i a_i = C \Leftrightarrow \sum_i s_i/\mu = C$ και τελικά:

$$\mu = \frac{\sum_i s_i}{C} \quad (6.2)$$

Υποθέτοντας ότι οι παίκτες είναι price anticipators, δηλαδή αντιλαμβάνονται την επίδραση της στρατηγικής τους στη διαμόρφωση των τιμών, καθώς και θεωρώντας ότι η ωφέλεια κάθε παίκτη εξαρτάται από το πόσο χρεώνεται από την ποσότητα a_i που του ανατίθεται, αντικαθιστώντας την τιμή μ , η συνάρτηση απόδοσης του παιγνίου λαμβάνει την εξής μορφή [109]:

$$P_i(s_i; \mathbf{s}_{-i}) = \begin{cases} U_i\left(\frac{s_i}{\sum_j s_j}C\right) - s_i, & \text{αν } s_i > 0 \\ U_i(0), & \text{αν } s_i = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

Η δεύτερη συνθήκη της σχέσης (6.3) είναι αναγκαία, έτσι ώστε να αποφευχθεί η απροσδιοριστία 0/0, άρα και η ασυνέχεια, όταν ταυτόχρονα ισχύει $s_i = 0$ και όλοι οι άλλοι παίκτες έχουν διαλέξει τέτοια \mathbf{s}_{-i} έτσι ώστε $\sum_{j \neq i} s_j = 0$. Είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι η συνάρτηση απόδοσης είναι συνεχής και διαφορίσιμη σε όλο το πεδίο ορισμού της, ώστε να υπάρχει λύση IN. Από τον συνδυασμό του γενικού ορισμού 5.3 της IN και τη σχέση (6.3) της συνάρτησης απόδοσης, προκύπτει ο ορισμός της IN για το παίγνιο:

Ορισμός 6.2. Η ισορροπία Nash του παιγνίου που ορίζεται από τις αποδόσεις $(P_1, \dots, P_{|\mathcal{N}|})$ είναι ένα διάνυσμα $\mathbf{s} \geq 0 : \forall i \in \mathcal{N} \text{ ισχύει:}$

$$P_i(s_i; \mathbf{s}_{-i}) \geq P_i(s'_i; \mathbf{s}_{-i}), \quad \forall s'_i \geq 0 \quad (6.4)$$

Έχοντας ορίσει τη μορφή του παιγνίου είναι δυνατός ο πλήρης ορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης, το οποίο αποδίδει τη μοναδική λύση IN (στο εξής Παίγνιο). Το πρόβλημα ταυτίζεται με τον ορισμό του Συστήματος (6.1), με τη μόνη διαφορά ότι στο Παίγνιο έχει τροποποιηθεί κατάλληλα η συνάρτηση ωφέλειας, ώστε να λαμβάνεται υπόψιν το γεγονός ότι οι

παίκτες του παιγνίου αναμένουν την επίδραση της στρατηγικής τους στην τελική διαμόρφωση των τιμών διάθεσης [110]:

Θεώρημα 6.1. Εστω $|\mathcal{N}| > 1$. Τότε υπάρχει μια μοναδική ισορροπία Nash $\mathbf{s} \geq 0$ του παιγνίου, οριζόμενο από τις αποδόσεις $(P_1, \dots, P_{|\mathcal{N}|})$ που ικανοποιεί τη σχέση $\sum_i s_i > 0$. Σε αντί ην περίπτωση, το διάνυσμα \mathbf{a} οριζόμενο ως:

$$a_i = \frac{s_i}{\sum_j s_j} C, \quad i \in \mathcal{N} \quad (6.5)$$

είναι η μοναδική βέλτιστη λύση του παρακάτω προβλήματος βελτιστοποίησης (Παιγνιο):

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_i \hat{U}_i(a_i) \\ & \text{subject to} \quad \sum_i a_i \leq C \\ & \quad a_i \geq 0, \quad i \in \mathcal{N}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

όπου

$$\hat{U}_i(a_i) = \left(1 - \frac{a_i}{C}\right) U_i(a_i) + \left(\frac{a_i}{C}\right) \left(\frac{1}{a_i} \int_0^{a_i} U_i(z) dz\right) \quad (6.7)$$

ΑΠΟΔΕΙΞΗ [109]. Με δεδομένο ότι $s_i > 0$, $\forall i \in \mathcal{N}$ και το διάνυσμα \mathbf{s} έχει τουλάχιστον δυο θετικά στοιχεία, το \mathbf{s} είναι IN, αν και μόνο αν ισχύουν οι εξής συνθήκες:

$$U'_i \left(\frac{s_i}{\sum_j s_j} C \right) \left(1 - \frac{s_i}{\sum_j s_j} \right) = \frac{\sum_j s_j}{C}, \quad \text{av } s_i > 0; \quad (6.8)$$

$$U'_i(0) \leq \frac{\sum_j s_j}{C}, \quad \text{av } s_i = 0. \quad (6.9)$$

Αντικαθιστώντας $\rho = \sum_j s_j / C$ και $a_i = s_i / \rho$, οι σχέσεις (6.8) και (6.9) μπορούν να επαναδιατυπωθούν ως εξής:

$$U'_i(a_i) = \rho, \quad \text{av } a_i > 0; \quad (6.10)$$

$$U'_i(0) \leq \rho, \quad \text{av } a_i = 0; \quad (6.11)$$

$$\sum_i a_i = C. \quad (6.12)$$

Αφού οι συναρτήσεις $\hat{U}_i(a_i)$ είναι αυστηρώς κοίλες και συνεχείς στο διάστημα $[0, \dots, C]$, οι συνθήκες (6.10) έως (6.12) είναι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για το παιγνιο.

Καταλήγοντας, το διάνυσμα s είναι [N] αν και μόνο αν $\sum_j s_j > 0$ και η κατανομή a λύνει το Παίγνιο με πολλαπλασιαστή Lagrange $\rho = \sum_j s_j/C$. Η λύση είναι μοναδική, αφού το Παίγνιο έχει μια γνησίως κούλη και συνεχής αντικειμενική συνάρτηση, τη $\hat{U}_i(a_i)$, σε μια συμπαγής εφικτή περιοχή, κάτι που σημαίνει ότι έχει μια μοναδική βέλτιστη λύση, άρα και μοναδική λύση ισορροπίας Nash [108]. \square

Η κατάλληλη επεξεργασία των σχέσεων (6.10) έως (6.10) οδηγεί στη διατύπωση του εξής λήμματος, το οποίο χρησιμεύει για τον υπολογισμό του ΤτA του παιγνίου [100]:

Λήμμα 6.1. Έστω $N > 1$ και s η μοναδική ισορροπία Nash του παιγνίου που ορίζεται από τις αποδόσεις (P_1, \dots, P_n) . Επίσης, ορίζεται το \mathbf{a} σύμφωνα με τη σχέση (6.5). Τότε, $\forall \bar{\mathbf{a}} \geq 0 : \sum_i \bar{a}_i \leq C$:

$$\sum_i \hat{U}'_i(a_i)(\bar{a}_i - a_i) \leq 0 \quad (6.13)$$

ΑΠΟΛΕΙΞΗ. Ο ορισμός προκύπτει από τις σχέσεις (6.10) έως (6.10), οι οποίες αποτελούν τις βέλτιστες συνθήκες για το Παίγνιο. \square

6.1.2 Υπολογισμός του Τιμήματος της Αναρχίας

Η λύση του Παιγνίου εξασφάλισε την ανάθεση πόρων με τέτοιον τρόπο, ώστε να μεγιστοποιείται η **κοινωνική ευημερία** των παικτών στην αγορά. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι παίκτες με την εγωιστική τους συμπεριφορά εξαντλούν τους διαθέσιμους πόρους και οδηγούν τον διαχειριστή πόρων στην αναπροσαρμογή της τιμής διάθεσης για κάθε παίκτη, οδηγεί σε μείωση της **κοινωνικής ευημερίας**, συγκρίνοντας την ιδανική περίπτωση κατά την οποία η τιμή διάθεσης θα διαμορφώνονταν ελεύθερα από τους κανόνες της ελεύθερης αγοράς. Ζήτημα της παρούσας υποενότητας αποτελεί ο υπολογισμός της απώλειας αυτής, δηλαδή του ΤτA , όπως αυτό ορίστηκε από τη σχέση (5.5).

Έστω \mathbf{a}^S η βέλτιστη λύση του Συστήματος και \mathbf{a}^G η αντίστοιχη λύση του Παιγνίου. Για τον υπολογισμό του τιμήματος της αναρχίας θα πρέπει να συγκριθεί η **κοινωνική ευημερία** $\sum_i U_i(a_i^G)$ που λαμβάνεται όταν οι παίκτες λαμβάνουν υπόψιν τους την επίδραση των στρατηγικών τους στις τιμές διάθεσης με την **κοινωνική ευημερία** $\sum_i U_i(a_i^S)$ που λαμβάνεται όταν οι παίκτες είναι **λήπτες τιμής**. Προφανώς, ισχύει ότι $\sum_i U_i(a_i^S) \geq \sum_i U_i(a_i^G)$. Το θεώρημα που ακολουθεί αποδεικνύει ότι η απολεσθείσα **ωφέλεια** των παικτών είναι ακριβώς 25% στη χειρότερη περίπτωση [109]:

Θεώρημα 6.2. Εστω $N > 1$ και $U_i(0) \geq 0, \forall i$. Αν η κατανομή \mathbf{a}^S είναι οποιαδήποτε βέλτιστη λύση του Συστήματος και η κατανομή \mathbf{a}^G η μοναδική βέλτιστη λύση του Παιγνίου, τότε:

$$\sum_i U_i(a_i^G) \geq \frac{3}{4} \sum_i U_i(a_i^S) \quad (6.14)$$

Επίσης, το σημείο αυτό είναι το μεγαλύτερο κάτω πέρας (*infimum*) διότι $\forall \epsilon > 0$ υπάρχει ένα σύνολο παικτών και συναρτήσεων ωφελείας U_i με $i \in N$:

$$\sum_i U_i(a_i^G) \leq \left(\frac{3}{4} + \epsilon \right) \left(\sum_i U_i(a_i^S) \right) \quad (6.15)$$

ΑΠΟΛΕΙΞΗ [100]. Η απόδειξη του θεωρήματος βασίζεται στον ορισμό μιας σταθεράς β ως εξής:

$$\beta = \inf_{U \in \mathcal{U}} \inf_{C > 0} \inf_{0 \leq a, \bar{a} \leq C} \frac{U(a) + \hat{U}'(a)(\bar{a} - a)}{U(\bar{a})} \quad (6.16)$$

Η σχέση (6.13) που προέκυψε από τις βέλτιστες συνθήκες του Παιγνίου αξιοποιείται ώστε να δειχθεί ότι το β είναι αυστηρό όριο στην αποδοτικότητα της \mathbb{N} . Αποδεικνύοντας ότι $\beta \geq 3/4$, είναι εμφανές ότι το πηλίκο της σχέσης (6.16) είναι μεγαλύτερο από 1 όταν $a > \bar{a}$ και ίσο με 1 όταν $a = \bar{a}$. Έτσι, υποθέτοντας ότι $a < \bar{a}$ προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} U(a) + \hat{U}'(a)(\bar{a} - a) &= U(a) + U'(a) \left(1 - \frac{a}{C} \right) (\bar{a} - a) \\ &\geq U(a) + \left(1 - \frac{a}{\bar{a}} \right) (U(\bar{a}) - U(a)) \\ &\geq \left(\frac{a}{\bar{a}} \right)^2 U(\bar{a}) + \left(1 - \frac{a}{\bar{a}} \right) U(\bar{a}) \\ &\geq \frac{3}{4} U(\bar{a}) \end{aligned}$$

Η πρώτη ανισότητα προκύπτει αφού $\bar{a} \leq C$ και η U είναι κοίλη. Η δεύτερη ισχύει αφού η U είναι μη αρνητική κοίλη και $a \leq \bar{a}$, έτσι ώστε $U(a) \geq (a/\bar{a})U(\bar{a})$. Τέλος, η τρίτη ανισότητα προκύπτει αφού η συνάρτηση $x^2 - x + 1$ ελαχιστοποιείται στο σημείο $x = 1/2$. Προκύπτει από τη σχέση (6.16) ότι $\beta \geq 3/4$.

Στη συνέχεια, αποδεικνύεται ότι για κάθε $\delta > 0$, ο λόγος της **κοινωνικής ευημερίας** του Συστήματος με αυτή του Παιγνίου είναι τουλάχιστον $\beta + \delta$. Κρατώντας ως δεδομένα ότι $a < \bar{a}$ και $C = \bar{a}$, έστω $N > 1$ παίκτες ανταγωνίζονται για τον πόρο C . Ακόμη, ο παίκτης i έχει συνάρτηση **ωφελείας** τη $U_1 = U$ και οι χρήστες $2, \dots, n$ διαθέτουν γραμμικές συναρτήσεις **ωφελείας** με κλίση $\hat{U}'(a)$, δηλαδή $U_i(a_i) = \hat{U}'(a)a_i = (U'(a))(1 - a/C)a_i$. Εστω \mathbf{a}^S η λύση του Συστή-

ματος: από τη στιγμή που μια εφικτή λύση περιλαμβάνει την ανάθεση ολόκληρου του πόρου \bar{a} στον παίκτη 1, θα πρέπει να ισχύει: $\sum_j U_j(a_j^S) \geq U(\bar{a})$. Από την άλλη πλευρά, αφού σε κάθε λύση IN τουλάχιστον δυο παίκτες λαμβάνουν θετική ποσότητα πόρων και αφού η ισορροπία είναι μοναδική, καταλήγει κάποιος στο συμπέρασμα ότι όλοι οι χρήστες $2, \dots, n$ λαμβάνουν την ίδια θετική ποσότητα. Έτσι, όσο $n \rightarrow \infty$ θα πρέπει $a_i \rightarrow 0$, $\forall i \in [2, \dots, n]$. Από τις βέλτιστες συνθήκες (6.10) και ((6.11)) του Παιγνίου προκύπτει ότι η **τιμή ισορροπίας** $\sum_j s_j/C$ συγκλίνει στο $\hat{U}'(a)$ όσο $n \rightarrow \infty$. Συνεπώς, η συνολική **ωφέλεια** σε ισορροπία συγκλίνει στο $U(a) + \hat{U}'(a)(\bar{a} - a)$ και η αναλογία της **ωφελείας** σε IN με τη μέγιστη είναι μικρότερη ή ίση με:

$$\frac{U(a) + \hat{U}'(a)(\bar{a} - a)}{U(\bar{a})}$$

Το συμπέρασμα είναι ότι για κάθε $\delta > 0$, υπάρχει ένα παίγνιο (P_1, \dots, P_n) , στο οποίο ο λόγος των δυο **ωφελειών** είναι το πολύ $\beta + \delta$. Λαμβάνοντας υπόψιν την ειδική περίπτωση στην οποία $U(\bar{a}) = \bar{a}$, $a = 1/2$ και $\bar{a} = 1$, τότε ο λόγος περιορίζεται ακριβώς στα $3/4$. Συνδυάζοντας αυτό με το γεγονός ότι $\beta \geq 3/4$, προκύπτει ότι $\beta = 3/4$.

Τέλος, μένει να αποδειχθεί ότι το κάτω όριο τηρείται για κάθε παίγνιο κατανομής πόρων.

Εφαρμόζοντας τη σχέση (6.13) για κάθε παίγνιο (P_1, \dots, P_n) με συναρτήσεις **ωφελείας** (U_1, \dots, U_n) και λύσεις \mathbf{a}^S και \mathbf{a}^G , για το Σύστημα και το Παίγνιο αντίστοιχα, προκύπτει:

$$\sum_j U_j(a_j^S) \leq \sum_j \frac{1}{\beta} \left(U_j(a_j^G) + \hat{U}'_j(a_j^G)(a_j^S - a_j^G) \right) \leq \frac{1}{\beta} \sum_j U_j(a_j^G) \quad (6.17)$$

Το πρώτο μέρος της ανισότητας προκύπτει από τον ορισμό του β και το δεύτερο από τη σχέση (6.13). Αφού $\beta = 3/4$, η απόδειξη ολοκληρώνεται. \square

Το προηγούμενο θεώρημα έδειξε, ότι στη χειρότερη περίπτωση η **κοινωνική ευημερία** δεν μειώνεται περισσότερο από 25%, όταν οι παίκτες είναι price anticipators. Στη χειρότερη περίπτωση, ένας κοινός πόρος με χωρητικότητα $C = 1$ μοιράζεται σε παίκτες, με τον χρήστη 1 να έχει **ωφέλεια** $U_1(a_1) = a_i$ και τους υπόλοιπους $U_i(a_i) \approx a_i/2$, όταν το n είναι αρκετά μεγάλο. Όσο $n \rightarrow \infty$, στη λύση IN , ο παίκτης 1 λαμβάνει ποσότητα $a_1^G = 1/2$, ενώ οι υπόλοιποι μοιράζονται ομοιόμορφα την ποσότητα $1 - a_1^G = 1/2$ μεταξύ τους, επιτυγχάνοντας αθροισμένη **ωφέλεια** $3/4$. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστη δυνατή **κοινωνική ευημερία** είναι 1, όταν $a_1^G = C$.

6.2 Ο ψευδοκώδικας του ΣΑΚΠ

Το παίγνιο που περιγράφτηκε στην προηγούμενη ενότητα υλοποιείται από τον αλγόριθμο **ΣΑΚΠ**, ο οποίος ενεργοποιείται μετά τη διανομή του εγγυημένου εύρους ζώνης, αν και μόνο αν ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες: (i) υπάρχει ακόμη διαθέσιμο εύρος ζώνης (ii) τουλάχιστον δυο **Alloc-ID** απαιτούν πρόσθετο εύρος ζώνης και (iii) οι πρόσθετες απαιτήσεις εύρους ζώνης υπερβαίνουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Αλγόριθμος: Ο ψευδοκώδικας **ΣΑΚΠ**

Input: $\mathcal{R}, C, \mathcal{I}$

Output: \mathcal{A}

```

1:  $\mathcal{N} \leftarrow \emptyset$ 
2:  $\mathcal{S} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $\mathcal{A} \leftarrow \emptyset$ 
4: for  $i \in \mathcal{I}$  do
5:   if  $R_i > 0$  then
6:      $\mathcal{N} \leftarrow \mathcal{N} \cup i$ 
7:      $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup r_i$ 
8:   end if
9: end for
10: for  $i \in \mathcal{N}$  do
11:    $a_i \leftarrow \left\lfloor \frac{s_i \cdot C}{\sum_j s_j} \right\rfloor$ 
12:    $\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A} \cup a_i$ 
13: end for

```

Είσοδοι στον αλγόριθμο είναι το σύνολο \mathcal{R} με τις απαιτήσεις μη εγγυημένου εύρους ζώνης των χρηστών, το διαθέσιμο εύρος ζώνης C μετά την ανάθεση του εγγυημένου εύρους ζώνης και το σύνολο \mathcal{I} των **Alloc-ID** που συμμετέχουν στη διαδικασία ανάθεσης. Έξοδος είναι το διάνυσμα \mathcal{A} που περιέχει την ανάθεση εύρους ζώνης που αντιστοιχεί στο κάθε **Alloc-ID**.

Ξεκινώντας, στις γραμμές 1-3 πραγματοποιούνται οι αρχικοποιήσεις των διανυσμάτων που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από το \mathcal{A} που ήδη αναφέρθηκε, το σύνολο \mathcal{N} περιέχει το σύνολο των **Alloc-ID** που συμμετέχουν στη διαδικασία ανάθεσης και το \mathcal{S} περιέχει την απαίτηση κάθε **Alloc-ID** για μη εγγυημένο εύρος ζώνης. Η μοντελοποίηση της διαδικασίας ανάθεσης εύρους ζώνης ως παίγνιο κατανομής πόρων οδηγεί στην αντιστοίχιση των **Alloc-ID** με τους παίκτες του παιγνίου και την απαίτηση για εύρος ζώνης ως τη στρατηγική του κάθε παίκτη.

Στις γραμμές 4 έως 9 ελέγχεται για κάθε Alloc-ID, αν αυτό έχει ακόμη απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Αν ναι, τότε το Alloc-ID συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο \mathcal{N} και η απαίτησή του σε εύρος ζώνης ορίζεται ως η στρατηγική του.

Τέλος, στις γραμμές 10 έως 13, για κάθε Alloc-ID που έχει λάβει μέρος στο παίγνιο, του ανατίθεται μερίδιο εύρους ζώνης a_i , το οποίο προκύπτει από τη δική του απαίτηση επί του συνολικά διαθέσιμου εύρους ζώνης προς το σύνολο των απαιτήσεων όλων των Alloc-ID, με βάση τη σχέση (6.5) που προέκυψε από τη λύση του Παιγνίου.

6.3 Προσομοίωση του ΣΑΚΠ

Για την εξέταση της αποδοτικότητας του ΣΑΚΠ κατασκευάστηκε ένας προσομοιωτής στη γλώσσα MATLAB, ο οποίος προσομοιώνει τη μετάδοση δεδομένων στο κανάλι ανόδου με βάση το πρότυπο ITU-T G.987.3.¹. Η προσομοίωση αποτελείται από ένα σενάριο προσομοίωσης, σκοπός του οποίου είναι η εξέταση της επίδρασης του ΣΑΚΠ σε γνωστές μετρικές απόδοσης δικτύων όπως η δικαιοσύνη, η καθυστέρηση και η διεκπεραιωτικότητα.

6.3.1 Παραμετροποίηση και συμβάσεις

Οι βασικές παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται στον πίνακα 6.1:

Παράμετρος	Τιμή
Διάρκεια προσομοίωσης	1 δευτερόλεπτο
(R_F, R_A)	(250, 500) byte
Πλήθος ΜΟΔ στο δίκτυο	4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32
Χωρική κατανομή ΜΟΔ	Ομοιόμορφη στο διάστημα [20, 60] χλμ
Δείγματα ανά πείραμα	10
Κίνηση ανά ΜΟΔ	97.935 Mbit/s ($\Sigma \Delta P$) + 1.965 Mbit/s ($M \Delta P$)

Πίνακας 6.1: Οι βασικές παράμετροι του σεναρίου προσομοίωσης

Το σενάριο της προσομοίωσης εκτελείται για ένα πλήθος πειραμάτων, κάθε ένα από τα οποία διακρίνεται από το πλήθος των ΜΟΔ που υπάρχουν στο δίκτυο και εκτελείται εις διπλούν, με

¹Λεπτομέρειες για τον προσομοιωτή βρίσκονται στην ενότητα A του παραρτήματος.

εναλλάξ ενεργοποίηση του **ΣΑΚΠ**.

Κάθε **ΜΟΔ** παράγει μια ενιαία πολυπλεγμένη ροή κίνησης, η οποία αποτελείται από μια ροή **Σταθερού Δυφιορρυθμού (ΣΔΡ, Constant Bit Rate – CBR)** 97.935 Mbit/s από πλαίσια ethernet και μια ροή **Μεταβλητού Δυφιορρυθμού (ΜΔΡ, Variable Bit Rate – VBR)** στα 1.965 Mbit/s. Η ροή **ΜΔΡ** δημιουργήθηκε από στατιστικά πραγματικής ροής μετάδοσης ενός βίντεο, η καταγραφή και η ανάλυση της οποίας εντάχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Η πολυπλεγμένη ροή που παράγει κάθε **ΜΟΔ** φτάνει τα 99.9 Mbit/s, νούμερο αρκετά υψηλό ώστε το κανάλι ανόδου να κορεστεί και να ενεργοποιείται μόνιμα το **ΣΑΚΠ**, όταν οι **ΜΟΔ** ξεπεράσουν τις 24.

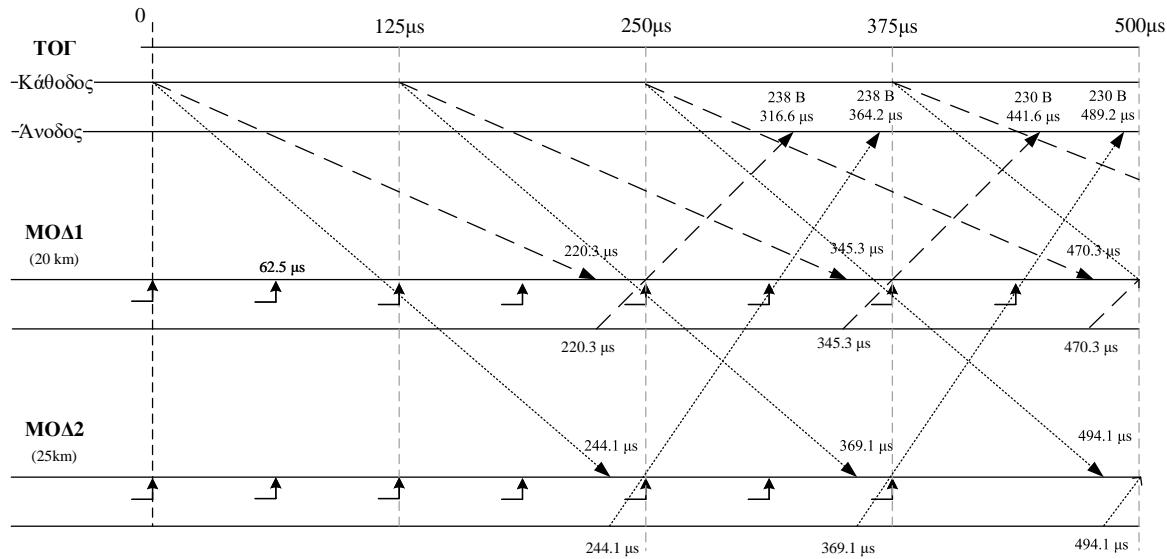
Πρέπει να επισημανθεί ότι, για λόγους απλότητας στην υλοποίηση, έχουν γίνει διάφορες παραδοχές για τη λειτουργία του **XG-PON**, κάποιες εκ των οποίων αποκλίνουν από το πρότυπο G.987.3 Περισσότερες λεπτομέρειες παρατίθενται στην ενότητα **A.1** του παραρτήματος τεκμηρίωσης του προσομοιωτή.

6.3.2 Αριθμητικό παράδειγμα

Οι αρχές με τις οποίες κατασκευάστηκε ο προσομοιωτής απεικονίζονται στο αριθμητικό παράδειγμα της εικόνας **6.1**, το οποίο αναπαριστά τη λειτουργία του ανοδικού καναλιού ενός δικτύου **XG-PON**. Συγκεκριμένα, στο παράδειγμα αναπαρίσταται η διαδικασία αποστολής αιτήσεων για μετάδοση δεδομένων στο ανοδικό κανάλι από τις **ΜΟΔ**, η λειτουργία του μηχανισμού **ΔΚΕΖ** και η κατασκευή του **BWmap** από το **ΤΟΓ**, καθώς και η αποστολή ριπών από τις **ΜΟΔ**, όπως αυτές διαμορφώνονται από το τμήμα του πεδίου **BWmap** που διάβασε η κάθε μια. Επισημαίνεται ότι οι χρόνοι εκφράζονται σε *μsec* και για λόγους πρακτικότητας στην αναπαράσταση των υπολογισμών διατηρείται μόνο το πρώτο δεκαδικό ψηφίο.

Το **ΠΟΔ** του παραδείγματος αποτελείται από το **ΤΟΓ** και δύο **ΜΟΔ**, οι οποίες απέχουν 20 και 25 χιλιόμετρα αντίστοιχα από αυτό. Κάθε **ΜΟΔ** περιέχει ακριβώς ένα **Alloc-ID**, το οποίο παράγει κίνηση 250 byte σταθερά κάθε 62.5 *μsec* με απεριόριστο μήκος **ουράς αναμονής** των πακέτων. Επίσης, το εγγυημένο εύρος ζώνης που παρέχει το **ΤΟΓ** είναι $R_F = 250 \text{ byte}$ και $R_A = 500 \text{ byte}$ για όλα τα **Alloc-ID**.

Η ανταλλαγή πλαισίων ξεκινάει τη χρονική στιγμή 0, όταν γίνεται ευρυεκπομπή του πλαισίου **BWmap** στις **ΜΟΔ**. Την στιγμή που δημιουργείται το πεδίο **BWmap**, το **ΤΟΓ** δεν έχει λάβει καμία ενημέρωση για το μέγεθος της **ουράς** των **Alloc-ID**, άρα το **GrantSize** του πεδίου **BWmap** είναι ίσο με το **πάγιο εύρος ζώνης** R_F . Το **ΤΟΓ** χρονοπρογραμματίζει τη μετάδοση



Σχήμα 6.1: Αριθμητικό παράδειγμα λειτουργίας XG-PON

των ριπών υπολογίζοντας τη χρονική στιγμή άφιξης της κάθε ριπής στο **ΤΟΙ**, αφού σε αυτήν έχει εφαρμοστεί ο κώδικας **ΕΔΣ** και έχουν προσαρτηθεί όλες οι προβλεπόμενες κεφαλίδες. Διαπιστώνεται πως οι αφίξεις απέχουν παραπάνω από 25.3 nsec (64 bit), συνεπώς, το **StartTime** και για τις δυο κατανομές ορίζεται 0. Ο χρόνος στον οποίο το πλαίσιο καθόδου φτάνει στη **ΜΟΔ1** υπολογίζεται από το άθροισμα των καθυστερήσεων μετάδοσης και διάδοσης. Δηλαδή: $125 \mu\text{sec} + 20000/(c_0 \cdot 0.7) \text{ sec} = 125 + 95.3 = 220.3 \mu\text{sec}$. Αντίστοιχα, για τη **ΜΟΔ2** το πλαίσιο φτάνει τη στιγμή $125 \mu\text{sec} + 25000/(c_0 \cdot 0.7) \text{ sec} = 125 + 119.1 = 244.1 \mu\text{sec}$

Τη στιγμή $125 \mu\text{sec}$ το **ΤΟΙ** ξεκινά τη μετάδοση του δεύτερου πλαισίου καθόδου **XGTC**. Μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή, το **ΤΟΙ** δεν έχει λάβει κάποια αναφορά σχετικά με τα δεδομένα που αναμένουν στις **υρές** των **Alloc-ID**. Συνεπώς, η ανάθεση εύρους ζώνης και ο χρονοπρογραμματισμός γίνονται όπως περιγράφηκε για το προηγούμενο πλαίσιο καθόδου. Το **BWmap** του συγκεκριμένου πλαισίου διαβάζεται από τη **ΜΟΔ1** τη στιγμή $125 + 125 + 95.3 = 345.3 \mu\text{sec}$ και από τη **ΜΟΔ2** τη στιγμή $125 + 125 + 119.1 = 369.1 \mu\text{sec}$

Τη στιγμή $220.3 \mu\text{sec}$ η **ΜΟΔ1** λαμβάνει το πλαίσιο καθόδου **XGTC**, διαβάζει το **BWmap** και εξάγει την τιμή των 250 byte για το **GrantSize** του **Alloc-ID** που διαθέτει. Από αυτά αφαιρεί 4 byte που προορίζονται για το πεδίο **DBRu** της κατανομής, με την άδεια που προορίζεται για ωφέλιμη πληροφορία να περιορίζεται στα 246 byte . Ακόμη, το **Alloc-ID** έχει στην **υρά** του μέχρι στιγμής 4 **MΔΥ** των 250 byte η κάθε μια. Δεδομένου ότι κάθε πλαίσιο **XGEM** πλαισιώνεται με κεφαλίδα 8 byte , η διαθέσιμη χωρητικότητα στην κατανομή αρκεί μόνο για ένα τεμάχιο των 238 byte . Επομένως, η **ΜΟΔ** τεμαχίζει την πρώτη **MΔΥ** των 250 byte σε

δυο τεμάχια των $238\ byte$ και $12\ byte$, ενθυλακώνοντας σε πλαίσιο **XGEM** μόνο την πρώτη. Η **ΜΟΔ** συμπληρώνει το πεδίο **DBRu**, υπολογίζοντας πόσα δεδομένα αναμένουν στην **ουρά** του **Alloc-ID** για μετάδοση. Αυτό το μέγεθος είναι $3 \cdot 250 + 12 = 762\ byte$. Έχοντας διαμορφώσει ολόκληρο το ωφέλιμο φορτίο της ριπής **XGTC**, το συνολικό μέγεθος αυτής είναι $258\ byte$ με την προσθήκη της κεφαλίδας ($4\ byte$) και της ουράς **XGTC** ($4\ byte$). Στο σύνολο της ριπής **XGTC** εφαρμόζεται κώδικας **ΕΔΣ** τύπου **RS(248, 216)** και προκύπτουν δυο κωδικολέξεις μήκους $232\ byte$ και $26\ byte$, με την κάθε μια από αυτές να επιβαρύνεται από πεδίο ισοτιμίας $16\ byte$. Τέλος, με την προσάρτηση του πεδίου **PSBu** μήκους $24\ byte$, το τελικό μήκος της ριπής **PHY** ανόδου προκύπτει: $24 + 16 + 232 + 16 + 26 = 314\ byte$. Η ριπή **PHY** αποστέλλεται χωρίς καθυστέρηση, αφού το **StartTime** είναι μηδέν, και φτάνει έπειτα από $314/311040000\ sec + 95.3\ \mu sec = 96.3\ \mu sec$. Συνεπώς, η ριπή φτάνει στο **ΤΟΓ** τη στιγμή $220.3 + 96.3 = 316.6\ \mu sec$. Τη στιγμή $244.1\ \mu sec$ η **ΜΟΔ2** λαμβάνει το ίδιο πλαίσιο καθόδου **XGTC**. Αφού η κίνηση του δεύτερου **Alloc-ID** είναι ίδια με αυτή του πρώτου και οι αναθέσεις που έγιναν από το **ΤΟΓ** είναι επίσης οι ίδιες για το συγκεκριμένο **BWmap** του πλαισίου, η ριπή **PHY** σχηματίζεται με τον ίδιο τρόπο, με τη μόνη διαφορά ότι η ριπή της **ΜΟΔ2** φτάνει τη στιγμή $244.1\ \mu sec + 314/311040000\ sec + 119.1\ \mu sec = 364.2\ \mu sec$.

Η τρίτη διαδικασία δημιουργίας πλαισίου καθόδου **XGTC** ξεκινά τη στιγμή $250\ \mu sec$. Μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή, το **ΤΟΓ** δεν έχει λάβει κάποια αναφορά σχετικά με τα δεδομένα που αναμένουν στις **ουρές** των **Alloc-ID**. Συνεπώς, η ανάθεση εύρους ζώνης και ο χρονοπρογραμματισμός γίνονται όπως περιγράφηκε για τα προηγούμενα πλαίσια καθόδου. Το **BWmap** του συγκεκριμένου πλαισίου διαβάζεται από τη **ΜΟΔ1** τη στιγμή $250 + 125 + 95.3 = 470.3\ \mu sec$ και από τη **ΜΟΔ2** τη στιγμή $250 + 125 + 119.1 = 494.1\ \mu sec$

Στις χρονικές στιγμές $316.6\ \mu sec$ και $364.2\ \mu sec$ φτάνουν οι ριπές των **ΜΟΔ1** και **ΜΟΔ2** αντίστοιχα. Η κάθε μια έχει μέγεθος $314\ byte$ με ωφέλιμη πληροφορία $238\ byte$ και αιτήματα για μετάδοση $762\ byte$. Καμία από τις δύο ριπές δεν περιέχει ολόκληρη **ΜΔΥ**, συνεπώς δεν μπορεί να μετρηθεί μέχρι στιγμής ο χρόνος καθυστέρησης για την άφιξη μιας ολόκληρης **ΜΔΥ**.

Τη χρονική στιγμή $345.3\ \mu sec$ φτάνει στη **ΜΟΔ1** το πλαίσιο καθόδου που μεταδόθηκε από το **ΤΟΓ** τη χρονική στιγμή $125\ \mu sec$. Η **ΜΟΔ1** διαβάζει το **BWmap** του πλαισίου και διαπιστώνει πως της επιτρέπεται να στείλει $246\ byte$ ωφέλιμης πληροφορίας, έχοντας αφαιρέσει τα $4\ byte$ του πεδίου αναφοράς **DBRu**. Η **ουρά** του **Alloc-ID** περιέχει το υπολειπόμενο τεμάχιο των $12\ byte$ από τον προηγούμενο τεμαχισμό, καθώς και αρκετές **ΜΔΥ** των $250\ byte$. Για να αξιοποιήσει πλήρως τη διαθέσιμη άδεια μετάδοσης, πλαισιώνει το τεμάχιο των $12\ byte$ σε **XGEM**

και τεμαχίζει τη δεύτερη ΜΔΥ που έλαβε τη στιγμή $62.5 \mu sec$ σε τμήματα των 218 και $32 byte$, ώστε να πλαισιώσει σε XGEM το πρώτο εξ αυτών μήκους 218 $byte$. Η ωφέλιμη πληροφορία ΜΔΥ που περιέχουν τα XGEM είναι $12 + 218 = 230 byte$ και το συνολικό μέγεθος της κατανομής που αποτελεί το ωφέλιμο φορτίο XGTC προκύπτει $4 + 8 + 12 + 218 + 8 = 250 byte$, το οποίο ταυτίζεται με το GrantSize. Η ΜΟΔ υπολογίζει τις υπολειπόμενες ΜΔΥ που αναμένονται στην ουρά του Alloc-ID στα $832 byte$, τιμή την οποία προσθέτει στο πεδίο DBRu. Κατά τον ίδιο τρόπο με την πρώτη ριπή, το συνολικό μέγεθος της ριπής PHY προκύπτει $314 byte$, αφού έχει προσαρτηθεί σε αυτή το πεδίο PSBu και έχει εφαρμοστεί ο κώδικας ΕΔΣ στο ωφέλιμο της φορτίο, το οποίο αποτελείται από τη ριπή XGTC. Η ριπή αποστέλλεται στο ΤΟΓ με χρόνο άφιξης τα $441.6 \mu sec$. Την χρονική στιγμή $369.1 \mu sec$ φτάνει το ίδιο πλαίσιο καθόδου στη ΜΟΔ2. Κατά τον ίδιο τρόπο με τη ΜΟΔ1, η ΜΟΔ2 σχηματίζει και αποστέλλει τη ριπή της με χρόνο άφιξης στο ΤΟΓ τα $489.2 \mu sec$.

Η τέταρτη διαδικασία ανάθεσης εύρους ζώνης πραγματοποιείται τη στιγμή $375 \mu sec$. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες διαδικασίες ανάθεσης, πλέον το ΤΟΓ διαθέτει αναφορά για το μήκος της ουράς αναμονής των Alloc-ID με τιμές $762 byte$. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι κάθε ανάθεση πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνει τα $4 byte$ που προορίζονται για το πεδίο DBRu, το ΤΟΓ ξεκινά τη διαδικασία ανάθεσης, θεωρώντας ότι σε κάθε Alloc-ID πρέπει να ανατεθεί το μέγεθος που αυτό ζητά προσαυξημένο κατά $4 byte$. Στο παράδειγμα, κάθε Alloc-ID θεωρείται από το ΤΟΓ ότι απαιτεί $766 byte$. Το μέγεθος αυτό υπερκαλύπτει το εγγυημένο εύρος ζώνης των $750 byte$, συνεπώς, ανατίθεται το πάγιο εύρος ζώνης των $250 byte$ και το εξασφαλισμένο των $500 byte$, ώστε σε κάθε Alloc-ID να κατανεμηθεί ακριβώς το ποσό των $750 byte$. Στη φάση της κατανομής του μη εγγυημένου εύρους ζώνης, υπολογίζεται η ελάχιστη απαίτηση των Alloc-ID, η οποία είναι $16 byte$, και ανατίθεται με στατικό τρόπο σε κάθε Alloc-ID μέχρι να ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις, με αποτέλεσμα οι τελικές αναθέσεις να είναι από $766 byte$. Το ΤΟΓ χρονοπρογραμματίζει τις ριπές με δεδομένο το GrantSize που υπολογίστηκε για την κάθε μια και διαπιστώνει πως η απόσταση μεταξύ των αφίξεων είναι πάνω από $64 bit$, συνεπώς, ορίζει το StartTime ίσο με μηδέν. Το πλαίσιο φτάνει στη ΜΟΔ1 τη στιγμή $595.3 \mu sec$, ενώ στη ΜΟΔ2 τη στιγμή $619.1 \mu sec$.

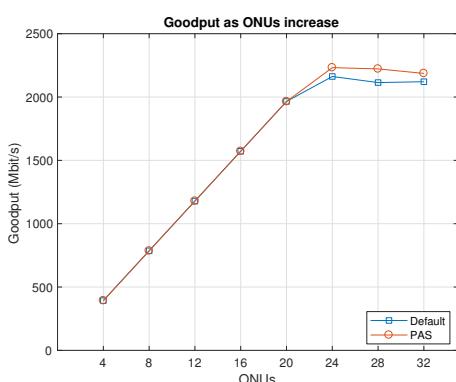
Τις χρονικές στιγμές $441.6 \mu sec$ και $489.2 \mu sec$ φτάνουν οι ριπές των ΜΟΔ1 και ΜΟΔ2 αντίστοιχα. Η κάθε ριπή έχει μέγεθος $314 byte$ με ωφέλιμη πληροφορία $230 byte$ και αιτήματα για μετάδοση $832 byte$. Οι ριπές περιέχουν το δεύτερο κομμάτι των τεμαχισμένων ΜΔΥ που έφτασαν τις στιγμές $316.6 \mu sec$ και $364.2 \mu sec$, για τα Alloc-ID των ΜΟΔ1 και ΜΟΔ2 αντί-

στοιχα. Συνεπώς, τις χρονικές στιγμές 441.6 μsec και 489.2 μsec σημειώνονται οι αφίξεις δυο ολοκληρωμένων ΜΔΥ με καθυστέρηση 441.6 μsec και 489.2 μsec .

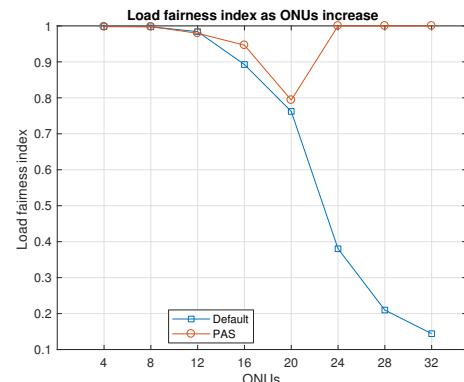
Το παράδειγμα ολοκληρώνεται στα 500 μsec . Μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή έχουν μεταδοθεί επιτυχώς συνολικά $238 + 238 + 230 + 230 = 936$ byte ωφέλιμης πληροφορίας. Συνεπώς, η διεκπεραιωτικότητα ωφέλιμης πληροφορίας (goodput) είναι $936 / 0.0005 = 1872000$ byte/s ≈ 14.976 Mbit/s. Επίσης, τις χρονικές στιγμές 441.6 μsec και 489.2 μsec πραγματοποιήθηκε η πρώτη άφιξη ολοκληρωμένων ΜΔΥ με καθυστέρηση 441.6 μsec και 489.2 μsec , με συνέπεια η μέση καθυστέρηση του δικτύου να είναι: $(441.6 + 489.2) / 2 = 465.4 \mu sec$.

6.3.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

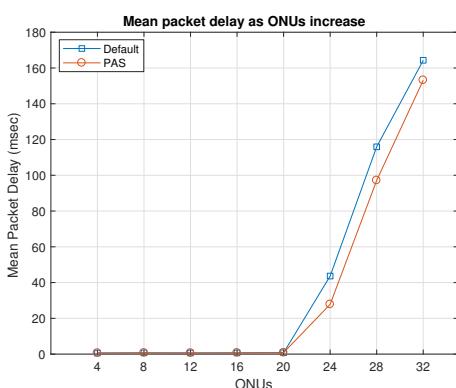
Στην ομάδα γραφημάτων 6.2 παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης για το ΣΑΚΠ και το προεπιλεγμένο (default).



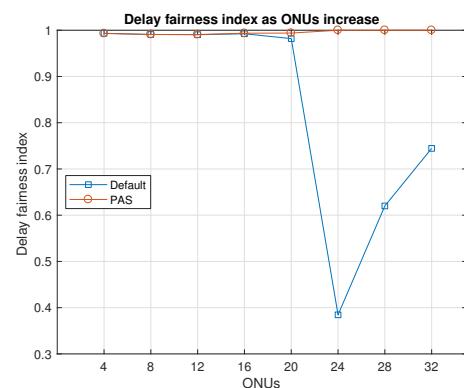
(a) Η μέση διεκπεραιωτικότητα ωφέλιμης πληροφορίας



(b) Ο δείκτης δικαιοσύνης φόρτου



(c) Μέση καθυστέρηση πακέτου



(d) Ο δείκτης δικαιοσύνης μέσης καθυστέρησης

Σχήμα 6.2: Τα αποτελέσματα του σεναρίου προσομοίωσης

Τα σχήματα 6.2d και 6.2b απεικονίζουν τη δικαιοσύνη του συστήματος από άποψη καθυ-

στέρησης και φόρτου κίνησης αντίστοιχα, βασιζόμενα στον δείκτη του Jain [111]. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης δικαιοσύνης φόρτου δείχνει πόσο δίκαια μοιράστηκε το εύρος ζώνης στους χρήστες ανάλογα με τις απαιτήσεις του καθενός, με την τιμή του να δίνεται από τον εξής τύπο:

$$J(r_1, r_2, \dots, r_n) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n r_i\right)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (6.18)$$

Η παράμετρος r_i προκύπτει από τον λόγο του εύρους ζώνης που έλαβε ο χρήστης i με το εύρος ζώνης που ζήτησε. Όσο πιο ομοιογενείς είναι οι τιμές r_i , η τιμή του δείκτη πλησιάζει το 1, κάτι το οποίο αναπαριστά πιο δίκαιη κατανομή. Κατά αντίστοιχο τρόπο, ο δείκτης δικαιοσύνης καθυστέρησης αναπαριστά το πόσο ομοιόμορφα κατανέμεται η μέση καθυστέρηση πακέτου που βιώνει η κάθε ΜΟΔ. Ο τύπος υπολογισμού ταυτίζεται με τον (6.18), με τη μόνη διαφορά ότι η παράμετρος r_i αναπαριστά τη μέση καθυστέρηση άφιξης των πακέτων².

Το γράφημα 6.2a αναπαριστά τη διεκπεραιωτικότητα ωφέλιμης πληροφορίας (goodput) όσο αυξάνεται το πλήθος των ΜΟΔ. Το γράφημα επαληθεύει την αξιοπιστία του προσομοιωτή, αφού οι τιμές της διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου αντιστοιχούν στην κίνηση που παράγουν οι χρήστες. Επίσης, το σημείο κορεσμού σωστά αποτυπώνεται στις 24 ΜΟΔ, αφού από αυτό το σημείο και έπειτα οι απαιτήσεις τους υπερβαίνουν τη χωρητικότητα του δικτύου, συνεπώς, το σύνολο του όγκου των δεδομένων που μεταδίδονται δεν μπορεί να υπερβαίνει τη χωρητικότητα του καναλιού. Ακόμη, παρόλο που και τα δυο σχήματα αναθέτουν ολόκληρο το εύρος ζώνης, όταν το δίκτυο φτάνει σε κορεσμό, το ΣΑΚΠ παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένη διεκπεραιωτικότητα, η οποία προκύπτει από τον μετριασμό των συνεπειών της συμφόρησης που επέφερε το ΣΑΚΠ, αλλά και επιβεβαιώνεται θεωρητικά από τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας του Παιγνίου.

Το γράφημα 6.2b απεικονίζει την πορεία του δείκτη δικαιοσύνης φόρτου όσο αυξάνεται το πλήθος των ΜΟΔ. Παρατηρώντας τη μεταβολή του δείκτη για τα δυο σχήματα είναι προφανές ότι το ΣΑΚΠ προσφέρει πιο δίκαιη κατανομή πόρων από το προεπιλεγμένο. Όταν ο φόρτος του δικτύου αυξάνεται και προσεγγίζει το σημείο κορεσμού είναι πιο δύσκολη η δίκαιη κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης, γι' αυτό και ο δείκτης χειροτερεύει. Όταν ο αριθμός των χρηστών ξεπεράσει τους 20, τότε οι απαιτήσεις τους υπερβαίνουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης με συνέπεια τη μόνιμη ενεργοποίηση του ΣΑΚΠ, ο οποίος κατανέμει δίκαια και αναλογικά το εύρος ζώνης μετατοπίζοντας τον δείκτη σταθερά στη μονάδα, ανεξάρτητα από το πόσο συνεχίζει να αυξάνεται το πλήθος των χρηστών. Αντίθετα, ο δείκτης δικαιοσύνης του προεπιλεγμένου

²Στο πλαίσιο της προσομοίωσης, ο όρος «πακέτο» ταυτίζεται με τον όρο «ΜΔΥ».

σχήματος καταρρέει, όταν το δίκτυο φτάνει σε κορεσμό, αφού δεν μπορεί να εξυπηρετήσει με δί-καιο τρόπο τους χρήστες. Διευκρινίζεται ότι η επιμέρους διαφοροποίηση του δείκτη στο ΣΑΚΠ, πριν οι ΜΟΔ ξεπεράσουν τις 20, συμβαίνει διότι το ΣΑΚΠ ενεργοποιείται περιστασιακά, στις περιπτώσεις που οι λογικές ουρές των Alloc-ID κορεστούν και οι απαιτήσεις τους υπερβούν την προσφορά σε εύρος ζώνης. Η κατάσταση δικτυακής συμφόρησης γίνεται μόνιμη και η ενεργοποίηση του ΣΑΚΠ είναι βέβαιη, αφού οι ΜΟΔ ξεπεράσουν τις 20.

Το γράφημα 6.2c απεικονίζει τη μεταβολή του μέσου όρου της καθυστέρησης πακέτου που βιώνουν τα Alloc-ID, όσο αυξάνεται το πλήθος των ΜΟΔ. Με δεδομένο ότι η ουρά κάθε ΜΟΔ έχει απεριόριστο μέγεθος, είναι αναμενόμενη η εκθετική αύξηση της καθυστέρησης, όταν το δίκτυο φτάνει στο σημείο συμφόρησης. Στην κατάσταση αυτή είναι εμφανής η μείωση της μέσης τιμής της καθυστέρησης για το ΣΑΚΠ, αφού με τη δικαιότερη κατανομή των πόρων, οι συνέπειες της δικτυακής συμφόρησης μετριάζονται. Ομοίως με το γράφημα 6.2a, η συνολική εικόνα βελτίωσης των τιμών της καθυστέρησης μπορούν να συσχετισθούν με τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας που προβλέπει το Παίγνιο του ΣΑΚΠ.

Τέλος, το γράφημα 6.2d αναπαριστά τη μεταβολή του δείκτη δικαιοσύνης για τη μέση καθυστέρηση πακέτου που βιώνει κάθε Alloc-ID. Κύριοι παράγοντες επηρεασμού της καθυστέρησης είναι ο φόρτος του δικτύου και η απόσταση των ΜΟΔ από το ΤΟΓ, από την οποία προκύπτει η καθυστέρηση διάδοσης. Με δεδομένο ότι οι ΜΟΔ έχουν τοποθετηθεί ομοιόμορφα στο δίκτυο, σε συνθήκες χαμηλού φόρτου η καθυστέρηση κατανέμεται με ομοιόμορφο τρόπο στα Alloc-ID και ο δείκτης δικαιοσύνης είναι υψηλός. Από το πείραμα των 24 ΜΟΔ και έπειτα, ο κορεσμός του δικτύου είναι μόνιμο φαινόμενο, με αποτέλεσμα ο δείκτης να καταρρέει στο προεπιλεγμένο σχήμα. Αντίθετα, στο ΣΑΚΠ ο δείκτης μένει σταθερός στη μονάδα, ως αποτέλεσμα της αναλογικής κατανομής του φόρτου, άρα και των συνεπειών της συμφόρησης.

Στον πίνακα 6.2 απεικονίζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε μετρική και κάθε πείραμα, καθώς και τα ποσοστά μεταβολής των μετρικών που προέκυψαν από τη λειτουργία του ΣΑΚΠ.

Κλείνοντας, από το γράφημα 6.2d είναι εμφανής μια εκ πρώτης όψεως αδικαιολόγητη αύξηση του δείκτη δικαιοσύνης καθυστέρησης στο προεπιλεγμένο σχήμα, όσο το δίκτυο βρίσκεται σε κορεσμό και οι ΜΟΔ αυξάνονται. Ωστόσο, η αύξηση της τιμής του δείκτη μπορεί να τεκμηριωθεί με τη μελέτη των γραφημάτων που δείχνουν τη μεταβολή της μέσης τιμής καθυστέρησης για κάθε ΜΟΔ κατά την πορεία της προσομοίωσης.

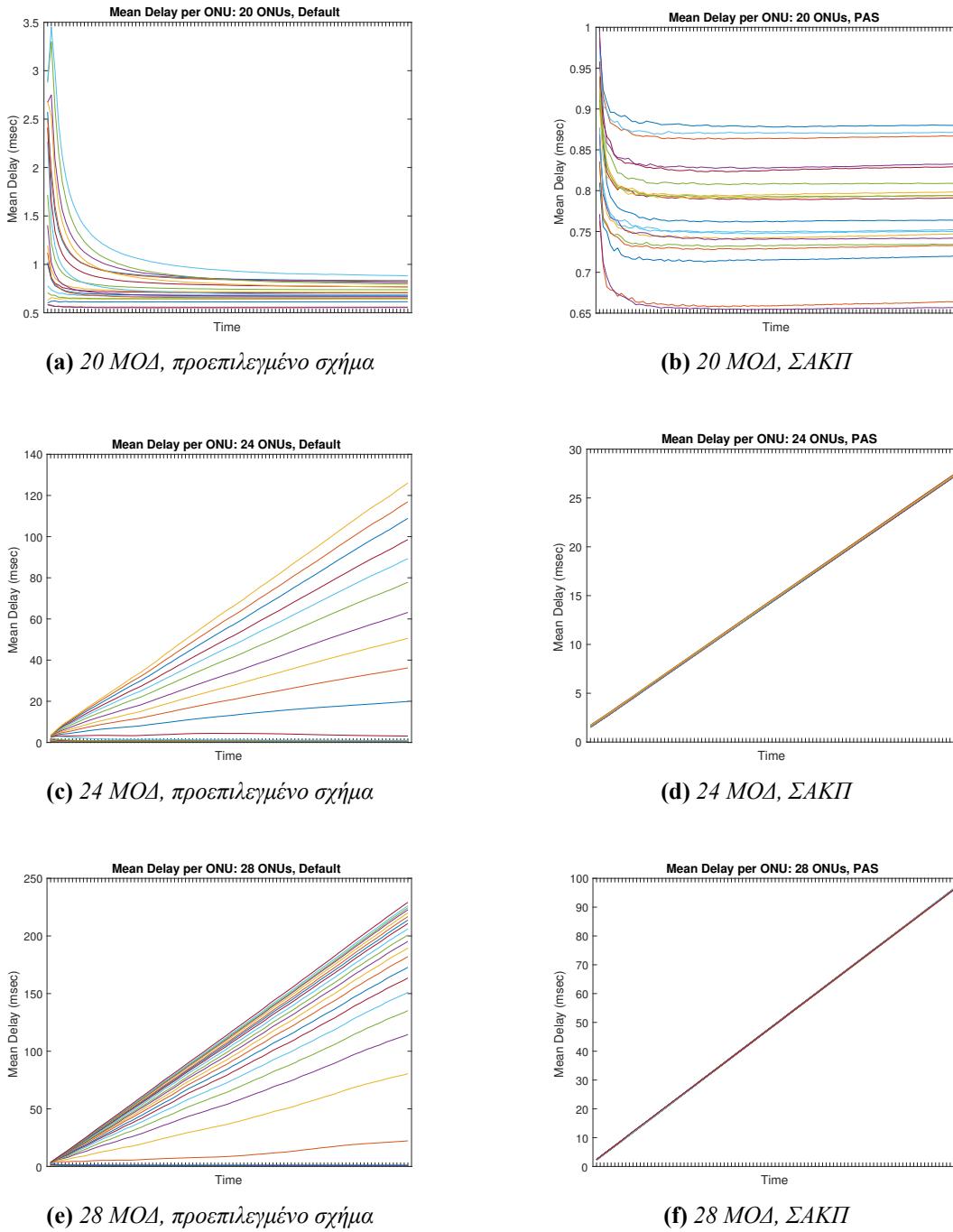
Στην ομάδα γραφημάτων 6.3 απεικονίζεται η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης κατά τη

Πλήθος AllocID	Μέση καθυστέρηση πακέτου (μsec)			Διεκπεραιωτικότητα ωφέλιμης πληροφορίας (Mbit/s)			Δικαιοσύνη φόρτου			Δικαιοσύνη καθυστέρησης		
	Blind	PAS	Μεταβολή	Blind	PAS	Μεταβολή	Blind	PAS	Μεταβολή	Blind	PAS	Μεταβολή
4	0.60	0.60	0 %	393.14	393.02	-0.03 %	1.00	1.00	0 %	0.99	0.99	0 %
8	0.69	0.69	0 %	785.91	785.91	0 %	1.00	1.00	0 %	0.99	0.99	0 %
12	0.64	0.64	0 %	1178.77	1178.97	+0.02 %	0.98	0.98	0 %	0.99	0.99	0 %
16	0.68	0.72	+5.88 %	1572.03	1571.90	-0.01 %	0.89	0.95	+6.74 %	0.99	0.99	0 %
20	0.77	0.82	+6.49 %	1965.16	1964.49	-0.03 %	0.76	0.79	+3.95 %	0.98	0.99	+1.02 %
24	43.64	27.83	-36.23 %	2162.13	2232.08	+3.24 %	0.38	1.00	+163.16 %	0.38	1.00	+163.16 %
28	115.92	97.14	-16.20 %	2114.21	2222.04	+5.10 %	0.21	1.00	+376.19 %	0.62	1.00	+61.29 %
32	164.30	153.18	-6.77 %	2120.85	2186.59	+3.10 %	0.14	1.00	+614.29 %	0.74	1.00	+35.14 %

Πίνακας 6.2: Αναλυτικά αποτελέσματα του σεναρίου προσομοίωσης

διάρκεια των πειραμάτων με 20, 24 και 28 ΜΟΔ, με κάθε χρωματιστή γραμμή να αναπαριστά τη μέση καθυστέρηση ενός Alloc-ID για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Είναι εμφανής η «εκρηκτική» αύξηση της καθυστέρησης, συγκρίνοντας τα γραφήματα 6.3b και 6.3a με τα 6.3d και 6.3c, όταν το δίκτυο φτάνει σε κορεσμό. Ακόμη, εξετάζοντας τα δυο γραφήματα που αφορούν το πείραμα των 20 ΜΟΔ, φαίνεται ότι η περιστασιακή ενεργοποίηση του ΣΑΚΠ εξισορρόπησε την καθυστέρηση που βιώνουν τα Alloc-ID απαλείφοντας τις «εκρήξεις» των 5 msec που φαίνονται στο προεπιλεγμένο σχήμα.

Η μεγιστοποίηση του δείκτη δικαιοσύνης καθυστέρησης για το ΣΑΚΠ (γράφημα 6.2d) δικαιολογείται από τα γραφήματα 6.3d και 6.3f, διότι η συμπαγής χρωματιστή γραμμή $y = x$ που σχηματίζουν οι καμπύλες των καθυστερήσεων υποδηλώνει ότι τα Alloc-ID μοιράζονται κατά τον ίδιο τρόπο τις συνέπειες της συμφόρησης. Αντίθετα, στα γραφήματα 6.3c και 6.3e του προεπιλεγμένου σχήματος φαίνεται ότι η καθυστέρηση που βιώνουν κάποια Alloc-ID συγκλίνει, ενώ σε άλλα αποκλίνει, είτε με τον ίδιο ρυθμό είτε με υψηλότερο. Η αύξηση του εν λόγω δείκτη για το προεπιλεγμένο σχήμα, όσο αυξάνεται πλήθος των ΜΟΔ, τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι η διεύρυνση του φαινομένου της συμφόρησης στο δίκτυο οδηγεί περισσότερα Alloc-ID στο να υφίστανται δραματική απόκλιση στις τιμές καθυστέρησης που βιώνουν (γράφημα 6.3e), με αποτέλεσμα να καταγράφονται παρόμοιες τιμές καθυστέρησης σε περισσότερα Alloc-ID. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι στο προεπιλεγμένο σχήμα παραμένουν Alloc-ID, των οποίων η καθυστέρηση συγκλίνει, κάτι το οποίο έχει ως συνέπεια η κάθυστέρηση κάποιων άλλων να αποκλίνει δραματικά. Αντίθετα, στο 6.3e, οι καθυστερήσεις του συνόλου των Alloc-ID αποκλίνουν με τον ίδιο ρυθμό, κάτι το οποίο σημαίνει ότι μοιράζονται δίκαια τις επιπτώσεις της συμφόρησης, αλλά και το ότι μετριάζονται οι ακραίες τιμές καθυστέρησης.



Σχήμα 6.3: Η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης για 20, 24 και 28 ΜΟΔ

*Ruin is the destination toward which all men rush,
each pursuing his own best interest in a society that
believes in the freedom of the commons.*

Garrett Hardin, Αμερικάνος φιλόσοφος

7

Συμπεράσματα

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η κατασκευή ενός μηχανισμού αγοράς για την αντιμετώπιση του προβλήματος κορεσμού στα δίκτυα **XG-PON** και η μελέτη της επίδρασής του σε γνωστές μετρικές δικτυακής απόδοσης. Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα του σεναρίου προσομοίωσης, προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις στο **ΣΑΚΠ**, καθώς και αναφέρονται δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά που προέκυψαν από τη διπλωματική εργασία.

Σε συνθήκες κορεσμού ενός δικτύου είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή απόδοση και η μέγιστη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα **6.3.3**, το προτεινόμενο **ΣΑΚΠ**, βασιζόμενο στην **IN** που προβλέπεται μεταξύ των χρηστών του δικτύου, επέδρασε θετικά στα εξής σημεία:

- Εξασφαλίστηκε η απόλυτη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών σε όρους καθυστέρησης και διεκπεραιωτικότητας δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής του δικτύου δεν κάνει διάκριση μεταξύ των χρηστών και παρέχει σε όλους ακριβώς την ίδια ποιότητα υπηρεσιών, ακόμη και σε συνθήκες συμφόρησης.
- Η μεγιστοποίηση της **ωφελείας** των χρηστών, που προβλέφθηκε από το Παίγνιο, αποτύπωθηκε στις μετρικές απόδοσης του δικτύου, καθώς παρατηρήθηκε βελτίωση σε όλες τις μετρικές, όταν η συμφόρηση έγινε εντονότερη και ο μηχανισμός ενεργοποιήθηκε σε μόνιμη βάση.

- Η εκ πρώτης όψεως ανεξήγητη αύξηση του δείκτη δικαιοσύνης καθυστέρησης που εμφανίζεται στο προεπιλεγμένο σχήμα, όταν αυξάνεται το πλήθος των **ΜΟΔ**, έδωσε την ευκαιρία για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εν λόγω δείκτη σε μεγαλύτερο βάθος. Δημιουργώντας τα γραφήματα που αναπαριστούν τη πορεία της τιμής μέσης καθυστέρησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της τιμής του ήταν ορθή, αφού όσο εντείνεται η συμφόρηση, αποκλίνει η τιμή καθυστέρησης όλο και περισσότερων **Alloc-ID**. Ακόμη, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι δείκτες δικαιοσύνης δεν πρέπει να εξετάζονται μεμονωμένα, αλλά σε σύγκριση με τις μετρικές στους οποίους αυτοί αναφέρονται.

Ο προσομοιωτής **XG-PON** που κατασκευάστηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς του **ΣΑΚΠ** αποτέλεσε μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση για εκτέλεση προσομοιώσεων, σε σύγκριση με τους πολύπλοκους προσομοιωτές που διατίθενται ως επεκτάσεις εξειδικευμένων λογισμικών προσομοίωσης δικτύων, όπως το Omnet++, το Riverbed SteelCentral (πρώην OPNET) και το NS-3. Η κατανόηση και εκμάθηση της λειτουργίας του προσομοιωτή της εργασίας είναι πολύ πιο εύκολη, σε αντίθεση με τους εξειδικευμένους προσομοιωτές, ενώ ταυτόχρονα είναι εύκολα προσαρμόσιμος και εστιάζει στην ορθή καταγραφή των μετρικών απόδοσης δικτύου, και όχι στη ρεαλιστικότητα της μοντελοποίησης διαφόρων στοιχείων του **XG-PON**, όπως τα αδρανή πλαισια **XGEM** ή η αναλυτική δομή των μεταδιδόμενων πλαισίων.

Μελλοντικές επεκτάσεις

Η θεωρητική υλοποίηση του **ΣΑΚΠ** θα μπορούσε να εφαρμοστεί ως πρόσθετη λειτουργία στον μηχανισμό **ΔΚΕΖ** ενός **ΤΟΓ**, σε περίπτωση που εμφανιστεί φαινόμενο κορεσμού. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίον το **ΣΑΚΠ** εφαρμόστηκε στον προσομοιωτή **XG-PON** δεν ήταν ρεαλιστικός, αφού δεν προβλέφθηκαν **ΣΕΥ** και προτεραιότητες μεταξύ των χρηστών. Είναι σαφές ότι δεν αποτελεί ζητούμενο η απόδοση δικαιοσύνης μεταξύ όλων αδιακρίτων των χρηστών, αλλά μεταξύ αυτών για τους οποίους προβλέπεται η παροχή του ίδιου επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών. Συνεπώς, προτείνεται η επανεξέταση του Παιγνίου για την προσθήκη της δυνατότητας, κατά την οποία οι συναρτήσεις U_i να έχουν διαφορετική μορφή για κάθε ομάδα προτεραιότητας, η οποία μορφή να αποδίδεται σε μεγαλύτερη απαιτητικότητα σε πόρους. Χρήσιμη πηγή για τις πιθανές μορφές των U_i μπορεί να αποτελέσει η δημοσίευση [103], στην οποία προβλέπονται συναρτήσεις **ωφελείας** για διαφορετικά είδη ροών κίνησης.

Αν και ο προσομοιωτής της εργασίας αποδεικνύεται αξιόπιστος από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ωστόσο, μπορεί να δεχθεί τις εξής βελτιώσεις:

- Την αντιμετώπιση των αποκλίσεων από το έγγραφο G.987.3, οι οποίες συνοψίζονται στην ενότητα A.1 του παραρτήματος.
- Η MATLAB, όπως και τα εναλλακτικά λογισμικά FreeMat, Scilab και Octave που διατίθενται ελεύθερα με άδειες χρήσης GNU, ως γλώσσες τέταρτης γενιάς, έχουν σχετικά χαμηλές αποδόσεις. Γι' αυτό προτείνεται η μετατροπή του προσομοιωτή σε μια γλώσσα τρίτης γενιάς, όπως η C++, ώστε να είναι δυνατή η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων για την εκτέλεση πιο απαιτητικών προσομοιώσεων που ολοκληρώνονται σε εύλογα χρονικά πλαίσια. Η μετατροπή σε γλώσσα χαμηλότερου επιπέδου θα μπορούσε να συνδυαστεί με τη μερική παραλληλοποίηση τμημάτων του προσομοιωτή. Δεδομένου ότι τα γεγονότα μιας γεγονοδηγούμενης προσομοίωσης εκτελούνται σειριακά, είναι δυνατή η παράλληλη εκτέλεση πειραμάτων σε επεξεργαστικά νήματα ή υπολογιστικούς κόμβους, τα αποτελέσματα των οποίων συλλέγονται από μια κεντρική διεργασία.
- Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος για την παραμετροποίηση και εκτέλεση σεναρίων προσομοίωσης
- Προσθήκη της δυνατότητας αυτοματοποιημένης προσθήκης νέων ροών κίνησης για κάθε Alloc-ID.

Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη Διπλωματική Εργασία

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας έχουν υποβληθεί στο επιστημονικό συνέδριο με κριτές «IEEE International Conference on Communications 2018», με τίτλο «PAS: A Fair Game-Driven DBA Scheme for XG-PON Systems» και συγγραφείς τους Χρήστο Δαλαμάγκα, Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη, Ιωάννη Μοσχολιό, Θωμά Λάγκα και Mohammad S. Obaidat.

Επίσης, με βάση το ΣΑΚΠ αναπτύχθηκε αντίστοιχο σχήμα ΔΑΜΚΕΖ για συστήματα NG-PON2, το οποίο έχει υποβληθεί στο επιστημονικό περιοδικό με κριτές «Optical Switching and Networking», με τίτλο «Dynamic Scheduling in TWDM-PONs Using Game Theory» και συγγραφείς τους Χρήστο Δαλαμάγκα, Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη, Στέλιο Καπετανάκη και Ιωάννη Μοσχολιό.

Παράρτημα

Ο προσομοιωτής XG-PON

Για την εξέταση της απόδοσης του προτεινόμενου ΣΑΚΠ αναπτύχθηκε ένας προσομοιωτής στη γλώσσα MATLAB, ο οποίος βασίζεται στο πρότυπο ITU-T G.987.3 και προσομοιώνει τη λειτουργία του ανοδικού καναλιού ενός XG-PON. Κύρια χαρακτηριστικά του προσομοιωτή είναι ο προσαρμόσιμος μηχανισμός ΔΚΕΖ και η δυνατότητα εισαγωγής πρόσθετης ρεαλιστικής κίνησης ΜΔΡ για τα Alloc-ID. Τα σενάρια και οι συναρτήσεις που συνθέτουν τον προσομοιωτή συνοψίζονται στον πίνακα A.1.

A.1 Συμβάσεις και αποκλίσεις από το πρότυπο G.987.3

Παρόλο που ο προσομοιωτής υποστηρίζει πλήρως τη λειτουργία ενός ανοδικού καναλιού XG-PON, για λόγους απλότητας στην υλοποίηση έχουν γίνει οι εξής παραδοχές, κάποιες εκ των οποίων αποκλίνουν από το πρότυπο της ITU-T:

- Κάθε ΜΟΔ διαθέτει μόνο ένα Alloc-ID, το οποίο ταυτίζεται με το ONU-ID του και στο οποίο ανατίθεται κάθε είδος κίνηση χωρίς κάποια διάκριση σε T-CONT και προτεραιότητες.
- Η ταχύτητα διάδοσης στην οπτική ίνα ορίστηκε ως το 70% της ταχύτητας του φωτός.
- Από το διάνυσμα του περιγραφέα κίνησης D ορίζονται μόνο οι τιμές R_F και R_A . Το διάνυσμα D είναι ίδιο για όλα τα Alloc-ID.
- Από το διαθέσιμο εύρος ζώνης για κάθε 125 μsec αφαιρούνται 24 byte για κάθε ΜΟΔ του δικτύου, υποθέτοντας ότι κάθε ΜΟΔ θα μεταδώσει ακριβώς μια ριπή δεδομένων στο αντίστοιχο πλαίσιο ανόδου XGTC.

Σενάριο	Λειτουργία
XGPON_Simulation.m	Αρχικοποίηση, παραμετροποίηση και εκτέλεση του σεναρίου προσομοίωσης.
XGPON.m	Ο «κορμός» του προσομοιωτή XG-PON.
Form_Traffic.m	Δημιουργία της δομής Traffic με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την κίνηση που παράγουν οι ΜΟΔ.
Set_PDT.m	Ορισμός της καθυστέρησης διάδοσης για κάθε ΜΟΔ.
DBA.m	Κατανομή εύρους ζώνης στα Alloc-ID και δημιουργία του πλαισίου BWmap.
Guaranteed_BA.m	Κατανομή του εγγυημένου εύρους ζώνης στα Alloc-ID.
Event1.m	Δημιουργία πλαισίου BWmap και ευρυεκπομπή του στις ΜΟΔ.
Event2.m	Άφιξη ενός BWmap σε ΜΟΔ και αποστολή ριπής XGTC από τη ΜΟΔ.
Event3.m	Άφιξη ριπής XGTC στο TOG.
Event4.m	Γεγονός τερματισμού
Event5.m	Δεσμευμένο γεγονός για σκοπούς αποσφαλμάτωσης.
Event6.m	Άφιξη πακέτου στην ουρά της ΜΟΔ (ΣΔΡ)
Event7.m	Άφιξη πακέτου στην ουρά της ΜΟΔ (ΜΔΡ)
Extract_Distribution.m	Εξαγωγή στατιστικών στοιχείων από καταγραφή αναλυτή πακέτων
RNG.m	Συνάρτηση RNG για προσαρμοσμένη στατιστική κατανομή
PHY_Payload.m	Υπολογισμός ωφέλιμου φορτίου ριπής ή πλαισίου PHY με βάση τον κώδικα RS(253,512).
Jain_Index.m	Υπολογισμός του δείκτη δικαιοσύνης ενός διανύσματος.

Πίνακας A.1: Τα σενάρια που συνθέτουν τον προσομοιωτή XG-PON

- Η μόνη λειτουργία που επιτελείται στο κανάλι καθόδου είναι η περιοδική ευρυεκπομπή του πλαισίου καθόδου XGTC, το οποίο περιέχει μόνο το πεδίο BWmap και κανένα πλαίσιο XGEM.
- Από την αρχιτεκτονική πολυπλεξίας του XG-PON έχει αφαιρεθεί η χρήση των XGEM Port-ID.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν οι ειδικές σχέσεις χρονισμού μεταξύ των ΜΟΔ και του ΤΟΓ. Ακόμη, θεωρείται ότι ο χρόνος επεξεργασίας από τις δικτυακές μονάδες είναι αμελητέος.

A.2 XGPON_Simulation.m

Το σενάριο XGPON_Simulation.m είναι αυτό που θα εκτελέσει κάποιος για να ξεκινήσει το σενάριο της προσομοίωσης, το οποίο αποτελείται από πολλά πειράματα, κάθε ένα εκ των οποίων διαφοροποιείται από το πλήθος των ΜΟΔ στο δίκτυο. Η ροή εκτέλεσης του σεναρίου προσομοίωσης είναι η εξής:

- Δημιουργείται το αντικείμενο Traffic, μέσω της συνάρτησης Form_Traffic.m.
- Ορίζονται οι παράμετροι του σεναρίου, όπως η διάρκεια προσομοίωσης (Sim_Time), το διάνυσμα περιγραφέα κίνησης D με τα R_F και R_A , το διάνυσμα N με το πλήθος των ΜΟΔ του κάθε πειράματος του σεναρίου και τη σταθερά Samples που δείχνει πόσες φορές θα εκτελεστεί κάθε πείραμα για μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Αρχικοποιούνται τα διανύσματα που διατηρούν τα τελικά αποτελέσματα των πειραμάτων και τα πειράματα εκτελούνται σε μια δομή parfor, η οποία δημιουργεί πολλαπλά επεξεργαστικά νήματα, ένα για κάθε πείραμα.
 - Σε κάθε πείραμα, πρώτα τοποθετούνται οι ΜΟΔ στο δίκτυο και υπολογίζεται η καθυστέρηση διάδοσης από το ΤΟΓ, με χρήση της συνάρτησης Set_PDT.m.
 - Για τις σταθερές του σεναρίου και την τοποθέτηση των ΜΟΔ εκτελείται δυο φορές προσομοίωση με τη συνάρτηση XGPON.m, η πρώτη με ενεργοποιημένο και η δεύτερη με απενεργοποιημένο το ΣΑΚΠ.
- Αφού ολοκληρωθούν όλα τα πειράματα, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε εξωτερικό αρχείο.

Κώδικας A.1: To σενάριο XGPON_Simulation.m

```

1 clc; clear;
2 fprintf('===== XGPON vs XGPON_GT Statistics =====\n');
3
4 hasVBR=1; hasCBR=1; %Enable or disable CBR/VBR traffic
5
6 Traffic = Form_Traffic( hasVBR, hasCBR );
7
8 Sim_Time = 1; %sec
9 D = [250 500]; %Bytes
10 N = 4:4:32; %for 8 workers
11 Samples = 5;
12 Experiments = length(N);
13
14 Final_Packet_Delay = zeros(2,Experiments);
15 Final_Goodput = zeros(2,Experiments);
16 Final_Load_Fairness = zeros(2,Experiments);
17 Final_Delay_Fairness = zeros(2,Experiments);
18 Final_Packet_Loss_Ratio = zeros(2,Experiments);
19 Final_PDV = zeros(2,Experiments);
20 tic;
21
22 parfor i = 1:Experiments
23     tmp_Packet_Delay = zeros(2,1);
24     tmp_Goodput = zeros(2,1);
25     tmp_Load_Fairness = zeros(2,1);
26     tmp_Delay_Fairness = zeros(2,1);
27     tmp_Packet_Loss_Ratio = zeros(2,1);
28     tmp_PDV = zeros(2,1);
29
30     for k = 1:Samples
31         PDT = Set_PDT(N(i));
32             [Packet_Delay, Goodput, Load_Fairness, Delay_Fairness,
33             Packet_Loss_Ratio, PDV] = XGPON(Sim_Time, D, N(i), PDT,
34             Traffic, false); %false disables Game Theory
35         tmp_Packet_Delay(1) = tmp_Packet_Delay(1) + sum(Packet_Delay)/length(
36             Packet_Delay);
37             tmp_Goodput(1) = tmp_Goodput(1) + Goodput;
38             tmp_Load_Fairness(1) = tmp_Load_Fairness(1) + Load_Fairness;
39             tmp_Delay_Fairness(1) = tmp_Delay_Fairness(1) + Delay_Fairness;
40             tmp_Packet_Loss_Ratio(1) = tmp_Packet_Loss_Ratio(1) + sum(Packet_Loss_Ratio
41                 )/length(Packet_Loss_Ratio);
42             tmp_PDV(1) = tmp_PDV(1) + sum(PDV)/length(PDV);
43
44             [Packet_Delay, Goodput, Load_Fairness, Delay_Fairness,
45             Packet_Loss_Ratio, PDV] = XGPON(Sim_Time, D, N(i), PDT,
46             Traffic, true); %true enables Game Theory
47             tmp_Packet_Delay(2) = tmp_Packet_Delay(2) + sum(Packet_Delay)/length(
48                 Packet_Delay);
49             tmp_Goodput(2) = tmp_Goodput(2) + Goodput;
50             tmp_Load_Fairness(2) = tmp_Load_Fairness(2) + Load_Fairness;

```

```

44         tmp_Delay_Fairness(2) = tmp_Delay_Fairness(2) + Delay_Fairness;
45         tmp_Packet_Loss_Ratio(2) = tmp_Packet_Loss_Ratio(2) + sum(Packet_Loss_Ratio
46             )/length(Packet_Loss_Ratio);
47         tmp_PDV(2) = tmp_PDV(2) + sum(PDV)/length(PDV);
48     end
49     tmp_Packet_Delay = tmp_Packet_Delay(:)/Samples;
50     tmp_Goodput = tmp_Goodput(:)/Samples;
51     tmp_Load_Fairness = tmp_Load_Fairness(:)/Samples;
52     tmp_Delay_Fairness = tmp_Delay_Fairness(:)/Samples;
53     tmp_Packet_Loss_Ratio = tmp_Packet_Loss_Ratio(:)/Samples;
54     tmp_PDV = tmp_PDV(:)/Samples;
55
56     Final_Packet_Delay(:,i) = tmp_Packet_Delay;
57     Final_Goodput(:,i) = tmp_Goodput;
58     Final_Load_Fairness(:,i) = tmp_Load_Fairness;
59     Final_Delay_Fairness(:,i) = tmp_Delay_Fairness;
60     Final_Packet_Loss_Ratio(:,i) = tmp_Packet_Loss_Ratio;
61     Final_PDV(:,i) = tmp_PDV;
62
63     fprintf('\n%d ONUs:\n', N(i));
64     fprintf('\tXGPON:    Delay=%f msec\t Goodput=%f Mbps\t Load Fairness=%f\t
65             Delay Fairness=%f\n', tmp_Packet_Delay(1)/1e-3, tmp_Goodput(1)*8e-6,
66             tmp_Load_Fairness(1), tmp_Delay_Fairness(1));
67     fprintf('\tXGPON-GT: Delay=%f msec\t Goodput=%f Mbps\t Load Fairness=%f\t
68             Delay Fairness=%f\n', tmp_Packet_Delay(2)/1e-3, tmp_Goodput(2)*8e-6,
69             tmp_Load_Fairness(2), tmp_Delay_Fairness(2));
70
71 end
72
73 Packet_Delay = Final_Packet_Delay;
74 Goodput = Final_Goodput;
75 Load_Fairness = Final_Load_Fairness;
76 Delay_Fairness = Final_Delay_Fairness;
77 Packet_Loss_Ratio = Final_Packet_Loss_Ratio;
78 PDV = Final_PDV;
79
80 save('results.mat','N','Packet_Delay','Goodput','Load_Fairness','Delay_Fairness',
81      'Traffic','Packet_Loss_Ratio','PDV','Sim_Time','D','N','Samples');
82
83 fprintf('\n===== End of simulation. Total time: %f =====\n', toc);

```

A.3 XGPON.m

Η συνάρτηση XGPON.m προσομοιώνει τη λειτουργία του ανοδικού καναλιού ενός XG-PON, εστιάζοντας στις μετρικές απόδοσης δικτύου που προκύπτουν από τη ΔΚΕΖ και τον χρονο-προγραμματισμό των αποστολών από τις ΜΟΔ. Παράμετροι εισόδου του προσομοιωτή είναι ο χρόνος προσομοίωσης, το διάνυσμα του περιγραφέα κίνησης, το πλήθος των ΜΟΔ που απο-

τελούν το δίκτυο, το διάνυσμα με την καθυστέρηση διάδοσης κάθε ΜΟΔ από το ΤΟΓ, η δομή Traffic και μια λογική μεταβλητή που δείχνει αν θα χρησιμοποιηθεί το ΣΑΚΠ στο πείραμα.

Η προσομοίωση ακολουθεί τις αρχές του γεγονοστρεφόμενου προγραμματισμού (event-driven programming), σύμφωνα με τον οποίον η ροή εκτέλεσης του κώδικα εξαρτάται από τη σειρά των γεγονότων που πρέπει να εκτελεστούν [112], [113]. Τα γεγονότα αυτά αναπαριστώνται από τις συναρτήσεις Event{1-6}.m, κάθε μια εξ αυτών διατηρείται στον πίνακα Event_List, ο οποίος λειτουργεί ως ουρά προτεραιότητας, με κάθε νέο γεγονός να εισέρχεται σε νέα στήλη του πίνακα. Συνεπώς, οι γραμμές του πίνακα διατηρούν τις ιδιότητες του κάθε γεγονότος, οι οποίες είναι οι εξής:

1. Το αναγνωριστικό του γεγονότος. Για παράδειγμα, το Event1 έχει ως αναγνωριστικό το 1, ενώ το Event4 έχει το 4.
2. Τη χρονική στιγμή στην οποία θα εκτελεστεί το γεγονός, σε δευτερόλεπτα.
3. Η προτεραιότητα του γεγονότος, στην περίπτωση που δυο γεγονότα συμπέσουν στην ίδια χρονική στιγμή. Χαμηλότερη απόλυτη τιμή για αυτό το πεδίο υποδεικνύει υψηλότερη προτεραιότητα.
4. Το αναγνωριστικό της ΜΟΔ που αφορά το συγκεκριμένο γεγονός.

Αν το γεγονός αφορά την αποστολή μιας ριπής XGTC προς το ΤΟΓ, αξιοποιούνται και οι εξής γραμμές:

5. Το μέγεθος της ωφέλιμης πληροφορίας που περιέχει η ριπή.
 6. Η τιμή του πεδίου BufOcc.
 7. Ο αριθμός των XGEM που περιέχονται στη ριπή XGTC, με εξαίρεση το πρώτο τεμάχιο ενός τεμαχισμένου SDU.
- 8+. Για κάθε ολοκληρωμένη ΜΔΥ ή για κάθε δεύτερο τεμάχιο ΜΔΥ που ενθυλακώνεται σε XGEM, ο χρόνος άφιξής του στην ουρά της ΜΟΔ.

Για να ξεκινήσει η προσομοίωση, αρχικοποιείται ο πίνακας Event_List με τα γεγονότα που είναι απαραίτητα για να αρχίσει η ανταλλαγή πλαισίων μεταξύ των ΜΟΔ και του ΤΟΓ. Αυτά περιλαμβάνουν τη δημιουργία γεγονότων Event6 και Event7 που παράγουν ΣΔΡ και ΜΔΡ κίνηση αντίστοιχα στη λογική ουρά κάθε Alloc-ID, καθώς και το γεγονός που αφορά την πρώτη

ευρυεκπομπή του πλαισίου καθόδου που περιέχει το πεδίο BWmap. Τέλος, αρχικοποιείται και το γεγονός τερματισμού Event4 με χρόνο εκτέλεσης που προσδιορίζεται στο τέλος της προσομοίωσης.

Η διαδικασία προσομοίωσης ξεκινά με μια δομή while, σε κάθε εκτέλεση της οποίας εξάγεται και εκτελείται από τον πίνακα Event_List το γεγονός με τη χαμηλότερη τιμή στο πεδίο του χρόνου και την υψηλότερη προτεραιότητα. Αφού εκτελεστεί το γεγονός μέσω μιας δομής if-else, ταξινομείται ο πίνακας Event_List σε αύξουσα σειρά με βάση τον χρόνο εκτέλεσης και την προτεραιότητα του κάθε γεγονότος.

Η ολοκλήρωση της προσομοίωσης σηματοδοτείται με την εκτέλεση του Event4, το οποίο υπολογίζει τις μετρικές απόδοσης του δικτύου. Οι υπολογιζόμενες μετρικές αποτελούν την έξοδο του προσομοιωτή.

Κώδικας A.2: Η συνάρτηση XGPON.m

```

1 function [ Packet_Delay, Goodput, Load_Fairness, Delay_Fairness,
2   Packet_Loss_Ratio, PDV, Record_Mean_Delay_per_ONU ] = XGPON( Sim_Time, D, N,
3   PDT, Traffic, PAS_Flag )
4 % XGPON Main XG-PON event-driven simulator
5 % Simulates the upstream channel of an ITU-T G.987 XG-PON1 network and
6 % exports network statistics. All simulation parameters and definitions
7 % are expressed in bytes and seconds.
8 %
9 % See also FORM_TRAFFIC, SET_PDT.
10
11
12
13
14
15 %% System constants
16 Upstream_Speed = 311040000;
17 Downstream_Transmission_Delay = 0.000125;
18 C = 38880 - 24*N;
19 Guard_Time = 2.57201646e-8;
20
21
22 %% BWmap related variables
23 Buf0cc_Buffer = zeros(1,N);
24 BWmap = zeros(3,N); %AllocID, StartTime, GrantSize
25 BWmap_Q = zeros(3,0,N); %Keeps BWmap that each ONU should read first.
26 BWmap_Q_Index = zeros(1,N);
27 CAT = 0;
28
29
30 %% Data packet queue
31 Serial_Number = 1;
32 Q = zeros(3,0,N); % packet_id, time entered in Q, size in bytes
33 Q_Index = zeros(1,N);
34 Buffer_Occupancy = zeros(1, N);
35 Buffer_Size = Inf; % Bytes
36 Padding = zeros(1, N);
37
38 %% Variables for network metrics

```

```

31 Total_Data = 0; %Bytes
32 Packet_Delay = zeros(1,N);
33 PDV = zeros(5,N); % 1. not the first in steam? 2. delay of first packet, 3. delay
   of second packet, 4. PDV accumulator, 5. PDV counter
34 Packet_Loss = zeros(1,N);
35 Arrivals = zeros(1,N);
36 Load_Fairness = zeros(2,1); %Jain's load fairness index
37
38 %% Event_List initialization
39 Event_List = zeros(7,0);
40
41 if Traffic.vbr.isenabled % VBR traffic(s) initialization
42     fields = fieldnames(Traffic.vbr);
43     Number_of_VBR_Traffics = length(fields)-1;
44     for k = 1:Number_of_VBR_Traffics
45         for i = 1:N
46             Event_List(1, end + 1) = 6+k;
47             Event_List(2, end) = 0;
48             Event_List(3, end) = 1;
49             Event_List(4, end) = i;
50         end
51     end
52 end
53 if Traffic.cbr.isenabled % CBR traffic initialization
54     for i = 1:N
55         Event_List(1, end + 1) = 6;
56         Event_List(2, end) = 0;
57         Event_List(3, end) = 1;
58         Event_List(4, end) = i;
59     end
60 end
61
62 Event_List(1, end + 1) = 1;
63 Event_List(2, end) = 0;
64 Event_List(3, end) = 2;
65
66 Event_List(1, end + 1) = 4;
67 Event_List(2, end) = Sim_Time;
68 Event_List(3, end) = 5;
69
70 %% Optional Event 5 initialization for debugging purposes
71 Record_Mean_Delay_per_ONU = zeros(N,0);
72 Event5_Rate = Sim_Time/100;
73 Event_List(1, end + 1) = 5;
74 Event_List(2, end) = 0;
75 Event_List(3, end) = 3;
76
77 %% Event_List main loop
78 Sim_Flag = true;
79 while Sim_Flag
80     Event = Event_List(1,1);

```

```

81 Time = Event_List(2,1);
82 if Event == 1 % "Create and broadcast" BWmap
83 [ Event_List, BWmap, CAT, BufOcc_Buffer, Load_Fairness, BWmap_Q,
84     BWmap_Q_Index ] = Event1 ( Event_List, Time, BWmap, CAT, BufOcc_Buffer,
85     Load_Fairness, Downstream_Transmission_Delay, D, Guard_Time, C, N,
86     Upstream_Speed, PDT, PAS_Flag, BWmap_Q, BWmap_Q_Index );
87 elseif Event == 2 % Send XGTC burst
88 [ Event_List, Q, Q_Index, BWmap_Q, BWmap_Q_Index, Buffer_Occupancy ] =
89     Event2 ( Time, Event_List, Q, Q_Index, BWmap_Q, Upstream_Speed, PDT,
90     BWmap_Q_Index, Buffer_Occupancy );
91 elseif Event == 3 % XGTC burst arrival
92 [ BufOcc_Buffer, Total_Data, Packet_Delay, Arrivals, PDV ] = Event3 ( Time,
93     Event_List, BufOcc_Buffer, Total_Data, Packet_Delay, Arrivals, PDV );
94 elseif Event == 4 % Termination event
95 [ Sim_Flag, Packet_Delay, Goodput, Load_Fairness, Delay_Fairness,
96     Packet_Loss_Ratio, PDV ] = Event4 ( Time, Packet_Delay, Total_Data,
97     Load_Fairness, N, Arrivals, Packet_Loss, PDV );
98 elseif Event == 5 % Reserved Event for debugging
99 [ Event_List, Record_Mean_Delay_per_ONU] = Event5 ( Time, Event_List,
100    Event5_Rate, Packet_Delay, Record_Mean_Delay_per_ONU, N, Arrivals );
101 elseif Event == 6 % CBR Traffic
102 [ Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy, Packet_Loss ] =
103     Event6 ( Time, Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy,
104     Buffer_Size, Packet_Loss, Traffic.cbr );
105 else % VBR Traffic events in range [7, Inf]
106 [ Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy, Packet_Loss ] =
107     Event7 ( Time, Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy,
108     Buffer_Size, Packet_Loss, Traffic.vbr.(fields{(Event-6)+1}) );
109 end
110 Event_List(:,1)=[];
111 Event_List=(sortrows(Event_List',[2,3]))';
112 end
113 end

```

A.4 Event1.m

Το γεγονός Event1 δημιουργεί το περιοδικό πλαίσιο καθόδου PHY. Επειδή δεν προσομοιώνεται η λειτουργία του καθοδικού καναλιού, το πλαίσιο αυτό περιέχει μόνο το πεδίο BWmap, για την κατασκευή του οποίου καλείται η συνάρτηση DBA.m.

Επειδή τα αντίγραφα του πλαισίου καθόδου λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τις ΜΟΔ, λόγω της επίδρασης του χρόνου διάδοσης στην οπτική ίνα, χρησιμοποιείται η τρισδιάστατη ουρά BWmap_Q, προτεραιότητας FIFO, η οποία αποθηκεύει τη σωστή έκδοση του πλαισίου BWmap που πρέπει να λάβει μια ΜΟΔ.

Πριν ολοκληρωθεί το γεγονός, τροποποιείται ο πίνακας Event_List, ώστε το Event1 να

εκτελεστεί ξανά μετά από 125 μsec.

Κώδικας A.3: Η συνάρτηση Event1.m

```

1 function [ Event_List, BWmap, CAT, BufOcc_Buffer, Load_Fairness, BWmap_Q,
2   BWmap_Q_Index ] = Event1 ( Event_List, Time, BWmap, CAT, BufOcc_Buffer,
3   Load_Fairness, Downstream_Transmission_Delay, D, Guard_Time, C, N,
4   Upstream_Speed, PDT, PAS_Flag, BWmap_Q, BWmap_Q_Index )
5 % EVENT1 Creates and broadcasts downstream PHY frame
6 %     Calls the DBA mechanism to create BWmap and then broadcasts the
7 % downstream PHY frame to ONUs. PHY frame arrival is represented
8 % by scheduling Event2. EVENT1 is strictly repeated each 125 usec.
9 %
10 % See also DBA, EVENT2.
11
12 [ BWmap, CAT, BufOcc_Buffer, Load_Fairness ] = DBA ( Time, BufOcc_Buffer, BWmap,
13   D, CAT, Downstream_Transmission_Delay, Guard_Time, C, N, Upstream_Speed, PDT,
14   Load_Fairness, PAS_Flag );
15 %fprintf('#[%d]# New BWmap was created #\n', Time);
16
17 for ONU_ID = 1:N
18
19   % BWmap_Q (FIFO) captures the version of BWmap that ONU should read.
20   BWmap_Q_Index(ONU_ID) = BWmap_Q_Index(ONU_ID) + 1;
21   BWmap_Q( 1, BWmap_Q_Index(ONU_ID), ONU_ID ) = BWmap( 1, ONU_ID );
22   BWmap_Q( 2, BWmap_Q_Index(ONU_ID), ONU_ID ) = BWmap( 2, ONU_ID );
23   BWmap_Q( 3, BWmap_Q_Index(ONU_ID), ONU_ID ) = BWmap( 3, ONU_ID );
24
25   Event_List( 1, end + 1 ) = 2;
26   Event_List( 2, end ) = Time + PDT(ONU_ID) + Downstream_Transmission_Delay;
27   Event_List( 3, end ) = 2;
28   Event_List( 4, end ) = ONU_ID;
29
30   %fprintf('#1 BWmap scheduled for arrival to ONU_ID (%d) at time [%d]\n',
31   %         ONU_ID, Event_List( 2, end ));
32 end
33
34 Event_List( 1, end + 1 ) = 1;
35 Event_List( 2, end ) = Time + 0.000125;
36 Event_List( 3, end ) = 2;
37
38 end

```

A.5 DBA.m

Η συνάρτηση DBA εκτελείται από το Event1.m για τον σχηματισμό του πεδίου BWmap και προσομοιώνει τη λειτουργία του μηχανισμού ΔΚΕΖ που διαθέτει το ΤΟΓ και περιλαμβάνει την κατανομή του εύρους ζώνης και τον χρονοπρογραμματισμό των ριπών.

Η διαδικασία ξεκινά με την κατανομή του εγγυημένου εύρους ζώνης από τη συνάρτηση `Guaranteed_BA.m`. Αμέσως μετά, ανάλογα με τις αναθέσεις και τις απαιτήσεις που απομένουν να ικανοποιηθούν για κάθε Alloc-ID, υπολογίζεται το υπολειπόμενο εύρος ζώνης για τη φάση της ανάθεσης μη εγγυημένου εύρους ζώνης (`Residual_Bandwidth`) και οριστικοποιούνται οι τελικές αναθέσεις για τα Alloc-ID που δεν έχουν πρόσθετες απαιτήσεις (`Final_Allocations`).

Επισημαίνεται, ότι για τον υπολογισμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης και των τελικών αναθέσεων λαμβάνεται υπόψιν το μικτό εύρος ζώνης που καταναλώνει η τελική ριπή της ανάθεσης, με την προσάρτηση όλων των κεφαλίδων και την εφαρμογή του κώδικα ΕΔΣ (βλ. το παράδειγμα της ενότητας 6.3.2). Το καταναλωμένο εύρος ζώνης που προκύπτει από μια ανάθεση υπολογίζεται από τη συνάρτηση `PHY_Payload.m`.

Κατά τη φάση της ανάθεσης του μη εγγυημένου εύρους ζώνης εκτελείται ο αλγόριθμος ΣΑΚΠ, αν ισχύουν οι προϋποθέσεις που περιγράφονται στην ενότητα 6.2. Αν δεν ισχύουν οι συνθήκες του Παιγνίου, τότε εφαρμόζεται το προεπιλεγμένο σχήμα, το οποίο σε μια επαναληπτική διαδικασία βρίσκει την ελάχιστη απαίτηση εύρους ζώνης από τα Alloc-ID και την αναθέτει σε όλους, μέχρι είτε να εξαντληθεί το εύρος ζώνης είτε να ικανοποιηθούν όλοι οι χρήστες [56], [78].

Για τις τελικές αναθέσεις που σχηματίστηκαν στο διάνυσμα `Final_Allocations` πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των ριπών στις οποίες αντιστοιχούν, με τέτοιον τρόπο ώστε να διατηρείται η προβλεπόμενη απόσταση ασφαλείας, δηλαδή η απόσταση μεταξύ διαδοχικών αφίξεων από διαφορετικές ΜΟΔ στο ΤΟΓ να μην είναι μικρότερη από 64 bit. Ταυτόχρονα, σχηματίζεται και η τελική μορφή του πίνακα `BWmap`, κάθε στήλη του οποίου περιέχει μια κατανομή με στοιχεία το Alloc-ID, το StartTime ώστε να εξασφαλιστεί η απόσταση ασφαλείας και το GrantSize με την τελική κατανομή.

Πριν ολοκληρωθεί η εκτέλεση της συνάρτησης, υπολογίζεται ο δείκτης δικαιοσύνης φόρτου. Συγκεκριμένα, για κάθε Alloc-ID που είχε απαιτήσεις σε byte, συλλέγεται το πόσα αυτό ζήτησε και πόσα έλαβε μέσω του πεδίου `BWmap`. Έπειτα, υπολογίζεται ο δείκτης μέσω της συνάρτησης `Jain_Index.m` για το διάνυσμα που προκύπτει διαιρώντας το τι έλαβε ο καθένας προς τι ζήτησε.

Κόδικας A.4: Η συνάρτηση `DBA.m`

```

1 function [ BWmap, CAT, Buf0cc_Buffer, Load_Fairness ] = DBA ( Time, Buf0cc_Buffer
    , BWmap, D, CAT, Downstream_Transmission_Delay, Guard_Time, C, N,
    Upstream_Speed, PDT, Load_Fairness, PAS_Flag )
2 % DBA The Dynamic Bandwidth Allocation mechanism of XG-PON
3 % DBA is called by Event1 every 125 usec and creates BWmap of the
4 % upcomming downstream frame. Performs bandwidth allocation and

```

```

5 % transmission scheduling for the upstream channel based on the
6 % received DBRus.
7 %
8 % See also EVENT1, GUARANTEED_BANDWIDTH_ALLOCATION, REED_SOLOMON.
9
10 Initial_Demands = BufOcc_Buffer;
11 BufOcc_Buffer = zeros(1,N);
12 Demands(:) = Initial_Demands(:) + 4;
13 %fprintf('Bandwidth Allocation starts\n\tDemand: '); disp(Demands);
14
15 %% Guaranteed bandwidth allocation and calculation of excessive demands
16
17 [Guaranteed_Allocations, Non_Guaranteed_Demands] = Guaranteed_BA(Demands, D, N);
18 %fprintf('\tGuaranteed allocations: '); disp(Guaranteed_Allocations);
19 Final_Allocations = zeros(1,N);
20 Residual_Bandwidth = C;
21 for AllocID = 1:N
22     if Non_Guaranteed_Demands(AllocID) == 0
23         Residual_Bandwidth = Residual_Bandwidth - PHY_Payload(
24             Guaranteed_Allocations(AllocID));
25         Final_Allocations(AllocID) = Guaranteed_Allocations(AllocID);
26     end
27 end
28
29 %% Non-Guaranteed bandwidth allocation phase
30 if PAS_Flag && nnz(Non_Guaranteed_Demands) > 1 && sum(PHY_Payload(
31     Non_Guaranteed_Demands)) > Residual_Bandwidth
32     %% allocate non-guaranteed BW using the market equilibrium
33     s = zeros(2,0);
34     for AllocID = 1:N
35         if Non_Guaranteed_Demands(AllocID) > 0
36             s(1, end+1) = PHY_Payload(Non_Guaranteed_Demands(AllocID)) +
37                 Guaranteed_Allocations(AllocID));
38             s(2, end) = AllocID;
39         end
40     end
41     a = zeros(1,length(s));
42     for i = 1:length(s)
43         a(i) = floor( s(1,i) * Residual_Bandwidth / sum(s(1,:)) ); % allocate
44             using the equilibrium
45         Final_Allocations(s(2,i)) = a(i) - ceil(a(i)/232)*16 - 8; % assign the
46             clean amount of bytes
47     end
48 elseif C - sum(PHY_Payload(Guaranteed_Allocations)) > 0 && nnz(
49     Non_Guaranteed_Demands) > 0
50     %% allocate non-guaranteed BW 'blindly'
51     Final_Allocations = Guaranteed_Allocations;
52     Flag = true;
53     while Flag && sum(Non_Guaranteed_Demands) > 0 && C > sum(PHY_Payload(
54         Final_Allocations))
55         Minimum_Demand = Inf;

```

```

49     for AllocID = 1:N
50         if Non_Guaranteed_Demands(AllocID) < Minimum_Demand &&
51             Non_Guaranteed_Demands(AllocID) > 0
52                 Minimum_Demand = Non_Guaranteed_Demands(AllocID);
53             end
54         end
55         for AllocID = 1:N
56             if Non_Guaranteed_Demands(AllocID) > 0
57                 Test_Allocation = Final_Allocations;
58                 Test_Allocation(AllocID) = Test_Allocation(AllocID) + Minimum_Demand;
59                 if C - sum(PHY_Payload(Test_Allocation)) >= 0
60                     Non_Guaranteed_Demands(AllocID) = Non_Guaranteed_Demands(AllocID)
61                         - Minimum_Demand;
62                     Final_Allocations(AllocID) = Final_Allocations(AllocID) +
63                         Minimum_Demand;
64                 else
65                     Test_Allocation = Final_Allocations;
66                     Test_Allocation(AllocID) = [];
67                     Residual_Bandwidth = C - sum(PHY_Payload(Test_Allocation));
68                     Final_Allocations(AllocID) = Residual_Bandwidth - ceil(
69                         Residual_Bandwidth/232)*16 - 8;
70                     Flag = false;
71                     break;
72                 end
73             end
74         end
75     end
76
77 %% Schedule allocations
78 for AllocID = 1 : N
79     Allocated_Size = PHY_Payload(Final_Allocations(AllocID));
80     Arrival_Time = Time + PDT(AllocID) + Downstream_Transmission_Delay +
81         Allocated_Size/Upstream_Speed + PDT(AllocID);
82     if Arrival_Time > CAT && Arrival_Time - CAT >= Guard_Time
83         StartTime = 0;
84         CAT = Arrival_Time;
85     elseif Arrival_Time > CAT && Arrival_Time - CAT < Guard_Time
86         StartTime = CAT - Arrival_Time + Guard_Time;
87         CAT = Arrival_Time + StartTime;
88     else
89         StartTime = CAT - Arrival_Time;
90         CAT = CAT + Guard_Time;
91     end
92     BWmap(2, AllocID) = AllocID;
93     BWmap(2, AllocID) = StartTime;
94     BWmap(3, AllocID) = Final_Allocations(AllocID);
95 end
96 %fprintf('\tFinal allocations: '); disp(BWmap(3,:));
97 %% Calculate Fairness Index of allocations
98 Demand = zeros(1,0);

```

```

95 Supply = zeros(1,0);
96
97 for i = 1 : N
98     if Initial_Demands(i) > 0
99         Demand(end+1) = Initial_Demands(i);
100        Supply(end+1) = BWmap(3, i);
101    end
102 end
103
104 if ~isempty(Demand)
105     Load_Fairness(1) = Load_Fairness(1) + Jain_Index(Supply./Demand);
106     Load_Fairness(2) = Load_Fairness(2) + 1;
107 end
108
109 end

```

A.6 Guaranteed_BA.m

Η συνάρτηση `Guaranteed_BA` πραγματοποιεί τη διαδικασία της εγγυημένης κατανομής εύρους ζώνης.

Εκτελούμενη σε δυο επαναλήψεις, η συνάρτηση πρώτα αναθέτει το R_F σε κάθε Alloc-ID ανεξάρτητα από το τι αυτό ζήτησε και στην περίπτωση που τουλάχιστον ένα Alloc-ID έχει πρόσθετες απαιτήσεις ενεργοποιείται η διαδικασία δυναμικής ανάθεσης του R_A . Σε αυτή την περίπτωση, αν ένα Alloc-ID έχει πρόσθετες απαιτήσεις που είναι μικρότερες από το R_A , τότε του ανατίθεται το σύνολο των αναγκών του, ενώ στην αντίθετη περίπτωση του ανατίθεται ολόκληρο το R_A .

Από τις δυο παραπάνω διαδικασίες σχηματίζεται το διάνυσμα `Demands` που περιέχει τις πρόσθετες απαιτήσεις για κάθε Alloc-ID και το `Guaranteed_Allocations` με τις αναθέσεις σε εγγυημένο εύρος ζώνης. Ο συνδυασμός των δυο διανυσμάτων μπορεί να δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες για το σύνολο του εύρους ζώνης που καταναλώνει η ριπή καθενός Alloc-ID με την ανάθεση μόνο του εγγυημένου εύρους ζώνης ή του συνόλου των απαιτήσεών του.

Κώδικας A.5: Η συνάρτηση Guaranteed_BA.m

```

1 function [Guaranteed_Allocations, Demands] = Guaranteed_BA(Demands, D, N )
2 % GUARANTEED_BA Allocates guaranteed bandwidth to AllocIDs
3 % Allocates R_F statically and R_A dynamically to AllocIDs.
4 %
5 % See also DBA, EVENT1.
6
7 Guaranteed_Allocations = zeros(1,N);
8
9 %% Allocate R_F regardless of ONUs needs
10 for AllocID = 1:N
11     Guaranteed_Allocations(AllocID) = D(1);
12     Demands(AllocID) = Demands(AllocID) - D(1);
13     if Demands(AllocID) < 0
14         Demands(AllocID) = 0;
15     end
16 end
17
18 %% Allocate R_A dynamically
19 if nnz(Demands) > 0 %if at least one node wants additive bandwidth
20     for AllocID = 1:N
21         if Demands(AllocID) > 0 && Demands(AllocID) <= D(2)
22             Guaranteed_Allocations(AllocID) = Guaranteed_Allocations(AllocID) +
23                 Demands(AllocID);
24             Demands(AllocID) = 0;
25         elseif Demands(AllocID) > D(2)
26             Guaranteed_Allocations(AllocID) = Guaranteed_Allocations(AllocID) + D(2)
27             ;
28             Demands(AllocID) = Demands(AllocID) - D(2);
29         end
30     end
31 end

```

A.7 Event2.m

Το γεγονός Event2 χρονοπρογραμματίζεται από το Event1.m και ενεργοποιείται όταν πραγματοποιείται η άφιξη ενός πλαισίου καθόδου σε μια ΜΟΔ. Το γεγονός σχηματίζει τη ριπή ανόδου με βάση τις ευκαιρίες πρόσβασης που παρέχει το BWmap που λαμβάνει η ΜΟΔ, τις ΜΔΥ που διαθέτει το Alloc-ID της ΜΟΔ στην ουρά του και τους κανόνες πλαισίωσης XGEM και τεμαχισμού ΜΔΥ που περιγράφηκαν στην υποενότητα 4.5.1.

Η εκτέλεση του γεγονότος ξεκινά με την εξαγωγή του BWmap από την ουρά FIFO και την επεξεργασία του για την εξαγωγή των πεδίων StartTime και GrantSize. Με δεδομένο ότι κάθε Alloc-

ID θα στείλει αναφορά DBRu, υπολογίζεται το διαθέσιμο ωφέλιμο φορτίο της ριπής XGTC με την αφαίρεση του πεδίου DBRu από το GrantSize, δηλαδή 4 byte.

Αν το Alloc-ID της ΜΟΔ έχει δεδομένα στην ουρά του, τότε σε μια επαναληπτική διαδικασία υπολογίζεται πόσες ΜΔΥ είναι δυνατό να ενταχθούν στο διαθέσιμο ωφέλιμο φορτίο της υπό διαμόρφωσης ριπής XGTC, δεδομένο ότι κάθε ΜΔΥ επιβαρύνεται με πλαισίωση XGEM των 8 byte. Αν η ΜΔΥ μαζί με την επιβάρυνσή της μπορούν να ενταχθούν στη ριπή και το μέγεθος της ΜΔΥ είναι πάνω από 8 byte, τότε αυτό πλαισιώνεται και εντάσσεται κανονικά στη ριπή. Αν κάποια ΜΔΥ έχει μέγεθος λιγότερο από 8 byte, τότε αυτή συμπληρώνεται (padding) με πρόσθετα byte, ώστε το πλαίσιο XGEM να φτάσει το ελάχιστο ποσό των 16 byte και να ενταχθεί στη ριπή. Αν κάποια ΜΔΥ μαζί με την επιβάρυνσή του δεν «χωρά» στη ριπή XGTC αλλά η διαθέσιμη χωρητικότητα είναι τουλάχιστον 16 byte, τότε η ΜΔΥ τεμαχίζεται, με σκοπό να αξιοποιηθεί πλήρως η διαθέσιμη χωρητικότητα στο ωφέλιμο φορτίο XGTC και ολοκληρώνεται η διαδικασία πλαισίωσης ΜΔΥ.

Οι ΜΔΥ που επιλέχθηκαν για ένταξη στη ριπή αφαιρούνται από την ουρά του Alloc-ID και ανανεώνεται το διάνυσμα Buffer_Occupancy που διατηρεί το μέγεθος της ουράς αυτής σε byte. Για κάθε ολόκληρη ΜΔΥ που ενθυλακώνεται, καταγράφεται στο Event3 που δημιουργείται η χρονική στιγμή άφιξης του πλαισίου στην ουρά αναμονής, ώστε με την άφιξή του στο ΤΟΓ να υπολογιστεί η καθυστέρηση για τη λήψη του.

Τέλος, με δεδομένο ότι η ΜΟΔ έχει αξιοποίησει ολόκληρο το GrantSize, είτε με πλαίσια XGEM που περιέχουν ΜΔΥ ή τεμάχια ΜΔΥ, είτε με αδρανή XGEM, διαμορφώνεται το μέγεθος της ριπής PHY, το οποίο προκύπτει από το ωφέλιμο φορτίο PHY και την κεφαλίδα των 24 byte. Το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου PHY προκύπτει από τη συνάρτηση PHY_Payload.m, η λειτουργία της οποίας εφαρμόζεται επί του ωφέλιμου φορτίου XGTC, το οποίο ταυτίζεται με το GrantSize.

Πριν ολοκληρωθεί το Event2, χρονοπρογραμματίζεται η άφιξη της ριπής ανόδου με την ολοκλήρωση της δημιουργίας του Event3. Ο χρόνος εκτέλεσης του γεγονότος προκύπτει από τον τρέχοντα χρόνο συν την καθυστέρηση StartTime προς αποφυγή σύγκρουσης συν τον χρόνο μετάδοσης της ριπής συν τον χρόνο διάδοσης του οπτικού σήματος.

Κώδικας A.6: Η συνάρτηση Event2.m

```

1 function [ Event_List, Q, Q_Index, BWmap_Q, BWmap_Q_Index, Buffer_Occupancy ] =
2   Event2 ( Time, Event_List, Q, Q_Index, BWmap_Q, Upstream_Speed, PDT,
3   BWmap_Q_Index, Buffer_Occupancy )
4 % EVENT2 Schedule XGTC burst
5 % Responds to a received BWmap. Upon BWmap arrival, ONU forms it's DBRu
6 % and allocation payload based on it's queue and GrantSize of the received
7 % BWmap. Finally, ONU sends the burst by scheduling Event3.
8 %
9 % See also EVENT1, EVENT3, EVENT6, EVENT7.
10
11 AllocID = Event_List(4,1);
12 %fprintf('[%d] #2 BWmap arrived to AllocID (%d).\n', Time, AllocID );
13
14 %% Take the right version of BWmap
15 StartTime = BWmap_Q( 2, 1, AllocID );
16 GrantSize = BWmap_Q( 3, 1, AllocID );
17
18 for i = 1 : BWmap_Q_Index(AllocID)-1
19   BWmap_Q( : , i, AllocID ) = BWmap_Q( : , i+1, AllocID );
20 end
21 BWmap_Q( : , BWmap_Q_Index(AllocID), AllocID ) = 0;
22 BWmap_Q_Index(AllocID) = BWmap_Q_Index(AllocID) - 1;
23
24 %% Form allocation payload
25 Data_Size = 0;
26 Number_of_Packets = 0;
27 Available_XGTC_Payload = GrantSize - 4; %DBRu+CRC is reserved as allocation
28 overhead
29 Total.Padding = 0;
30
31 Event_List( 1, end + 1 ) = 3;
32
33 if Q_Index(AllocID) > 0
34   %% Select packets
35   for i = 1 : Q_Index(AllocID)
36     if Available_XGTC_Payload >= Q(3, i, AllocID) + 8
37       if Q(3, i, AllocID) < 8
38         Data_Size = Data_Size + 8;
39         Padding = 8 - Q(3, i, AllocID);
40         Available_XGTC_Payload = Available_XGTC_Payload - 16;
41         Total.Padding = Total.Padding + Padding;
42       else
43         Data_Size = Data_Size + Q(3, i, AllocID);
44         Available_XGTC_Payload = Available_XGTC_Payload - Q(3, i, AllocID) -
45           8;
46       end
47       Number_of_Packets = Number_of_Packets + 1;
48     elseif Available_XGTC_Payload >= 16 && Available_XGTC_Payload < Q(3, i,
49       AllocID) + 8
50       Fragment = Available_XGTC_Payload - 8;
51     end
52   end
53 end

```

```

46     Data_Size = Data_Size + Fragment;
47     Q( 3, i, AllocID ) = Q( 3, i, AllocID ) - Fragment;
48     break;
49 end
50
51 %% Remove sending packets from queue
52 Event_List( 7, end ) = Number_of_Packets;
53 for counter = 1:Number_of_Packets
54     Event_List( 7+counter, end ) = Q( 2, 1, AllocID );
55     Q( :, 1, AllocID ) = 0;
56     for i = 1 : Q_Index(AllocID)-1
57         Q( :, i, AllocID ) = Q( :, i+1, AllocID );
58     end
59     Q( :, Q_Index(AllocID), AllocID ) = 0;
60     Q_Index(AllocID) = Q_Index(AllocID) - 1;
61 end
62 %% Refresh buffer occupancy of AllocID
63 Buffer_Occupancy(AllocID) = Buffer_Occupancy(AllocID) - Data_Size -
64     Total.Padding;
65
66 %% Create final PHY burst and schedule it's arrival
67 PHY_Burst = 24 + PHY_Payload(GrantSize);
68
69 Event_List( 2, end ) = Time + StartTime + PHY_Burst/Upstream_Speed + PDT(AllocID)
70 ;
71 Event_List( 3, end ) = 2;
72 Event_List( 4, end ) = AllocID;
73 Event_List( 5, end ) = Data_Size - Total.Padding; % Payload sent
74 Event_List( 6, end ) = Buffer_Occupancy(AllocID);
75
76 %fprintf('\t PHY burst size: %d. Allocation payload: %d\n', PHY_Burst, Data_Size)
77 ;
end

```

A.8 Event3.m

Το γεγονός Event3 χρονοπρογραμματίζεται από το Event2.m και αναπαριστά την άφιξη μιας ριπής XGTC στο ΤΟΓ. Το γεγονός καταγράφει το συνολικό μέγεθος ωφέλιμης πληροφορίας ΜΔΥ που μεταδόθηκε, τις απαιτήσεις του αντίστοιχου Alloc-ID στον πίνακα Buf0cc_Buffer και το πλήθος των αφίξεων ολοκληρωμένων ΜΔΥ.

Για κάθε ολοκληρωμένη ΜΔΥ της ριπής καταγράφεται η καθυστέρηση άφιξης που προκύπτει ως η διαφορά του χρόνου άφιξης στο ΤΟΓ με τον χρόνο άφιξης στην ουρά της ΜΟΔ, καθώς και η ΔΚΠ, σύμφωνα με το πρότυπο MEF 10 [114].

Κώδικας A.7: Η συνάρτηση Event3.m

```

1 function [ Buf0cc_Buffer, Total_Data, Packet_Delay, Arrivals, PDV ] = Event3 (
2     Time, Event_List, Buf0cc_Buffer, Total_Data, Packet_Delay, Arrivals, PDV )
3 % EVENT3 XGTC burst arrives at the OLT
4 % OLT receives a XGTC burst, which is sent by Event2. Upon the arrival,
5 % OLT records information that are used to measure throughput, mean packet
6 % delay and packet delay variation (PDV).
7 %
8 % See also EVENT2.
9
10 AllocID = Event_List(4,1);
11 %fprintf('[%d] #3 XGTC frame arrival [%d bytes] from AllocID (%d)\n', Time,
12 %       Event_List(5,1), AllocID);
13
14 Total_Data = Total_Data + Event_List(5,1);
15 Buf0cc_Buffer(AllocID) = Buf0cc_Buffer(AllocID) + Event_List(6,1);
16
17 Number_of_Packets = Event_List(7,1);
18 Arrivals(AllocID) = Arrivals(AllocID) + Number_of_Packets;
19
20 for i = 1:Number_of_Packets
21     Delay = (Time - Event_List(7+i, 1));
22     Packet_Delay(1, AllocID) = Packet_Delay(1, AllocID) + Delay; %Sum delays
23     if PDV(1, AllocID)
24         PDV(3, AllocID) = Delay;
25         PDV(4, AllocID) = PDV(4, AllocID) + abs(PDV(2, AllocID) - PDV(3, AllocID));
26         PDV(5, AllocID) = PDV(5, AllocID) + 1;
27         PDV(2, AllocID) = PDV(3, AllocID);
28     else
29         PDV(1, AllocID) = 1;
30         PDV(2, AllocID) = Delay;
31     end
32 end

```

A.9 Event4.m

Το γεγονός τερματισμού εκτελείται όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση και συλλέγει τα τελικά αποτελέσματα, τα οποία επιστρέφονται στο σενάριο XGPON_Simulation.

Τα τελικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη μέση διεκπεραιωτική ικανότητα ωφέλιμης πληροφορίας του δικτύου, τη μέση καθυστέρηση που προκύπτει ως μέσος όρος της μέσης καθυστέρησης που βιώνει κάθε Alloc-ID, τη μέση τιμή του δείκτη δικαιοσύνης φόρτου, καθώς και τον αντίστοιχο δείκτη από τη μέση καθυστέρηση που βιώνει κάθε Alloc-ID.

Ακόμη, ολοκληρώνεται η διαδικασία υπολογισμού της μέσης τιμής της ΔΚΠ και του λόγου

απόρριψης πακέτου (packet loss ratio) για κάθε Alloc-ID, ο οποίος προκύπτει από τον λόγο του πλήθους απολεσθέντων πακέτων προς το πλήθος των επιτυχημένων αφίξεων. Οι ορισμοί των μετρικών απόδοσης που υπολογίζει το Event4 είναι συμβατοί με τα πρότυπα ITU-T Y.1540 [115] και MEF 10 [114].

Κώδικας A.8: Η συνάρτηση Event4.m

```

1 function [ Sim_Flag, Packet_Delay, Goodput, Load_Fairness, Delay_Fairness,
2   Packet_Loss, PDV ] = Event4 ( Time, Packet_Delay, Total_Data, Load_Fairness,
3   N, Arrivals, Packet_Loss, PDV )
4 % EVENT4 Termination Event
5 % Termination event is called when simulation time ends. The final network
6 % metrics are being calculated: mean packet delay per ONU, mean packet
7 % delay variation per ONU, mean packet loss ratio, mean network goodput,
8 % and delay fairness index.
9 %
10 % See also XGPON.
11
12
13 Sim_Flag = false;
14 %fprintf('Simulation end at time [%f]',Time)
15
16 PDV(1,:) = [];
17 PDV(1,:) = [];
18 PDV(1,:) = [];
19
20 for AllocID = 1:N
21   Packet_Delay(AllocID) = Packet_Delay(AllocID)/Arrivals(AllocID);
22   Packet_Loss(AllocID) = Packet_Loss(AllocID)/Arrivals(AllocID); %Conversion to
23   % packet loss ratio
24   PDV(1, AllocID) = PDV(1, AllocID)/PDV(2, AllocID);
25 end
26
27 PDV(2, :) = [];
28 Goodput = Total_Data/Time;
29 Load_Fairness = Load_Fairness(1)/Load_Fairness(2);
30 Delay_Fairness = Jain_Index(Packet_Delay);
31
32 end

```

A.10 Event6.m

Το γεγονός Event6 προσθέτει μια νέα ΜΔΥ στην ουρά ενός Alloc-ID, το οποίο προέρχεται από μια ροή κίνησης ΣΔΡ που το Alloc-ID παράγει.

Το γεγονός αναπαράγεται με σταθερό ρυθμό και το μέγεθος των ΜΔΥ είναι επίσης σταθερό, με τα μεγέθη αυτά να προκύπτουν από τη δομή CBR που δημιουργήθηκε από τη συνάρτηση

Form_Traffic.m.

Αν μια ΜΔΥ δεν μπορεί να προστεθεί στην ουρά του Alloc-ID, τότε το περιστατικό καταγράφεται στον πίνακα **Packet_Loss**, από τον οποίο μπορεί να προκύψει ο λόγος απόρριψης πακέτου.

Κώδικας A.9: Η συνάρτηση *Event6.m*

```

1 function [ Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy, Packet_Loss ] 
2     = Event6 ( Time, Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy,
3         Buffer_Size, Packet_Loss, CBR )
4 % EVENT6 Packet arrival (CBR)
5 % EVENT6 adds a new packet to AllocID's queue, based on the CBR traffic
6 % struct input.
7 %
8 % See also EVENT2, EVENT7, RNG.
9
10 AllocID = Event_List(4,1);
11 %fprintf('[%d] #6 New packet to AllocID (%d)\n', Time, AllocID);
12
13 if Buffer_Occupancy(AllocID) + CBR.packetsize < Buffer_Size
14     Q_Index( AllocID ) = Q_Index( AllocID ) + 1;
15     Q( 1, Q_Index(AllocID), AllocID ) = Serial_Number;
16     Q( 2, Q_Index(AllocID), AllocID ) = Time;
17     Q( 3, Q_Index(AllocID), AllocID ) = CBR.packetsize;
18     Serial_Number = Serial_Number + 1;
19
20     Buffer_Occupancy(AllocID) = Buffer_Occupancy(AllocID) + CBR.packetsize;
21
22     Event_List( 1, end + 1 ) = 6;
23     Event_List( 2, end ) = Time + CBR.interarrival;
24     Event_List( 3, end ) = 1;
25     Event_List( 4, end ) = AllocID;
26 else
27     %fprintf('WARNING! Packet was dropped\n');
28     Packet_Loss(1, AllocID) = Packet_Loss(1, AllocID) + 1;
29 end
30 end

```

A.11 Event7.m

Το γεγονός **Event7** προσθέτει μια νέα ΜΔΥ στην ουρά ενός Alloc-ID, το οποίο προέρχεται από μια ροή κίνησης ΜΔΡ.

Η μόνη διαφορά του συγκεκριμένου γεγονότος από το **Event6** είναι ότι η παραγωγή κίνησης, δηλαδή ο ρυθμός άφιξης και το μέγεθος των πακέτων, καθορίζεται από τα στατιστικά της

κίνησης που περιέχονται στη δομή VBR. Μια τυχαία τιμή με βάση αυτά τα στατιστικά εξάγεται από τη συνάρτηση RNG.m.

Κώδικας A.10: Η συνάρτηση Event7.m

```

1 function [ Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy, Packet_Loss ]
2     = Event7 ( Time, Event_List, Serial_Number, Q, Q_Index, Buffer_Occupancy,
3     Buffer_Size, Packet_Loss, VBR )
4 % EVENT7 Packet arrival (VBR)
5 % Adds a new packet to AllocID's queue, based on the VBR traffic
6 % struct input.
7 %
8 % See also EVENT2, EVENT6, FORM_TRAFFIC, EXTRACT_DISTRIBUTION.
9
10 AllocID = Event_List(4,1);
11 Packet_Size = RNG(VBR.packetfreq);
12
13 if Buffer_Occupancy(AllocID) + Packet_Size < Buffer_Size
14     Q_Index( AllocID ) = Q_Index( AllocID ) + 1;
15     Q( 1, Q_Index(AllocID), AllocID ) = Serial_Number;
16     Q( 2, Q_Index(AllocID), AllocID ) = Time;
17     Q( 3, Q_Index(AllocID), AllocID ) = Packet_Size;
18     Serial_Number = Serial_Number + 1;
19
20     Buffer_Occupancy(AllocID) = Buffer_Occupancy(AllocID) + Packet_Size;
21
22     Event_List( 1, end + 1 ) = Event_List(1, 1);
23     Event_List( 2, end ) = Time + RNG(VBR.interarrivalfreq);
24     Event_List( 3, end ) = 1;
25     Event_List( 4, end ) = AllocID;
26 else
27     %fprintf('WARNING! Packet was dropped\n');
28     Packet_Loss(1, AllocID) = Packet_Loss(1, AllocID) + 1;
29 end
30
31 end

```

A.12 Extract_Distribution.m

Η συνάρτηση Extract_Distribution επεξεργάζεται ένα αρχείο κειμένου το οποίο προήλθε από καταγραφή αναλυτή πακέτων, με σκοπό να εξάγει στατιστικά στοιχεία που αφορούν τη συχνότητα εμφάνισης του κάθε πακέτου και των μεσοδιαστημάτων άφιξης (interarrival time).

Για να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα από τη συνάρτηση, θα πρέπει το αρχείο να περιλαμβάνει τρεις στήλες: Η πρώτη στήλη να δείχνει το ID του πακέτου, η δεύτερη στήλη το μέγεθος του

πακέτου και η τρίτη στήλη τον χρόνο άφιξης. Τα δεδομένα των πινάκων που σχηματίζονται και περιέχουν πληροφορίες για τα στατιστικά δεδομένα μιας ροής κίνησης πρέπει να ταξινομηθούν σε φθίνουσα σειρά, ώστε να χρησιμοποιηθούν από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών RNG.m.

Κώδικας A.11: Η συνάρτηση Extract_Distribution.m

```

1 function [Packet_Frequencies, Interarrivals] = Extract_Distribution(filename)
2 % EXTRACT_DISTRIBUTION Forms the components of a traffic object
3 % Reads Output.txt file of a Wireshark capture and
4 % records frequencies of packet sizes and interarrival times.
5 % INPUT: Relative or absolute path of Output.txt
6 % OUTPUT: Sorted distribution tables of packet sizes and interarrivals
7 % REQUIREMENTS: Output.txt must be a timeseries of three columns:
8 %   packet id, arrival time and packet size, spaced by tab.
9 %
10 % See also FORM_TRAFFIC, EVENT7, RNG.
11
12 Packet_Frequencies = zeros(2,0); Interarrivals = zeros(2,0);
13
14 fid = fopen(filename, 'r');
15 if fid == -1
16     error('Error while opening Traffic file.');
17 end
18
19 tline = fgets(fid); %Read first line to initialize metrics
20 tline = strsplit(tline);
21 Packet_Frequencies(1,end+1) = str2double(char(tline(3)));
22 Packet_Frequencies(2,end) = 1;
23
24 Previous_Arrival = str2double(char(tline(2)));
25
26 tline = fgets(fid); %Read next line
27
28 while ischar(tline)
29     tline = strsplit(tline);
30     Current_Packet = str2double(char(tline(3)));
31     Current_Interarrival = str2double(char(tline(2))) - Previous_Arrival;
32
33     i = find(Packet_Frequencies(1,:) == Current_Packet);
34     if isempty(i)
35         Packet_Frequencies(1,end+1) = Current_Packet;
36         Packet_Frequencies(2,end) = 1;
37     else
38         Packet_Frequencies(2,i) = Packet_Frequencies(2,i) + 1;
39     end
40
41     i = find(Interarrivals(1,:) == Current_Interarrival);
42     if isempty(i)
43         Interarrivals(1,end+1) = Current_Interarrival;
44         Interarrivals(2,end) = 1;
45     else

```

```

46     Interarrivals(2,i) = Interarrivals(2,i) + 1;
47 end
48
49 Previous_Arrival = str2double(char(tline(2)));
50 tline = fgets(fid);
51 end
52
53 Packet_Frequencies(2,:) = Packet_Frequencies(2,:)./length(Packet_Frequencies);
54 Interarrivals(2,:) = Interarrivals(2,:)./length(Interarrivals);
55
56 Packet_Frequencies = sortrows(Packet_Frequencies',2)';
57 Interarrivals = sortrows(Interarrivals',2)';
58
59 fclose(fid);
60
61 end

```

A.13 Form_Traffic.m

Η συνάρτηση διαμορφώνει τη δομή δεδομένων τύπου **Traffic**, η οποία περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις ροές κίνησης που παράγει κάθε Alloc-ID του δικτύου. Η δομή αποτελείται από δύο πεδία, το **cbr** και το **vbr**.

Το πεδίο **cbr** είναι μια δομή τύπου CBR, η οποία αποτελείται από τα πεδία **isenabled**, **interarrival** και **packetsize**. Η τιμή του πρώτου πεδίου καθορίζεται από το εάν ο χρήστης έχει ενεργοποιήσει τη ροή κίνησης ΣΔΡ στο **XGPON_Simulation** και τα υπόλοιπα πεδία καθορίζουν τα μεσοδιαστήματα άφιξης και το μέγεθος των πακέτων. Η τιμή των δύο αυτών πεδίων ορίζεται χειροκίνητα στον κώδικα της συνάρτησης **Form_Traffic** (γραμμή 28).

Το πεδίο **vbr** είναι μια δομή τύπου VBR, η οποία αποτελείται από μεταβλητό πλήθος πεδίων, το οποίο εξαρτάται από το πόσες ανεξάρτητες ροές κίνησης ΜΔΡ θα παράγονται από τις ΜΟΔ. Η προσθήκη μιας ροής ΜΔΡ γίνεται χειροκίνητα με επεμβάσεις στον κώδικα για την κλήση της συνάρτησης **Extract_Distribution** και τη δημιουργία μιας δομής τύπου **trafficX**, με πεδία το διάνυσμα με τις συχνότητες εμφάνισης των πακέτων και το αντίστοιχο για τα μεσοδιαστήματα αφίξεων. Οι δομές αυτές τύπου **trafficX**, μαζί με το πεδίο **isenabled** συμπεριλαμβάνονται ως πεδία στη δομή **VBR**.

Ο συγκεκριμένος τρόπος σχεδίασης της δομής **Traffic** αξιοποιείται από τον προσομοιωτή **XGPON** με τέτοιον τρόπο, ώστε κάθε Alloc-ID να μπορεί να παράγει ανεξάρτητες ροές κίνησης χωρίς περαιτέρω επεμβάσεις στον κώδικα, πέρα από αυτή της προσθήκης δομής **trafficX** στη δομή **vbr**.

Κώδικας A.12: Η συνάρτηση Form_Traffic.m

```

1 function [ Traffic ] = Form_Traffic( hasVBR, hasCBR )
2 % FORM_TRAFFIC Creates traffic objects based on user preferences
3 % Returns traffic objects of CBR and VBR traffic that ONU use to generate
4 % traffic. User can edit manually the CBR traffic object parameters and
5 % specify Output.txt files for VBR. Each Output.txt file corresponds to
6 % independent VBR traffic that a single ONU generates.
7 %
8 % See also XGPON, EVENT7, RNG, EXTRACT_DISTRIBUTION
9
10 if ~hasVBR && ~hasCBR
11     error('Some traffic must be enabled');
12 end
13
14 if hasVBR
15     if ispc()
16         filename = '.\Traffic\1\Output.txt';
17         [Packet_Frequencies1, Interarrivals1] = Extract_Distribution(filename);
18     else %for UNIX
19         filename = './Traffic/1/Output.txt';
20         [Packet_Frequencies1, Interarrivals1] = Extract_Distribution(filename);
21     end
22     Traffic1 = struct('packetfreq', Packet_Frequencies1, 'interarrivalfreq',
23                         Interarrivals1);
23     VBR = struct('isenabled', true, 'traffic1', Traffic1);
24 else
25     VBR = struct('isenabled', false);
26 end
27
28 if hasCBR
29     CBR = struct('isenabled', true, 'interarrival', 0.000124, 'packetsize', 1518);
30 else
31     CBR = struct('isenabled', false);
32 end
33
34 Traffic = struct('cbr', CBR, 'vbr', VBR);
35
36 end

```

A.14 RNG.m

Η συνάρτηση υλοποιεί μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, που με είσοδο έναν πίνακα κατανομής πιθανοτήτων επιστρέφει έναν αντίστοιχο τυχαίο αριθμό. Ο πίνακας εισόδου θεωρείται πως είναι ήδη ταξινομημένος σε φθίνουσα σειρά, από τη συνάρτηση Extract_Distribution.m.

Κώδικας A.13: Η συνάρτηση *RNG.m*

```

1 function [ out ] = RNG( F )
2 % RNG Random Number Generator
3 % Generates a random number from the probability distribution F. Input F must be
4 % already sorted
5 %
6 % See also EVENT7, EXTRACT_DISTRIBUTION, FORM_TRAFFIC.
7
8 p = rand;
9 for i = 1:length(F)
10    sum = 0;
11    for k = 1:i
12       sum = sum + F(2,k);
13    end
14    if p <= sum
15       out = F(1,i);
16       break;
17    end
18 end
19 end

```

A.15 Set_PDT.m

Η συνάρτηση τοποθετεί ομοιόμορφα τις ΜΟΔ στο δίκτυο, το πλήθος των οποίων ορίζεται από την παράμετρο εισόδου N, και για κάθε μια από αυτές υπολογίζει την αντίστοιχη καθυστέρηση διάδοσης που προκύπτει από την τοποθέτησή της στο δίκτυο.

Κώδικας A.14: Η συνάρτηση *Set_PDT.m*

```

1 function [ PDT ] = Set_PDT( N )
2 % SET_PDT Sets the PDT of ONU's network
3 % Sets the distance of each ONU from the OLT and calculates the
4 % corresponding propagation delay time (PDT). ONUs are placed
5 % uniformly in range [20,60] km
6 %
7 % See also XGPON.
8
9 PDT = zeros(1,N);
10 SpeedLight = 299792458*0.7;
11 for i=1:N
12    ONU_Placement = rand*(60000-20000)+20000; % in meters
13    PDT(i) = ONU_Placement/SpeedLight;
14 end
15
16 end

```

A.16 PHY_Payload.m

Για το ωφέλιμο φορτίο μιας ή περισσοτέρων ριπών XGTC, η συνάρτηση υπολογίζει και επιστρέφει το πραγματικό μέγεθος σε byte που η αντίστοιχη ριπή PHY καταναλώνει.

Το μέγεθος της ριπής προκύπτει από τον σχηματισμό της ριπής XGTC, με την προσθήκη της κεφαλίδας XGTC και τον υπολογισμό της επιβάρυνσης ΕΔΣ για όλο το μήκος της ριπής XGTC. Η επιβάρυνση υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τα 16 byte επιβάρυνσης κάθε κωδικολέξης με το πλήθος των κωδικολέξεων που μπορεί να προκύψουν από το XGTC, με δεδομένο ότι κάθε μια από αυτές έχει μήκος 232 byte. Η χρήση της συνάρτησης `ceil` είναι αναγκαία διότι αφενός το πλήθος των κωδικολέξεων είναι ακέραιος αριθμός και αφετέρου το μήκος της τελευταίας κωδικολέξης μπορεί να είναι μικρότερο από 232 byte αλλά η επιβάρυνσή της είναι ακριβώς 16 byte.

Κόδικας A.15: Η συνάρτηση *PHY_Payload.m*

```

1 function [out] = PHY_Payload(XGTC_Payloads)
2 % PHY_PAYLOAD Apply RS(248,232) code on XGTC frame
3 % Applies Reed-Solomon FEC code to one or more XGTC frames, after adding
4 % XGTC overhead. Returns the final size of PHY payload which includes
5 % XGTC overhead + XGTC_Payload + FEC overhead.
6 %
7 % See also DBA.
8
9 N = length(XGTC_Payloads);
10 out = zeros(1, N);
11 XGTC_Frame = zeros(1, N);
12 for i=1:N
13     XGTC_Frame(i) = XGTC_Payloads(i) + 8;
14     out(i) = ceil(XGTC_Frame(i)/232)*16 + XGTC_Frame(i);
15 end
16
17 end

```

A.17 Jain_Index.m

Η συνάρτηση υπολογίζει τον δείκτη Jain ενός διανύσματος V με βάση τον τύπο (6.18).

Κόδικας A.16: Η συνάρτηση Jain_Index.m

```
1 function [ J ] = Jain_Index(V)
2 % JAIN_INDEX Jain index of vector
3 % Calculates the jain fairness index of an input vector
4
5 % See also DBA, EVENT4
6
7 J = sum(V)^2/(length(V)*sum(V.^2));
8
9 end
```

Βιβλιογραφία

- [1] «The Zettabyte Era: Trends and Analysis,» Cisco VNI, 7 Ιούν. 2017. διεύθυνση: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>.
- [2] H. C. Leligou, C. Linardakis, K. Kanonakis, J. D. Angelopoulos και T. Orphanoudakis, «Efficient medium arbitration of FSAN-compliant GPONs,» *International Journal of Communication Systems*, τόμ. 19, αρθρ. 5, σσ. 603–617, 2006. doi: 10.1002/dac.761.
- [3] M.-S. Han, H. Yoo, B.-Y. Yoon, B. Kim και J.-S. Koh, «Efficient dynamic bandwidth allocation for FSAN-compliant GPON,» *Journal of Optical Networking*, τόμ. 7, αρθρ. 8, σ. 783, Ιούλ. 2008. doi: 10.1364/jon.7.000783.
- [4] M. S. Han, H. Yoo και D. S. Lee, «Development of Efficient Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for XGPON,» *ETRI Journal*, τόμ. 35, αρθρ. 1, σσ. 18–26, Φεβ. 2013. doi: 10.4218/etrij.13.0112.0061.
- [5] R. A. Butt, S. M. Idrus, K. N. Qureshi, N. Zulkifli και S. H. Mohammad, «Improved Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for XGPON,» *Journal of Optical Communications and Networking*, τόμ. 9, αρθρ. 1, σ. 87, Δεκ. 2016. doi: 10.1364/jocn.9.000087.
- [6] I. Gravalos, K. Yiannopoulos, E. A. Varvarigos και G. Papadimitriou, «Burst-by-burst dynamic bandwidth allocation for XG-PONs,» *IET Networks*, τόμ. 5, αρθρ. 3, σσ. 47–55, Μάι. 2016. doi: 10.1049/iet-net.2015.0070.
- [7] M. S. Han, «Simple and feasible dynamic bandwidth allocation for XGPON,» στο *16th International Conference on Advanced Communication Technology*, 2014, ISBN: 978-89-968650-1-8.
- [8] ———, «Dynamic bandwidth allocation with high utilization for XGPON,» στο *16th International Conference on Advanced Communication Technology*, Global IT Research Institute (GIRI), 2014. doi: 10.1109/icact.2014.6779107.
- [9] *G.987.3: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*, ITU-T, 2014. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12098>.
- [10] P. Sarigiannidis, D. Pliatsios, T. Zygoridis και N. Kantartzis, «DAMA: A data mining forecasting DBA scheme for XG-PONs,» στο *2016 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, IEEE, Μάι. 2016. doi: 10.1109/mocast.2016.7495169.

- [11] P. Sarigiannidis, G. Papadimitriou, P. Nicopolitidis, V. Kakali, E. Varvarigos και K. Yiannopoulos, «ARES: An Adaptive, Resilient, Estimation Scheme for Enforcing Bandwidth Allocation in XG-PON Systems,» στο *E-Business and Telecommunications: 11th International Joint Conference, ICETE 2014, Vienna, Austria, August 28-30, 2014, Revised Selected Papers*, M. S. Obaidat, A. Holzinger και J. Filipe, επιμελητές. Cham: Springer International Publishing, 2015, σσ. 131–151, ISBN: 978-3-319-25915-4. doi: 10.1007/978-3-319-25915-4_8. διεύθυν.: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25915-4_8.
- [12] P. Sarigiannidis, G. Papadimitriou, P. Nicopolitidis, E. Varvarigos και K. Yiannopoulos, «HYRA: An Efficient Hybrid Reporting Method for XG-PON Upstream Resource Allocation,» στο *Proceedings of the 5th International Conference on Optical Communication Systems*, SCITEPRESS - Science και Technology Publications, 2014. doi: 10.5220/0005048200050014.
- [13] S. Anthony, «255Tbps: World's fastest network could carry all of the internet's traffic on a single fiber,» *ExtremeTech*, 27 Οκτ. 2014.
- [14] Αισχύλος, *Αγαμέμνων*. Παπαδήμας Δημ. Ν., 1999, ISBN: 9789602064450.
- [15] M. K. Carson, *Alexander Graham Bell: Giving Voice to the World*. Sterling, 2007, ISBN: 978-1402732300.
- [16] A. G. Bell, «Upon the production and reproduction of sound by light,» *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, τόμ. 9, αρθρ. 34, σσ. 404–426, 1880. doi: 10.1049/jste-1.1880.0046.
- [17] A. Moncalvo και F. Tosco, «European Field Trials and Early Applications in Telephony,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, τόμ. 1, αρθρ. 3, σσ. 398–403, Απρ. 1983. doi: 10.1109/jsac.1983.1145947.
- [18] S. Buzzelli, B. Catania, D. Gagliardi και F. Tosco, «Optical fibre field experiments in Italy: COS1, COS2 and COS3/FOSTER,» στο *International Conference on Communications*, Seattle, 1980. διεύθυν.: http://www.chezbasilio.org/immagini/cos1_cos2_cos3_expts.pdf (επίσκεψη 08/09/2017).
- [19] P. Rigby, «Three decades of innovation,» *Lightwave Online*, 22 Ιαν. 2014. διεύθυν.: <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-31/issue-1/features/three-decades-of-innovation.html> (επίσκεψη 08/09/2017).
- [20] F. Idachaba, D. U. Ike και O. Hope, «Future Trends in Fiber Optics Communication,» στο *World Congress on Engineering*, τόμ. I, International Association of Engineers, 2014, ISBN: 978-988-19252-7-5. διεύθυν.: http://www.iae.org/publication/WCE2014/WCE2014_pp438-442.pdf (επίσκεψη 08/09/2017).
- [21] V. Wongpaibool, «Improvement of Fiber Optic System Performance by Synchronous Phase Modulation and Filtering at the Transmitter,» Διδακτορική διατρ., Virginia Tech, 31 Ιαν. 2003, κεφ. 1, σσ. 1–22. διεύθυν.: <https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-02042003-164941/> (επίσκεψη 08/09/2017).
- [22] B. Bakhshi, M. Arend, M. Vaa, E. Golovchenko, D. Duff, H. Li, S. Jiang, W. Patterson, R. Maybach και D. Kovsh, «1 Tbit/s (101 x 10 Gbit/s) transmission over transpacific distance using 28 nm C-band EDFAs,» στο *Optical Fiber Communication Conference and International Conference on Quantum Information*, OSA, 2001. doi: 10.1364/ofc.2001.pd21.

- [23] E. Tamechika. (2006). 14-Tbit/s over a Single Optical Fiber - Demonstration of World's Largest Capacity, NTT Science και Core Technology Laboratory Group, διεύθυνση: <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200611053.pdf> (επίσκεψη 08/09/2017).
- [24] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering)*. Wiley, 2012, ISBN: 978-0-470-50511-3.
- [25] B. J. Puttnam, R. S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. D. Mendieta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano και J. Marciante, «2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb,» στο *2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, IEEE, Οκτ. 2015. doi: 10.1109/ecoc.2015.7341685.
- [26] P. Bayvel, R. Maher, T. Xu, G. Liga, N. A. Shevchenko, D. Lavery, A. Alvarado και R. I. Killey, «Maximizing the optical network capacity,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, τόμ. 374, αρθρ. 2062, σ. 20140440, Ιαν. 2016. doi: 10.1098/rsta.2014.0440.
- [27] X. Βασιλόπουλος, Δ. Κωτούλας, Δ. Ξενικός, Π. Βούδδας, Γ. Χελιώτης, Γ. Αγαπίου και Τ. Δούκογλου, *Δίκτυα Πρόσβασης Νέας Γενιάς*, X. Βασιλόπουλος, επιμελητής. Κλειδάριθμος, 2010, ISBN: 978-960-461-378-6.
- [28] A. S. Tanenbaum και D. J. Wetherall, *Δίκτυα Υπολογιστών*. Κλειδάριθμος, 2006, ISBN: 978-960-461-447-9.
- [29] H. M. Sigurdsson, «Techno-Economics of Residential Broadband Deployment,» Διδακτορική διατρ., Technical University of Denmark, 2007. διεύθυνση: http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/publication_details.php?id=5443 (επίσκεψη 08/09/2017).
- [30] T. Rokkas, D. Katsianis και D. Varoutas, «Techno-economic Evaluation of FTTC/VDSL and FTTH Roll-Out Scenarios: Discounted Cash Flows and Real Option Valuation,» *Journal of Optical Communications and Networking*, τόμ. 2, αρθρ. 9, σ. 760, Σεπτ. 2010. doi: 10.1364/jocn.2.000760.
- [31] G. Keiser, *Ftx Concepts and Applications*. JOHN WILEY & SONS INC, 11 Φεβ. 2006, 312 σσ., ISBN: 0471704202.
- [32] R. Zhao, W. Fischer, E. Aker και P. Rigby. (2013). White Paper: Broadband Access Technologies, διεύθυνση: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/Dand0_White_Paper_2_2013_Final.pdf.
- [33] *ETS 300 681: Transmission and Multiplexing (TM); Optical Distribution Network (ODN) for Optical Access Network (OAN)*, European Telecommunication Standard, 1997. διεύθυνση: http://www.etsi.org/deliver/etsi_i_ets/300600_300699/300681/01_60/ets_300681e01p.pdf (επίσκεψη 11/09/2017).
- [34] S. Morgan. (2011). Fibre to the Cabinet: The Solution to Superfast Broadband or a Convenient Stopgap? INTERCONNECT COMMUNICATIONS, διεύθυνση: <http://www.icc-uk.com/download/papers/Fibre%20to%20the%20Cabinet%20-%20NGA%20Solution%20or%20Stopgap.pdf>.

- [35] M. Decina και E. Scace, «CCITT Recommendations on the ISDN: A Review,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, τόμ. 4, αρθμ. 3, σσ. 320–325, Μάι. 1986. doi: 10.1109/jsac.1986.1146333.
- [36] *Integrated services digital networks (ISDNs)*, ITU-T, 12 Μαρ. 1993. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/1111>.
- [37] Α. Αλεξόπουλος και Γ. Λαγογιάννης, *Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών*. Γιαλός, 2012, ISBN: 978-960-933542-3.
- [38] S. Anthony, «XG.fast DSL does 10Gbps over telephone lines,» *Ars Technica*, 18 Οκτ. 2016. διεύθυν.: <https://arstechnica.com/information-technology/2016/10/xg-fast-dsl-does-10gbps-over-telephone-lines/>.
- [39] W. Coomans, R. B. Moraes, K. Hooghe, A. Duque, J. Galero, M. Timmers, A. J. van Wijngaarden, M. Guenach και J. Maes, «XG-fast: the 5th generation broadband,» *IEEE Communications Magazine*, τόμ. 53, αρθμ. 12, σσ. 83–88, Δεκ. 2015, ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/mcom.2015.7355589.
- [40] *G.9701: Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification*, ITU-T, 5 Δεκ. 2014. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12090>.
- [41] *G.993.2: Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification*, ITU-T, 13 Ιαν. 2015. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12370>.
- [42] H. AlObaidan, «Current and Future FTTH Technologies,» *Journal of Wireless Networking and Communications*, τόμ. 7, αρθμ. 2, σσ. 35–40, 2017, ISSN: 2167-7336. doi: 10.5923/j.jwnc.20170702.02. διεύθυν.: <http://www.sapub.org/global/showpaperpdf.aspx?doi=10.5923/j.jwnc.20170702.02> (επίσκεψη 11/09/2017).
- [43] *G.982: Optical access networks to support services up to the ISDN primary rate or equivalent bit rates*, ITU-T, Νοέ. 1996. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/3833>.
- [44] I. P. C. George A. Heliotis, *Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies*. INFORMATION SCIENCE REFERENCE, 11 Μαρ. 2011, 380 σσ., ISBN: 1605667072.
- [45] W. Stallings, *Επικοινωνίες Υπολογιστών και Δεδομένων*. Τζίόλα, 2011, ISBN: 978-960-418-329-6.
- [46] *G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, ITU-T, Νοέ. 2016. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/4091>.
- [47] *G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, ITU-T, Δεκ. 2003. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/7057>.
- [48] *G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, ITU-T, Φεβ. 2012. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11482>.
- [49] McGarry, M. Reisslein και M. Maier, «WDM Ethernet passive optical networks,» *IEEE Communications Magazine*, τόμ. 44, αρθμ. 2, σσ. 15–22, Φεβ. 2006. doi: 10.1109/mcom.2006.1593545.

- [50] *G.989.2: 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification*, ITU-T, Δεκ. 2014. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12097>.
- [51] X. Guo, Q. Wang, L. Zhou, L. Fang, A. Wonfor, R. V. Penty και I. H. White, «High speed OFDM-CDMA optical access network,» *Optics Letters*, τόμ. 41, αρθρ. 8, σ. 1809, Απρ. 2016. doi: 10.1364/ol.41.001809.
- [52] P. Kumar και A. Srivastava, «Electrical Spreading Code-Based OFDM Optical Access Networks for Budget Enhancement and Reduced System Bandwidth Requirement,» *Journal of Optical Communications*, τόμ. 36, αρθρ. 4, Ιαν. 2015. doi: 10.1515/joc-2014-0081.
- [53] *G.983.1: Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*, ITU-T, Ιαν. 2005. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/7485>.
- [54] R. Hogg, «ATM PON maximizes bandwidth to homes and businesses,» *Lightwave Online*, 1 Αύγ. 1999. διεύθυνση: <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-16/issue-9/special-report/atm-pon-maximizes-bandwidth-to-homes-and-businesses-53489072.html>.
- [55] *G.984.2: Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*, ITU-T, Μαρ. 2003. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/6273>.
- [56] *G.984.3: Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification*, ITU-T, Ιαν. 2014. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12099>.
- [57] O. Haran και A. Sheffer. (1 Ιαν. 2008). The Importance of Dynamic Bandwidth Allocation in GPON Networks, διεύθυνση: <https://goo.gl/FCZDD4>.
- [58] I. Cale, A. Salihovic και M. Ivezkovic, «Gigabit Passive Optical Network - GPON,» στο 2007 29th International Conference on Information Technology Interfaces, IEEE, Ioúv. 2007. doi: 10.1109/iti.2007.4283853.
- [59] *G.987.2: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*, ITU-T, Φεβ. 2016. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12832>.
- [60] J.-i. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey και S. Rodrigues, «Next-generation PON-part I: Technology roadmap and general requirements,» *IEEE Communications Magazine*, τόμ. 47, αρθρ. 11, σσ. 43–49, Νοέ. 2009. doi: 10.1109/mcom.2009.5307465.
- [61] F. Effenberger, H. Mukai, J.-i. Kani και M. Rasztovits-Wiech, «Next-generation PON-part III: System specifications for XP-PON,» *IEEE Communications Magazine*, τόμ. 47, αρθρ. 11, σσ. 58–64, Νοέ. 2009. doi: 10.1109/mcom.2009.5307467.
- [62] F. J. Effenberger, «The XG-PON System: Cost Effective 10 Gb/s Access,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 29, αρθρ. 4, σσ. 403–409, Φεβ. 2011. doi: 10.1109/jlt.2010.2084989.
- [63] *G.989.3: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification*, ITU-T, Ιαν. 2016. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12562>.

- [64] D. Nesson, «NG-PON2 Technology and Standards,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 33, αρθρ. 5, σσ. 1136–1143, Μαρ. 2015. doi: 10.1109/jlt.2015.2389115.
- [65] D. A. Khotimsky, «NG-PON2 Transmission Convergence Layer: A Tutorial,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 34, αρθρ. 5, σσ. 1424–1432, Μαρ. 2016. doi: 10.1109/jlt.2016.2523343.
- [66] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian και Y. Ma, «Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2),» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 31, αρθρ. 4, σσ. 587–593, Φεβ. 2013. doi: 10.1109/jlt.2012.2215841.
- [67] G.9807.1 : 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON), ITU-T, Ιούν. 2016. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12834>.
- [68] A. Pesovic και D. Thomas. (27 Ιούν. 2016). XGS-PON makes NG-PON simpler, διεύθυν.: <https://insight.nokia.com/xgs-pon-makes-ng-pon-simpler>.
- [69] M. Beck, *Ethernet in the First Mile: The IEEE 802.3ah Efm Standard*, 11 Ιούν. 2005.
- [70] B. Gaglanello. (2002). MPCP: Multi-Point Control Protocol for EPONs, διεύθυν.: http://www.ieee802.org/linksec/meetings/Sep02/Gaglanello_sec_1_0902.pdf.
- [71] G. Kramer και G. Pesavento, «Ethernet passive optical network (EPON): building a next-generation optical access network,» *IEEE Communications Magazine*, τόμ. 40, αρθρ. 2, σσ. 66–73, 2002. doi: 10.1109/35.983910.
- [72] K. Tanaka, A. Agata και Y. Horiuchi, «IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status,» *J. Lightwave Technol.*, τόμ. 28, αρθρ. 4, σσ. 651–661, Φεβ. 2010. διεύθυν.: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-28-4-651>.
- [73] S. P. Rout, «Study and Emulation of 10G-EPON Access Network,» *Indian Journal of Science and Technology*, τόμ. 9, αρθρ. 20, Ιούν. 2016. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i20/91959.
- [74] V. Houtsma, D. van Veen και E. Harstead, «Recent Progress on Standardization of Next-Generation 25, 50, and 100G EPON,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 35, αρθρ. 6, σσ. 1228–1234, Μαρ. 2017. doi: 10.1109/jlt.2016.2637825.
- [75] T. Takahara, T. Tanaka, M. Nishihara, Y. Kai, L. Li, Z. Tao και J. Rasmussen, «Discrete Multi-Tone for 100 Gb/s Optical Access Networks,» στο *Optical Fiber Communication Conference*, OSA, 2014. doi: 10.1364/ofc.2014.m2i.1.
- [76] E. Harstead, D. van Veen και V. Houtsma. (2016). 25G/50G/100G EPON wavelength plan, διεύθυν.: http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/05/harstead_3ca_2_0516.pdf.
- [77] G.988: *ONU management and control interface (OMCI) specification*, ITU-T, 29 Οκτ. 2012. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11784>.
- [78] G.983.4: *A broadband optical access system with increased service capability using dynamic bandwidth assignment*, ITU-T, Νοέ. 2001. διεύθυν.: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/5612>.

- [79] L. Xu, J. Wang, A. Nallanathan και Y. Li, «Resource Allocation Based on Double Auction for Cloud Computing System,» στο *2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications IEEE 14th International Conference on Smart City IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems*, IEEE, 2016. doi: 10.1109/hpcc-smartcity-dss.2016.0221.
- [80] G. Stamatopoulos, *Game Theory*, Greek. Athens: Hellenic Academic Libraries Link, 2015, ISBN: 978-960-603-349-0. διεύθυν.: <http://hdl.handle.net/11419/3007>.
- [81] A. Muthoo, M. J. Osborne και A. Rubinstein, «A Course in Game Theory,» *Economica*, τόμ. 63, αρθρ. 249, σ. 164, Φεβ. 1996. doi: 10.2307/2554642.
- [82] J. T. Drew Fudenberg, *Game Theory*. The MIT Press, 1991, ISBN: 0262061414.
- [83] J. Nash, «Non-Cooperative Games,» *The Annals of Mathematics*, τόμ. 54, αρθρ. 2, σ. 286, Σεπτ. 1951. doi: 10.2307/1969529.
- [84] S. Kuhn, «Prisoner’s Dilemma,» στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta, επιμελητής, Spring 2017, Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. διεύθυν.: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/prisoner-dilemma/> (επίσκεψη 02/09/2017).
- [85] R. A. Pollak, «Bergson-Samuelson Social Welfare Functions and the Theory of Social Choice,» *The Quarterly Journal of Economics*, τόμ. 93, αρθρ. 1, σ. 73, Φεβ. 1979. doi: 10.2307/1882599.
- [86] P. Dubey, «Inefficiency of Nash Equilibria,» *Mathematics of Operations Research*, τόμ. 11, αρθρ. 1, σσ. 1–8, Φεβ. 1986. doi: 10.1287/moor.11.1.1.
- [87] E. Koutsoupias και C. Papadimitriou, «Worst-Case Equilibria,» στο *STACS 99: 16th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science Trier, Germany, March 4–6, 1999 Proceedings*, C. Meinel και S. Tison, επιμελητές. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, σσ. 404–413, ISBN: 978-3-540-49116-3. doi: 10.1007/3-540-49116-3_38.
- [88] C. Daskalakis, P. W. Goldberg και C. H. Papadimitriou, «The Complexity of Computing a Nash Equilibrium,» *SIAM Journal on Computing*, τόμ. 39, αρθρ. 1, σσ. 195–259, Ιαν. 2009. doi: 10.1137/070699652.
- [89] C. H. Papadimitriou, «On the complexity of the parity argument and other inefficient proofs of existence,» *Journal of Computer and System Sciences*, τόμ. 48, αρθρ. 3, σσ. 498–532, Ιούν. 1994. doi: 10.1016/s0022-0000(05)80063-7.
- [90] R. Feldmann, M. Gairing, T. Lucking, B. Monien και M. Rode, «Nashification and the Coordination Ratio for a Selfish Routing Game,» στο *Proceedings of the 30th International Conference on Automata, Languages and Programming*, σειρά ICALP’03, Eindhoven, The Netherlands: Springer-Verlag, 2003, σσ. 514–526, ISBN: 3-540-40493-7. διεύθυν.: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1759210.1759262>.
- [91] M. Y. Kao, *Encyclopedia of Algorithms*. SPRINGER VERLAG GMBH, 14 Μαρ. 2016, 2389 σσ., ISBN: 1493928635.
- [92] S. Bowles, R. Edwards και F. Roosevelt, *Understanding Capitalism: Competition, Command, and Change*. OXFORD UNIV PR, 11 Φεβ. 2005, 608 σσ., ISBN: 0195138651.

- [93] M. Friedman, *Capitalism and Freedom*. University of Chicago Pr., 2002, 208 σσ., ISBN: 0226264211.
- [94] A. Smith, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. 9 Μαρ. 1776.
- [95] V. K. Mathur, «How Well Do We Know Pareto Optimality?» *The Journal of Economic Education*, τόμ. 22, αρθρ. 2, σσ. 172–178, 1991. doi: 10.1080/00220485.1991.10844705.
- [96] Z. He, «Pareto-optimality is a criterion uniting efficiency and justice,» στο *2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, Σεπτ. 2011. doi: 10.1109/icieem.2011.6035186.
- [97] D. Salvatore, *Principles of Microeconomics*. Oxford University Press, 2012, ISBN: 978-0198062301.
- [98] A. Mas-Colell, M. D. Whinston και J. R. Green, *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 11 Σεπτ. 1995, 998 σσ., ISBN: 0195102681.
- [99] C. C. Morrison, «Price makers and nonclearing markets,» *Atlantic Economic Journal*, τόμ. 24, αρθρ. 1, σσ. 19–32, Μαρ. 1996, ISSN: 1573-9678. doi: 10.1007/BF02319877. διεύθυνση: <https://doi.org/10.1007/BF02319877>.
- [100] T. R. Noam Nisan, *Algorithmic Game Theory*. Cambridge University Pr., 11 Δεκ. 2007, 650 σσ., ISBN: 0521872820.
- [101] C. A. Holt και A. E. Roth, «The Nash equilibrium: A perspective,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, τόμ. 101, αρθρ. 12, σσ. 3999–4002, Μαρ. 2004. doi: 10.1073/pnas.0308738101.
- [102] G. Becker, «Marginal Utility,» στο *Wiley Encyclopedia of Management*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015, ISBN: 9781118785317. doi: 10.1002/9781118785317.weom080031.
- [103] S. Shenker, «Fundamental design issues for the future Internet,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, τόμ. 13, αρθρ. 7, σσ. 1176–1188, Σεπτ. 1995. doi: 10.1109/49.414637.
- [104] G. Scutari, D. Palomar, F. Facchinei και J.-s. Pang, «Convex Optimization, Game Theory, and Variational Inequality Theory,» *IEEE Signal Processing Magazine*, τόμ. 27, αρθρ. 3, σσ. 35–49, Μάι. 2010. doi: 10.1109/msp.2010.936021.
- [105] L. H. Chen, Y. Y. Ye και J. W. Zhang, «On Equilibrium Pricing as Convex Optimization,» *Journal of Computational Mathematics*, 2010. doi: 10.4208/jcm.1003-m0001.
- [106] G. Hardin, «The Tragedy of the Commons,» *Science*, τόμ. 162, αρθρ. 3859, σσ. 1243–1248, 13 Δεκ. 1968. doi: 10.1126/science.162.3859.1243.
- [107] F. Kelly, «Charging and rate control for elastic traffic,» *European Transactions on Telecommunications*, τόμ. 8, αρθρ. 1, σσ. 33–37, Ιαν. 1997. doi: 10.1002/ett.4460080106.
- [108] R. La και V. Anantharam, «Charge-sensitive TCP and rate control in the Internet,» στο *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, IEEE, 2000. doi: 10.1109/infcom.2000.832485.
- [109] R. Johari και J. N. Tsitsiklis, «Efficiency Loss in a Network Resource Allocation Game,» *Mathematics of Operations Research*, τόμ. 29, αρθρ. 3, σσ. 407–435, Αύγ. 2004. doi: 10.1287/moor.1040.0091.

-
- [110] B. Hajek και G. Gopalakrishnan, «Do greedy autonomous systems make for a sensible Internet?» Στο *Conference on Stochastic Networks, Stanford University*, τόμ. 222, 2002.
 - [111] R. Jain, D. Chiu και W. Hawe, «A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems,» *ACM Transactions on Computer Systems*, 24 Σεπτ. 1998. arXiv: cs/9809099v1 [cs.NI].
 - [112] K. Wehrle, M. Güneş και J. Gross, *Modeling and Tools for Network Simulation*, K. Wehrle, M. Güneş και J. Gross, επιμελητές. Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12331-3.
 - [113] H. Perros. (2009). Computer Simulation Techniques: The definitive introduction! Διεύθυνση: <http://www4.ncsu.edu/~hp/files/simulation.pdf> (επίσκεψη 02/09/2017).
 - [114] *MEF 10: Ethernet Services Attributes Phase 1*, 2004. διεύθυνση: https://mef.net/PDF_Documents/technical-specifications/MEF10.pdf (επίσκεψη 02/09/2017).
 - [115] *Y.1540: Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters*, ITU-T, Ιούλ. 2016. διεύθυνση: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12975>.

Κατάλογος συντομομορφών

Στον κατάλογο των συντομομορφών, ο οποίος έχει τη μορφή ευρετηρίου, παρατίθενται σχεδόν όλες οι συντομομορφές (αρτικόλεξα, ακρωνύμια και συντομογραφίες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 1455), ελληνικές και ξένες, που χρησιμοποιούνται στο κείμενο της διπλωματικής εργασίας, έχοντας παραλείψει όσες εμφανίζονται μια φορά στο κείμενο και δεν έχουν άμεση σχέση με το θέμα της εργασίας. Για κάθε συντομομορφή παρατίθεται η πλήρης μορφή της, οι σελίδες στις οποίες εμφανίζεται, καθώς και αναφορά για το εαν υπάρχει αντίστοιχο λήμμα μετάφρασης στον κατάλογο μεταφράσεων.

10G-EPON 10-Gigabit Ethernet PON 37, 39, 40

A-PON ATM PON 32

Alloc-ID Allocation Identifier 2, 46, 47, 49, 52–57, 61, 62, 65, 84, 85, 91–96, 98–100, 104, 105, 107, 108, 112, 117, 120–122, 124–127, 130, *βλ. μιτφρ:* Alloc-ID

B-PON Broadband PON 32–34

BWmap bandwidth map 47, 48, 60–62, 65, 66, 93–95, 108, 109, 113, 115–117, 121, *βλ. μιτφρ:* BWmap

BufOcc Buffer Occupancy 53, 62, 63, 112, *βλ. μιτφρ:* BufOcc

DBRd/DBRu Dynamic Bandwidth Report downstream/upstream 48, 61, 62, 85, 94–96, 122, *βλ. μιτφρ:* DBRd/DBRu

DSL Digital Subscriber Line 19–21, *βλ. μιτφρ:* DSL

DSLAM Digital Subscriber Line Access Multiplexer 11, 14, 15, 21, *βλ. μιτφρ:* DSLAM

EFM Ethernet in the First Mile 21, 22, 24, 38, *βλ. μιτφρ:* EFM

EPON Ethernet PON 28, 31, 38–40

FSAN Full Service Access Network 24, 31, 32, 37, 41

FTTB Fiber to the Building 13, 15, 21, *βλ. μιτφρ:* FTTB

FTTC Fiber to the Cabinet 13–17, 21, *βλ. μιτφρ:* FTTC

FTTH Fiber to the Home 13, 15–17, 26, *βλ. μιτφρ:* FTTH

FTTx Fiber To The x 4, 7, 13, 14, 21, *βλ. μιτφρ:* FTTx

- GEM** Gigabit Encapsulation Method 33
- G-PON** Gigabit PON 2, 33–35, 41
- GTC** Gigabit Transmission Converage 33–35
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers 5, 24, 26, 38, 39, *βλ. μιτφρ:* IEEE
- ISDN** Integrated Services Digital Network 12, 14, 15, 17–19, *βλ. μιτφρ:* ISDN
- ITU** International Telecommunication Sector 5, 24, 25, 32, *βλ. μιτφρ:* ITU
- ITU-T** ITU Telecommunication Standardization Sector 17, 19, 22, 26, 31, 35, 37, 41, 50, 57, 92, 107, *βλ. μιτφρ:* ITU-T
- MATLAB** MATrix LABoratory 4, 92, 105, 107
- MPCP** Multi-Point Control Protocol 38, *βλ. μιτφρ:* MPCP
- NG-PON2** New Generation PON 2 28, 35, 37, 40, 105
- OAM** Operation, Administration and Maintenance 44, 47, 48, 60, *βλ. μιτφρ:* OAM
- OMCC** ONU Management and Control Channel 46–48, *βλ. μιτφρ:* OMCC
- OMCI** ONU Management and Control Interface 33, 48, *βλ. μιτφρ:* OMCI
- ONU-ID** ONU Identifier 46, 49, *βλ. μιτφρ:* ONU-ID
- PHY** PHYSical Layer 45, 47, 57, 61, 63–66, 95, 96, 108, 115, 122, 133, *βλ. μιτφρ:* PHY
- PLOAM** Physical Layer OAM 32, 33, 36, 44, 46–49, 60, 62, *βλ. μιτφρ:* PLOAM
- PMD** Physical media dependent layer 41, 48, *βλ. μιτφρ:* PMD
- PSBd/PSBu** Physical Synchronization Block downstream/upstream 45, 64, 65, 95, 96, *βλ. μιτφρ:* PSBd/PSBu
- RS** Reed-Solomon 64–66, 95, 108
- TC** Transmission Converange 37, *βλ. μιτφρ:* TC
- T-CONT** Transmission Container 2, 52, 107, *βλ. μιτφρ:* T-CONT
- XGEM** XG-PON Gigabit Encapsulation Method 44, 45, 47, 50, 57–60, 94–96, 104, 109, 112, 121, 122
- XGEM Port-ID** XGEM Port Identifier 44, 46, 47, 52, 58, 59, 109, *βλ. μιτφρ:* XGEM Port-ID
- XG-PON** neXt Generation PON 2, 4–6, 35, 37, 41, 42, 48–50, 53, 55, 57, 58, 81, 83, 84, 93, 103, 104, 107–109, 111
- XGS-PON** neXt Generation Symmetrical PON 36, 37, 40
- XGTC** XG-PON Transmission Convergence layer 5, 35, 41, 42, 44–48, 57, 59–66, 85, 94–96, 107–109, 112, 122, 124, 133, *βλ. μιτφρ:* XGTC

ΑΚ Αστικό Κέντρο 10–15, 21–23, 25, βλ. μτφρ: ΑΚ

ΑΝΚ Αναφορά Κατάστασης 3, 50, βλ. μτφρ: ΑΝΚ

ΑΤΜ Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς 19, 32, 33, βλ. μτφρ: ΑΤΜ

ΒΠΔΜΚ Βασική Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος 27, βλ. μτφρ: ΒΠΔΜΚ

ΔΑΜΚΕΖ Δυναμική Ανάθεση Μήκους Κύματος και Εύρους Ζώνης 36, 105, βλ. μτφρ: ΔΑΜΚΕΖ

ΔΚΕΖ Δυναμική Κατανομή Εύρος Ζώνης 2–5, 25, 34–36, 38, 41, 42, 44, 48, 50, 53, 55, 67, 68, 83, 85, 93, 104, 107, 111, 117, βλ. μτφρ: ΔΚΕΖ

ΔΚΠ Διακύμανση Καθυστέρησης Πακέτου 50, 124, 125, βλ. μτφρ: ΔΚΠ

ΔΙΙ Δίκτυο Πρόσβασης 1, 4, 5, 7, 10–17, 20–22, βλ. μτφρ: ΔΙΙ

ΔΠΤ Διακριτή Πολυτονική 20, 40, βλ. μτφρ: ΔΠΤ

ΔΤΔΜ Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής 10, 17, 18, βλ. μτφρ: ΔΤΔΜ

ΕΔΣ Εμπροσθόδοτη Διόρθωση Σφαλμάτων 39, 40, 45, 57, 61, 63, 64, 66, 94–96, 117, 133, βλ. μτφρ: ΕΔΣ

ΕΟΔ Ενεργό Οπτικό Δίκτυο 22, βλ. μτφρ: ΕΟΔ

ΕΠΜ Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου 30, 47, βλ. μτφρ: ΕΠΜ

ΘΠ Θεωρία Παιγνίων 4, 5, 67–72, 74, 75, 79, βλ. μτφρ: ΘΠ

ΙΝ Ισορροπία Nash 5, 68, 71–76, 79, 83, 86–90, 103, βλ. μτφρ: ΙΝ

ΚΔΕΖ Καλύτερο δυνατό εύρος ζώνης 51, 54, 56, 57, βλ. μτφρ: ΚΔΕΖ

ΚΕΔΑ Κεφαλαιουχικές Δαπάνες 12, 14, 28, 36, 40, βλ. μτφρ: ΚΕΔΑ

ΚΚ Κατανεμητής Καλωδίων 11, βλ. μτφρ: ΚΚ

ΚΠΟΚ-Κ Κύριο Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή Κτηρίου 16, 17, βλ. μτφρ: ΚΠΟΚ-Κ

ΛΔΣ Λόγος Δυφιακών Σφαλμάτων 31, 63, βλ. μτφρ: ΛΔΣ

ΛΕΙΔΑ Λειτουργικές Δαπάνες 12, 17, 22, 23, 35, βλ. μτφρ: ΛΕΙΔΑ

ΜΔΔ Μονάδα Διεπαφής Δικτύου 11, 14, 16, βλ. μτφρ: ΜΔΔ

ΜΔΡ Μεταβλητός Δυφιορρυθμός 92, 93, 107, 108, 112, 127, 130, βλ. μτφρ: ΜΔΡ

ΜΔΥ Μονάδα Δεδομένων Υπηρεσίας 42, 44, 46, 58–60, 62, 63, 94–98, 112, 121, 122, 124, 126, 127, βλ. μτφρ: ΜΔΥ

ΜΕΕΖ Μη εξασφαλισμένο εύρος ζώνης 51, 54, 55, βλ. μτφρ: ΜΕΕΖ

ΜΟΔ Μονάδα Οπτικού Δικτύου 14–17, 26–28, 30, 32, 34–36, 38, 39, 42, 44, 46–50, 53, 58, 60–63, 66, 92–96, 98–100, 104, 107–109, 111, 112, 115–117, 121, 122, 124, 130, 132, βλ. μιφρ: ΜΟΔ

ΜΠΔΜΚ Μαζική Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος 28, βλ. μιφρ: ΜΠΔΜΚ

ΟΔΔ Οπτικό Δίκτυο Διανομής 15, 23, 26, 37, βλ. μιφρ: ΟΔΔ

ΟΔΠ Οπτικό Δίκτυο Πρόσβασης 13, 16, 17, 26, 31, βλ. μιφρ: ΟΔΠ

ΠΔΚ Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα 31, βλ. μιφρ: ΠΔΚ

ΠΔΜΚ Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος 10, 27, 28, 30, βλ. μιφρ: ΠΔΜΚ

ΠΔΣ Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας 27, 31, βλ. μιφρ: ΠΔΣ

ΠΔΧ Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου 29, 30, βλ. μιφρ: ΠΔΧ

ΠΔΧΜΚ Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου και Μήκους Κύματος 35, 36, βλ. μιφρ: ΠΔΧΜΚ

ΠΚ Παρακολούθηση Κίνησης 3, 50, βλ. μιφρ: ΠΚ

ΠΚΚ Πλαίσιο Κύριου Κατανεμητή 11, 13, βλ. μιφρ: ΠΚΚ

ΠΟΔ Παθητικό Οπτικό Δίκτυο 1, 3–5, 22–32, 36–38, 40–42, 46, 48, 50, 54, 58, 85, 93, βλ. μιφρ: ΠΟΔ

ΠΟΔΣ Πολυπλεξία Ορθογωνικής Διαίρεσης Συχνότητας 30, 31, 40, βλ. μιφρ: ΠΟΔΣ

ΠΟΚ Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή 13, 14, 21, 25, βλ. μιφρ: ΠΟΚ

ΠΟΚ-Κ Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή Κτηρίου 15, βλ. μιφρ: ΠΟΚ-Κ

ΠΟΚ-Ο Πλαίσιο Οπτικού Κατανεμητή Ορόφου 17, βλ. μιφρ: ΠΟΚ-Ο

ΠΠΔΜΚ Πυκνή Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος 10, 28, βλ. μιφρ: ΠΠΔΜΚ

ΠΠΔΧ Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου 30, βλ. μιφρ: ΠΠΔΧ

ΠΠΟΔΣ Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογωνικής Διαίρεσης Συχνότητας βλ. μιφρ: ΠΠΟΔΣ

ΠτΥ Ποιότητα Υπηρεσιών 12, 28, 34–36, 49, βλ. μιφρ: ΠτΥ

ΠΥΔ Πάροχος Υπηρεσιών Διαδικτύου 1, 3, 10–12, 14, 16–18, 24, 25, βλ. μιφρ: ΠΥΔ

ΣΑΚΠ Σχήμα Αναλογικής Κατανομής Πόρων 5, 83, 84, 91–93, 97–100, 103–105, 107, 109, 112, 117, βλ. μιφρ: ΣΑΚΠ

ΣΔΡ Σταθερός Δυνοτητικός Πόρος 92, 93, 108, 112, 126, 130, βλ. μιφρ: ΣΔΡ

ΣΕΥ Σύμφωνο Επιπέδου Υπηρεσιών 12, 21, 34, 104, βλ. μιφρ: ΣΕΥ

ΣΠΔΧ Στατιστική Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου 29, βλ. μιφρ: ΣΠΔΧ

Σ-ΠΣ Σημείο προς Πολλαπλά Σημεία 21–23, 58, βλ. μιφρ: Σ-ΠΣ

Σ-Σ Σημείο προς Σημείο 18, 21, βλ. μιτφρ: Σ-Σ

ΤΚ-ΤΟΓ Τερματισμός Καναλιού του ΤΟΓ 35, 36, βλ. μιτφρ: ΤΚ-ΤΟΓ

ΤΟΓ Τερματικό Οπτικής Γραμμής 14, 25–28, 32, 34–36, 39, 42, 46–55, 58, 60, 61, 63–66, 85, 93–96, 99, 104, 108, 109, 112, 117, 122, 124, βλ. μιτφρ: ΤΟΓ

ΤΟΔ Τερματικό Οπτικού Δικτύου 16, 17, 26, βλ. μιτφρ: ΤΟΔ

ΤτΑ Τιμή της Αναρχίας 5, 74, 88, βλ. μιτφρ: ΤτΑ

ΤτΚ Τραγωδία των Κοινών 4, 5, 68, 80, 81, 83, 84, βλ. μιτφρ: ΤτΚ

ΥΚΤ Υπηρεσία Κοινής Τηλεφωνίας 11, 12, 14, 15, 18, βλ. μιτφρ: ΥΚΤ

Κατάλογος μεταφράσεων

Στον κατάλογο μεταφράσεων, ο οποίος έχει τη μορφή ευρετηρίου, παρατίθενται οι αποδόσεις των περισσότερων τεχνικών και επιστημονικών όρων που χρησιμοποιούνται στο κείμενο της διπλωματικής εργασίας στην ελληνική ή στην αγγλική γλώσσα. Πιο συγκεκριμένα, ο κατάλογος περιλαμβάνει μετάφραση της πλήρης μορφής ελληνικών συντομομορφών στα αγγλικά, ελληνικής ορολογίας στα αγγλικά, καθώς και της πλήρης μορφής ξένων συντομομορφών στα ελληνικά. Για κάθε λήμμα του καταλόγου, λοιπόν, εμφανίζεται με έντονα γράμματα η μορφή του όρου που υιοθετείται στο κείμενο, η απόδοσή του στην άτερη γλώσσα, οι σελίδες στις οποίες εμφανίζεται, αναφορά για το αν υπάρχει αντίστοιχη καταχώριση στον κατάλογο συντομομορφών, καθώς και τυχόν εναλλακτικές αποδόσεις του όρου στην ελληνική και την αγγλική γλώσσα. Επισημαίνεται ότι για τους περισσότερους ξένους όρους δεν υπάρχει επίσημη ελληνική μετάφραση από κάποιον φορέα, οι μεταφράσεις βασίστηκαν κυρίως στη Βάση Τηλεπικοινωνιακών Όρων του OTE (<http://www.moto-teleterm.gr>) και την κρίση του συγγραφέα.

ΑΚ Central Office – CO 10–15, 21–23, 25, *βλ. συντμ:* AK

ΑΝΚ Status Reporting – SR 3, 50, *βλ. συντμ:* ANK

ΑΤΜ Asynchronous Transfer Mode – ATM 19, 32, 33, *βλ. συντμ:* ATM

ΒΠΔΜΚ Basic Wavelength Division Multiplexing – BWDM 27, *βλ. συντμ:* ΒΠΔΜΚ

ΔΑΜΚΕΖ Dynamic Wavelength Bandwidth Allocation – DWBA 36, 105, *βλ. συντμ:* ΔΑΜΚΕΖ

ΔΚΕΖ Dynamic Bandwidth Allocation – DBA 2–5, 25, 34–36, 38, 41, 42, 44, 48, 50, 53, 55, 67, 68, 83, 85, 93, 104, 107, 111, 117, *βλ. συντμ:* ΔΚΕΖ

ΔΚΠ Packet Delay Variation – PDV 50, 124, 125, *βλ. συντμ:* ΔΚΠ

ΔΠ Access Network – AN 1, 4, 5, 7, 10–17, 20–22, *βλ. συντμ:* ΔΠ

ΔΠΤ Discrete Multi-Tone – DMT 20, 40, *βλ. συντμ:* ΔΠΤ

ΔΤΔΜ Public Switched Telephone Network – PSTN 10, 17, 18, *βλ. συντμ:* ΔΤΔΜ

ΕΔΣ Forward Error Correction – FEC 39, 40, 45, 57, 61, 63, 64, 66, 94–96, 117, 133, *βλ. συντμ:* ΕΔΣ

ΕΟΔ Active Optical Network – AON 22, *βλ. συντμ:* ΕΟΔ

ΕΠΜ Medium Access Control – MAC 30, 47, *βλ. συντμ:* ΕΠΜ

ΘΠ Game Theory 4, 5, 67–72, 74, 75, 79, βλ. συντμ: ΘΠ

ΙΝ Nash Equilibrium – NE 5, 68, 71–76, 79, 83, 86–90, 103, βλ. συντμ: IN

ΚΔΕΖ Best-Effort – BE 51, 54, 56, 57, βλ. συντμ: ΚΔΕΖ

ΚΕΔΑ CAPital EXpenditures – CAPEX 12, 14, 28, 36, 40, βλ. συντμ: ΚΕΔΑ

ΚΚ Kabelverteiler – KV 11, βλ. συντμ: KK

ΚΠΟΚ-Κ Main Building ODF – MB-ODF 16, 17, βλ. συντμ: ΚΠΟΚ-Κ

ΛΔΣ Bit Error Rate – BER 31, 63, βλ. συντμ: ΛΔΣ

ΛΕΙΔΑ OPerational EXpenditures – OPEX 12, 17, 22, 23, 35, βλ. συντμ: ΛΕΙΔΑ

ΜΔΔ Network Interface Unit – NIU 11, 14, 16, βλ. συντμ: ΜΔΔ

ΜΔΡ Variable Bit Rate – VBR 92, 93, 107, 108, 112, 127, 130, βλ. συντμ: ΜΔΡ

ΜΔΥ Service Data Unit – SDU 42, 44, 46, 58–60, 62, 63, 94–98, 112, 121, 122, 124, 126, 127, βλ. συντμ: ΜΔΥ

ΜΕΕΖ Non-Assured – NA 51, 54, 55, βλ. συντμ: MEEZ

ΜΟΔ Optical Network Unit – ONU 14–17, 26–28, 30, 32, 34–36, 38, 39, 42, 44, 46–50, 53, 58, 60–63, 66, 92–96, 98–100, 104, 107–109, 111, 112, 115–117, 121, 122, 124, 130, 132, βλ. συντμ: ΜΟΔ

ΜΠΔΜΚ Coarse Wavelength Division Multiplexing – CWDM 28, βλ. συντμ: ΜΠΔΜΚ

ΟΔΔ Optical Distribution Network – ODN 15, 23, 26, βλ. συντμ: ΟΔΔ

ΟΔΠ Optical Access Network – OAN 13, 16, 17, 26, 31, βλ. συντμ: ΟΔΠ

ΠΔΚ Code Division Multiplexing – CDM 31, βλ. συντμ: ΠΔΚ

ΠΔΜΚ Wavelength Division Multiplexing – WDM 10, 27, 28, 30, βλ. συντμ: ΠΔΜΚ

ΠΔΣ Frequency Division Multiplexing – FDM 27, 31, βλ. συντμ: ΠΔΣ

ΠΔΧ Time Division Multiplexing – TDM 29, 30, βλ. συντμ: ΠΔΧ

ΠΔΧΜΚ Time and Wavelength Division Multiplexing – TWDM 35, 36, βλ. συντμ: ΠΔΧΜΚ

ΠΚ Traffic Monitoring – TM 3, 50, βλ. συντμ: ΠΚ

ΠΚΚ Main Distribution Frame – MDF 11, 13, βλ. συντμ: ΠΚΚ

ΠΟΔ Passive Optical Network – PON 1, 3–5, 22–32, 36–38, 40–42, 46, 48, 50, 54, 58, 85, 93, βλ. συντμ: ΠΟΔ

ΠΟΔΣ Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – OFDM 30, 31, 40, βλ. συντμ: ΠΟΔΣ

ΠΟΚ Optical Distribution Frame – ODF 13, 14, 21, 25, βλ. συντμ: ΠΟΚ

ΠΟΚ-Κ Building ODF – B-ODF 15, βλ. συντμ: ΠΟΚ-Κ

ΠΟΚ-Ο Floor ODF – F-ODF 17, βλ. συντμ: ΠΟΚ-Ο

ΠΠΔΜΚ Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM 10, 28, βλ. συντμ: ΠΠΔΜΚ

ΠΠΔΧ Time Division Multiple Access – TDMA 30, βλ. συντμ: ΠΠΔΧ

ΠΠΟΔΣ Orthogonal Frequency-Division Multiple Access – OFDMA βλ. συντμ: ΠΠΟΔΣ

ΠΥΔ Internet Service Provider – ISP 1, 3, 10–12, 14, 16–18, 24, 25, βλ. συντμ: ΠΥΔ

ΠτΥ Quality of Service – QoS 12, 28, 34–36, 49, βλ. συντμ: ΠτΥ

ΣΑΚΠ Proportional Allocation Scheme – PAS 5, 83, 84, 91–93, 97–100, 103–105, 107, 109, 112, 117, βλ. συντμ: ΣΑΚΠ

ΣΔΡ Constant Bit Rate – CBR 92, 93, 108, 112, 126, 130, βλ. συντμ: ΣΔΡ

ΣΕΥ Service Level Agreement – SLA 12, 21, 34, 104, βλ. συντμ: ΣΕΥ

ΣΠΔΧ Statistical Time Division Multiplexing – STDM 29, βλ. συντμ: ΣΠΔΧ

Σ-ΠΣ Point to Point – P2MP 21–23, 58, βλ. συντμ: Σ-ΠΣ

Σ-Σ Point to Point – P2P 18, 21, βλ. συντμ: Σ-Σ

ΤΚ-ΤΟΓ OLT Channel Termination – OLT CT 35, 36, βλ. συντμ: ΤΚ-ΤΟΓ

ΤΟΓ Optical Line Terminal – OLT 14, 25–28, 32, 34–36, 39, 42, 46–55, 58, 60, 61, 63–66, 85, 93–96, 99, 104, 108, 109, 112, 117, 122, 124, βλ. συντμ: ΤΟΓ

ΤΟΔ Optical Network Terminal – ONT 16, 17, 26, βλ. συντμ: ΤΟΔ

ΤτΑ Price of Anarchy – PoA 5, 74, 88, βλ. συντμ: ΤτΑ

ΤτΚ Tragedy of the Commons 5, 81, 83, 84, βλ. συντμ: ΤτΚ

ΥΚΤ Plain Old Telephone Service – POTS 11, 12, 14, 15, 18, βλ. συντμ: ΥΚΤ

ανταγωνιστική ισορροπία competitive equilibrium 78, 79

αποδοτική κατά Παρέτο Pareto efficient, *Ταντόσημο με: Pareto optimal, βέλτιστη κατά Παρέτο* 78, 79

απόδοση payoff 69, 70, 72, 86

απόσταση ασφαλείας guard time 29, 66, 117

δέσμιση καναλιού channel bonding 40

διαμορφωτής τιμής price maker 79, 85

δομή κατανομής allocation structure 61, 62

εξασφαλισμένο εύρος ζώνης assured bandwidth 51, 54

καμπίνα cabinet 11–15, 21, 22

κοινωνική ευημερία social welfare 4, 74, 79, 85, 88–90, 99

κύτταρο ATM ATM cell 32

λήπτης τιμής price taker 78, 88

λογική μνήμη προσωρινής αποθήκευσης logical buffer, *Ταντόσημο με: ουρά (queue)* 39, 52, 93–96, 99, 112, 122, 126, 127

μνήμη προσωρινής αποθήκευσης buffer 26, 53, 99, 121

οπτικός διακλαδωτής optical splitter 22, 23, 25, 26

οριακή ωφελιμότητα marginal utility 80

πάγιο εύρος ζώνης fixed bandwidth 3, 50, 54, 93

περιγραφέας κίνησης traffic descriptor 50–52, 107, 109, 111

σημείο οριοθέτησης demarcation point 11, 13, 16

σκιαγράφηση delineation, *Ταντόσημο με: οριοθέτηση, διαχωρισμός πλαισίων* 44

συνδρομητική γραμμή subscriber line, *Ταντόσημο με: local loop, τοπικός βρόχος* 11, 18

τιμή ισορροπίας equilibrium price, *Ταντόσημο με: clear-market price* 78, 90

το δίλημμα του φυλακισμένου the prisoner's dilemma 72, 73

υπόστρωμα πλαισίωσης framing sublayer 42, 44, 45

υπόστρωμα προσαρμογής υπηρεσιών service adaptation sublayer 42, 44

υπόστρωμα προσαρμογής φυσικού επιπέδου PHY adaptation sublayer 42, 45

ωφέλεια utility 4, 5, 69–71, 74–76, 79–81, 85–90, 98, 103, 104

Alloc-ID Αναγνωριστικό Κατανομής 2, 46, 47, 49, 52–57, 61, 62, 65, 84, 85, 91–96, 98–100, 104, 105, 107, 108, 112, 117, 120–122, 124–127, 130, *βλ. συντμ:* Alloc-ID

BufOcc ποσοστό κατάληψης της προσωρινής μνήμης αποθήκευσης 53, 62, 63, 112, *βλ. συντμ:* BufOcc

BWmap χάρτης καταχώρισης εύρους ζώνης 47, 48, 60–62, 65, 66, 93–95, 108, 109, 113, 115–117, 121, *βλ. συντμ:* BWmap

DBRd/DBRu Αναφορά Δυναμικού Ευρους Ζώνης καθόδου/ανόδου 48, 61, 62, 85, 94–96, 122, *βλ. συντμ:* DBRd/DBRu

DSL Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή 11, 12, 14, 15, 19–21, *βλ. συντμ:* DSL

DSLAM Πολυπλέκτης Πρόσβασης Ψηφιακής Συνδρομητικής Γραμμής 11, 14, 15, 21, *βλ. συντμ:* DSLAM

EFM Ethernet στο Πρώτο Μίλι 21, 24, 38, βλ. συντμ: EFM

FTTB Ήνα μέχρι το Κτήριο 13, 15, 21, βλ. συντμ: FTTB

FTTC Ήνα μέχρι την Καμπίνα 13–17, 21, βλ. συντμ: FTTC

FTTH Ήνα μέχρι το Σπίτι 13, 15–17, 26, βλ. συντμ: FTTH

FTTx Ήνα μέχρι το X 4, 7, 13, 14, 21, βλ. συντμ: FTTx

IEEE Ινστιντούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών 5, 24, 26, 38, βλ. συντμ: IEEE

ISDN Ψηφιακό Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών 12, 14, 15, 17–19, βλ. συντμ: ISDN

ITU Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών 5, 24, 25, 32, βλ. συντμ: ITU

ITU-T Τομέας Τυποποίησης της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών 17, 19, 22, 26, 31, 35, 41, 50, 57, 92, 107, βλ. συντμ: ITU-T

MPCP Πολυσημειακό Πρωτόκολλο Ελέγχου 38, βλ. συντμ: MPCP

OAM κανάλι Λειτουργίας, Διοίκησης και Συντήρησης 44, 47, 48, 60, βλ. συντμ: OAM

OMCC Κανάλι Διαχείρισης και Ελέγχου της ΜΟΔ 46–48, βλ. συντμ: OMCC

OMCI Διεπαφή Διαχείρισης και Ελέγχου της ΜΟΔ 48, βλ. συντμ: OMCI

ONU-ID Αναγνωριστικό ΜΟΔ 46, 49, βλ. συντμ: ONU-ID

PHY Φυσικό Στρώμα 45, 47, 57, 61, 63–66, 95, 96, 108, 115, 122, 133, βλ. συντμ: PHY

PLOAM κανάλι Λειτουργίας, Διοίκησης και Συντήρησης Φυσικού Επιπέδου 44, 46–49, 60, 62, βλ. συντμ: PLOAM

PMD στρώμα Εξαρτώμενο από Φυσικά Μέσα 41, 48, βλ. συντμ: PMD

PSBd/PSBu Πεδίο Χρονισμού Φυσικού Επιπέδου καθόδου/ανόδου 45, 64, 65, 95, 96, βλ. συντμ: PSB-d/PSB-u

TC στρώμα Σύγκλισης Μετάδοσης 37, βλ. συντμ: TC

T-CONT περιέκτης μεταδόσεων 2, 52, 107, βλ. συντμ: T-CONT

XGEM Port-ID Αναγνωριστικό θύρας XGEM 47, 52, 58, 59, 109, βλ. συντμ: XGEM Port-ID

XGTC στρώμα Σύγκλισης Μετάδοσης του XG-PON 41, 42, 44–48, 57, 59–66, 85, 94–96, 107–109, 112, 122, 124, 133, βλ. συντμ: XGTC