



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αλγόριθμοι Δρομολόγησης για Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιπποκράτης Ε. Σαρτζετάκης

Το έργο συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποίησε το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Αθήνα, Ιούλιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αλγόριθμοι Δρομολόγησης για Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιπποκράτης Ε. Σαρτζετάκης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Θεοδώρα Βαρβαρίγου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 1^η Ιουλίου 2019.

.....
Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μικτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Δ. Σταμούλης
Καθηγητής Ο.Π.Α.

.....
Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσάκη
Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....

Ιπποκράτης Ε. Σαρτζετάκης

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

Copyright © Ιπποκράτης Ε. Σαρτζετάκης, 2019.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Σύνοψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εντάσσεται στο ερευνητικό πεδίο των οπτικών δικτύων, και πιο συγκεκριμένα των αλγορίθμων δρομολόγησης και βελτιστοποίησης για ευέλικτα οπτικά δίκτυα. Η ολοένα αυξανόμενη κίνηση στο διαδίκτυο έχει δημιουργήσει την ανάγκη για πιο αποδοτικά οπτικά δίκτυα. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των οπτικών δικτύων είναι ιδιαίτερα σημαντικές αλλά δεν είναι αρκετές για να καλύψουν τις ανάγκες του κοντινού μέλλοντος. Η αρχιτεκτονική των οπτικών δικτύων θα πρέπει να εξελιχθεί ώστε να γίνει εφικτός ο δυναμικός έλεγχος και η προσαρμογή του δικτύου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτό προϋποθέτει την ανάπτυξη αλγορίθμων οι οποίοι αρχικά θα αξιοποιούν τις πληροφορίες από την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Έπειτα, από τις τωρινές και μελλοντικές απαιτήσεις, οι αλγόριθμοι θα καθορίζουν πιθανές λειτουργίες βελτιστοποίησης, και εν συνεχεία θα αποφασίζουν για την εκτέλεση των αντίστοιχων ενεργειών. Η υλοποίηση αυτών των αλγορίθμων είναι το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας των οπτικών δικτύων, την αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων τους και την μείωση των εξόδων λειτουργίας τους.

Λέξεις κλειδιά

Οπτικά Δίκτυα, Ελαστικά Οπτικά Δίκτυα, Βελτιστοποίηση Δικτύων, Μηχανική Μάθηση, Δρομολόγηση και Ανάθεση Φάσματος, Εκτίμηση Ποιότητας Μετάδοσης (QoT), Ακρίβεια Εκτίμησης, Περιθώρια Φυσικού Επιπέδου, Επιβίωση δικτύου, Εγγυήσεις Ρυθμού, Επαναρρύθμιση, Βλάβες, Ελαφριές Βλάβες, Διαστρωματική Βελτιστοποίηση.

Abstract

This PhD dissertation belongs to the research field of optical networks, and more specifically to the field of routing and optimization algorithms for elastic (flexible) optical networks. The continuous Internet traffic increase has created the need for more efficient optical networks. Recent developments in the field of optical networks are particularly important but are not enough to meet the needs of the near future. The architecture of the optical networks should evolve to allow dynamic control and adaptation of the network to changing conditions. This presupposes the development of algorithms that will initially use the information from the current state of the network. Next, from current and future requirements, the algorithms will determine possible optimization functions, and then decide on the execution of the respective actions. The implementation of these algorithms is the subject of this doctoral dissertation and has the effect of increasing the efficiency of optical networks, managing their resources more efficiently and reducing operating costs.

Keywords

Optical Networks, Elastic Optical Networks, Network Optimization, Machine Learning, Routing and Spectrum Allocation, Quality of Transmission (QoT) Estimation, Estimation Accuracy, Physical Layer Margins, Network survivability, Rate-guarantees, Reconfiguration, Soft failures, Failure Localization, Spectrum sharing, Cross layer optimization.

Περιεχόμενα	
Σύνοψη	4
Λέξεις κλειδιά	4
Abstract	5
Keywords	5
Ευχαριστίες.....	9
Γλωσσάρι όρων.....	10
Extended Summary.....	11
Εισαγωγή.....	18
Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό πλαίσιο και Μοντελοποίηση Δικτύου.....	19
Θεωρητικό πλαίσιο	19
Μοντέλο δικτύου και φυσικού επιπέδου	21
<i>Μοντέλο Δικτύου.....</i>	<i>21</i>
<i>Μοντέλο Φυσικού Επιπέδου.....</i>	<i>22</i>
Κεφάλαιο 2 Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης	26
Σύνοψη	26
Εισαγωγή.....	26
Προηγούμενες εργασίες	28
Τεχνικές Εκτίμησης Ποιότητας Μετάδοσης.....	29
<i>Συμβολισμός του δικτύου</i>	<i>30</i>
<i>Το πρόβλημα εκτίμησης ποιότητας μετάδοσης</i>	<i>30</i>
<i>Network kriging.....</i>	<i>32</i>
<i>Norm l2 minimization.....</i>	<i>32</i>
Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψιν παρεμβολές	33
Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης για ελαστικά οπτικά δίκτυα	36
<i>Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης ενός μονοπατιού προτού αυτό εγκατασταθεί</i>	<i>36</i>
<i>Εκτίμηση της υποβάθμισης που θα προκαλέσει ένα καινούριο μονοπάτι στα υπάρχοντα.....</i>	<i>37</i>
<i>Βάση δεδομένων μετρήσεων</i>	<i>38</i>
Προσομοιώσεις	39
<i>Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης ενός μονοπατιού προτού αυτό εγκατασταθεί</i>	<i>40</i>
<i>Εξοικονόμηση Αναγεννητών</i>	<i>42</i>
Συμπεράσματα	44
Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης με Μηχανική Μάθηση	46
Σύνοψη	46
Εισαγωγή.....	46
Προηγούμενες εργασίες	46

Προσεγγιστικές Αρχιτεκτονικές	49
<i>Machine Learning Physical Layer Model (ML-PLM)</i>	49
<i>Machine learning model (ML-M)</i>	51
Αποτελέσματα	54
<i>Συμπεράσματα</i>	58
Σύνοψη	60
Εισαγωγή	60
Μοντελοποίηση	61
Μείωση των αβεβαιοτήτων	62
Soft failures και εντοπισμός σφαλμάτων	64
<i>Ενισχυτές</i>	64
<i>Τνες</i>	64
<i>Ρυθμιζόμενα Φίλτρα, Οπτικοί Μεταγωγείς, Πομποδέκτες</i>	64
Εντοπισμός soft failures	64
Αποτελέσματα	65
<i>Μείωση της αβεβαιότητας</i>	65
<i>Εντοπισμός Βλαβών</i>	67
Συμπεράσματα	68
Κεφάλαιο 5 Διαστρωματική προσαρμογή οπτικών δικτύων	69
Σύνοψη	69
Εισαγωγή	69
Προηγούμενες εργασίες	70
Σενάριο δικτύου	71
Σενάρια Χρήσης	72
Η Εργαλειοθήκη	73
<i>Προσαρμογή FEC</i>	73
<i>Προσαρμογή ζώνης φύλαξης φάσματος</i>	74
<i>Προσαρμογή σχήματος διαμόρφωσης</i>	75
<i>Αναδρομικός αλγόριθμος μετατόπισης φάσματος μονοπατιών</i>	75
<i>Εφαρμογή της εργαλειοθήκης</i>	76
Προσομοιώσεις	77
<i>Προ-ορατική επαναφορά (Pro-Active Restoration)</i>	78
<i>Δυναμική λειτουργία δικτύου</i>	79
Συμπεράσματα	82
Κεφάλαιο 6 Διαμοιρασμός Φάσματος για επαναφορά από βλάβες	83
Σύνοψη	83

Εισαγωγή.....	83
Προηγούμενες εργασίες	84
Σενάριο δικτύου.....	85
ILP μοντελοποίηση	86
Αποτελέσματα.....	89
Συμπεράσματα.....	91
Τελικά Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	92
Δημοσιεύσεις.....	94
Βιβλιογραφία	95

Ευχαριστίες...

...για όλους όσους βοήθησαν...

Γλωσσάρι όρων

Elastic Optical Networks	Ελαστικά Οπτικά Δίκτυα
Machine Learning	Μηχανική Μάθηση
Routing and Spectrum Allocation	Δρομολόγηση και Ανάθεση Φάσματος
Quality of Transmission	Ποιότητα Μετάδοσης
Physical Layer Margins	Περιθώρια Φυσικού Επιπέδου
Soft Failures	Ελαφριές Βλάβες
Hard Failures	Σοβαρές Βλάβες
Cross Layer Optimization	Διαστρωματική Βελτιστοποίηση
Bit Error Rate	Ρυθμός Σφαλμάτων Διφύων
Signal-to-Noise Ratio	Σηματοθορυβικός Λόγος
Physical Layer Model	Μοντέλο Φυσικού Επιπέδου
Baud Rate	Ρυθμός Συμβόλου
Wavelength Division Multiplexing	Πολυπλέξια Μήκους Κύματος
Transponder	Πομποδέκτης
Wavelength Selective Switch	Επιλεκτικός Μεταγωγέας Μήκους Κύματος
(Reconfigurable) Optical Add-Drop Multiplexer	(Ρυθμιζόμενος) Οπτικός Πολυπλέκτης Προσθήκης/Τερματισμού Κίνησης
Optical Cross Connect	Οπτικός Μεταγωγέας
System Margins	Περιθώρια Συστήματος
Design Margin	Περιθώριο Σχεδίασης
Fiber Span	Διάστημα Ίνας
Optical Performance Monitor	Οπτική Συσκευή Παρακολούθησης Απόδοσης
End-to-End	Διατερματικές

Extended Summary

Internet traffic has been growing continuously in recent years, with new applications, such as HD video on demand and cloud computing, requiring high capacity, which only optical networks can provide, and flexibility, which is the promise of elastic optical networks (EONs). In transport optical networks the optical signals can transparently pass intermediate nodes (without undergoing Optical-Electrical-Optical conversion) and traverse long links. The accumulated impairments may degrade the Quality of Transmission (QoT) of the signal to an unacceptable degree, necessitating the use of regenerators at certain intermediate hops.

The QoT of an established lightpath does not remain constant but decreases as time passes, due to increased interference from new lightpaths (the utilization of the network is light at the beginning of its life, and increases as more connections are established), equipment ageing and maintenance operations (e.g., splices after fixing fiber cuts). Traditional provisioning of lightpaths makes use of tools (also referred to as Q-tools) that estimate the QoT of the lightpaths that use abundant margins. Margins are used to account for any inaccuracies in their model and avoid subsequent interventions during the network lifetime. High margins often force the deployment of regenerators or more robust transponders that are not strictly necessary during the initial set-up. Clearly, provisioning with lower margins and placing equipment “Just in Time” (JIT) would be both desirable and beneficial, by avoiding or postponing the purchase of equipment by operators, reducing the overall cost, as equipment costs fall with time and saved capital translates to reduced loans or interest.

Lowering the margins used in provisioning, however, requires new feedback-based networking mechanisms. Such mechanisms can rely on the use of optical performance monitors (OPM), to observe the state of the network and (i) estimate in an accurate way the QoT before provisioning new lightpaths, and (ii) anticipate, identify and remedy the QoT problems that could occur at later times. In the past, hardware QoT monitors were expensive and as a result only power monitors were deployed. During the past few years, optical coherent transceivers have started being installed in core networks and the general expectation is that we are moving towards all-coherent optical networks. Such transceivers employ DSP processing at the receivers and are thus able to monitor and compensate certain impairments. These coherent receivers can be extended to operate as software OPMs and a scalable and responsive monitoring and control plane can support and use such data, providing the solution for lowering the margins as well as other benefits in dynamic network operation, as discussed in the following.

With the advent of flex-grid and tunable transceivers, optical networks are becoming more dynamic, typically referred to as flexible or elastic optical networks (EONs). In such a dynamic optical network environment the reconfiguration actions would benefit from accurate QoT estimation. For example, assume a network that automatically adapts to traffic changes. Taking dynamic decisions to change the spectrum used and/or the modulation format of existing lightpath(s) to cope with traffic changes, requires the estimation of the QoT of the changed lightpath(s) and the effect the changes have to the other established ones. This PhD thesis presents optimization algorithms conforming to a network that observes itself, and uses such information in dynamic optimization decisions, closing the control cycle. Note that this control cycle of observing, correlating, and re-adjusting the network is also very much in line with the current trends towards Software Defined Networking (SDN).

As far as the network model that this dissertation considers, it is based on a national or continental optical transport network that employs either fixed - (WDM) or flex (elastic) -grid. The nodes are assumed to be equipped with Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers (ROADM) so that the traffic can be switched to the desired direction while the signal remains in the optical domain according to the routing decisions. The nodes are connected through uncompensated fiber links, each consisting of a number of fiber spans terminating at an amplifier. The latter compensates exactly the loss of the span. We assume that there is no wavelength conversion and thus the wavelength (or spectrum, in the case of a flex-grid network) continuity constraint holds for a lightpath that crosses several links. The lightpaths are provisioned using a Routing and Wavelength Assignment (RWA) algorithm, or a Routing and Spectrum Assignment (RSA) algorithm for a WDM or flex-grid network, respectively. If the QoT of a certain connection is estimated to be

unacceptable, the algorithm decides to place regenerators at certain locations, and then each segment between regenerators is considered a separate lightpath that can use a different wavelength or spectrum.

We assume that the network is enriched with optical performance monitor (OPM) capabilities: certain (all or a subset of) receivers in the network are used as OPMs. Note that coherent receivers deployed today are packed with DSP capabilities, so they can be extended, almost for free, to function as OPMs. The DSP at the receivers performs electronic dispersion compensation and MIMO equalization. In particular we assume that an OPM (receiver) can provide information about the SNR (Signal to Noise Ratio) of the lightpath. We also assume that from the SNR and taking into account the modulation format, we can calculate the pre-FEC BER, and then, taking into account the FEC, the BER, which is the ultimate QoT metric. Note that SNR is reported even today by commercial coherent transceivers. The SNR takes into account all impairments, ASE (Amplified Spontaneous Emission) and NLI (Non linear interference), and residual dispersion. Alternatively, we can assume that an OPM can provide separate information for several impairments, and that the SNR can be calculated based on the monitored parameters.

A key approximating assumption that we make is that the inverse of SNR is additive per link, or that impairment parameters are additive per link if we estimate those separately. In this study we use the GN model to approximate the behavior of the physical layer: to obtain QoT estimates of the established lightpaths and to evaluate the accuracy of our estimation framework. The impairments considered are ASE and NLI, which consists of SCI (Self Channel Interference) and XCI (Cross Channel Interference). We ignore MCI (Multi Channel Interference) because it is almost always negligible, while the GN model assumes also ideal dispersion compensation at the receivers. The BER estimates of the GN model will serve as the ground truth for validating the accuracy of our correlation techniques. In practice, the proposed framework, when deployed in a real network, will use (instead of the GN model) the actual monitored values provided by the OPMs in the field. The first algorithm that this dissertation considers is a Quality of Transmission estimator. In optical transport networks the Quality of Transmission (QoT) is estimated before provisioning new connections or upgrading existing ones. Traditionally, a physical layer model (PLM) is used for QoT estimation coupled with high margins to account for the model inaccuracy and the uncertainty in the evolving physical layer conditions. Reducing the margins increases network efficiency but requires accurate QoT estimation. We present a framework that correlates monitoring information from established lightpaths to estimate (a) the QoT of a new lightpath before it is established, and (b) the degradation the new lightpath will cause to existing ones. This can be used to provision a lightpath with low margins and enable optimized and dynamic reconfiguration actions, which both increase the network efficiency, as discussed above. The network studied is a single- or multi-rate traditional WDM or EON with coherent transmission. We assume that coherent receivers provide monitoring information on the electrical Signal to Noise Ratio (SNR), which accounts for all optical layer impairments and is used to calculate the Bit Error Ratio (BER), which is the ultimate QoT metric. Note that the SNR is already measured and reported by commercial coherent receivers. Alternative, individual impairments or other QoT metrics that can be measured by soft-OPMs can be estimated. The proposed framework correlates SNR measurements, taking into account the space (routing) and the spectrum domains (interference of spectrum neighboring channels), through the introduction of an auxiliary graph, which we call the Interference-Aware (IA) graph, on which the estimation algorithms run. As a result, the SNR and then the BER estimates provided by our framework are more accurate and realistic than those obtained by previous approaches (that only took the space domain into account). This in turn helps the network manager make more optimized decisions. Past similar studies used only space (routing) information and thus neglected spectrum, while they focused on old generation non-coherent networks.

We used the GN model to approximate the behavior of the physical layer and conduct a set of simulation experiments to evaluate the accuracy of the estimation framework and the benefits it provides. The worst case interference scenario that assumes all channels are lighted on simultaneously, always overestimates the BER, as opposed to our estimation framework that takes into account the actual lightpath utilization. As a result the estimated BER is much closer to reality and quite lower than the BER of the worst case interference scenario (assuming that the actual network load is not very high and therefore is not close to the worst case scenario). We observed that the estimate of the pre-FEC BER of a new lightpath that our framework provides is up to $4 \cdot 10^{-2}$ lower than the corresponding worst case estimate. This has profound implications on the required number of costly regenerators as we also show in the simulations. In particular, our framework was shown to require up to 47% fewer regenerators than the worst case scenario, while it required only 5% more than the perfect estimation scenario where we accurately know the BER of the new lightpath. The accuracy of the framework was slightly worse in EON as opposed to WDM networks, due to the higher number of possible interference states that were modelled through relaxed grouping criteria.

We also developed two different QoT estimators based on Machine Learning. A great deal of recent research effort has been directed towards QoT estimation with Machine Learning (ML). ML has been applied in various areas of Optical Networks both at the physical and the network layer. In this study we focus on ML regression, aiming to estimate a specific value for the QoT metric. In doing so, we investigate two possible solutions based on ML techniques. The first approach is to use a machine learning physical layer model (ML-PLM) with specific input parameters (e.g. fiber attenuation, dispersion, nonlinear coefficients) to estimate the QoT. ML is used to learn the input parameters of the PLM and thus improve its accuracy. The second approach is to use a supervised machine learning model (ML-M) as the QoT estimator. In this case the choice of the features determines to a great extent the accuracy of the estimator. We select the features of the estimators to be appropriate for a heterogeneous network. The proposed ML methods account for variations and uncertainties in equipment parameters, such as fiber attenuation, dispersion and nonlinear coefficients, or amplifier noise figure per span, which are typical in deployed networks. We evaluate the accuracy of the estimators under various parameter uncertainty scenarios. We demonstrate excellent estimation accuracy with data monitored from a relatively low number of established lightpaths. In a brownfield scenario (where large amount of monitoring data are available) the estimators can be used in a straightforward way to provision new lightpaths with reduced margins and decrease the network costs. In a greenfield scenario the operator could initially use some probe lightpaths to train the estimator, and provision the lightpaths with reduced margins. Another option could be to initially overprovision the lightpaths and at a later stage (next upgrade) train and use the estimators to adjust the transmission parameters accordingly. Studies such as consider this option by assuming a design margin that is reduced over the network lifetime, as traffic increases and more lightpaths are established in the network. Both ML-PLM and ML-M achieve high accuracy using monitoring information from few established lightpaths. ML-PLM is more accurate than ML-M but requires a larger running time for training purposes. ML-M is more flexible in that it does not require any previous physical layer knowledge and is applicable to a large variety of networks (core, metro, dispersion compensated etc) with small or no modifications. Both approaches performed much better than ML algorithms that use end-to-end features. The high accuracy of the proposed models makes them suitable for a dynamic network that continuously evolves. Also, network costs can be significantly reduced, since the operating margins can be reduced through more accurate QoT estimation.

Next we developed a framework to reduce monitoring uncertainties and localize failures. Optical transport networks are quite static in the sense that they are not dynamically re-configured unless there is a hard failure (such as a fiber cut). Hard failures are handled with protection/restoration mechanisms, which involve the dynamic re-routing of the affected traffic. Optical connections (lightpaths) can travel over multiple consecutive links, bypassing transparently the intermediate optical switches. In this process they accumulate noise from inline amplifiers but also suffer from other physical degradations, typically referred to as Physical Layer Impairments (PLIs) which deteriorate their Quality of Transmission (QoT). As a matter of fact, a lightpath needs to have acceptable QoT. Reducing the margins can yield significant cost savings. The reduction of margins makes the equipment to operate closer to their limits. The increased efficiency yields cost savings but requires a more dynamic network. Lightpaths operated close to their QoT limits are subject to *soft failures*: subject to equipment (e.g. transceivers, amplifiers, filters, bends of fiber, etc.) malfunctioning or ageing, increase of interference due to new connections or other operations that deteriorate the QoT such as performing a maintenance task. The key distinction of a soft failure as opposed to a hard failure is that the soft failure does not cause complete loss of the signal, and therefore correcting the soft failure is not urgent; the lightpath can live for a short time with deteriorated QoT. To give an example of a soft-failure, it has often been observed that after fixing a failure the performance of the system is significantly different. A fiber repair could result in unpredictable situations, such as higher insertion loss, worse back-reflections, longer path, or a mix of different fiber types, when e.g. the one used in the network is not commercially available anymore (e.g. dispersion shifted fiber G.653). Increased span loss or back-reflections are particularly harmful in Raman amplified spans, because they affect the Raman gain and degrade the achieved OSNR. Soft failures are generally difficult to locate and the task usually relies on the analysis of alarms reported by certain devices. However not all soft failures generate alarms and certain failures may exist before the alarm goes off. While hard failure localization has received significant attention, not much research exists for soft failures. We propose a scheme that relies on OPM information of lightpaths and uses space and time correlation techniques to improve the monitoring accuracy, reducing thus the uncertainty of the reported measurements. Increased monitoring accuracy helps in more accurate QoT estimation, which in turn enables the network operator to reduce the margins, make more optimized decisions and reduce the total provisioning costs. Certain routing algorithms can take into account the QoT inaccuracies, but even such algorithms can benefit from more accurate QoT metrics. What is more, the proposed correlation scheme which harvests the space dimension can be used to infer certain QoT parameters per link. This, in turn, can be used to localize soft failures to a link level. The localization of a QoT problem helps the network operator resolve the problem (if it can be resolved) or take relevant measures before the failure affects significantly the QoT of any lightpath or the operation of the network as a whole. It stands to reason that the better the QoT measurements accuracy, the smaller the soft failures we are able to localize. Our simulation results show the improvements in the monitoring accuracy that the proposed scheme achieves and also showcase how this can be used to localize at a link level two noise related soft failures.

Then we developed an algorithmic toolkit to adapt the parameters of the connections to always ensure acceptable QoT and efficient operation. Optical Networks are designed to be operated statically: lightpaths are provisioned for uninterrupted operation for several years using high margins to anticipate the deterioration of their Quality of Transmission (QoT) from various factors (equipment aging, malfunctioning and maintenance operations). Operating the network dynamically and closer to its actual capabilities increases the efficiency and reduces capital expenditure (CAPEX). Elastic Optical Networks (EONs) offer several optimization dimensions, such as

spectrum, modulation format and symbol (baud) rate adaptation. Depending on the transceivers used, these parameters can be configured independently per lightpath in order to maximize the utilization of the network's equipment and the overall efficiency. As a result, EONs promise significant benefits such as higher spectral efficiency, increased capacity and reduced network costs. The degrees of freedom that the aforementioned parameters offer, when combined also with the routing (space dimension) options available, are vast. The effective definition of each of these parameters is not straightforward. For example, a given net bit rate can be achieved using a high-order modulation format and low baud rate or a lower-order modulation format and higher baud rate. The determination of the transmission parameters depends among others on several effects appearing during the propagation of light in the fiber, such as noise, interference, nonlinear effects, equipment aging, and failures. The adaptation of the network's parameters can be used to regulate the QoT of the lightpaths but requires careful examination. More specifically, the adaptation of the modulation format (or the Forward Correction Code (FEC)) is not straightforward because of bandwidth constraints. Indeed, if the modulation format is changed to a more robust one (e.g., from PM-16QAM to PM-QPSK), the bit rate is reduced. Therefore, a new sub-carrier or a new lightpath should be established to keep the initial bit rate assuming constant baud rate. Similarly, in case of an adaptation of a low data overhead FEC to a high one, the baud rate should be increased if the net bit rate is to be retained. Thus, generally, the adaptation of the parameters to more robust ones requires extra bandwidth to maintain a given net bit rate.

In this study we present a novel algorithmic toolkit designed to enable the efficient operation of Elastic Optical Networks (EONs). The toolkit exploits the configuration capabilities of elastic transponders (also referred to as Bandwidth Variable Transponders–BVTs) and feedback information from the physical layer. It can be used to decide on appropriate reconfiguration actions aiming to regulate the QoT margins, keep them low but always acceptable, and achieve overall high efficiency. In particular, the toolkit considers the combination of three re-configuration techniques to regulate the QoT of a lightpath: (i) modifying its Forward Error Correction (FEC) overhead, (ii) adjusting the spectrum guard-band to control the interference from neighboring lightpaths, and (iii) adapting its modulation format. Depending on the capabilities of the transponder and the related class of service and Service Layer Agreements (SLAs), these adaptations can be combined with the modification of the baud-rate of the respective lightpath. Thus, these techniques result in a set of network adaptation actions that can involve spectrum re-configuration of one or more lightpaths. Since the available optimization combinations in an EON are vast, the toolkit searches the possible solutions using various criteria such as the control plane overhead (i.e. the actions that have to be performed and the number of lightpaths that are adapted) or the required additional spectrum. It can also leverage a QoT estimation model in order to estimate whether an adaptation action will result in an acceptable QoT. Alternatively, we can gradually apply the changes, monitor their effect and adjust the configurations accordingly until we reach the targeted margins levels.

We examined the application of our proposal in the recovery from soft failures. We define a soft-failure as a QoT degradation, as opposed to a hard failure that causes total loss of the signal e.g. due to a fiber cut or a complete breakdown of some equipment. The current practice is to use high margins that can absorb soft failures up to a certain amount. When these margins are exceeded, operators rely on protection/ restoration mechanisms. A network operated with low margins, as the one proposed in this study, has lightpaths whose QoT is close to the acceptable threshold; it achieves high efficiency and requires less equipment, but is susceptible to soft failures. Our toolkit can be used to adapt the transmission parameters of the problematic lightpaths in order to restore their QoT to acceptable levels. If the failure is repaired and the QoT is improved, then we can again use the toolkit to harvest the excessive margins and restore the previous or another appropriate configuration. In this way we always keep the utilization of the resources and the efficiency of the

network high.

We evaluate the benefits of our proposal by simulating various soft-failures scenarios and comparing them to the traditional practice of planning with high margins. Our results indicate that significant savings can be achieved, while always guaranteeing acceptable QoT. We performed simulation experiments where we modelled two soft-failures scenarios. For sudden soft failures we observed that we can save at least 22% and at most 40% in regenerators when compared to planning with high margins. We also observed significant postponement in the deployment of regenerators in a 10 year operating period of the network.

Finally we developed an optimal Integer Linear Programming algorithm to enable spectrum sharing between neighboring connections. Elastic Optical Networks (EONs) offer several optimization dimensions that can be harvested to increase the network's efficiency and survivability. In this section we propose spectrum sharing between lightpaths of different rate guaranteed classes to recover the QoT in case of a soft failure. We assume that the optical network supports traffic that is carried by different classes of connections. These classes are defined with respect to the guarantees provided for the rate and also the recovery time, and can thus be also viewed as different "survivability" classes. In particular we focus on the case of two generic survivability classes: the *rate-guaranteed* and the rate-nonguaranteed or *minimum-rate-guaranteed class*. The QoT (thus BER) of both classes is ensured and in case of a soft-failure it is recovered so that it is above a specific threshold. However, the rate of only the first survivability class is always fully guaranteed. For the second survivability class only a minimum rate is guaranteed, and we can have several subclasses distinguished by the different minimum values. Note that the above classification is made on the basis of rate maintenance. It is complementary to the typical classification that is made with respect to the restoration time. During the normal operation of the network, all the lightpaths transmit at their full requested bit rate, usually using the most spectral efficient modulation format. In the case of a soft failure, the rate of a rate-nonguaranteed priority connection is not necessary to be maintained. Thus, part of its spectrum can be redistributed and used to maintain the rate of a rate-guaranteed connection. In this way the modulation format of the rate-guaranteed connections can be adapted to a more robust one in order to increase the QoT. At the same time the baud rate can be increased or a new lightpath or sub-carrier can be established to maintain the original net rate. After the reparation of the failure (if it is repairable), the network can return to the original transmission configurations.

The idea of spectrum sharing can effectively reduce the required network costs to satisfy the rate-guaranteed connections. The common approach would be to preserve the rate of high priority rate-guaranteed connections by using additional spectrum. We propose an Integer Linear Programming (ILP) Routing and Spectrum Assignment (RSA) algorithm for the planning phase that optimize the spectrum sharing among lightpaths of different classes. With the proposed method we harvest the spectrum of lower priority rate-nonguaranteed connections and reduce the total spectrum used. Spectrum savings result in cost savings in terms of the expenditures for elastic network equipment. The objective function of the optimization algorithm can control the degree to which the spectrum assigned to rate-nonguaranteed connections is redistributed to the rate-guaranteed connections. More specifically, a weight parameter W can regulate the emphasis (relative importance) the ILP algorithm gives on the total spectrum utilization and on the spectrum dropped by the rate-nonguaranteed connections experiencing the soft failure. In a sense, the parameter W controls the spectrum and thus the cost savings that can be achieved. For small values of W , rate-guaranteed connections take full advantage of the spectrum of the rate-nonguaranteed connections, decreasing the network costs. For large values of W , the rate-guaranteed connections require additional free resources to maintain their rate, thereby increasing the costs. We observed that using spectrum sharing (redistribution) we can

obtain spectrum savings of up to 20%.

In conclusion in this PhD thesis we developed routing and optimization algorithms for Elastic optical networks. These algorithms estimate the QoT of the connections and make dynamic reconfiguration decisions to adapt the network to current conditions and ensure high efficiency. Future work includes the application of the algorithms in the context of metro optical networks, and in conjunction with the integration of 5G.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η κίνηση δεδομένων στο διαδίκτυο αυξάνεται συνεχώς και η ετήσια παγκόσμια κίνηση δεδομένων στο διαδίκτυο προβλέπεται να συνεχίσει να αυξάνεται τα επόμενα χρόνια [1] ως αποτέλεσμα της εμφάνισης νέων εφαρμογών όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και το υπολογιστικό «νέφος». Οι εφαρμογές αυτές θέτουν μεγάλες απαιτήσεις στην χωρητικότητα για την μεταφορά δεδομένων στα δίκτυα κορμού, που μόνο τα οπτικά δίκτυα μπορούν να ικανοποιήσουν. Επιπλέον, πολλές από αυτές τις εφαρμογές έχουν «εκρηκτική» συμπεριφορά, δηλαδή σε κάποιες χρονικές περιόδους οι απαιτήσεις δικτυακής χωρητικότητας είναι πολύ μικρές και σε κάποιες άλλες αυξάνονται απότομα, ενισχύοντας την ανάγκη ελαστικής και ευέλικτης λειτουργίας των οπτικών δικτύων. Ένα παράδειγμα είναι η απευθείας μετάδοση ενός σημαντικού αθλητικού γεγονότος.

Για να καλυφθούν αυτές οι ανάγκες έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές ερευνητικές και τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των οπτικών δικτύων, όπως για παράδειγμα η χρήση προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης και ψηφιακής ισοστάθμισης [2][3]. Επιπλέον, με την εμφάνιση των ευέλικτων οπτικών δικτύων [4][5] είναι πλέον δυνατή η αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος και η προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης ανάλογα με τις υπάρχουσες ανάγκες. Ωστόσο οι πραγματικές δυνατότητες των οπτικών δικτύων δεν μπορούν να αξιοποιηθούν πλήρως, όσο το επίπεδο ελέγχου των δικτυακών λειτουργιών δεν έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει δυναμικά και με αποδοτικό τρόπο τις παραμέτρους του δικτύου ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτό.

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι να αναπτυχθούν αλγόριθμοι δρομολόγησης και βελτιστοποίησης για οπτικά δίκτυα που: α) θα εκτιμούν την ποιότητα μετάδοσης μιας υποψήφιας νέας σύνδεσης ή εγκαταστημένων συνδέσεων, β) θα εντοπίζουν τυχόν σφάλματα εξοπλισμού βάση αυτών των εκτιμήσεων, γ) θα υπολογίζουν την επίδραση των διαθέσιμων ενεργειών βελτιστοποίησης (όπως προσαρμογή του φάσματος ανά σύνδεση και άλλες ενέργειες όπως θα δούμε στη συνέχεια), δ) θα λαμβάνουν αποφάσεις και θα εκτελούν τις ενέργειες βελτιστοποίησης ώστε το δίκτυο να λειτουργεί σε υψηλή αποδοτικότητα.

Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό πλαίσιο και Μοντελοποίηση Δικτύου

Θεωρητικό πλαίσιο

Η επικοινωνία μέσω οπτικών ινών βασίζεται στην μετάδοση διαμορφωμένων παλμών φωτός. Οι οπτικές ίνες παρέχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τα καλώδια χαλκού, με παράλληλα χαμηλότερες απώλειες και παρεμβολές. Για αυτούς τους λόγους τα οπτικά δίκτυα έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη, και είναι μονόδρομος για οποιαδήποτε εφαρμογή χρειάζεται μεγάλο εύρος ζώνης και μικρές καθυστερήσεις.

Σε μία οπτική ίνα είναι δυνατόν να πολυπλεχθούν ένα σύνολο από διαφορετικά σήματα χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος για το κάθε σήμα (Πολυπλεξία Μήκους Κύματος, Wavelength Division Multiplexing [6], WDM). Τα WDM οπτικά δίκτυα προσφέρουν υψηλή χωρητικότητα, αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων και εύκολη επέκταση. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων σε εύρος φάσματος οδήγησε σε σημαντικές εξελίξεις στα WDM δίκτυα όπως εξελιγμένα σχήματα διαμόρφωσης και ψηφιακή ισοστάθμιση. Παρόλα αυτά, τα WDM δίκτυα έχουν ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα, αυτό της «άκαμπτης» ανάθεσης φάσματος: σε κάθε σύνδεση ανατίθεται ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων πλάτους συνήθως 50GHz το οποίο είναι σταθερό ανεξάρτητα από τις πραγματικές ανάγκες και οδηγεί σε μη αποδοτική κατανομή πόρων του δικτύου. Για το λόγο αυτό εξελίχθηκε [7] η τεχνολογία των ευέλικτων οπτικών δικτύων - elastic optical networks (EONs), όπου το συνολικό διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε «σχισμές» των 6.5 ή 12.5 GHz και οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν δυναμικά ώστε να δημιουργήσουν συνδέσεις με το απαιτούμενο εύρος φάσματος.

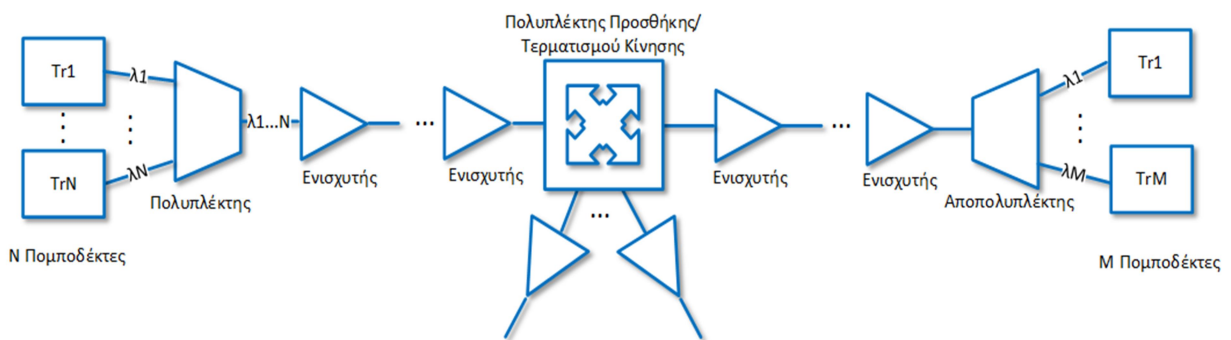
Τα βασικά στοιχεία ενός οπτικού δικτύου είναι τα παρακάτω:

- Πομποδέκτης (Transponder): Από την μεριά του πομπού, ο transponder δέχεται ως είσοδο ένα ηλεκτρικό σήμα από τον πελάτη του οπτικού δικτύου (π.χ. έναν IP δρομολογητή). Το σήμα αυτό μετατρέπεται σε οπτικό συνήθως με τη χρήση ενός ρυθμιζόμενου (ανά μήκος κύματος) laser. Προτού το εκάστοτε οπτικό σήμα μεταδοθεί στην οπτική ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας πολυπλέκτης προκειμένου να πολυπλέξει όλα τα σήματα με διαφορετικά μήκη κύματος από διαφορετικούς transponders σε ένα ενιαίο σήμα. Στη μεριά του δέκτη ακολουθεί η αντίστροφη διαδικασία για την μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό.
- Ενισχυτής (Amplifier): Η δουλειά ενός οπτικού ενισχυτή είναι να ενισχύσει το οπτικό σήμα (συνήθως όλων των μηκών κύματος ταυτόχρονα) χωρίς να το μετατρέψει σε ηλεκτρικό. Ένας ενισχυτής χρησιμοποιείται καταρχάς στο αρχικό στάδιο της μετάδοσης του οπτικού σήματος (ακριβώς μετά τον πολυπλέκτη ή transponder). Μετά ανάλογα με την διανυθείσα απόσταση και την εξάσθениση του σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν ενισχυτές ανά συγκεκριμένα διαστήματα της οπτικής ίνας (spans), προκειμένου να αντισταθμίσουν την εξασθένηση. Ο πιο κοινός τύπος ενισχυτή είναι ο EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) ο οποίος αποτελείται από οπτική ίνα εμποτισμένη με έρβιο και μπορεί να ενισχύσει σήμα μεταξύ περίπου 1530nm και 1560nm.
- Επιλεκτικός Μεταγωγέας Μήκους Κύματος (Wavelength Selective Switch – WSS): Ένα WSS είναι ένας εξελιγμένος πολυπλέκτης-αποπολυπλέκτης. Όταν λειτουργεί ως αποπολυπλέκτης δέχεται ως είσοδο ένα σύνθετο σήμα που αποτελείται από πολλές συχνοτήτες και μπορεί να επιλέξει ποια συγκεκριμένα μήκη κύματος θα κατευθυνθούν προς την εκάστοτε (N-ιστή) έξοδό του. Όταν λειτουργεί ως πολυπλέκτης, μπορεί να συνδυάσει σήματα που δέχεται από τις N-ιστές εισόδους του, προς τη μία έξοδό του. Το

WSS είναι ένα βασικό και το πιο συνηθισμένο πλέον δομικό στοιχείο των (ρυθμιζόμενων) οπτικών πολυπλεκτών προσθήκης/τερματισμού κίνησης – (Reconfigurable) Optical Add-Drop Multiplexers (R-OADMs) και των οπτικών μεταγωγών Optical Cross Connects (OXC).

- (R)OADM-OXC: Κατά τη μετάδοση ενός πολυπλεγμένου οπτικού σήματος σε ένα δίκτυο που αποτελείται από πολλούς κόμβους, υπάρχει η ανάγκη για την δρομολόγηση συγκεκριμένων μηκών κύματος προς ανεξάρτητες κατευθύνσεις ανάλογα με τον τελικό προορισμό κάθε μήκους κύματος. Αυτή τη λειτουργία επιτελούν οι συσκευές (R)OADM-OXC. Ένα (R)OADM είναι ένας (ρυθμιζόμενος) πολυπλέκτης προσθήκης/τερματισμού κίνησης που επιτελεί την λειτουργία που προαναφέραμε. Ο χαρακτηρισμός «ρυθμιζόμενος» αναφέρεται στη δυνατότητα να μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί η κατεύθυνση που θα ακολουθήσει ένα μήκος κύματος. Τα (R)OADMs μπορούν να διαχειριστούν σχετικά μικρό αριθμό από μήκη κύματος και να χρησιμοποιηθούν σε απλές τοπολογίες δικτύου. Για πιο περίπλοκες τοπολογίες και μεγάλο αριθμό μηκών κύματος χρησιμοποιούνται τα OXCs.

Μία τυπική αρχιτεκτονική δικτύου που περιλαμβάνει τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζεται στην Εικόνα 1:



Εικόνα 1 Μία αρχιτεκτονική ενός σύγχρονου οπτικού δικτύου

Οι πομποδέκτες που χρησιμοποιούνται στα ευέλικτα δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν διάφορες παραμέτρους της σύνδεσης, όπως ο ρυθμός συμβόλου, το σχήμα διαμόρφωσης και οι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων [8]. Ο αποτελεσματικός καθορισμός όλων αυτών των παραμέτρων για κάθε σύνδεση δεν είναι προφανής, και περιπλέκεται από διάφορα φαινόμενα [9] κατά τη διάδοση του φωτός στις οπτικές ίνες, όπως ο θόρυβος, η διασπορά, οι παρεμβολές από γειτονικά κανάλια και τα μη γραμμικά φαινόμενα καθένα από τα οποία επηρεάζει την ποιότητα της μετάδοσης (Quality of Transmission - QoT) του σήματος. Πιο συγκεκριμένα, η ποιότητα της μετάδοσης εξαρτάται [9] από τις παραμέτρους του πομπού, από την απόσταση μετάδοσης, άρα και από το μονοπάτι που θα επιλέγει από τον αλγόριθμο δρομολόγησης, από την απόσταση σε GHz από τα υπόλοιπα κανάλια και από τις παραμέτρους μετάδοσης των υπολοίπων (κυρίως των διπλανών) μονοπατιών. Επιπλέον, αυτές οι παράμετροι μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του χρόνου λόγω της εγκαθίδρυσης νέων συνδέσεων και της γήρανσης του εξοπλισμού, καθώς και της μεταβλητότητας των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα παίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στο μέλλον και θα καταστήσουν απαραίτητο τον δυναμικό έλεγχο και την αυτοματοποιημένη προσαρμογή-βελτιστοποίηση των παραμέτρων του δικτύου [10][11][12] έτσι ώστε οι αλλαγές στις συνθήκες του δικτύου να μπορούν να αντιμετωπιστούν χωρίς τη χειροκίνητη παρέμβαση του διαχειριστή του δικτύου όπως γίνεται σήμερα.

Ο αυτόματος και κεντρικοποιημένος έλεγχος του δικτύου μπορεί να οδηγήσει στη αποδοτική διαχείριση του συνόλου των πόρων του δικτύου και να επιτρέψει την λειτουργία των συνδέσεων με την απαιτούμενη ποιότητα μετάδοσης. Η τελευταία θα παρακολουθείται καθόλη τη διάρκεια ζωής της εκάστοτε σύνδεσης ώστε αν χρειάζεται να λαμβάνονται διορθωτικές αποφάσεις, όπως για παράδειγμα αύξηση του φάσματος για την απομάκρυνση γειτονικών καναλιών που προκαλούν παρεμβολές, αλλαγή του σχήματος διαμόρφωσης σε κάποιο που προσφέρει χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων, αύξηση του ποσοστού περίσσειας πληροφορίας των κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων και προσαρμογή του ρυθμού συμβόλου. Για να γίνει εφικτός όμως ο αυτόματος και δυναμικός έλεγχος του δικτύου θα πρέπει να αναπτυχθούν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης και βελτιστοποίησης που προτείνονται σε αυτήν την διδακτορική διατριβή.

Μοντέλο δικτύου και φυσικού επιπέδου

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε το μοντέλο του δικτύου που θα θεωρήσουμε σε όλο το υπόλοιπο κείμενο, καθώς επίσης και το μοντέλο φυσικού επιπέδου μέσω του οποίου θα προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά του φυσικού επιπέδου και θα εκτελέσουμε και τις προσομοιώσεις για τα αποτελέσματα.

Μοντέλο Δικτύου

Θεωρούμε ένα εθνικό ή ηπειρωτικό οπτικό δίκτυο μετάδοσης το οποίο χρησιμοποιεί είτε σταθερό (WDM) είτε ευέλικτο φάσμα or flex (elastic) -grid [4]. Οι κόμβοι θεωρούμε ότι είναι εξοπλισμένοι με ROADMs έτσι ώστε η κίνηση να μπορεί να μεταφερθεί προς την επιθυμητή κατεύθυνση ενόσω το σήμα παραμένει στο οπτικό επίπεδο. Οι κόμβοι συνδέονται με οπτικούς συνδέσμους που δεν αντισταθμίζουν την διασπορά (dispersion uncompensated), ο καθένας από τους οποίους αποτελείται από έναν αριθμό από διαστήματα (spans) ινών που τερματίζουν σε έναν ενισχυτή. Ο τελευταίος αντισταθμίζει ακριβώς τις απώλειες του span. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει δυνατότητα μετατροπής μήκους κύματος και έτσι το μήκος κύματος (ή το φάσμα στην περίπτωση ευέλικτου δικτύου) παραμένει σταθερό για ένα μονοπάτι που χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο αριθμό συνδέσμων. Τα μονοπάτια εγκαθίστανται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος ή φάσματος - Routing and Wavelength Assignment (RWA) algorithm, Routing and Spectrum Assignment (RSA) για WDM και elastic δίκτυα αντίστοιχα. Αν το QoT ενός μονοπατιού είναι μη αποδεκτό τότε ο αλγόριθμος αποφασίζει να τοποθετήσει αναγεννητές σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και το κομμάτι του μονοπατιού μετά τον αναγεννητή θεωρείται ξεχωριστό μονοπάτι το οποίο μπορεί να έχει διαφορετικό μήκος κύματος ή φάσμα.

Θεωρούμε ότι το δίκτυο είναι εξοπλισμένο με οπτικές συσκευές παρακολούθησης απόδοσης - optical performance monitors (OPMs): ένας συγκεκριμένος αριθμός (ή όλοι) οι δέκτες του δικτύου χρησιμοποιούνται ως OPMs. Οι σημερινοί σύμφωνοι δέκτες έχουν δυνατότητες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος - digital signal processing (DSP) και μπορούν να επεκταθούν σχεδόν χωρίς κόστος για να λειτουργήσουν ως OPMs [13]. Ο DSP στους δέκτες εκτελεί ψηφιακή αντιστάθμιση της διασποράς και ισοστάθμιση. Πιο συγκεκριμένα υποθέτουμε ότι ένας δέκτης μπορεί να παρέχει πληροφορία για το λόγο σήματος προς θόρυβο - Signal to Noise Ratio (SNR) του μονοπατιού και ότι από το SNR μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό σφαλμάτων πριν εφαρμοστούν οι κωδικές διόρθωσης σφαλμάτων (pre-Forward Error Correction Codes Bit Error Rate - pre-FEC BER) αν ξέρουμε το σχήμα διαμόρφωσης. Το SNR υπολογίζεται ακόμη και από τους τωρινούς εμπορικούς πομποδέκτες και περιέχει όλες τις μετρικές παραμόρφωσης του σήματος: θόρυβος ενισχυτών - amplified spontaneous emission (ASE), μη γραμμικές παρεμβολές - Non linear interference (NLI), και υπολειπόμενη διασπορά - residual dispersion. Εναλλακτικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι ένα

OPM μπορεί να παρέχει πληροφορίες για μία σειρά από μετρικές παραμόρφωσης και ότι το SNR μπορεί να υπολογιστεί με βάση αυτές τις παραμέτρους.

Μοντέλο Φυσικού Επιπέδου

Χρησιμοποιούμε το GN model [14][15] για να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του φυσικού επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα, με το GN model λαμβάνουμε τις QoT μετρικές των εγκατεστημένων μονοπατιών. Αυτές οι μετρικές μπορεί να είναι το SNR ή και ο ρυθμός σφαλμάτων BER. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιήσουμε και άλλες μετρικές. Οι αλγόριθμοι που θα παρουσιάσουμε στις επόμενες ενότητες δεν εξαρτώνται από το GN ή από οποιοδήποτε άλλο μοντέλο. Η χρησιμότητά του GN είναι να συμπληρώσει ή να αντικαταστήσει ένα τέτοιο μοντέλο κατά την εισαγωγή ενός νέου μονοπατιού στο δίκτυο. Οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τις υποθέσεις ότι συγκεκριμένες παράμετροι όπως το αντίστροφο του SNR είναι αθροιστικές ανά σύνδεσμο. Οι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να επαληθευτούν και από άλλα μοντέλα φυσικού επιπέδου όπως το VPI [16] με μικρές αλλαγές. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν αληθινά δεδομένα από συσκευές παρακολούθησης πράγμα όμως που χρειάζεται την ανάπτυξη ενός πραγματικού δικτύου και είναι θέμα μελλοντικής εργασίας. Η χρήση του GN model μας επιτρέπει να προσομοιάσουμε γρήγορα διαφορετικά σενάρια δικτύων και κίνησης και να συγκρίνουμε αποτελέσματα χρησιμοποιώντας διάφορες υποθέσεις. Επίσης μας επιτρέπει να αποφύγουμε την υπόθεση χειρότερης περίπτωσης μη γραμμικών παρεμβολών κατά την οποία όλα τα κανάλια είναι ταυτόχρονα αναμμένα.

Η μετάδοση δεδομένων σε μεγάλη απόσταση μέσω οπτικών σημάτων περιορίζεται από δύο κυρίως παράγοντες: τον ASE θόρυβο, και τα μη γραμμικά φαινόμενα NLI [9]. Η συσσώρευση του ASE θορύβου είναι γενικά αρκετά καλά τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία και υπάρχει γενικά αποδεκτός τρόπος υπολογισμού της. Για τα φαινόμενα NLI έχουν προταθεί πολλά διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού ανάλογα με το αν υποθέτουν ότι υπάρχει αντιστάθμιση της διασποράς κατά τη διάδοση του οπτικού σήματος ή όχι. Το GN model θεωρεί ότι δεν γίνεται αντιστάθμιση της διασποράς κατά τη διάδοση και ότι ο DSP στον δέκτη είναι υπεύθυνος για την αντιστάθμισή της. Λόγω των υψηλών τιμών της συσσωρευμένης διασποράς, η κατανομή των σημάτων ενός WDM καναλιού μοιάζει με ανεξάρτητη και ομοιόμορφη Gaussian κατανομή με μηδενική μέση τιμή. Αυτό φαίνεται να ισχύει και για τις κατανομές των σημείων του αστερισμού στο λαμβανόμενο σήμα μετά τον DSP ακόμα και αν δεν υπάρχει θόρυβος ASE. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση του NLI θορύβου μπορεί να προσεγγιστεί ως αθροιστικός Gaussian θόρυβος, πράγμα που θεωρεί το GN model, εξού και το όνομά του (Gaussian Noise model). Σύμφωνα με το GN model ο NLI θόρυβος αποτελείται από τρεις συνιστώσες: SCI (Self Channel Interference), XCI (Cross Channel Interference) και MCI (Multi Channel Interference). Το SCI αποτελείται από τον θόρυβο που προκαλείται από την επίδραση του ίδιου του καναλιού στον εαυτό του. Το XCI αποτελείται από το άθροισμα των θορύβων που προκαλούνται από ένα εκάστοτε γειτονικό κανάλι. Το MCI αποτελείται από το άθροισμα των θορύβων που προκαλούνται από τον συνδυασμό τουλάχιστον δύο εκάστοτε γειτονικών καναλιών. Σύμφωνα με την [14] το MCI είναι σχεδόν πάντα αμελητέο, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται ίνες single-mode optical fiber (SMF) ή pure silica core fiber (PSCF). Για αυτό το λόγο σε αυτή την διατριβή δεν λαμβάνουμε καθόλου υπόψη το MCI. Οι παραπάνω NLI εξασθενήσεις καθώς και ο ASE θόρυβος χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το SNR και μετά το pre-FEC BER κάθε σύνδεσης.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε τις αναλυτικές προσεγγίσεις του GN model και του BER σύμφωνα με την [15]. Χρησιμοποιούμε την Εξ. 120 της [15] μαζί με τις Εξ. 125-126 (αν τα spans είναι όμοια) για να υπολογίσουμε την πυκνότητα φασματικής ισχύος - power spectral density (PSD) του NLI θορύβου:

$$G_{\bar{E}_{NLI}}(f_{ch,i}) \approx \frac{16}{27} \gamma^2 L_{eff}^2 \sum_{n=1}^{N_{ch}} G_{ch,n} G_{ch,n} G_{ch,i} (2 - \delta_{ni}) \psi_{n,i}$$

$$\psi_{i,i} \approx N_s^{1+\varepsilon} \frac{a \sinh\left(\frac{\pi^2}{2} |\beta_2| [2a]^{-1} B_{ch,i}^2\right)}{2\pi |\beta_2| [2a]^{-1}}, \quad \varepsilon \approx \frac{3}{10} \log_e \left(1 + \frac{6}{L_s} \frac{(2a)^{-1}}{a \sinh\left(\frac{1}{2} \pi^2 |\beta_2| (2a)^{-1} B_{ch,i}^2\right)} \right)$$

ή τις Εξ. 127-129 της [15] (αν τα spans δεν είναι όμοια)

$$G_{\bar{E}_{NLI}}(f_{ch,i}) \approx \frac{16}{27} \sum_{n_s=1}^{N_s} \gamma^2 L_{eff,n_s}^2 \cdot \prod_{n_s=1}^{n_s-1} g_{n_s}^3 e^{-6an_s L_{s,n_s}} \prod_{n_s=n_s}^{N_s} g_{n_s} e^{-2an_s L_{s,n_s}} \cdot \psi_{i,i,n_s} \approx \frac{a \sinh\left(\frac{\pi^2}{2} |\beta_{2,n_s}| [2a_{n_s}]^{-1} B_{ch,i}^2\right)}{2\pi |\beta_{2,n_s}| [2a_{n_s}]^{-1}} \sum_{n=1}^{N_{ch}} G_{ch,n} G_{ch,n} G_{ch,i} (2 - \delta_{ni}) \psi_{n,i,n_s}$$

Η PSD του ASE θορύβου υπολογίζεται από την Εξ. 8 της [15]:

$$G_{ASE} = 2n_{sp} (G - 1) h f_{CUT}$$

Τότε το SNR δίνεται από την Εξ.11 της [15]

$$SNR = \frac{\bar{A}^2}{\sigma_{ASE}^2 + \sigma_{NLI}^2}$$

Που είναι ισοδύναμο με

$$SNR = \frac{P_{R_x}}{(G_{ASE} + G_{NLI}) R_s}$$

Τέλος, το BER υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την κατάλληλη εξίσωση για το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης. Για παράδειγμα στην περίπτωση του PM-QPSK, χρησιμοποιείται η Εξ. 6 της [14]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{SNR/2}\right)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούμε τα παρακάτω σύμβολα:

f: συχνότητα

a : οπτική εξασθένηση της ίνας

γ : συντελεστής μη γραμμικότητας της ίνας

β₂ : δεύτερης τάξης συντελεστής διασποράς της ίνας

$\delta_{ni}=1$ αν $n=i$ και $\delta_{ni}=0$ διαφορετικά

R_s : ρυθμός συμβόλου του ανεξάρτητου καναλιού

\bar{A}^2 : μέση τιμή του τετραγωνικού πλάτους του σήματος

P_{Rx} : μέση τιμή της ισχύος του σήματος

G_{ASE} : φασματική πυκνότητα ισχύος power spectral density (PSD) του διπλά πολωμένου ASE θορύβου

G_{NLI} : PSD του NLI θορύβου

G_{ENLI} : μέση PSD του NLI θορύβου

G_{ch} : επίπεδη μέγιστη τιμή του PSD του καναλιού

g_{ch} : κανονικοποιημένη PSD του καναλιού

G : το κέρδος του ενισχυτή

B_{ch} : οπτικό εύρος ζώνης των καναλιών

$f_{ch,n}$: κεντρική συχνότητα ενός καναλιού

n_{sp} : συντελεστής βελτίωσης θορύβου

h : σταθερά του Planck

CUT : κανάλι υπό δοκιμή (channel under test)

erfc: συνάρτηση σφάλματος

L_s : φυσικό μήκος του span

$$L_{eff} = L_{eff} = \frac{1 - e^{(-2 * a * L_s)}}{2 * a}$$

Το GN model λαμβάνει υπόψιν τη χρήση φάσματος (ή συγκεκριμένου μήκους κύματος) κάθε συνδέσμου και έτσι οι μη γραμμικές εξασθενήσεις που εκτιμά με τις παραπάνω εξισώσεις είναι κοντά στις πραγματικές τιμές. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η υπόθεση της χειρότερης περίπτωσης ότι όλα τα κανάλια είναι αναμμένα ταυτόχρονα (και άρα τα NLIs είναι αυξημένα). Σημειώνουμε ότι όλες οι εξασθενήσεις θεωρούνται αθροιστικές ανά σύνδεσμο εκτός από το SNR που είναι αθροιστικό το αντίστροφό του.

Επίσης, το GN model απαιτεί σε όλα τα spans να είναι αναμμένα τα ίδια μονοπάτια. Όμως σε ένα πραγματικό δίκτυο τα μονοπάτια μπορεί να ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές και να μην περνάνε όλα από τους ίδιους συνδέσμους. Έτσι το GN model που χρησιμοποιούμε υπολογίζει όλες τις εξασθενήσεις (ASE, SCI, XCI, O/SNR) για όλα τα μονοπάτια ανά σύνδεσμο, και μετά για κάθε μονοπάτι προσθέτει τις αντίστοιχες τιμές ανάλογα με τους συνδέσμους που χρησιμοποιεί. Πιο συγκεκριμένα, το GN model δέχεται ως εισόδους:

- Τις παραμέτρους του δικτύου: Τον αριθμό των spans ανά σύνδεσμο. Για κάθε span: το μήκος του, τον τύπο της ίνας (SMF, NZDSF, PSCF), τον συντελεστή εξασθένησης, τον συντελεστή διασποράς, τον μη γραμμικό συντελεστή και το συντελεστή θορύβου του ενισχυτή erbium doped fiber amplifier (EDFA) του span.

- Τα εγκατεστημένα μονοπάτια του δικτύου. Για κάθε μονοπάτι: το ρυθμό συμβόλου, την ισχύ μετάδοσης, το σχήμα διαμόρφωσης, την κεντρική συχνότητα, τον αριθμό των σχισμών που χρησιμοποιεί.

Η έξοδος είναι οι τιμές BER, SNR, ASE, SCI, XCI για όλα τα μονοπάτια.

Κεφάλαιο 2 Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης

Σύνοψη

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε ένα πλαίσιο για την εκτίμηση της Ποιότητας Μετάδοσης (QoT) ενός νέου μονοπατιού πριν από την εγκατάστασή του, καθώς και για τον υπολογισμό της αναμενόμενης υποβάθμισης που το καινούριο μονοπάτι θα προκαλέσει στα ήδη υπάρχοντα. Το πλαίσιο συσχετίζει τις μετρήσεις QoT των ήδη εγκατεστημένων μονοπατιών, οι οποίες είναι άμεσα διαθέσιμες από σύμφωνους οπτικούς δέκτες που μπορούν να επεκταθούν για να χρησιμοποιηθούν ως οπτικές συσκευές παρακολούθησης απόδοσης (OPM). Οι προηγούμενες παρόμοιες μελέτες χρησιμοποίησαν μόνο πληροφορίες χώρου (δρομολόγησης) και έτσι παραμελούσαν το φάσμα, ενώ εστίασαν σε μη σύμφωνα δίκτυα παλαιάς γενιάς. Το προτεινόμενο πλαίσιο λαμβάνει υπόψιν συσχετίσεις τόσο στον τομέα του χώρου όσο και στον τομέα του φάσματος και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) όσο και στα ελαστικά οπτικά δίκτυα– Elastic Optical Networks (EONs). Βασίζεται σε ένα μετασχηματισμό γράφου που καταγράφει και μοντελοποιεί την παρεμβολή μεταξύ γειτονικών μονοπατιών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι εκτιμήσεις QoT είναι πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα απόδοσης, δηλαδή σε αυτά που προκύπτουν από την ακριβή γνώση του φυσικού επιπέδου. Το προτεινόμενο πλαίσιο εκτίμησης αποδεικνύεται ότι παρέχει μέχρι $4 \cdot 10^{-2}$ χαμηλότερο BER διόρθωσης σφάλματος προ της διόρθωσης (προ-FEC) σε σύγκριση με το σενάριο που υποθέτει παρεμβολές χειρότερης περίπτωσης το οποίο υπερεκτιμά το BER. Η υψηλότερη ακρίβεια μπορεί να αξιοποιηθεί όταν τα μονοπάτια εγκαθίστανται με χαμηλά περιθώρια. Τα αποτελέσματα μας έδειξαν έως 47% μείωση των απαιτούμενων αναγεννητών, μία σημαντική εξοικονόμηση στο κόστος εξοπλισμού.

Εισαγωγή

Η κίνηση στο Ίντερνετ αναπτύσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, με νέες εφαρμογές, όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας και cloud computing, που απαιτούν μεγάλη χωρητικότητα, την οποία παρέχουν μόνο τα οπτικά δίκτυα, και ευελιξία, την οποία υπόσχονται τα ελαστικά οπτικά δίκτυα. Στα οπτικά δίκτυα μεταφοράς τα οπτικά σήματα μπορούν να περνούν διαφανώς (χωρίς να υποβάλλονται σε οπτική-ηλεκτρο-οπτική μετατροπή) από ενδιάμεσους κόμβους και να διασχίζουν μεγάλους συνδέσμους. Οι συσσωρευμένες παραμορφώσεις του σήματος ενδέχεται να υποβαθμίσουν την ποιότητα της μετάδοσης (QoT) του σήματος σε μη αποδεκτό βαθμό, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση αναγεννητών σε ορισμένους ενδιάμεσους κόμβους.

Η ποιότητα μετάδοσης QoT ενός εγκατεστημένου μονοπατιού δεν παραμένει σταθερή, αλλά μειώνεται όσο περνά ο καιρός, λόγω της αυξημένης παρεμβολής από νέα μονοπάτια (η χρήση του δικτύου είναι μικρή στην αρχή της ζωής του και αυξάνεται καθώς δημιουργούνται περισσότερες συνδέσεις), από την γήρανση του εξοπλισμού και από εργασίες συντήρησης (π.χ. επισκευή κομμένης ίνας). Η παραδοσιακή πολιτική εγκαθίδρυσης μονοπατιών χρησιμοποιεί εργαλεία (Q-Tools) που υπολογίζουν την ποιότητα μετάδοσης χρησιμοποιώντας άφθονα περιθώρια. Τα περιθώρια χρησιμοποιούνται για να λαμβάνουν υπόψιν τους τυχόν ανακρίβειες στο μοντέλο τους και να αποφεύγουν μεταγενέστερες παρεμβάσεις κατά τη διάρκεια της διάρκειας ζωής του δικτύου. Τα υψηλά περιθώρια συχνά αναγκάζουν την εγκατάσταση αναγεννητών ή πιο ανθεκτικών αναμεταδοτών που δεν είναι απολύτως απαραίτητοι κατά την αρχική εγκατάσταση. Είναι σαφές ότι η εγκαθίδρυση μονοπατιών με χαμηλότερα περιθώρια και η τοποθέτηση του εξοπλισμού «πάνω στην ώρα» - «Just In Time» (JIT) θα ήταν επιθυμητή και επωφελής [17][18][19], αποφεύγοντας ή αναβάλλοντας την αγορά εξοπλισμού από τους διαχειριστές του δικτύου, μειώνοντας το συνολικό κόστος, καθώς το κόστος εξοπλισμού μειώνεται με το χρόνο και η εξοικονόμηση κεφαλαίου μεταφράζεται σε μειωμένα δάνεια ή τόκους.

Η μείωση των περιθωρίων αυξάνει την αποδοτικότητα του δικτύου, και έχει δώσει κίνητρο για άλλες έρευνες. Οι συγγραφείς των [20][21] μελέτησαν το σχεδιασμό ενός EON σε πολλαπλές περιόδους για να εκμεταλλευτούν την εξέλιξη των περιθωρίων στο χρόνο. Συγκεκριμένες παράμετροι των συνδέσεων (π.χ. ρυθμός μεταφοράς) προσαρμόζονται σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα (π.χ. 1-2 χρόνια) και προστίθεται νέος εξοπλισμός όταν χρειάζεται πραγματικά σύμφωνα με την τρέχουσα κίνηση και την κατάσταση του φυσικού επιπέδου του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, αντί να εγκαθίστανται τα μονοπάτια με υψηλά περιθώρια ώστε να έχουν αποδεκτό QoT μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής του δικτύου, το δίκτυο λειτουργεί με τη λογική της εγκατάστασης μονοπατιών και εξοπλισμού JIT. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αποδοτικότητα του δικτύου, η αγορά εξοπλισμού αποτρέπεται ή αναβάλλεται και τα κόστη του δικτύου μειώνονται.

Ένα EON μπορεί να λειτουργήσει ακόμα πιο δυναμικά, αφού είναι δυνατόν να προσαρμοστούν οι παράμετροί του σε ακόμα πιο μικρό χρονικό ορίζοντα. Πιο συγκεκριμένα, η [22] υποθέτει δυναμικό καθορισμό του φάσματος ώστε να προσαρμόσει το δίκτυο σε περιοδικές (π.χ. ημερήσιες) μεταβολές των απαιτήσεων κίνησης. Επίσης, ανάλογα με τις προβλέψεις για τη βραχυπρόθεσμη μελλοντική κίνηση είναι δυνατόν να επαναρυθμίσουμε τα μονοπάτια ώστε να εξυπηρετήσουν την αναμενόμενη κίνηση [23]. Η δυναμική λειτουργία του δικτύου μπορεί επίσης να βοηθήσει ώστε να αντιμετωπισθούν αποτελεσματικά βλάβες ή υποβαθμίσεις του QoT. Η [24] μελετά τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων των συνδέσεων ανάλογα με την κατάσταση του φυσικού επιπέδου. Επιπλέον η [25] μελετά ένα σενάριο δυναμικής επαναφοράς ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επαναφοράς σε περίπτωση βλάβης.

Ωστόσο, η μείωση των περιθωρίων που χρησιμοποιούνται για την εγκαθίδρυση μονοπατιών απαιτεί νέους μηχανισμούς δικτύωσης βασισμένους σε ανατροφοδότηση. Οι μηχανισμοί αυτοί μπορούν να βασίζονται στη χρήση OPM, για να παρατηρούν την κατάσταση του δικτύου και (i) να εκτιμούν με ακριβή τρόπο το QoT πριν την εγκατάσταση νέων μονοπατιών, και (ii) να προβλέπουν, εντοπίζουν και αντιμετωπίζουν προβλήματα QoT που θα μπορούσαν να εμφανιστούν αργότερα. Στο παρελθόν, τα OPMs ήταν ακριβά και ως αποτέλεσμα εγκαθίσταντο μόνο συσκευές παρακολούθησης ισχύος. Η εργασία [26] ανέπτυξε έναν αλγόριθμο για την τοποθέτηση των (ακριβών) monitors σε λίγες επιλεγμένες τοποθεσίες, ώστε να επιβλέπει το QoT των μονοπατιών κατά τη λειτουργία του δικτύου. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, οπτικοί σύμφωνοι πομποδέκτες έχουν αρχίσει να εγκαθίστανται σε δίκτυα κορμού και η γενική προσδοκία είναι ότι οδεύουμε προς ολικώς σύμφωνα οπτικά δίκτυα [27]. Αυτοί οι πομποδέκτες χρησιμοποιούν την ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP) στους δέκτες και έτσι είναι σε θέση να παρακολουθούν και να αντισταθμίζουν ορισμένες παραμόρφωσης του σήματος. Το έργο ORCHESTRA [13] προτείνει την επέκταση αυτών των σύμφωνων δεκτών για να λειτουργούν ως λογισμικά OPM και αναπτύσσει ένα κλιμακωτό και ευέλικτο επίπεδο ελέγχου για την υποστήριξη και χρήση τέτοιων δεδομένων, παρέχοντας τη λύση για τη μείωση των περιθωρίων καθώς και άλλα οφέλη στη δυναμική λειτουργία του δικτύου, όπως θα δούμε παρακάτω.

Με την εμφάνιση των ευέλικτων δικτύων και των ρυθμιζόμενων πομποδεκτών, τα οπτικά δίκτυα καθίστανται πιο δυναμικά, και αναφέρονται συνήθως ως ευέλικτα ή ελαστικά οπτικά δίκτυα (EON) [4]. Σε ένα τέτοιο δυναμικό περιβάλλον, οι δυνατότητες επαναρυθμίσεως θα επωφεληθούν από την ακριβή εκτίμηση του QoT. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ένα δίκτυο που προσαρμόζεται αυτόματα στις αλλαγές της κυκλοφορίας, η λήψη δυναμικών αποφάσεων για την αλλαγή του χρησιμοποιούμενου φάσματος ή και του σχήματος διαμόρφωσης των υφιστάμενων μονοπατιών για να αντιμετωπισθούν οι μεταβολές της κίνησης δεδομένων απαιτεί την εκτίμηση του QoT των τροποποιημένων μονοπατιών και των επιπτώσεων των αλλαγών αυτών στις άλλες εγκατεστημένες συνδέσεις. Ως εκ τούτου, η ακριβής εκτίμηση της ποιότητας του QoT που διερευνάται στην

παρούσα ενότητα είναι σύμφωνη με ένα δίκτυο που παρακολουθεί τις παραμέτρους του και χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες σε αποφάσεις δυναμικής βελτιστοποίησης, κλείνοντας τον κύκλο ελέγχου όπως οραματίζεται το ORCHESTRA [13]. Αυτός ο κύκλος ελέγχου της παρακολούθησης, της συσχέτισης και της αναπροσαρμογής του δικτύου είναι επίσης σε μεγάλο βαθμό σύμφωνος με τις τρέχουσες τάσεις όσον αφορά τη δικτύωση που καθορίζεται από το λογισμικό (Software Defined Networking, SDN).

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε ένα πλαίσιο το οποίο συσχετίζει την παρατηρούμενη πληροφορία από τα εγκατεστημένα μονοπάτια για να εκτιμήσει α) την ποιότητα μετάδοσης ενός νέου μονοπατιού πριν αυτό εγκατασταθεί και β) την υποβάθμιση που το νέο μονοπάτι θα προκαλέσει στα ήδη υπάρχοντα. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση μονοπατιών με μειωμένα περιθώρια και για να γίνει εφικτή η εκτέλεση αποδοτικών και δυναμικών ενεργειών αναπροσαρμογής του δικτύου, που και τα δύο αυξάνουν την απόδοση του δικτύου. Τα δίκτυα που μελετάμε είναι WDM ή EON με σύμφωνη μετάδοση. Υποθέτουμε ότι οι σύμφωνοι δέκτες παρέχουν πληροφορία για το λόγο σήματος προς θόρυβο - Signal to Noise Ratio (SNR), το οποίο λαμβάνει υπόψη του όλες τις παραμορφώσεις του οπτικού επιπέδου και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού σφαλμάτων - Bit Error Ratio (BER), το οποίο είναι και η απόλυτη QoT μετρική. Το SNR ήδη μπορεί να μετρηθεί από τους τρέχοντες εμπορικούς σύμφωνους δέκτες. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητες μετρήσεις παρομορφώσεων ή άλλες μετρικές QoT που μπορούν να παρατηρηθούν από OPMs. Το προτεινόμενο πλαίσιο συσχετίζει μετρήσεις SNR λαμβάνοντας υπόψη το χώρο (δρομολόγηση των συνδέσεων), και το φάσμα (παρεμβολές από γειτονικά μονοπάτια). Αυτό το καταφέρνει μέσα από τον υπολογισμό ενός βοηθητικού γράφου τον οποίο αποκαλούμε Interference-Aware (IA) γράφο, πάνω στον οποίο εκτελούνται οι αλγόριθμοι εκτίμησης. Ως αποτέλεσμα οι SNR και BER μετρικές που παρέχει το πλαίσιο είναι πιο ακριβείς και ρεαλιστικές σε σχέση με αυτές που λαμβάνονταν από προηγούμενες τεχνικές (οι οποίες λάμβαναν υπόψη μόνο τις χωρικές συσχετίσεις). Οι πιο ακριβείς εκτιμήσεις βοηθούν τον διαχειριστή του δικτύου να λάβει πιο αποτελεσματικές αποφάσεις [28].

Χρησιμοποιούμε το GN model για να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά του φυσικού επιπέδου και να εκτελέσουμε μία σειρά από πειράματα για να υπολογίσουμε την ακρίβεια εκτίμησης του πλαισίου μας και τα οφέλη που αυτό παρέχει. Το σενάριο που θεωρεί παρεμβολές χειρότερης περίπτωσης υποθέτει ότι όλα τα κανάλια λειτουργούν ταυτόχρονα πάντα υπερεκτιμά το BER, σε αντίθεση με το δικό μας πλαίσιο το οποίο λαμβάνει υπόψη την πραγματική κατάσταση του δικτύου. Ως αποτέλεσμα, το εκτιμώμενο BER είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα και αρκετά χαμηλότερο από το BER που υπολογίζει το σενάριο παρεμβολών χειρότερης περίπτωσης (θεωρώντας ότι ο φόρτος του δικτύου δεν είναι πολύ υψηλός και άρα δεν είναι κοντά στο σενάριο χειρότερης περίπτωσης). Παρατηρήσαμε ότι το εκτιμώμενο pre-FEC BER που παρέχει το πλαίσιο μας για ένα νέο μονοπάτι είναι έως $4 \cdot 10^{-2}$ χαμηλότερο από το αντίστοιχο εκτιμώμενο του χειρότερου σεναρίου. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες στον αριθμό των ακριβών αναγεννητών που χρειάζονται όπως επίσης δείχνουμε στις προσομοιώσεις. Πιο συγκεκριμένα το πλαίσιο μας χρειάζεται 47% λιγότερους αναγεννητές σε σχέση με το σενάριο χειρότερης περίπτωσης, ενώ χρειάζεται μόνο 5% περισσότερους σε σχέση με το σενάριο όπου έχουμε τέλεια γνώση του φυσικού επιπέδου και του BER του καινούριου μονοπατιού.

Προηγούμενες εργασίες

Η εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης ενός μονοπατιού είναι μία σημαντική λειτουργικότητα που εκτελείται συνήθως από ένα εργαλείο "Qtool" το οποίο χρησιμοποιείται όταν σχεδιάζεται, αναβαθμίζεται ή λειτουργεί ένα οπτικό δίκτυο. Οι μέθοδοι εκτίμησης QoT ποικίλουν από αυξημένης πολυπλοκότητας μεθόδους λύσης Schrödinger εξισώσεων μέχρι προσομοιώσεις όπως

VPI [16] και αναλυτικά μοντέλα χαμηλότερης πολυπλοκότητας. Το GN model έχει αποδειχθεί ότι είναι αρκετά ακριβές και η προσεγγιστική αναλυτική μορφή του συνδυάζει ικανοποιητική ακρίβεια και χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Τέτοια μοντέλα εκτελούν «εκ των υστέρων» εκτίμηση του QoT υποθέτοντας ακριβή γνώση των παραμέτρων του δικτύου και του φυσικού επιπέδου. Στην πραγματικότητα αυτά τα εργαλεία είναι αδύνατον να έχουν ακριβή γνώση για αυτές τις παραμέτρους, και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται περιθώρια που λαμβάνουν υπόψιν αυτές τις ανακρίβειες (αναφέρονται ως περιθώρια σχεδιασμού στην [19]). Υψηλά περιθώρια χρησιμοποιούνται επίσης και για να λάβουν υπόψιν τη γήρανση του εξοπλισμού και τις αυξημένες παρεμβολές από γειτονικά μονοπάτια (αναφέρονται ως περιθώρια συστήματος). Μία δεύτερη κατηγορία QoT εκτίμησης είναι οι μέθοδοι που βασίζονται σε ανάδραση [29][30], όπου οι μετρήσεις και η παρατηρούμενη πληροφορία συσχετίζεται για να εκτιμηθεί το QoT νέων μονοπατιών και τα οποία μπορούν να μειώσουν τόσο τα περιθώρια σχεδιασμού όσο και συστήματος και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δυναμική λειτουργία του δικτύου.

Οι προηγούμενες μελέτες [29][30] εστίαζαν αποκλειστικά στην εκτίμηση του QoT ενός νέου μονοπατιού χρησιμοποιώντας τεχνικές συσχέτισης. Πιο συγκεκριμένα η [29] εκτιμούσε διατεματικές (end-to-end) QoT μετρικές για ένα καινούριο μονοπάτι, βασιζόμενη σε μετρητικά δεδομένα από ήδη εγκατεστημένα μονοπάτια. Στην [30] χρησιμοποιούνται μετρικές για τις μέσες τιμές και τις διακυμάνσεις των κατανομών των '0' και '1' συμβόλων. Με βάση αυτές τις μετρικές υπολογίζονταν αρχικά το Q factor και μετέπειτα το BER ενός νέου μονοπατιού. Και στις δύο μελέτες χρησιμοποιούνται οι τεχνικές Network kriging (NK) [31] και ελαχιστοποίηση l2 νόρμας - Norm minimization (NM) για να εκμεταλλευτούν τη συσχέτιση της πληροφορίας που παρέχουν τα ήδη εγκατεστημένα μονοπάτια που μοιράζονται κοινούς συνδέσμους. Παρόλαυτα και οι δύο μελέτες αγνοούσαν τη συσχέτιση στο πεδίο φάσματος μεταξύ μονοπατιών που χρησιμοποιούσαν γειτονικές συχνότητες και γι' αυτό δεν λάμβαναν υπόψιν τις πραγματικές παρεμβολές των διπλανών μονοπατιών. Επίσης εστίαζαν μόνο σε γραμμικά φαινόμενα (που είναι αθροιστικά ανά σύνδεσμο) και σε παλαιάς γενιάς 10Gbps WDM δίκτυα με σχήμα διαμόρφωσης On-Off keying. Όταν οι παρεμβολές δεν λαμβάνονται υπόψιν στο μοντέλο εκτίμησης, χρειάζονται υποθέσεις χειρότερης περίπτωσης, δηλαδή ότι το δίκτυο είναι πάντα πλήρως χρησιμοποιούμενο και όλα τα κανάλια είναι ταυτόχρονα αναμμένα. Οι QoT εκτιμήσεις που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο είναι απαισιόδοξες και δεν αντανakλούν την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Η αποφυγή αυτής της απαισιόδοξης υπόθεσης χειρότερου σεναρίου και η χρήση της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου μπορεί να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση σε εξοπλισμό όπως έδειξε η [28].

Το προτεινόμενο πλαίσιο προσφέρει σημαντικές καινοτομίες σε σχέση με τις [29] και [30]. Καταρχάς μοντελοποιεί συσχετίσεις μονοπατιών όχι μόνο στο πεδίο του χώρου (δρομολόγησης) αλλά και στο πεδίο του φάσματος, λαμβάνοντας υπόψιν τις πραγματικές παρεμβολές από τα γειτονικά μονοπάτια. Με αυτόν τον τρόπο οι εκτιμήσεις QoT είναι σημαντικά πιο ακριβείς. Επιπλέον το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της υποβάθμιξης στο QoT που θα προκαλέσει το καινούριο μονοπάτι στα ήδη υπάρχοντα. Επίσης, η προτεινόμενη μέθοδος είναι εφαρμόσιμη τόσο στα τρέχουσας όσο και στα επόμενης γενιάς σύμφωνα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν είτε σταθερό είτε ευέλικτο φάσμα σε αντίθεση με τις [29] και [30] που υπέθεταν δίκτυα προηγούμενης γενιάς. Σε σχέση με τις τεχνικές εκτίμησης όπως το GN model, η πρότασή μας είναι ανεξάρτητη από τις τιμές των παραμέτρων του φυσικού επιπέδου, ενώ η ανάδραση από το φυσικό επίπεδο καθιστά απαραίτητη την χρήση υψηλών περιθωρίων για την γήρανση του εξοπλισμού και τις παρεμβολές χειρότερου σεναρίου.

Τεχνικές Εκτίμησης Ποιότητας Μετάδοσης

Σε αυτό το σημείο ορίζουμε τις τεχνικές συσχέτισης που χρησιμοποιούμε στο πλαίσió μας.

Παρουσιάζουμε τις βασικές αλγεβρικές αναπαραστάσεις και μετά περιγράφουμε πώς μπορούμε να εκτιμήσουμε το QoT ενός άγνωστου μονοπατιού χρησιμοποιώντας τις τιμές των ήδη υπάρχοντων μονοπατιών. Ακολουθούμε αρχικά μία γενική περιγραφή όπου δεν ορίζουμε την μετρική που θα χρησιμοποιήσουμε, πράγμα που θα κάνουμε στο τέλος της επόμενης υποενότητας.

Συμβολισμός του δικτύου

Θεωρούμε ένα δίκτυο $G=(V,E)$ με V να συμβολίζει το σύνολο των κόμβων και E το σύνολο των μονής κατεύθυνσης οπτικών συνδέσμων. Υποθέτουμε ένα σετ M μονοπατιών που είναι ήδη εγκατεστημένα στο δίκτυο, και το οποίο ορίζουμε ως «κατάσταση» του δικτύου. Μία σύνδεση χρειάζεται ένα ζεύγος από δύο μονής κατεύθυνσης μονοπάτια αντίθετης φοράς και διαδρομής και τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος ή φάσμα στους αντίστοιχους συνδέσμους. Ο πίνακας δρομολόγησης των εγκατεστημένων μονοπατιών ορίζεται ως ο δυαδικός πίνακας $R_M \in \{0,1\}^{|M| \times |E|}$, όπου $R_M[m, l]=1$ όταν το μονοπάτι m περιέχει το σύνδεσμο l , και είναι 0, σε διαφορετική περίπτωση. Έστω το διατεματικό διάνυσμα των παραμέτρων $\mathbf{y}_M \in \mathbb{R}^{|M|}$, με y_m μέλος του \mathbf{y}_M και το οποίο αναπαριστά την τιμή της μετρικής του μονοπατιού m . Το διάνυσμα \mathbf{y}_M μπορεί να γραφτεί ως γραμμικός συνδυασμός των παραμέτρων ανά σύνδεσμο $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{|E|}$ έτσι ώστε $\mathbf{y}_M = R_M \mathbf{x}$.

Το πρόβλημα εκτίμησης ποιότητας μετάδοσης

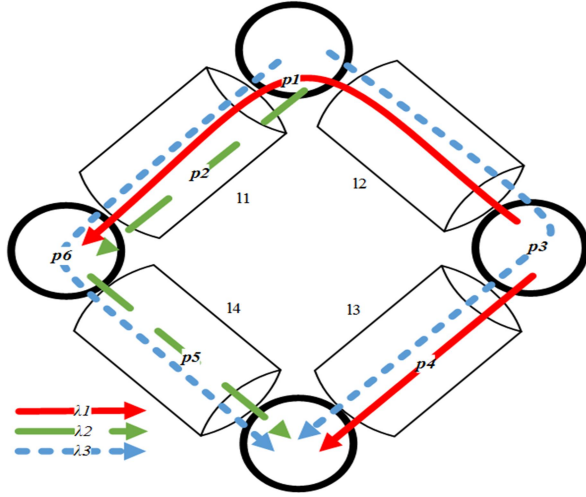
Συμβολίζουμε με $Q^*(p|P)$ την πραγματική τιμή του SNR για το μονοπάτι p όταν το δίκτυο είναι στην κατάσταση P και με $Q^*(P)$ το διάνυσμα QoT που περιέχει τις τιμές SNR για όλα τα μονοπάτια $p \in P$. Η αλλαγή $Q^*(P)$ είναι μη γραμμική και άγνωστη σε εμάς. Το σύνολο των πιθανών καταστάσεων P είναι τεράστιο για οποιοδήποτε δίκτυο ρεαλιστικών διαστάσεων και έτσι είναι αδύνατον να μετρηθεί και να καταγραφεί (π.χ. σε ένα πίνακα) για όλες τις πιθανές καταστάσεις. Για οποιοδήποτε σύνολο εγκατεστημένων μονοπατιών P συμβολίζουμε με $Y(P)$ το διάνυσμα των μετρούμενων τιμών SNR που θεωρούμε ότι είναι διαθέσιμες. Σημειώνουμε ότι χωρίς μετρητικά σφάλματα έχουμε $Y(P) = Q^*(P)$. Τα μετρητικά σφάλματα αποτελούνται από ένα συστηματικό σφάλμα και ένα τυχαίο σφάλμα. Το συστηματικό σφάλμα μπορεί να μειωθεί σημαντικά μέσα από κατάλληλη ρύθμιση-εκπαίδευση του εξοπλισμού μέτρησης. Το τυχαίο σφάλμα μπορεί να μειωθεί παίρνοντας το μέσο όρο διάφορων μετρικών στο πεδίο του χρόνου (σε χαμηλότερη κλίμακα του χρόνου από εκεί που θα ήταν πιθανή η αλλαγή των τιμών λόγω φυσικών γεγονότων π.χ. γήρανσης). Επειδή τα μετρητικά σφάλματα είναι μικρά και μπορούν να μειωθούν με παραδοσιακές τεχνικές, τα αγνοούμε σε αυτήν την ενότητα. Έτσι υποθέτουμε ότι μετράμε το πραγματικό QoT για όλα τα μονοπάτια, οπότε $Y(P) = Q^*(P)$ για $p \in P$.

Θεωρούμε την περίπτωση όπου ένα νέο μονοπάτι $\omega \notin P$ πρόκειται να εγκατασταθεί στο δίκτυο, και θέλουμε να εκτιμήσουμε (i) ποιο θα είναι το QoT αυτού του νέου μονοπατιού ω και (ii) πως οι QoT μετρικές των υπάρχοντων μονοπατιών $p \in P$ θα επηρεαστούν από την εγκατάσταση του ω . Η διατύπωση του προβλήματος είναι η παρακάτω:

Πρόβλημα εκτίμησης QoT νέου μονοπατιού: Μας δίνονται οι μετρήσεις $Y(P) = Q^*(P)$ για το διάνυσμα των μετρικών QoT για την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου P . Ο στόχος μας είναι να εκτιμήσουμε το καινούριο QoT διάνυσμα $Q^*(P \cup \{\omega\})$ που θα ισχύει μετά την εγκατάσταση του μονοπατιού $\omega \notin P$.

Σημειώνουμε ότι η παραπάνω διατύπωση του προβλήματος μπορεί να επεκταθεί με προφανή τρόπο για να συμπεριλάβει την υποψήφια επαναρρύθμιση ενός ήδη εγκατεστημένου μονοπατιού ή την εγκατάσταση ή επαναρρύθμιση πολλών μονοπατιών.

Το νέο διάνυσμα $Q^*(P \cup \{\omega\})$ περιέχει τόσο τις (νέες) QoT μετρικές $Q^*(p|P \cup \{\omega\})$ των ήδη εγκατεστημένων μονοπατιών $p \in P$, που γενικά θα επηρεαστούν από την εγκατάσταση του ω και την



Εικόνα 2 Ένα δίκτυο με 6 μονοπάτια σε 3 διαφορετικά μήκη κύματος

(μελλοντική) QoT μετρική $Q^*(w|P \cup \{\omega\})$ του μονοπατιού προς εγκατάσταση ω . Ο λόγος που θέλουμε να αποκτήσουμε αυτές τις μετρικές πριν την εγκατάσταση του μονοπατιού ω είναι ότι το νέο μονοπάτι μπορεί να καταστήσει κάποιο από τα ήδη υπάρχοντα μονοπάτια μη αποδεκτά (από άποψη QoT). Έτσι θέλουμε να μπορούμε να αποκτήσουμε κάποιες εκτιμήσεις εκ των προτέρων χωρίς να πρέπει να μπούμε στην διαδικασία να εγκαταστήσουμε το καινούριο μονοπάτι και να δούμε τις επιπτώσεις που αυτό μπορεί να έχει.

Υποθέτουμε ότι θέλουμε να εκτιμήσουμε τις διατεματικές παραμέτρους ενός συνόλου N καινούριων μονοπατιών που αναπαριστώνται από το διάνυσμα $\mathbf{y}_N \in \mathbb{R}^N$, υποθέτοντας ότι γνωρίζουμε την δρομολόγησή τους $R_N \in \{0,1\}^{|N| \times |E|}$. Τότε έχουμε

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_M \\ \mathbf{y}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_M \\ R_N \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (1)$$

Έστω για παράδειγμα το δίκτυο (Εικόνα 2), όπου ένα σύνολο $M = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, από μονοπάτια είναι ήδη εγκατεστημένα και αντιστοιχούν στον υποπίνακα R_M και οι γνωστές διατεματικές μετρικές παραμορφώσεων $\mathbf{y}_M = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$ (θα συζητήσουμε αργότερα για τη φύση αυτών των μετρικών). Για λόγους απλότητας μόνο η μία κατεύθυνση μίας σύνδεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Η ίδια σύμβαση ακολουθείται και στις παρακάτω εξισώσεις. Το μονοπάτι προς εγκατάσταση συμβολίζεται με $N = \{p_6\}$ του οποίου τις διατεματικές μετρικές y_6 θέλουμε να εκτιμήσουμε. Ο πίνακας δρομολόγησης του δικτύου μπορεί να περιγραφεί ως:

$$\frac{\mathbf{y}_M}{\mathbf{y}_N} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Οι μετρικές παραμορφώσεων στο διάνυσμα \mathbf{y} μπορεί να είναι διαφορετικές ανάλογα με την εφαρμογή και επίσης εξαρτώνται από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του φυσικού επιπέδου. Για παράδειγμα σε αυτή τη μελέτη θεωρούμε ότι το \mathbf{y}_M είναι το αντίστροφο του SNR των εγκατεστημένων μονοπατιών και θέλουμε να εκτιμήσουμε το αντίστροφο του SNR του καινούριου μονοπατιού \mathbf{y}_N . Από το SNR, και γνωρίζοντας το σχήμα διαμόρφωσης και το FEC, μπορούμε να υπολογίσουμε το pre-FEC BER. Υποθέτοντας ένα OPM που μπορεί να αναφέρει διάφορες μετρικές παραμορφώσεων όπως ASE, διασπορά, ή NLIs, μπορούμε να διατυπώσουμε ένα πρόβλημα εκτίμησης για κάθε μία μετρική, να το λύσουμε και μετά να εξετάσουμε το αν είναι

εφικτή η κάθε λύση ξεχωριστά ή να συνδυάσουμε τις τιμές για να υπολογίσουμε μία εκτίμηση του BER. Σε άλλες περιπτώσεις όπως εντοπισμό σοβαρών (hard) ή ελαφριών (soft) βλαβών (failures) (οι οποίες απαιτούν την εκτίμηση του διανύσματος ανά σύνδεσμο \mathbf{x} που περιλαμβάνει τις μετρικές ανά σύνδεσμο), άλλες παράμετροι πρέπει να εξεταστούν. Οι ελαφριές βλάβες (Soft-failures) ορίζονται ως γεγονότα που υποβαθμίζουν προοδευτικά το QoT. Προκαλούν μικρές αλλαγές στην απόδοση του δικτύου και είναι συχνά δύσκολο να εντοπιστούν. Οι περισσότερες ελαφριές βλάβες απαιτούν περίπλοκους υπολογισμούς και πληροφορίες από τους OPMs για να εντοπιστούν. Σε αυτήν την περίπτωση το πλαίσιο μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένες μετρικές παραμόρφωσης που παρέχουν τα OPMs ή κάποιες άλλες συγκεκριμένες παραμέτρους με την προϋπόθεση ότι μπορούν να θεωρηθούν αθροιστικές ανά σύνδεσμο.

Επειδή το καινούριο μονοπάτι p_6 περιέχει συνδέσμους που χρησιμοποιούνται (σε διαφορετικό μήκος κύματος-φάσμα) από άλλα μονοπάτια, είναι δυνατόν να εκτιμήσουμε την διατεματική μετρική του. Για να εκφράσουμε αυτήν την ιδέα συστηματικά χρησιμοποιώντας τους προηγούμενους ορισμούς, οι διατεματικές παρατηρήσεις εκφράζονται ως $\mathbf{y}_M = R_M \mathbf{x}$, όπου οι παράμετροι των συνδέσμων \mathbf{x} είναι άγνωστοι και δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν επακριβώς λόγω περιορισμένης πληροφορίας από τις διαθέσιμες παρατηρήσεις (\mathbf{y}_m). Ο σκοπός είναι να εκτιμηθούν οι διατεματικές παράμετροι \mathbf{y}_N , όπου $\mathbf{y}_N = R_N \mathbf{x}$. Η λύση του προβλήματος παρουσιάζεται στις [29][30] χρησιμοποιώντας τις τεχνικές «Network kriging» ή «Ελαχιστοποίηση νόρμας» (Norm minimization) και τις οποίες θα αναλύσουμε παρακάτω.

Σημειώνουμε ότι αν κάνουμε την υπόθεση χειρότερης περίπτωσης παρεμβολών όπως στις [29][30] ότι όλα τα κανάλια είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένα, τότε όλες οι μετρικές παραμόρφωσης ενός συνδέσμου θα έχουν ίσες τιμές ανεξάρτητα από την εκάστοτε χρησιμοποίηση του φάσματος. Γι' αυτό το λόγο όλα τα εγκατεστημένα μονοπάτια και τα καινούρια που θα περνάνε από αυτόν τον σύνδεσμο θα παρουσιάζουν ίση υποβάθμιση του QoT. Στην επόμενη υποενότητα θα περιγράψουμε το πλαίσιο μας το οποίο λαμβάνει υπόψιν του τις παρεμβολές από τα γειτονικά κανάλια.

Network kriging

Το Network kriging [31] είναι ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από μεθόδους γραμμικές πρόβλεψης που στοχεύουν στην εκτίμηση δικτυακών παραμέτρων μονοπατιών βασιζόμενοι σε ένα δείγμα. Εφαρμόστηκε στα οπτικά δίκτυα στις [29] και [30]. Βρίσκει την καλύτερη γραμμική εκτίμηση του \mathbf{y}_N , με βάση το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που είναι:

$$\hat{\mathbf{y}}_N = R_N R_M^T (R_M R_M^T)^+ \mathbf{y}_M \quad (3)$$

Το σύμβολο $(\cdot)^+$ συμβολίζει έναν ψευδο-αντίστροφο όπως τον Moore-Penrose αντίστροφο. Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O(|M|^3)$ [29], όπου $|M|$ είναι ο αριθμός των εγκατεστημένων μονοπατιών.

Norm l2 minimization

Αυτή η μέθοδος μπορεί να υπολογίσει μη γραμμικές εκτιμήσεις του \mathbf{y}_N . Έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι μπορούν να οριστούν περιορισμοί για τον υπολογισμό της λύσης. Το πρόβλημα όπως ορίζεται στις [29], [30] είναι:

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}} \left(\|\mathbf{u}\|_2^2 + \|\mathbf{x}\|_2^2 \right) \quad (4)$$

που υπόκειται στον περιορισμό $R_M \mathbf{x} + D_2 \mathbf{u} = \mathbf{y}_M, \mathbf{x} \geq 0$

Το σύμβολο $\|\cdot\|_2^2$ συμβολίζει την Ευκλείδεια (12) νόρμα. Στην (4), το \mathbf{u} είναι μία ρυθμιστική παράμετρος και ο D_2 είναι θετικά ορισμένος διαγώνιος πίνακας. Ο D_2 καθορίζει αν κάθε γραμμή του $R_M \mathbf{x} \approx \mathbf{y}_M$ θα πρέπει να ικανοποιείται με ακρίβεια ή με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων. Οι διαγώνιοί του πρέπει να είναι τυπικά μικροί (10^{-4}) αν οι περιορισμοί θα πρέπει να ικανοποιηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες λογισμικού όπως η PDCO [33] που λύνει την Εξ. (4). Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου υπολογίστηκε στην [29] και είναι $O(aL^3)$, με το a να εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια της εκτίμησης και $L=|E|$ είναι ο αριθμός των συνδέσμων του δικτύου. Η έξοδος του αλγορίθμου είναι η εκτίμηση \mathbf{x} των παραμέτρων των συνδέσμων. Στην παρούσα ενότητα μας ενδιαφέρει η εκτίμηση των διατεματικών παραμέτρων καινούριων μονοπατιών η οποία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τη σχέση $\mathbf{y}_N = R_N \mathbf{x}$.

Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψιν παρεμβολές

Ο ορισμός του πίνακα R στην προηγούμενη ενότητα εξαρτάται μόνο από την δρομολόγηση των μονοπατιών και έτσι μπορεί να αξιοποιήσει πληροφορία μόνο από τις εξαρτήσεις στο πεδίο του χώρου, και αγνοεί εξαρτήσεις στο πεδίο των συχνοτήτων. Καταγράφει ποια μονοπάτια μοιράζονται συγκεκριμένους συνδέσμους αλλά δεν καταγράφει ποια χρησιμοποιούν διπλανά ή μακρινά κανάλια και πόσο φάσμα καθένα από αυτά χρησιμοποιεί. Συνεπώς η διατύπωση στην προηγούμενη ενότητα δεν μπορεί να λάβει υπόψιν παρεμβολές γειτονικών καναλιών (μήκος κύματος σε WDM ή μπάντες φάσματος σε EON) που προκαλούν το ένα στο άλλο, και πρέπει να βασιστεί σε μία υπόθεση παρεμβολών χειρότερης περίπτωσης όπως γίνεται στις [29], [30]. Αυτή η υπόθεση μοντελοποιεί τα μονοπάτια που μοιράζονται τον ίδιο σύνδεσμο να έχουν την ίδια μετρική QoT (το αντίστροφο του SNR στην μελέτη μας), χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την πραγματική χρήση του φάσματος, την θέση και την απόσταση των χρησιμοποιούμενων μηκών κύματος ή φάσματος.

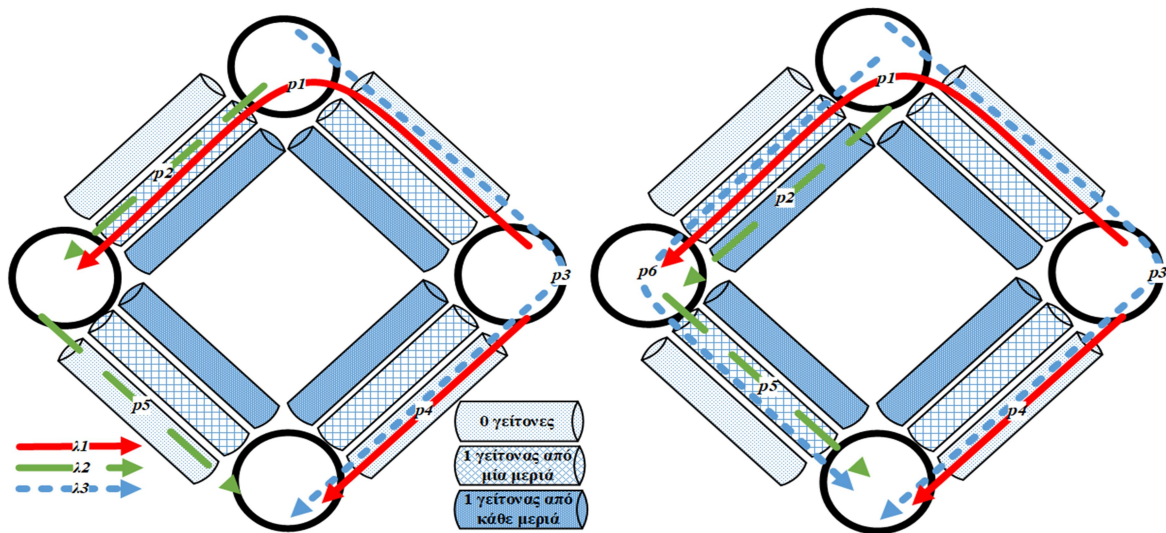
Το μοντέλο που αναπτύξαμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε WDM όσο και σε EON. Λαμβάνει υπόψιν το φάσμα που κάθε μονοπάτι καταλαμβάνει, και αυτή η πληροφορία αξιοποιείται για να ληφθούν υπόψιν οι παρεμβολές των γειτονικών καναλιών. Αυτό είναι σημαντικό γιατί με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση του QoT, αποφεύγοντας την υπόθεση χειρότερης περίπτωσης ότι όλα τα κανάλια είναι αναμμένα ταυτόχρονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση σε αναγεννητές όπως θα δείξουμε στις προσομοιώσεις. Θα δείξουμε επίσης ότι το μοντέλο που αναπτύξαμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσουμε την υποβάθμιση που θα προκαλέσει ένα νέο μονοπάτι στα ήδη υπάρχοντα.

Για να εκτιμηθεί η παρεμβολή από τα γειτονικά κανάλια, η αρχική διατύπωση του προβλήματος πρέπει να τροποποιηθεί. Μας δίνεται ένα δίκτυο $G = (V, E)$ το οποίο είναι σε μία δεδομένη κατάσταση. Η κατάσταση του δικτύου περιγράφεται από τον πίνακα δρομολόγησης $A \in \{0,1\}^{|M| \times |E|}$ και το διάνυσμα \mathbf{w} από $|M|$ στοιχεία που περιγράφουν το μήκος κύματος ή το φάσμα που χρησιμοποιεί το εκάστοτε μονοπάτι. Για να αποκτήσουμε ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψιν του παρεμβολές γειτονικών καναλιών, ορίζουμε ένα βοηθητικό γράφο τον οποίο ορίζουμε ως *interference aware* (IA-) γράφο $G' = (V', E')$, (Εικόνα 3), και έναν αντίστοιχο πίνακα δρομολόγησης R_M , όπως ορίζεται παρακάτω. Το σύνολο V' των κόμβων στον G είναι το ίδιο με το σύνολο των κόμβων V στον IA-γράφο G' , άλλα κάθε σύνδεσμος l_i στον E αντικαθιστάται από ένα σύνολο IA-συνδέσμων στον G' , που συμβολίζονται με $l'_{i,j}$ όπου $j=1 \dots q$, με $q=0.5(2^\gamma + 2^{\gamma/2})$, και το γ συμβολίζει το συνολικό αριθμό των πιο κοντινών γειτονικών καναλιών που θεωρούμε ότι συνεισφέρουν στις παρεμβολές, δηλαδή $\gamma/2$ γείτονες από κάθε μεριά. Για να λάβουμε υπόψιν παρεμβολές από πιο μακρινούς γείτονες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα κατάλληλο περιθώριο. Κάθε IA-σύνδεσμος $l'_{i,j}$ αναπαριστά τον αριθμό και τη θέση των ενεργών γειτονικών καναλιών. Υποθέτοντας ίση ισχύ και ρυθμό συμβόλου, αν δύο κανάλια έχουν ίδιους γείτονες θα έχουν και

σχεδόν ίσες τιμές τιμές παρεμβολών ανεξάρτητα από το ποια μεριά είναι οι γείτονες. Αυτή η υπόθεση καθιστά ορισμένους συνδυασμούς ενεργών γειτονικών καναλιών να είναι ισοδύναμοι. Γι' αυτό ο αριθμός q των ΙΑ-συνδέσμων, που παρουσιάζεται παραπάνω, υπολογίζεται αφαιρώντας τον αριθμό των ισοδύναμων συνδέσμων από το συνολικό αριθμό των συνδυασμών 2^{γ} .

Ένα μονοπάτι στον G' που περιέχει συγκεκριμένους ΙΑ-συνδέσμους $l'_{i,j}$ αποκαλείται ΙΑ-μονοπάτι. Για να ορίσουμε τον πίνακα δρομολόγησης R_M του G' από το πίνακα A και το διάνυσμα μήκων κύματος w του G , λαμβάνουμε κάθε μονοπάτι (p, w) στον G (κάθε γραμμή του A και του w) και το δρομολογούμε ως ένα ΙΑ-μονοπάτι στον G' : Αν το p περνάει από τον σύνδεσμο l_i στον G και δεν έχει ενεργά γειτονικά κανάλια στον l_i (δηλ. κανένα άλλο μονοπάτι δεν χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος l_i το οποίο είναι γ -γειτονικό με το w) το αντίστοιχο ΙΑ-μονοπάτι δρομολογείται από τον σύνδεσμο $l'_{i,0}$ στον G' . Αν το p έχει 1 ενεργό διπλανό γείτονα (σε οποιαδήποτε μεριά) στο l_i του G , τότε το ΙΑ-μονοπάτι θα δρομολογηθεί από το $l'_{i,1}$ στον G' , κοκ, ώστε τελικά να καλυφθεί η περίπτωση όπου το p έχει $\gamma/2$ ενεργούς γείτονες από κάθε μεριά, οπότε το ΙΑ-μονοπάτι δρομολογείται από τον σύνδεσμο $l'_{i,q-1}$ στο G' . Ο αντίστοιχος ψευδοκώδικας περιγράφεται στον Αλγόριθμο 1.

Για να παρουσιάσουμε την μετατροπή του γράφου και της κατάστασης μέσα από ένα παράδειγμα, θεωρήστε το οπτικό δίκτυο (Εικόνα 2) και θεωρήστε ότι μόνο ο ένας πιο κοντινός γείτονας από κάθε μεριά συνεισφέρει σημαντικά στην παρεμβολή. Σε αυτήν την περίπτωση $\gamma=2$, και υπάρχουν



Εικόνα 3 Ο βοηθητικός ΙΑ-γράφος και οι ΙΑ-σύνδεσμοι και μονοπάτια, α) πριν και β) μετά την εγκατάσταση του p_6 . Παρατηρήστε τα p_2 και p_5 .

$q=3$ ΙΑ-σύνδεσμοι στο δίκτυο G' για κάθε σύνδεσμο του δικτύου. Τα πέντε μονοπάτια $M=\{p_i\}$, $i=1,2,\dots,5$ θεωρούνται ενεργά στο δίκτυο και χρησιμοποιούν ένα σύνολο από τρία μήκη κύματος λ_1 , λ_2 and λ_3 . Θα περιγράψουμε τη διαδικασία δρομολόγησης για το μονοπάτι p_1 . Αυτό το μονοπάτι περιέχει τους συνδέσμους l_1 και l_2 . Στον σύνδεσμο l_1 , το μονοπάτι p_1 έχει έναν γείτονα από κάθε μεριά (δηλαδή το μονοπάτι p_2 στο μήκος κύματος λ_2), άρα το αντίστοιχο ΙΑ-μονοπάτι δρομολογείται από τον σύνδεσμο $l'_{1,1}$ στον G' (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3α). Στον σύνδεσμο l_2 , το μονοπάτι p_1 δεν έχει κανέναν γείτονα από καμία πλευρά οπότε δρομολογείται από τον σύνδεσμο $l'_{2,0}$ του G' . Αν είχε έναν γείτονα από κάθε μεριά θα είχε δρομολογηθεί από τον σύνδεσμο $l'_{2,2}$. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για να δρομολογήσουμε όλα τα εγκατεστημένα μονοπάτια στον G' .

Η ακρίβεια της QoT εκτίμησης αυξάνει με τον αριθμό των πηγών παρεμβολής (ο αριθμός των γειτόνων γ) που λαμβάνουμε υπόψιν. Από την άλλη μεριά ο αριθμός των ΙΑ-συνδέσμων q αυξάνει

Αλγόριθμος 1: Κατασκευή του βοηθητικού interference aware (IA)γράφου

Είσοδος: αρχικός πίνακας δρομολόγησης $A \in \{0, 1\}^{|\mathcal{M}| \times |\mathcal{E}|}$, μήκη κύματος ανά μονοπάτι \mathbf{w} , αριθμός γειτόνων γ

Έξοδος: IA-μονοπάτια με τους αντίστοιχους IA- συνδέσμους (πίνακας R_M)

Διαδικασία:

1: Αρχικοποίηση $q=0.5(2^\gamma + 2^{\gamma^2})$ IA-συνδέσμους προς αντικατάσταση κάθε συνδέσμου $e \in E$

2: **for** ένα μονοπάτι $m \in M$

3: **for** $l_i \in m$ {οι σύνδεσμοι του μονοπατιού m }

4: Ψάξε στο A και \mathbf{w} για ενεργούς $\gamma/2$ γείτονες από κάθε μεριά

5: Ανάλογα με τον αριθμό και τον τύπο των ενεργών γειτόνων στον σύνδεσμο l_i , δρομολόγησε το m από το $l_{i,z}$ ($R_M[m, l_{i,z}]=1$), $z \in \{0, \dots, \gamma-1\}$

6: **end for**

7: **end for**

εκθετικά με το γ . Επειδή η ακρίβεια της εκτίμησης εξαρτάται από τον αριθμό των μονοπατιών που περνάνε από έναν σύνδεσμο και η πολυπλοκότητα των μεθόδων εκτίμησης εξαρτάται από τον αριθμό των συνδέσμων προτιμούμε να κρατήσουμε μικρό τον αριθμό των επιπλέον IA-συνδέσμων. Στην πράξη η υπόθεση ότι οι δύο πιο κοντινοί γείτονες από κάθε μεριά συνεισφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό των παρεμβολών είναι αρκετά καλή από την άποψη ότι

χρειάζεται μόνο $q=10$ IA-συνδέσμους μεταξύ δύο κόμβων, παρέχει πολύ καλή ακρίβεια εκτίμησης QoT με σχετικά λίγη πληροφορία και χρειάζεται μικρό περιθώριο για να ληφθούν υπόψη οι πιο μακρινοί γείτονες. Στις προσομοιώσεις μας εξετάζουμε επίσης την απόδοση για διαφορετικές τιμές του γ , και παρατηρούμε τα ανταλλάγματα μεταξύ ακρίβειας εκτίμησης και απαιτούμενου περιθωρίου για τους πιο μακρινούς γείτονες, αλλά η πλειονότητα των προσομοιώσεων εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας $\gamma=4$.

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία είναι δυνατόν να λάβουμε υπόψη διαφορετικό αριθμό ρυθμών συμβόλου ή ισχύος εισάγοντας επιπλέον IA-συνδέσμους στον γράφο G' για να αναπαραστήσουμε το ρυθμό συμβόλου/ισχύ του εκάστοτε καναλιού και των διπλανών του. Σε αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των IA-συνδέσμων είναι $q = (br + lp - 1) \left\{ 0.5 \left((br + lp)^\gamma + (br + lp)^{\frac{\gamma}{2}} \right) \right\}$, όπου br συμβολίζει τον αριθμό των διαφορετικών ρυθμών συμβόλου και lp τον αριθμό των διαφορετικών ισχύων στο δίκτυο. Για $br=1$ και $lp=1$ η εξίσωση απλοποιείται σε αυτήν που αναφέρθηκε προηγουμένως. Όπως αναφέραμε παραπάνω, ο αριθμός των απαιτούμενων IA-συνδέσμων αυξάνεται εκθετικά με το γ και γι'αυτό πρέπει να κρατήσουμε μικρό τον αριθμό των περιπτώσεων που λαμβάνουμε υπόψη. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας χαλαρά κριτήρια ομαδοποίησης. Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε ένα δίκτυο στο οποίο χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί ρυθμοί συμβόλων, αν δυο IA-σύνδεσμοι διαφέρουν μόνο στο ρυθμό συμβόλου του πιο μακρινού γείτονα, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουν ίσες τιμές παρεμβολών. Παρόμοιοι ρυθμοί συμβόλων (π.χ. 28 και 32 Gbaud), μπορούν να ομαδοποιηθούν μαζί σε όλους τους συνδέσμους. Γενικά οι ομαδοποιήσεις έχουν επιπτώσεις στην ακρίβεια εκτίμησης. Γι αυτό το λόγο μπορεί να προστεθεί ένα περιθώριο έτσι ώστε να υποεκτιμούμε πάντα το QoT. Παίρνοντας μία διαφορετική προσέγγιση, μπορούν να γίνουν υπολογισμοί για να αποκτηθούν οι μετρικές ενός IA-συνδέσμου χρησιμοποιώντας αυτές ενός άλλου που χρησιμοποιεί διαφορετικό ρυθμό συμβόλου. (π.χ., να χρησιμοποιήσουμε την αναπαράσταση Taylor του GN model σε συνάρτηση του ρυθμού συμβόλου).

Ο προαναφερθείς μετασχηματισμός γράφου έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή του αρχικού πίνακα δρομολόγησης G σε έναν καινούριο IA G' ο οποίος κρατά πληροφορία όχι μόνο για την δρομολόγηση των μονοπατιών αλλά και για τα γειτονικά μονοπάτια στο φάσμα για κάθε σύνδεσμο μίας σύνδεσης και έτσι για την αντίστοιχη τιμή παρεμβολής. Όσο προστίθενται επιπλέον IA-σύνδεσμοι στο γράφο, τόσο προστίθεται επιπλέον πληροφορία για τιμές παρεμβολής που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατανομές γειτόνων ανάλογα με τις παραμέτρους που λαμβάνουμε υπόψη (π.χ. ρυθμός συμβόλου ή και ισχύς).

Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης για ελαστικά οπτικά δίκτυα

Το προτεινόμενο πλαίσιο εκτίμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για EON αλλάζοντας τον ορισμό του γείτονα. Σε ένα EON το φάσμα χωρίζεται σε φασματικές σχισμές (slots) των F GHz ($F = 12.5$ GHz) και σε κάθε μονοπάτι ανατίθεται ένας συνεχόμενος αριθμός από σχισμές. Σε μία δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί να είναι εγκατεστημένα μονοπάτια των οποίων το φάσμα αποτελείται από διαφορετικό αριθμό σχισμών φάσματος. Αν λάβουμε υπόψιν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς χρησιμοποίησης φάσματος θα χρειαστεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός από IA-συνδέσμους. Γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μερικά χαλαρά κριτήρια ομαδοποίησης ώστε να περιορίσουμε τον συνολικό αριθμό IA-συνδέσμων και τα οποία παρουσιάζουμε παρακάτω.

Εισάγουμε μία παράμετρο z η οποία αναπαριστά το πλάτος ενός ελαστικού καναλιού. Στα πειράματά μας θέτουμε το z να είναι ίσο με τον ελάχιστο αριθμό σχισμών που καταλαμβάνει ένα μονοπάτι, αλλά υπάρχουν και άλλες επιλογές όπως ο μέσος όρος ή ο μέγιστος αριθμός των σχισμών κ.α. Θεωρούμε ότι για ένα μονοπάτι οι z σχισμές από κάθε μεριά συνιστούν τον πρώτο γείτονα του και οι z με $2z$ σχισμές από κάθε μεριά είναι ο δεύτερος γείτονας κ.ο.κ, έως ότου συμπεριλάβουμε $\gamma/2$ γείτονες από κάθε μεριά. Για παράδειγμα, υποθέστε ένα EON με δύο ρυθμούς συμβόλου: 32 and 56 Gbaud και ότι ένα 32 Gbaud μονοπάτι μπορεί να χρησιμοποιεί 3 ή 4 σχισμές και ότι ένα 56 Gbaud μονοπάτι μπορεί να χρησιμοποιεί 5, 6, ή 7 σχισμές. Σημειώστε ότι οι επιπλέον σχισμές χρησιμοποιούνται ως ζώνη φύλαξης για να μειωθούν οι παρεμβολές από τα γειτονικά μονοπάτια και να αυξηθεί αν χρειαστεί η εμβέλεια μετάδοσης ενός μονοπατιού. Ο πρώτος γείτονας θεωρείται ότι βρίσκεται μέχρι $z=3$ σχισμές μακριά (ο ελάχιστος αριθμός των σχισμών ανάμεσα σε όλες τις επιλογές) και ο δεύτερος γείτονας θεωρείται ότι βρίσκεται 3 με 6 σχισμές μακριά. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα ότι ένας πρώτος γείτονας μπορεί να είναι μία σχισμή μακριά και ένας άλλος πρώτος γείτονας να είναι 2 σχισμές μακριά. Επειδή και οι δύο θεωρούνται πρώτοι γείτονες αντιστοιχίζονται στο ίδιο IA-σύνδεσμο και υποθέτουμε ότι έχουν τις ίδιες τιμές παρεμβολών ενώ στην πραγματικότητα έχουν διαφορετικές. Ένα άλλο ζήτημα το οποίο επηρεάζει την ακρίβεια εκτίμησης στην περίπτωση των EON είναι ότι δυο μονοπάτια που έχουν το ίδιο ρυθμό συμβόλου μπορεί να

Αλγόριθμος 2: Εκτίμηση QoT νέου μονοπατιού

Είσοδος: αρχικός πίνακας δρομολόγησης $A \in \{0,1\}^{|\mathcal{M}| \times |\mathcal{E}|}$, μήκη κύματος ανά \mathbf{w} , μετρητικές τιμές \mathbf{y}_M , νέο μονοπάτι n ($N = \{n\}$), αριθμός γειτόνων γ

Έξοδος: η εκτίμηση QoT για το μονοπάτι n (\mathbf{y}_N)

Διαδικασία:

1: Αρχικοποίηση $q=0.5(2^{\gamma} + 2^{\gamma/2})$ IA-συνδέσμου για αντικατάσταση κάθε συνδέσμου $\in E$

2: Χρησιμοποίησης Αλγόριθμο 1 με εισόδους A , \mathbf{w} και γ για να δημιουργηθεί ο R_M

3: **for** $l_i \in n$ οι σύνδεσμοι του μονοπατιού n

4: Ψάξε στον A και \mathbf{w} για ενεργούς $\gamma/2$ γείτονες από κάθε μεριά

5: Ανάλογα με τον αριθμό και τύπο των ενεργών γειτόνων του συνδέσμου l_i βρίσκουμε τον σύνδεσμο $l'_{i,z}$ για την δρομολόγηση n , $z \in \{0, \dots, \gamma-1\}$

6: **IF** ($l'_{i,z}$ χρησιμοποιείται στον R_M) **then** θέσε $R_N[n, l'_{i,z}] = 1$

7: **else** χρησιμοποίησε IA-σύνδεσμο με περισσότερους γείτονες

8: **End for**

9: Χρησιμοποίησε εξισώσεις (3) ή (4) με R_M , R_N και \mathbf{y}_M για την εκτίμηση του \mathbf{y}_N

καταλαμβάνουν διαφορετικό αριθμό σχισμών. Αυτό σημαίνει ότι προκαλούν ελαφρώς διαφορετικά φαινόμενα παρεμβολών επειδή οι κεντρικές τους συχνότητες έχουν διαφορετικές αποστάσεις από τα γειτονικά κανάλια. Επειδή όμως έχουν το ίδιο ρυθμό συμβόλου, θα τα αντιστοιχίσουμε στον ίδιο IA-σύνδεσμο. Όλα αυτά τα θέματα προσθέτουν «θόρυβο» στην εκτίμηση και η ακρίβεια αναμένεται να χειροτερεύει για κάθε επιπλέον διαθέσιμη επιλογή για ρυθμό συμβόλου/σχισμή. Για αυτό το λόγο η ακρίβεια εκτίμησης για τα EONs αναμένεται να είναι χειρότερη από αυτή των WDM, όπως δείχνουμε και στις

προσομοιώσεις μας. Για να λάβουμε υπόψιν αυτή την ανακρίβεια πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερα περιθώρια σε σύγκριση με τα WDM δίκτυα. Παρόλα αυτά τα περιθώρια είναι μικρότερα από αυτά που απαιτούνται από την υπόθεση χειρότερης παρεμβολής.

Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης ενός μονοπατιού προτού αυτό εγκατασταθεί

Σε αυτήν την υποενότητα θα περιγράψουμε πως συνδυάζεται η έννοια του IA-γράφου με τις

τεχνικές εκτίμησης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συμβολίζουμε με A τον αρχικό πίνακα δρομολόγησης και με \mathbf{Y}_M τις διατεματικές μετρικές ($1/\text{SNR}$ σε αυτήν την μελέτη από τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε το BER). Μετά κατασκευάζουμε τους υποπίνακες R_M και R_N που αντιστοιχούν στον πίνακα δρομολόγησης R του IA-γράφου, χρησιμοποιώντας τον Αλγόριθμο 2. Για να κατασκευάσουμε τον πίνακα R_M χρησιμοποιούμε τον Αλγόριθμο 1 χωρίς να λάβουμε υπόψιν το καινούριο μονοπάτι (γραμμές 1-2 του Αλγορίθμου

Αλγόριθμος 3: Εκτίμηση της υποβάθμισης που θα προκαλέσει ένα καινούριο μονοπάτι στα ήδη υπάρχοντα

Είσοδος: αρχικός πίνακας δρομολόγησης $A \in \{0,1\}^{|M \times |E|}$, μήκη κύματος ανά μονοπάτι \mathbf{w} , μετρητικές τιμές \mathbf{y}_M , νέο μονοπάτι n , αριθμός γειτόνων γ

Έξοδος: η εκτίμηση QoT των επηρεαζόμενων μονοπατιών (\mathbf{y}_N)

Διαδικασία:

- 1: Χρησιμοποίησε Αλγόριθμο 1 με είσοδο A , \mathbf{w} και γ , για τη δημιουργία του R_M
- 2: Βάλε το μονοπάτι n στον πίνακα δρομολόγησης A και \mathbf{w} για τη δημιουργία προσωρινού πίνακα δρομολόγησης A' και προσωρινού διανύσματος μηκών κύματος \mathbf{w}'
- 3: Χρησιμοποίησε Αλγόριθμο 1 με εισόδους A' , \mathbf{w}' και γ για τη δημιουργία του T_M
- 4: Σύγκρισε R_M και T_M για να βρεις το σύνολο N των υπάρχοντων IA-Μονοπατιών που έχουν τροποποιημένους γείτονες και θέσε στον R_N τις σχετικές γραμμές του T_M
- 5: Χρησιμοποίησε τις (3) ή (4) με τους R_M, R_N , και \mathbf{y}_M για να εκτιμήσεις \mathbf{y}_N , και το QoT των επηρεαζόμενων μονοπατιών N

2). Οι στήλες του πίνακα R_M είναι οι IA-σύνδεσμοι που αντιπροσωπεύουν τον αριθμό και την θέση των γειτονικών μονοπατιών. Για παράδειγμα στην Εικόνα 3α ο IA-γράφος κατασκευάζεται χωρίς να λάβουμε υπόψιν το καινούριο μονοπάτι $N = \{p_6\}$. Τα IA-μονοπάτια $M = \{p_1, \dots, p_5\}$ αντιστοιχούν στον πίνακα R_M . Ο πίνακας R_N είναι ένα διάνυσμα που αναπαριστά το μονοπάτι που πρόκειται να εγκατασταθεί και για το οποίο θέλουμε να εκτιμήσουμε την ποιότητα της μετάδοσής του. Οι στήλες του διανύσματος είναι πάλι οι IA-σύνδεσμοι του IA-γράφου που αναπαριστούν το είδος των γειτόνων που κάθε σύνδεσμος του καινούριου μονοπατιού θα είχε αν εισαγόταν στο τρέχων δίκτυο. Για να το βρούμε αυτό ψάχνουμε στον αρχικό πίνακα δρομολόγησης A λαμβάνοντας υπόψιν το διάνυσμα χρησιμοποίησης μηκών κύματος για να αναγνωρίσουμε τα γειτονικά μονοπάτια κάθε συνδέσμου του καινούριου μονοπατιού και μετά να κατασκευάσουμε το αντίστοιχο διάνυσμα (γραμμές 3-8 του Αλγορίθμου 2). Η μέθοδος συσχέτισης εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι IA-σύνδεσμοι του καινούριου μονοπατιού χρησιμοποιούνται από μονοπάτια που είναι ήδη εγκατεστημένα. Παρόλα αυτά μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις όπου κάποιοι IA-σύνδεσμοι του καινούριου μονοπατιού δεν χρησιμοποιούνται από κάποιο ήδη υπάρχων μονοπάτι στον πίνακα R_M και άρα δεν υπάρχει καθόλου πληροφορία για τις μετρικές αυτού του IA-συνδέσμου. Αυτή η περίπτωση δεν μπορεί να εμφανιστεί κατά την δημιουργία του πίνακα R_M (δεν καλύπτεται στον Αλγόριθμο 1). Στη συγκεκριμένη περίπτωση δρομολογούμε το καινούριο μονοπάτι πάνω από ένα IA-σύνδεσμο που έχει περισσότερους γείτονες έτσι ώστε η εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης του καινούριου μονοπατιού να είναι συντηρητική και ασφαλής (υποεκτίμηση του QoT). Αν υπάρχουν παραπάνω από ένας IA-σύνδεσμοι που έχουν παραπάνω γείτονες τότε υπάρχουν αρκετές παράμετροι που μπορούμε να λάβουμε υπόψιν για την επιλογή του IA-συνδέσμου όπως ο αριθμός των μονοπατιών που περνάνε από αυτούς τους IA-συνδέσμους, το μήκος των μονοπατιών κ.α. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανένας IA-σύνδεσμος που να έχει περισσότερους γείτονες τότε μπορούμε να υποθέσουμε παρεμβολές χειρότερης περίπτωσης για τον συγκεκριμένο σύνδεσμο. Σε ένα σενάριο με πολλαπλούς ρυθμούς συμβόλου αν ένας IA-σύνδεσμος ενός συγκεκριμένου ρυθμού συμβόλου δεν χρησιμοποιείται από κανένα μονοπάτι μπορούμε να αναθέσουμε ως ισοδύναμο IA-σύνδεσμο αυτόν που χρησιμοποιεί το υψηλότερο ρυθμό συμβόλου και που θα έχει μεγαλύτερες παρεμβολές έτσι ώστε και πάλι να υποεκτιμούμε το QoT. Όταν οι πίνακες R_M και R_N έχουν δημιουργηθεί τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι NK ή NM ώστε να εκτιμηθεί το QoT του καινούριου μονοπατιού.

Εκτίμηση της υποβάθμισης που θα προκαλέσει ένα καινούριο μονοπάτι στα υπάρχοντα

Το πλαίσιο εκτίμησης που παρουσιάσαμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της

υποβάθμισης της ποιότητας της μετάδοσης που το καινούριο μονοπάτι θα προκαλέσει στα ήδη υπάρχοντα αν εγκατασταθεί. Θα χρησιμοποιήσουμε την ίδια διατύπωση του προβλήματος όπως στην προηγούμενη υποενότητα. Ο πίνακας δρομολόγησης R_M κατασκευάζεται χωρίς να λάβουμε υπόψιν το καινούριο μονοπάτι (γραμμή 1 του Αλγορίθμου 3) και το διάνυσμα \mathbf{y}_M περιέχει τις αντίστοιχες μετρικές. Σε αυτήν την περίπτωση ο πίνακας R_N αναπαριστά τα μονοπάτια N που θα επηρεαστούν από το καινούριο μονοπάτι αν αυτό εγκατασταθεί στο δίκτυο. Για να βρούμε ποια μονοπάτια θα επηρεαστούν θα εισάγουμε το καινούριο μονοπάτι στον αρχικό πίνακα δρομολόγησης A (γραμμή 3 του Αλγορίθμου 3) και θα κατασκευάσουμε έναν προσωρινό πίνακα A' και ένα διάνυσμα αντίστοιχων μήκων κύματος \mathbf{w}' . Χρησιμοποιώντας αυτά στον Αλγόριθμο 1 (γραμμή 3 του Αλγορίθμου 3) βρίσκουμε ένα καινούριο ΙΑ-πίνακα δρομολόγησης T_M . Μετά συγκρίνουμε τις διαφορές μεταξύ των n πινάκων R_M και T_M για να βρούμε ποια από τα υπάρχοντα (ΙΑ-) μονοπάτια έχουν γείτονες διαφορετικού τύπου (αυτό είναι το σύνολο N) και άρα θα χρησιμοποιούν διαφορετικούς ΙΑ-συνδέσμους (γραμμή 4 του Αλγορίθμου 3). Αυτά είναι τα μονοπάτια που θα επηρεαστούν περισσότερο (αν περιορίσουμε τον αριθμό των γειτονικών γ μονοπατιών που λαμβάνουμε υπόψιν για τις παρεμβολές) από την εγκατάσταση του καινούριου μονοπατιού. Δημιουργούμε για αυτά τα ΙΑ-μονοπάτια τον αντίστοιχο πίνακα R_N (αντιγράφουμε τα αντίστοιχα δεδομένα του πίνακα T_M στον R_N) και τρέχουμε τον αλγόριθμο εκτίμησης χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3) ή (4).

Για παράδειγμα η Εικόνα 3α αντιστοιχεί στον πίνακα R_M ο οποίος αναπαριστά τον πίνακα δρομολόγησης των ΙΑ-μονοπατιών $M = \{p_1, \dots, p_5\}$ τα οποία υπολογίζονται πριν την εγκατάσταση του καινούριου μονοπατιού p_6 . Η Εικόνα 3β αντιστοιχεί στον πίνακα T_M ο οποίος αναπαριστά την δρομολόγηση των ΙΑ-μονοπατιών $\{p_1, \dots, p_5, p_6\}$ μετά την εγκατάσταση του μονοπατιού p_6 . Αν συγκρίνουμε τους δύο ΙΑ-γράφους (πίνακες R_M και T_M), μπορούμε να δούμε ότι μόνο τα p_2 και p_5 περιέχουν διαφορετικούς ΙΑ-συνδέσμους. Έτσι θέτουμε $N = \{p_2, p_5\}$ και δημιουργούμε τον αντίστοιχο πίνακα R_N . Χρησιμοποιώντας αυτήν την είσοδο το πλαίσιο μας μπορεί να εκτιμήσει αν η εγκατάσταση ενός καινούριου μονοπατιού θα καταστήσει απαράδεκτα ως προς το QoT κάποια υπάρχοντα μονοπάτια, ή πόσο πολύ θα χειροτερεύσει η ποιότητα μετάδοσής τους.

Βάση δεδομένων μετρήσεων

Το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί να επεκταθεί προσθέτοντας μία βάση δεδομένων (DB) η οποία αποθηκεύει παλαιές διατεματικές μετρήσεις μαζί με τα ΙΑ-μονοπάτια που αυτές αντιστοιχούν. Η βάση μπορεί να ανανεωθεί όταν ένα καινούριο μονοπάτι εγκαθίσταται ή όταν χρειάζεται η εκτίμηση ενός νέου μονοπατιού (επειδή συγκεκριμένες λειτουργίες του πλαισίου και της βάσης είναι κοινές, δηλαδή οι λειτουργίες του Αλγορίθμου 1). Η βάση μπορεί να έχει ένα πεδίο που θα κρατάει την ηλικία της κάθε μέτρησης ούτως ώστε να αφαιρούνται παλιές μετρήσεις οι οποίες μπορεί να είναι πλέον άχρηστες λόγω γήρανσης του εξοπλισμού ή λόγω άλλων χρονικά μεταβαλλόμενων φαινομένων. Οι τεχνικές λεπτομέρειες σχετικά με την ενσωμάτωση της βάσης στο πεδίο ελέγχου του δικτύου είναι έξω από το πεδίο της παρούσης έρευνας. Επίσης, μία τέτοια βάση μπορεί να γεμίσει πολύ γρήγορα γιατί αποθηκεύουμε πληροφορία για τα ΙΑ-μονοπάτια και έτσι για ένα συγκεκριμένο μονοπάτι μπορεί να αντιστοιχούν πολλές καταχωρήσεις στη βάση. Όποτε εγκαθίσταται ένα καινούριο μονοπάτι αυτό πυροδοτεί πολλαπλές εισαγωγές στη βάση επειδή επηρεάζει όλους τους κοντινούς του γείτονες και έτσι αυτοί επαναδρομολογούνται στον G' . Για να το πούμε διαφορετικά κάθε επηρεασμένο μονοπάτι για το οποίο θέλουμε να εκτιμήσουμε το QoT του μπορεί να μας δώσει μία καινούρια μέτρηση (και μία καινούρια καταχώρηση στη βάση) όταν το καινούριο μονοπάτι εγκατασταθεί. Κάποια ΙΑ-μονοπάτια στη βάση μπορεί να δίνουν περίσσεια πληροφορία για συγκεκριμένους ΙΑ-συνδέσμους. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί η αβεβαιότητα των μετρήσεων λόγω π.χ. μειωμένης ακρίβειας των DSP αλγορίθμων. Όταν η βάση δεν έχει πολλές μετρήσεις τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά μονοπάτια τα

οποία εγκαθιστώνται αποκλειστικά για λόγους εκτίμησης και τα οποία δεν μεταφέρουν χρήσιμη πληροφορία. Τέτοια μονοπάτια μπορούν να επιλεγούν για να προσθέσουν στη βάση την μέγιστη δυνατή καινούρια πληροφορία ή και να μειώσουν τον απαιτούμενο αριθμό των ΙΑ-μονοπατιών που απαιτούνται για ακριβή εκτίμηση.

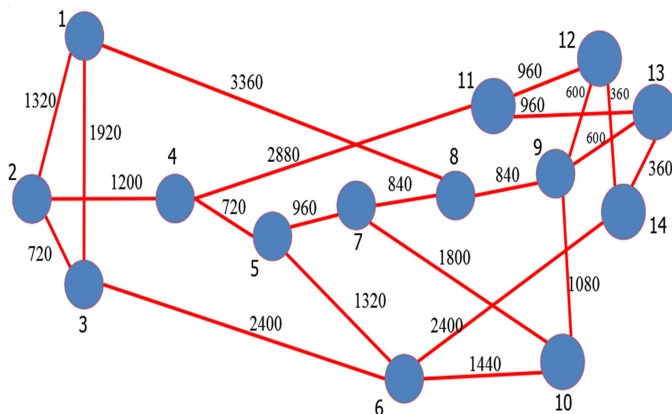
Στο πλαίσιο που αναπτύξαμε, κάθε φορά που χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι, ο πίνακας R_M ενσωματώνεται με τις ξένες (disjoint) γραμμές της βάσης οι οποίες είναι υπερασύνολο των εγκατεστημένων μονοπατιών. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η ακρίβεια εκτίμησης.

Προσομοιώσεις

Για να μετρήσουμε την απόδοση (ακρίβεια) του πλαισίου εκτίμησης διεξάγαμε μία σειρά από πειράματα. Πιο συγκεκριμένα αξιολογήσαμε το πλαίσιο σε δύο σενάρια: (i) ένα WDM δίκτυο με ένα ή δύο διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και (ii) ένα ελαστικό οπτικό δίκτυο (EON) χρησιμοποιώντας δύο ρυθμούς μετάδοσης και διάφορες επιλογές χρησιμοποίησης σχισμών. Χρησιμοποιήσαμε δύο τοπολογίες δικτύων: NSFNET (Εικόνα 4), με 14 κόμβους και 22 αμφίδρομους συνδέσμους με μήκη την πραγματική ευκλείδεια απόσταση των κόμβων πολλαπλασιασμένη επί 1.2, και ένα τροποποιημένο Ευρωπαϊκό δίκτυο SPARKLE (Εικόνα 5) με 49 κόμβους και 63 αμφίδρομους συνδέσμους. Οι αλλαγές που κάναμε στο δίκτυο SPARKLE ήταν να θέσουμε το ελάχιστο μήκος συνδέσμου στα 80 Km, ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός του GN μοντέλου για απώλειες span μεγαλύτερες των 7 dB, και να αγνοήσουμε τους διπλούς συνδέσμους μεταξύ κόμβων και να θεωρήσουμε μόνο τους συνδέσμους με το μικρότερο μήκος.

Οι σύνδεσμοι υποθέτουμε ότι αποτελούνται από single mode fiber (SMF) με συντελεστή εξασθένησης 0.25 dB/km, παράμετρο διασποράς 16.7 ps/nm/km, και μη γραμμικό συντελεστή 1.3 1/W/km. Το μήκος του span και στις δύο τοπολογίες τέθηκε ίσο το πολύ με 100 Km, και οι EDFA ενισχυτές θεωρούμε ότι αντισταθμίζουν πλήρως τις απώλειες τις ίνας και έχουν παράμετρο θορύβου 6 dB. Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν ίνες αντιστάθμισης της διασποράς και οι DSP στους δέκτες εκτελούν τέλεια αντιστάθμιση της διασποράς και MIMO ισοστάθμιση.

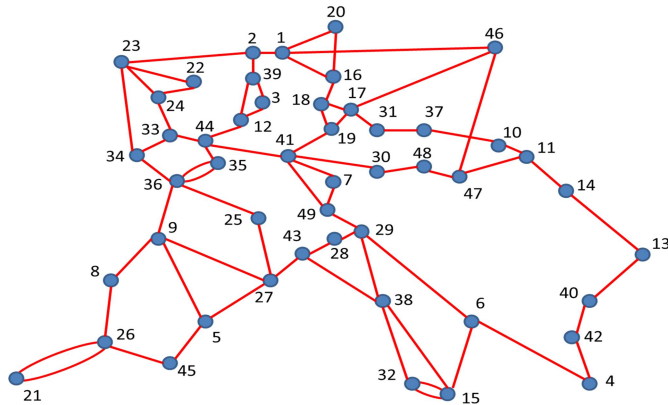
Για το WDM δίκτυο θεωρούμε 50 GHz grid, 80 μήκη κύματος και δύο διαφορετικά σενάρια:



Εικόνα 4 Το NSFNET δίκτυο με τα μήκη συνδέσμων σε χλμ

“WDM- 1 baudrate” υποθέτει 100Gbps PM-QPSK με 28 Gbaud, και το “WDM- 2 baudrate” υποθέτει δύο διαφορετικούς ρυθμούς συμβόλου: 28 και 32Gbaud, οι οποίοι αναπαριστούνται από διαφορετικούς ΙΑ-συνδέσμους στο ΙΑ-γράφο. Για το EON υποθέσαμε PM-QPSK με 32 και 56 Gbaud (100 και 200Gbps, αντίστοιχα). Θεωρήσαμε δύο υποσενάρια: “EON-ScenA” υποθέτει 32 Gbaud συνδέσεις με 3 σχισμές (37.5 GHz), και 56 Gbaud με 5 ή 6 σχισμές (62.5 and 75 GHz). “EON-ScenB”

υποθέτει 3 και 4 σχισμές για το 32Gbaud και 5, 6, ή 7 σχισμές για το 56 Gbaud. Ο συνολικός αριθμός των γειτόνων ήταν $\gamma=4$, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Για τα EON σενάρια χρησιμοποιήσαμε ως z , το ελάχιστο αριθμό σχισμών που μπορεί να χρησιμοποιεί ένα μονοπάτι, δηλαδή $z=3$ σχισμές και για το ScenA και για το ScenB.



Εικόνα 5 Το τροποποιημένο Ευρωπαϊκό δίκτυο SPARKLE

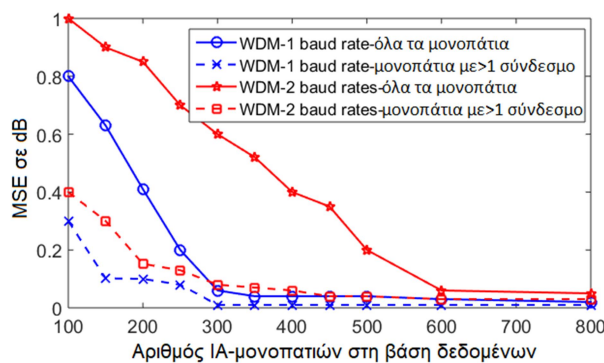
Οι αιτήσεις για την εγκατάσταση μονοπατιών φτάνουν σύμφωνα με μία Poisson διαδικασία με ρυθμό λ . Οι προορισμοί είναι κατανεμημένοι ομοιόμορφα για όλους τους κόμβους και οι διάρκειες των συνδέσεων είναι εκθετικά κατανεμημένες με μέση τιμή $1/\mu$. Με την άφιξη μία αίτησης για ένα μονοπάτι από μία πηγή σε έναν προορισμό, χρησιμοποιούμε ως Routing and Wavelength Assignment (RWA) έναν αλγόριθμο δρομολόγησης συντομότερου μονοπατιού με ανάθεση

μήκους κύματος “first-fit” δηλαδή το πρώτο διαθέσιμο μήκος κύματος. Στα EON σενάρια χρησιμοποιείται ένας route and spectrum assignment (RSA) αλγόριθμος με τις ίδιες αρχές όπως ο προαναφερόμενος RWA. Σημειώνουμε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός εκτίμησης μπορεί να δουλέψει για οποιοδήποτε άλλον RWA/RSA αλγόριθμο, επειδή οποιοσδήποτε αλγόριθμος μπορεί να επωφεληθεί από μία πιο ακριβή εκτίμηση των φυσικών παραμέτρων. Στην πραγματικότητα τα οφέλη είναι ακόμα περισσότερα για τα πιο μακρινά μονοπάτια (επειδή η ποιότητα μετάδοσής τους είναι χειρότερη) και έτσι οποιοσδήποτε RWA/RSA αλγόριθμος που χρησιμοποιεί εναλλακτικά μονοπάτια και όχι τα συντομότερα θα παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερα οφέλη.

Ο χρόνος που χρειάζονται οι αλγόριθμοι για να κατασκευάσουν τον IA-γράφο και για να εκτιμήσουν το pre-FEC BER από το SNR σε MATLAB ήταν 0.9, 1.8, 8.2 sec για 300, 600, 1000 γνωστά IA-μονοπάτια (συμπεριλαμβανομένων αυτών της βάσης) σε έναν Intel Core-i5 4210U (2 cores@2.7GHz).

Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης ενός μονοπατιού προτού αυτό εγκατασταθεί

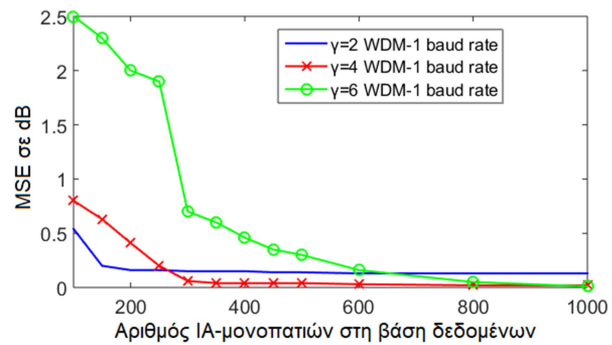
Εξετάζουμε την ακρίβεια της εκτίμησης του πλαισίου μας χρησιμοποιώντας το Mean Squared Error (MSE) για την pre-FEC BER εκτίμηση ως συνάρτηση του αριθμού των IA-μονοπατιών που είναι διαθέσιμα στη βάση. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζουμε την $\log(\text{pre-FEC BER})$ εκτίμηση ενός νέου μονοπατιού και μετά τη συγκρίνουμε με την $\log(\text{pre-FEC BER})$ που υπολογίζουμε με το GN model. Η μέθοδος Network kriging (NK) και η ελαχιστοποίηση νόρμας Norm minimization (NM) βρέθηκαν να παρέχουν σχεδόν ίσα αποτελέσματα, με την NM να παρέχει ελαφρώς πιο ακριβή αποτελέσματα και για αυτό τη χρησιμοποιούμε για όλα τα παρακάτω αποτελέσματα. Η Εικόνα 6 παρουσιάζει το MSE του πλαισίου εκτίμησης για το WDM σενάριο στο NSFNET δίκτυο.



Εικόνα 6 Pre-FEC BER εκτίμηση Mean Squared Error (MSE) για δύο WDM σενάρια

Παρατηρούμε ότι όταν ο αριθμός των IA-μονοπατιών στη βάση είναι μικρός, τότε το MSE είναι υψηλό. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία για πολλούς IA-συνδέσμους. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ακρίβεια εκτίμησης ήταν μεταξύ 0.01 και 0.5 dB. Η διαφορά ήταν μεγαλύτερη για τα μονοπάτια που αποτελούνταν μόνο από έναν σύνδεσμο. Αυτά τα μονοπάτια έχουν συνήθως χαμηλό pre-FEC BER και άρα αυτή η

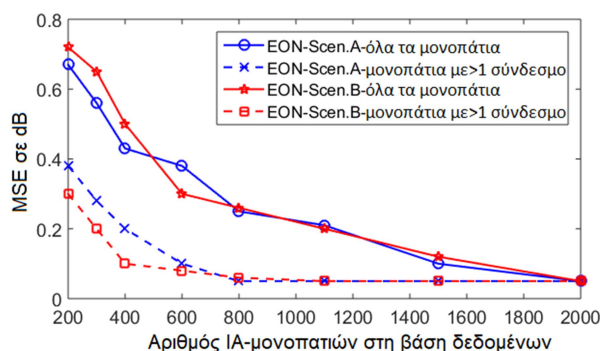
ανακρίβεια δεν είναι σημαντική στην πράξη. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζουμε επίσης και το MSE για μονοπάτια που έχουν τουλάχιστον δύο συνδέσμους. Σε αυτήν την περίπτωση η ακρίβεια είναι αρκετά βελτιωμένη. Για να πετύχουμε αμελητέα MSE (μικρότερη από 0.05) στο WDM NSFNET δίκτυο, η βάση πρέπει να έχει γύρω στα 400 IA-μονοπάτια (το οποίο μεταφράζεται σε περίπου 160 μονοπάτια στο αρχικό γράφο-δίκτυο) για το σενάριο με ένα ρυθμό συμβόλου, και περίπου 700 (180 μονοπάτια στο αρχικό δίκτυο) για το σενάριο με τους δύο ρυθμούς συμβόλου. Η βάση γεμίζει πολύ γρήγορα επειδή η εγκατάσταση ενός νέου μονοπατιού προκαλεί παρεμβολές στα γειτονικά μονοπάτια και άρα επαναδρομολογεί πολλά IA-μονοπάτια. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί νέες καταχωρήσεις στη βάση.



Εικόνα 7 Pre-FEC BER εκτίμηση Mean Squared Error (MSE) για διαφορετικό αριθμό γειτόνων γ

Μία άλλη ενδιαφέρουσα μετρική πέρα από το MSE, είναι η μέγιστη υπερεκτίμηση maximum overestimation (MO) του pre-FEC BER, αφού αυτή μας δίνει το QoT περιθώριο που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ώστε να είμαστε πάντα ασφαλής (ποτέ να μην υπερεκτιμούμε το QoT). Για το σενάριο του ενός ρυθμού συμβόλου το MO ήταν 0.1 dB για 1000 IA-μονοπάτια, ενώ για το σενάριο με τους δύο ρυθμούς συμβόλου, το ίδιο MO χρειάζεται περίπου 1800 IA-μονοπάτια.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει την ακρίβεια σε MSE για το σενάριο ενός ρυθμού συμβόλου WDM λαμβάνοντας υπόψιν τις παρεμβολές από διαφορετικό αριθμό γειτονικών καναλιών, και πιο συγκεκριμένα θεωρώντας $\gamma=2$, $\gamma=4$ και $\gamma=6$ γειτονικά κανάλια συνολικά και από τις δύο πλευρές. Παρατηρούμε ότι για $\gamma=2$ (δηλ. 3 IA-συνδέσμους για κάθε αρχικό σύνδεσμο) το MSE του pre-FEC BER είναι σχετικά χαμηλό ακόμα και για μικρό αριθμό IA-μονοπατιών, αλλά μετά από περίπου 200 IA-μονοπάτια το MSE παραμένει σταθερό στα 0.13 dB και η μέγιστη υπερεκτίμηση είναι 0.2 dB. Η καλή ακρίβεια με τα λίγα IA-μονοπάτια προέρχεται από το γεγονός ότι χρειάζονται λίγοι IA-σύνδεσμοι και έτσι ακόμα και ένας μικρός αριθμός δεδομένων στη βάση είναι αρκετός για να παρέχει την απαιτούμενη πληροφορία για αυτούς τους συνδέσμους. Όμως αυτό προκαλεί και τον κορεσμό της ακρίβειας εκτίμησης μετά από 200 IA-μονοπάτια. Η απουσία λεπτομέρειας στη μοντελοποίηση των παρεμβολών περιορίζει το πλαίσιο εκτίμησης από αρκετή πληροφορία και έτσι περιορίζει και την ακρίβειά του. Όταν $\gamma=6$ (τότε χρειάζονται 36 IA-σύνδεσμοι) παρατηρούμε ότι αρχικά το MSE είναι αρκετά υψηλό και περίπου 1000 IA-μονοπάτια χρειάζονται για να πέσει στο 0.01 (μέγιστη υπερεκτίμηση 0.08 dB), το οποίο είναι αρκετά χαμηλότερο από την ακρίβεια που επιτυγχάνεται με $\gamma=2$. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο μεγάλος αριθμός των IA-συνδέσμων απαιτεί πολλά IA-μονοπάτια για να αποκτηθούν οι αντίστοιχες συσχετισμένες τιμές. Ο μικρός αριθμός IA-μονοπατιών περιέχει αντίστοιχα και μικρό αριθμό IA-συνδέσμων και όπως είδαμε στην προηγούμενη υποενότητα όταν δεν υπάρχει πληροφορία για έναν IA-σύνδεσμο τότε χρησιμοποιούμε έναν ισοδύναμο σύνδεσμο ο οποίος αντιστοιχεί



Εικόνα 8 Pre-FEC BER εκτίμηση Mean Squared Error (MSE) για το σενάριο ελαστικού δικτύου

επιτυγχάνεται με $\gamma=2$. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο μεγάλος αριθμός των IA-συνδέσμων απαιτεί πολλά IA-μονοπάτια για να αποκτηθούν οι αντίστοιχες συσχετισμένες τιμές. Ο μικρός αριθμός IA-μονοπατιών περιέχει αντίστοιχα και μικρό αριθμό IA-συνδέσμων και όπως είδαμε στην προηγούμενη υποενότητα όταν δεν υπάρχει πληροφορία για έναν IA-σύνδεσμο τότε χρησιμοποιούμε έναν ισοδύναμο σύνδεσμο ο οποίος αντιστοιχεί

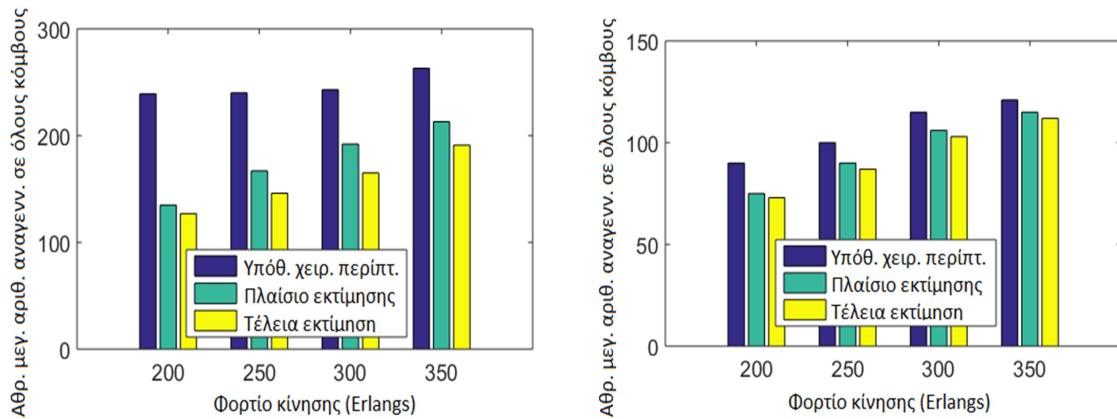
σε περισσότερους ενεργούς γείτονες. Αυτή η απόφαση λαμβάνεται για να είμαστε πάντα συντηρητικοί και να υποεκτιμούμε το QoT, θυσιάζοντας παράλληλα την ακρίβεια εκτίμησης. Ο χρόνος εκτέλεσης για $\gamma=2$ είναι περίπου ο ίδιος με $\gamma=4$, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για $\gamma=6$ είναι κοντά σε αυτόν με $\gamma=4$ (περίπου 1 sec πιο αργό για 1000 μονοπάτια). Η καλή ακρίβεια εκτίμησης και ο μικρός αριθμός IA-μονοπατιών που απαιτούνται για $\gamma=4$ το κάνει την καλύτερη επιλογή για τις περισσότερες περιπτώσεις αφού η βάση μπορεί να γεμίσει γρήγορα και να ανανεωθεί σε αλλαγές του δικτύου όπως γήρανση εξοπλισμού και χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα.

Η Εικόνα 8 απεικονίζει την ακρίβεια του πλαισίου για το EON για δύο σενάρια: EON-ScenA και EON-ScenB. Παρατηρούμε ότι το MSE είναι γενικά υψηλότερο από το WDM σενάριο, λόγω των ανακριβειών που οφείλονται στα χαλαρωμένα κριτήρια γειτνίασης για τα EON δίκτυα. Επίσης το MSE του σεναρίου A είναι ελαφρώς χειρότερο από του B, επειδή το επιπλέον σύνολο σχισμών για κάθε ρυθμό συμβόλου εισάγει επιπλέον πηγές ανακριβείας. Για να επιτύχουμε MSE μικρότερο από 0.05 για τα σενάρια A και B, απαιτούνται 2000 IA-μονοπάτια, που δείχνει ότι τα χαλαρωμένα κριτήρια είναι αρκετά καλά. Η μέγιστη υπερεκτίμηση του BER για αυτών τον αριθμό IA-μονοπατιών είναι 0.3 dB για μονοπάτια που περιέχουν πάνω από ένα σύνδεσμο και 1.2 dB για τα μονοπάτια που αποτελούνται μόνο από ένα σύνδεσμο. Αν λάβουμε υπόψιν μόνο τα μονοπάτια των οποίων το QoT είναι κοντά στο όριο απόρριψης (στην δική μας περίπτωση αυτό είναι -2 dB), τότε το MO είναι 0.2dB. Αυτό συμβαίνει γιατί η κλίση της erf συνάρτησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του BER [12] είναι μικρή όταν το BER είναι υψηλό. Ως αποτελεσματικό αποτέλεσμα λείπουν οι μικρές αποκλίσεις στο SNR δεν μεταφράζονται σε αντίστοιχες αποκλίσεις στο BER. Όπως ήταν αναμενόμενο το περιθώριο είναι υψηλότερο από ότι του WDM σεναρίου.

Εξοικονόμηση Αναγεννητών

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, οι καλύτερες εκτιμήσεις QoT μεταφράζονται σε διάφορα πλεονεκτήματα για τον διαχειριστή του δικτύου. Σε αυτή την παράγραφο υπολογίζουμε τα οφέλη σε αναγεννητές που το πλαίσιο μας μπορεί να επιτύχει όταν συγκριθεί με το σενάριο των παρεμβολών χειρότερης περίπτωσης, δηλαδή ότι όλα τα μονοπάτια είναι ταυτόχρονα αναμμένα. Επίσης υπολογίζουμε τον αριθμό των αναγεννητών που θα χρειάζονταν αν οι πραγματικές τιμές BER των μονοπατιών ήταν γνωστές προτού τα εγκαταστήσουμε (το αναφέρουμε ως *perfect estimation*). Στα πειράματά μας αυτό το επιτυγχάνουμε εγκαθιστώντας το μονοπάτι και χρησιμοποιώντας το GN model για να υπολογίσουμε το pre-FEC BER. Τοποθετούμε αναγεννητές σε έναν κόμβο όταν ένα μονοπάτι έχει μη αποδεκτό pre-FEC BER. Αν το BER είναι μη αποδεκτό ακόμη και μετά μόνο από έναν σύνδεσμο (π.χ., 200G μετάδοση πάνω από ένα μεγάλο σύνδεσμο) τότε υποθέτουμε ότι ο αναγεννητής τοποθετείται στη μέση του συνδέσμου. Αυτό απαιτείται μόνο σε ένα σύνδεσμο της NSFNET τοπολογίας. Το pre-FEC BER όριο τέθηκε στα -2 dB για τα 28 και 32 Gbaud υποθέτοντας 20% FEC, και στα -1.88 dB για τα 56 Gbaud υποθέτοντας 28% FEC. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της ακρίβειας της προηγούμενης παραγράφου (MO μετρική) χρησιμοποιούμε 0.1 dB περιθώριο για να λάβουμε υπόψιν το λάθος εκτίμησης για το WDM σενάριο. Αυτό σημαίνει ότι αν το πλαίσιο μας υπολογίσει το pre-FEC BER ενός WDM μονοπατιού *lightpath* να είναι ίσο με -2.1 dB τότε θα χρειαστεί αναγεννητής παρόλο που το όριο είναι -2 dB. Παρόμοια για το EON χρησιμοποιούμε περιθώριο 0.2 dB. Το προτεινόμενο πλαίσιο χρησιμοποιείται επίσης και για να εκτιμήσει την υποβάθμιση που ένα καινούριο μονοπάτι προκαλεί στα ήδη υπάρχοντα: ο RWA/RSA αλγόριθμος αρχικά διαλέγει το πρώτο διαθέσιμο μήκος κύματος/σειρά από σχισμές και μετά διαλέγει το επόμενο κατά σειρά σε περίπτωση που η πρώτη επιλογή υποβαθμίζει κάποιο μονοπάτι πέρα από το όριο.

Η Εικόνα 9 απεικονίζει τα οφέλη ως προς το μέγιστο αριθμό αναγεννητών για το WDM δίκτυο με 1 baud-rate για την NSFNET τοπολογία. Παρατηρούμε ότι τα οφέλη είναι έως 47% (για το χαμηλότερο φορτίο) για το προτεινόμενο πλαίσιο μας σε σύγκριση με το σενάριο παρεμβολών

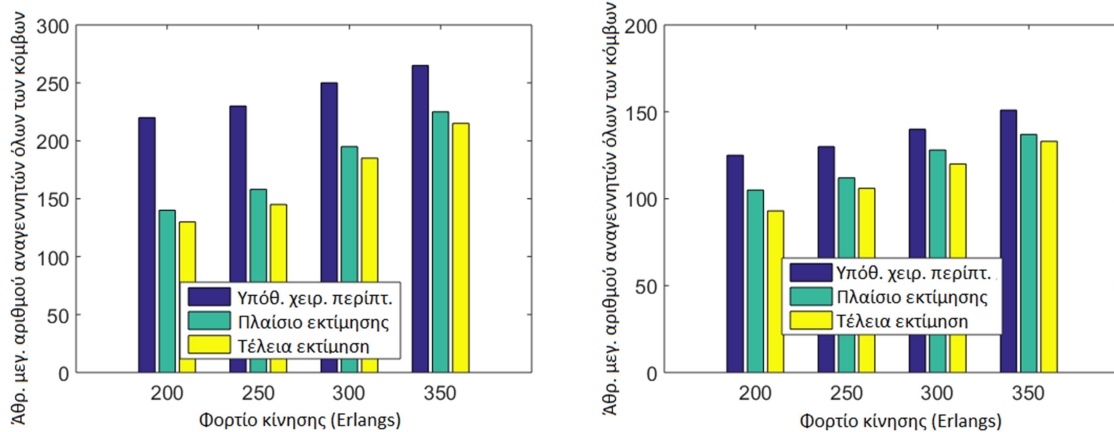


Εικόνα 9 Συνολικός αριθμός μέγιστων αναγεννητών για όλους τους κόμβους για το WDM σενάριο σε (α)NSFNET, και σε (β) SPARKLE

χειρότερης περίπτωσης. Αυτό επιτεύχθηκε επειδή το πλαίσιο μας επιτυγχάνει έως 0.04 χαμηλότερο pre-FEC BER (1.4 dB) σε σύγκριση με το σενάριο χειρότερης περίπτωσης που υποεκτιμά το QoT. Το πλαίσιο μας χρειάζεται λιγότερο από 5% περισσότερους αναγεννητές σε σχέση με την perfect estimation περίπτωση, που υποθέτει ότι ξέρουμε επακριβώς το pre-FEC BER, αποδεικνύοντας την πολύ καλή ακρίβεια του εκτιμητή μας. Όταν το φορτίο του δικτύου αυξάνει, περισσότερα μονοπάτια είναι ταυτόχρονα αναμμένα και έτσι η ποιότητα μετάδοσής τους μειώνεται και πλησιάζει σε αυτή της χειρότερης περίπτωσης. Ως αποτέλεσμα όσο το φορτίο αυξάνεται ο απαιτούμενος αριθμός αναγεννητών για το πλαίσιο μας και για το perfect estimation case πλησιάζει σε αυτόν του χειρότερου σεναρίου και τα οφέλη μειώνονται. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούμε και για τα μέγιστα οφέλη σε αναγεννητές για ένα κόμβο. Το πλαίσιο μας χρειάζεται 21 αναγεννητές σε έναν κόμβο ενώ το σενάριο χειρότερης περίπτωσης 41.

Στην Εικόνα 9β παρουσιάζουμε τα οφέλη για το SPARKLE δίκτυο για το ίδιο WDM σενάριο. Τα οφέλη για το συνολικό αριθμό αναγεννητών ήταν έως 15%. Ο μέγιστος αριθμός αναγεννητών σε έναν κόμβο ήταν 11 για το πλαίσιο μας και 19 για το σενάριο παρεμβολών χειρότερης περίπτωσης. Ο λόγος που τα οφέλη είναι μικρότερα είναι ότι το SPARKLE δίκτυο έχει πολύ μικρότερους συνδέσμους σε σχέση με το NSFNET. Έτσι το QoT των περισσότερων μονοπατιών δεν φτάνει μέχρι το όριο αναγέννησης που θέσαμε. Επίσης τα οφέλη που παρουσιάζει και το σενάριο perfect estimation είναι και αυτά περιορισμένα με το πλαίσιο μας να είναι 5% χειρότερο. Συμπερασματικά το πλαίσιο μας λειτουργεί αρκετά καλά ακόμα και σε μία τοπολογία όπου τα οφέλη είναι περιορισμένα.

Η Εικόνα 10α απεικονίζει τα οφέλη σε αναγεννητές για το EON σενάριο A (EON-ScenA) στο NSFNET δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση το σενάριο χειρότερης περίπτωσης ορίζεται ως το να έχουμε όλα τα γειτονικά κανάλια αναμμένα χρησιμοποιώντας το χαμηλότερο ρυθμό συμβόλου και τον ελάχιστο δυνατό αριθμό από σχισμές. Τα οφέλη που παρατηρούμε για το συνολικό αριθμό των αναγεννητών είναι έως 36%. Επίσης ο μέγιστος αριθμός αναγεννητών σε έναν κόμβο ήταν 47 για το σενάριο χειρότερης περίπτωσης και 34 όταν χρησιμοποιείται το πλαίσιο μας. Η Εικόνα 10β απεικονίζει τα αποτελέσματα για το EON στη SPARKLE τοπολογία. Τα αντίστοιχα κέρδη είναι περίπου 12%. Ο μέγιστος αριθμός αναγεννητών σε έναν κόμβο είναι 12 για το πλαίσιο μας και 21 για το σενάριο χειρότερης περίπτωσης. Παρατηρούμε ότι τα επί τις εκατό κέρδη στο EON σενάριο είναι λιγότερα από αυτά του WDM και στις δύο τοπολογίες. Ο λόγος είναι ότι τα χαλαρά κριτήρια γειτνίασης που χρησιμοποιούνται στην EON περίπτωση έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερο MSE και χρησιμοποιούμε υψηλότερο περιθώριο 0.2dB για αυτό το λόγο. Το αυξημένο περιθώριο είναι αναμενόμενο να απαιτεί περισσότερους αναγεννητές αφού αυτό προστίθεται στο όριο αναγέννησης της ιδανικής περίπτωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται 7% περισσότερους αναγεννητές



Εικόνα 10 Συνολικός αριθμός μέγιστων αναγεννητών για όλους τους κόμβους για το ελαστικό σενάριο σε (α) NSFNET, και (β) σε SPARKLE

σε σχέση με το σενάριο perfect estimation όπου ξέρουμε επακριβώς το BER, και το οποίο είναι ελαφρώς υψηλότερο από το 5% που παρατηρήσαμε στο WDM σενάριο. Επίσης παρατηρούμε ότι η διαφορά στον αριθμό των αναγεννητών μεταξύ την ιδανικής περίπτωσης και του σεναρίου χειρότερης περίπτωσης είναι μικρότερη από αυτή του WDM σεναρίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το EON σενάριο χρησιμοποιεί 56 Gbaud συνδέσεις οι οποίες είναι πιο επιρρεπής στις παρεμβολές από ότι οι 32 Gbaud, και για αυτό χρειάζονται περισσότεροι αναγεννητές ακόμα και στο perfect estimation σενάριο. Συμπερασματικά παρόλο που χρειάζονται υψηλότερα περιθώρια για τα EONs, η ακρίβεια του πλαισίου μας είναι αρκετά καλή και παρέχει σημαντικά οφέλη σε αναγεννητές.

Σημειώνουμε ότι στα παραπάνω πειράματα εστίασαμε σε περιπτώσεις όπου η απόρριψη (το μπλοκάρισμα) των συνδέσεων λόγω έλλειψης ελεύθερου φάσματος κατά μήκος όλης της σύνδεσης είναι μηδενικό. Επειδή οι αναγεννητές λειτουργούν και ως μετατροπείς μήκους κύματος, ένας μεγάλος αριθμός από αναγεννητές θα βελτιώνει το ρυθμό απόρριψης όταν αυτός εμφανιζόταν. Όμως όταν το δίκτυο φτάσει σε αυτό το όριο ο διαχειριστής του δικτύου θα λάβει πιο δραστικά μέτρα από το να προσθέτει αναγεννητές για να χαλαρώσει τους περιορισμούς στο μήκος κύματος, όπως για παράδειγμα να αναβαθμίσει μέρος του δικτύου με transponders υψηλότερου ρυθμού ή να εγκαταστήσει περισσότερες οπτικές ίνες. Ο στόχος μας είναι στην ελαχιστοποίηση των εξόδων αγνοώντας το ρυθμό απόρριψης του δικτύου που παρουσιάζεται κοντά στο τέλος ζωής του. Επίσης η παραπάνω σύγκριση εστιάζει μόνο στις παρεμβολές υποθέτοντας καλή γνώση των παραμέτρων του δικτύου και σταθερή απόδοση του εξοπλισμού. Η εγκατάσταση μονοπατιών με το σενάριο χειρότερης εκτίμησης αλλά και με περιθώρια τέλους ζωής end-of-life ageing (system margins), και λαμβάνοντας υπόψιν ανακρίβειες εκτίμησης (design margins), όπως συνήθως γίνεται, θα είχε ως αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερο αριθμό απαιτούμενου εξοπλισμού. Άρα τα οφέλη του πλαισίου εκτίμησης μπορούν να είναι ακόμα υψηλότερα αν λάβουμε υπόψιν ότι μπορούν να μειωθούν τόσο τα design όσο και τα system margins λαμβάνοντας υπόψιν την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου.

Συμπεράσματα

Παρουσιάσαμε ένα καινούριο QoT πλαίσιο εκτίμησης για WDM και EON δίκτυα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν εγκαθίστανται καινούρια μονοπάτια. Χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματισμό γράφου λάβαμε υπόψιν τόσο χωρικές όσο και φασματικές πληροφορίες κατά το υπολογισμό του QoT ενός καινούριου μονοπατιού προτού αυτό εγκατασταθεί. Επίσης υπολογίσαμε και την υποβάθμιση που αυτό αναμένεται να προκαλέσει στα ήδη υπάρχοντα μονοπάτια αν εγκατασταθεί. Οι εκτιμήσεις που λάβαμε ήταν αρκετά ακριβείς και έχουν ως αποτέλεσμα

χαμηλότερα περιθώρια όταν εγκαθιστώνται καινούρια μονοπάτια. Η ακρίβεια του πλαισίου ήταν ελαφρώς χειρότερη στα EON σε σύγκριση με τα WDM, λόγω του υψηλότερου αριθμού καταστάσεων παρεμβολής που μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας χαλαρωμένα κριτήρια. Η υψηλή ακρίβεια του προτεινόμενου πλαισίου οδηγεί σε σημαντικά οφέλη σε απαιτούμενους αναγεννητές σε σύγκριση με το να εγκαθιστάμε μονοπάτια λαμβάνοντας υπόψιν το σενάριο παρεμβολών χειρότερης περίπτωσης ότι όλα τα κανάλια είναι ταυτόχρονα αναμμένα.

Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση ποιότητας μετάδοσης με Μηχανική Μάθηση

Σύνοψη

Παρουσιάζουμε δύο προσεγγίσεις για την μοντελοποίηση ενός ακριβή εκτιμητή QoT χρησιμοποιώντας μεθόδους μηχανικής μάθησης – Machine Learning (ML). Συλλέγουμε δεδομένα από το φυσικό επίπεδο παρακολουθώντας την ποιότητα μετάδοσης των εγκατεστημένων μονοπατιών για να κατανοήσουμε τις πραγματικές συνθήκες του δικτύου. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να εκπαιδευτούν είτε οι παράμετροι εισόδου ενός μοντέλου φυσικού επιπέδου-physical layer model (PLM) είτε ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης - machine learning model (ML-M). Οι προτεινόμενες ML μέθοδοι λαμβάνουν υπόψιν διακυμάνσεις και αβεβαιότητες στις παραμέτρους του εξοπλισμού όπως η εξασθένηση της ίνας, διασπορά και μη γραμμικοί συντελεστές ή παράμετρος θορύβου του ενισχυτή που είναι συνηθισμένες σε πραγματικά δίκτυα. Αξιολογούμε την ακρίβεια των προτεινόμενων μεθόδων για διάφορα σενάρια αβεβαιότητας των παραμέτρων και τις συγκρίνουμε με άλλους QoT εκτιμητές της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι εκτιμητές μας έχουν άριστη ακρίβεια εκτίμηση με σχετικά λίγα δεδομένα, και είναι καλύτεροι από άλλους προηγούμενους εκτιμητές.

Εισαγωγή

Έχει γίνει σημαντική έρευνα για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση. Η μηχανική μάθηση έχει επίσης εφαρμοστεί σε διάφορες περιοχές των οπτικών δικτύων τόσο στο φυσικό όσο και στο επίπεδο δικτύου [34]. Σε αυτήν την ενότητα εστιάζουμε σε ML regression, δηλαδή θέλουμε να εκτιμήσουμε μία συγκεκριμένη τιμή για το QoT. Χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικές ML τεχνικές. Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα μοντέλο φυσικού επιπέδου μηχανικής μάθησης machine learning physical layer model (ML-PLM) με συγκεκριμένες παραμέτρους εισόδου (π.χ. εξασθένηση ίνας, διασπορά, μη γραμμικοί συντελεστές) για να εκτιμήσει το QoT. Χρησιμοποιείται μηχανική μάθηση ώστε να εκπαιδευτούν οι παράμετροι εισόδου του PLM και να βελτιωθεί η ακρίβειά του. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί ως εκτιμητή QoT ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης με επίβλεψη. Σε αυτήν την περίπτωση, η επιλογή των χαρακτηριστικών (features) καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του εκτιμητή. Επιλέγουμε τα χαρακτηριστικά του εκτιμητή ώστε να είναι κατάλληλα για ένα ετερογενές δίκτυο. Αξιολογούμε την ακρίβεια των εκτιμητών κάτω από διάφορα σενάρια αβεβαιότητας των παραμέτρων. Παρουσιάζουμε άριστη ακρίβεια εκτίμησης με δεδομένα από ένα σχετικά μικρό αριθμό μονοπατιών. Σε ένα σενάριο brownfield (όπου ο εξοπλισμός του δικτύου είναι ήδη εγκατεστημένος) υπάρχει πληθώρα παρατηρούμενων δεδομένων και οι εκτιμητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ώστε να εγκατασταθούν καινούρια μονοπάτια με μειωμένα περιθώρια και να μειωθούν τα κόστη του δικτύου. Σε ένα σενάριο greenfield (όπου το δίκτυο φτιάχνεται από το μηδέν), ο διαχειριστής του δικτύου θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει αρχικά κάποια μονοπάτια αποκλειστικά για λόγους μετρήσεων έτσι ώστε να εκπαιδευτεί ο εκτιμητής [35], και τα καινούρια μονοπάτια να εγκατασταθούν με μειωμένα περιθώρια. Μία άλλη επιλογή είναι αρχικά τα μονοπάτια να εγκατασταθούν με υψηλά περιθώρια και σε μία επόμενη περίοδο (πχ αναβάθμισης του δικτύου) να εκπαιδύσουμε τους εκτιμητές και να τους χρησιμοποιήσουμε για να προσαρμόσουμε τις παραμέτρους μετάδοσης. Μελέτες όπως η [21] εξετάζουν αυτό το σενάριο υποθέτοντας περιθώριο σχεδίασης (design margin) που μειώνεται σε βάθος χρόνου καθώς αυξάνεται η κίνηση και εγκαθίστανται περισσότερα μονοπάτια στο δίκτυο.

Προηγούμενες εργασίες

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης έχουν εφαρμοστεί τόσο στο φυσικό όσο και στο επίπεδο δικτύου. Στο φυσικό επίπεδο οι τεχνικές ML είναι χρήσιμες λόγω της πολυπλοκότητας της μοντελοποίησης

της μετάδοσης. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα φυσικού επιπέδου που μπορούν να ρυθμίσουν την πολυπλοκότητα σε βάρος της ακρίβειας εκτίμησης. Το κυρίως πρόβλημα για τη χρήση αυτών των μοντέλων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ή της λειτουργίας του δικτύου είναι ότι χρειάζονται ως είσοδο συγκεκριμένες παραμέτρους του φυσικού επιπέδου οι οποίες είναι δύσκολο να μετρηθούν και να έχουμε ακριβή γνώση των τιμών τους κάθε χρονική στιγμή. Επίσης το ίδιο το μοντέλο μπορεί να μην είναι ακριβές. Οι τρέχουσες προσεγγίσεις για το σχεδιασμό του δικτύου θεωρούν ένα δίκτυο που γερνάει (η απόδοση του εξοπλισμού μειώνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου) με εξελισσόμενη κατάσταση του φυσικού επιπέδου και στατική λειτουργία: τα μονοπάτια εγκαθίστανται ώστε να έχουν αποδεκτή ποιότητα μετάδοσης μέχρι το τέλος ζωής του δικτύου χωρίς να χρειαστεί να επαναρυθμιστούν. Κάτω από αυτές τις παραδοχές, χρησιμοποιούνται υψηλά περιθώρια (σχεδίασης και συστήματος) ώστε να καλύψουν τις ανακρίβειες του φυσικού επιπέδου και να λάβουν υπόψιν τις μελλοντικές υποβαθμίσεις. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές μηχανικής μάθησης ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια του PLM, να κατανοηθούν οι πραγματικές συνθήκες και να μειωθούν τα περιθώρια.

Στο επίπεδο δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές μηχανικής μάθησης ώστε να μοχλευθεί η τεράστια και εξελισσόμενη ποσότητα πληροφορίας για να ληφθούν πολύπλοκες αποφάσεις βελτιστοποίησης του δικτύου [34]. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηχανική μάθηση ώστε να i) προληφθούν και να προβλεφθούν αλλαγές στην κίνηση και ii) να εκτελεστεί προληπτική επαναρύθμιση του εικονικού δικτύου (Virtual Network Reconfiguration [36]) ανάλογα με αυτές τις προβλέψεις. Η ML μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για αναγνώριση και εντοπισμό βλαβών, και μετέπειτα επαναρύθμιση για αποκατάσταση [34].

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ML τεχνικών τόσο στο φυσικό επίπεδο όσο και στο επίπεδο δικτύου είναι ότι μπορούν να μαθαίνουν και να προσαρμόζουν συνεχώς τις παραμέτρους τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ένα εξελισσόμενο δίκτυο όπου ο εξοπλισμός γερνάει, αντικαθίσταται ή επιδιορθώνεται και η κίνηση αλλάζει σε όγκο και συμπεριφορά. Για αυτούς τους λόγους οι ML τεχνικές είναι πολύ σημαντικές για τη δυναμική λειτουργία του δικτύου.

Έχει γίνει σημαντική έρευνα για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση. Η εκτίμηση του QoT είναι μία πολύ σημαντική λειτουργία στα οπτικά δίκτυα. Οι μέθοδοι εκτίμησης περιλαμβάνουν επίλυση εξισώσεων Schrödinger, λογισμικό προσομοίωσης όπως VPItransmissionMaker Optical Systems, αναλυτικά μοντέλα χαμηλότερης πολυπλοκότητας, και μέθοδοι βασισμένες στην ανάδραση όπου διάφορες μετρήσεις και παρατηρούμενη πληροφορία συσχετίζονται ώστε να εκτιμηθεί η ποιότητα μετάδοσης καινούριων μονοπατιών. Οι μέθοδοι της τελευταίας περίπτωσης μπορούν να χαρακτηριστούν ML παρόλο που αρχικά δεν είχαν αναφερθεί ως τέτοιες. Οι περισσότερες προηγούμενες εργασίες χρησιμοποιούν διατεματικές παραμέτρους μονοπατιών όπως για παράδειγμα παρατηρούμενη πληροφορία από σύμφωνους δέκτες [13], αλλά υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται μετρητικές συσκευές σε επίπεδο συνδέσμου ή κόμβου [37]. Επιπλέον, οι περισσότερες προηγούμενες εργασίες (όπως και η παρούσα) εστιάζουν στην εκτίμηση μίας διατεματικής μετρικής ποιότητας μετάδοσης Signal to Noise Ratio (SNR) ή Bit Error Ratio (BER), ενός νέου ή επαναρυθμιζόμενου μονοπατιού [38][39][40]. Στην [38], ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται ώστε να μπορεί να προβλέψει με σημαντική ακρίβεια το Optical SNR κάθε Wavelength Division Multiplexing (WDM) καναλιού σε κάθε κόμβο του δικτύου. Παρόλα αυτά η ετερογένεια του δικτύου δεν εξετάζεται.

Ως προς την χρησιμοποιούμενη μέθοδο, κάποιες δημοσιεύσεις χρησιμοποιούν ML classification (κατηγοριοποίηση) [39][40] για να εκτιμήσουν αν ένα νέο μονοπάτι έχει αποδεκτή ποιότητα μετάδοσης ή όχι. Αυτή η μέθοδος όμως έχει διάφορα μειονεκτήματα αφού στην πραγματικότητα δεν

υπάρχουν μη αποδεκτά μονοπάτια ώστε να εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος. Επίσης ο αλγόριθμος μπορεί να πρέπει να εκπαιδευτεί για διαφορετικά FEC όρια αποδοχής (για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης, ποσοστό FEC, κλπ). Αυτά τα μειονεκτήματα δεν τα έχει ένας regressive QoT εκτιμητής αφού μπορεί να εκπαιδευτεί από ένα μεγάλο εύρος QoT τιμών, και η έξοδος του εκτιμητή είναι και αυτή μία QoT τιμή η οποία συγκρίνεται με το όριο αποδοχής. Επιπλέον η μέθοδος του classification δεν δίνει πληροφορία για το περιθώριο, την απόσταση από το αποδεκτό QoT όριο. Αυτή είναι μία πολύ χρήσιμη μετρική για τον διαχειριστή του δικτύου δεδομένου ενός εξελισσόμενου δικτύου με μειούμενα περιθώρια. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την εγκατάσταση καινούριων μονοπατιών και για τον προγραμματισμό αναβαθμίσεων.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι τα χαρακτηριστικά (features) που θα χρησιμοποιεί το ML μοντέλο για να εκτιμήσει το QoT. Μία προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθούν διατεμαχικά χαρακτηριστικά, όπως το συνολικό μήκος του μονοπατιού, ο αριθμός των ενισχυτών, ο ρυθμός συμβόλου κ.α [39]. Όμως τα διατεμαχικά χαρακτηριστικά έχουν το μειονέκτημα ότι δεν αναπαριστούν με ακρίβεια την πραγματικότητα, κυρίως λόγω της ετερογένειας των πραγματικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, συγκεκριμένες παράμετροι όπως το μήκος του span, ο θόρυβος του ενισχυτή, οι παράμετροι της ίνας είναι διαφορετικές από span σε span. Όλα τα δίκτυα είναι ετερογενή ακόμα και από την πρώτη μέρα λειτουργίας τους καθώς υπάρχουν διακυμάνσεις στις τιμές των παραμέτρων ακόμα και στον ίδιο εξοπλισμό λόγω κατασκευαστικών ατελειών. Επίσης σε διαφορετικά σημεία του δικτύου μπορεί να εγκαθίστανται διαφορετικός εξοπλισμός. Όσο το δίκτυο γερνάει και εξελίσσεται, τόσο η ετερογένειά του αυξάνεται γενικά. Ο λόγος μπορεί να είναι διαφορετικός ρυθμός γήρανσης λόγω διαφορετικών περιβαλλοντολογικών συνθηκών, αντικατάσταση ή επισκευή εξοπλισμού και επιδιόρθωση οπτικών ινών. Έτσι συγκεκριμένα διατεμαχικά χαρακτηριστικά όπως το συνολικό μήκος του μονοπατιού παρέχουν περιορισμένη πληροφορία για ακριβή εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης. Για παράδειγμα, δύο μονοπάτια με παρόμοιο μήκος μπορεί να αποτελούνται από spans με διαφορετικό εξοπλισμό και έτσι να έχουν σημαντικές διαφορές στο QoT τους. Αυτές οι διαφορές μπορούν να εξηγηθούν μόνο εν μέρει από τον συνδυασμό διατεμαχικών χαρακτηριστικών (όπως για παράδειγμα αριθμός ενισχυτών). Επειδή όμως δεν υπάρχει συγκεκριμένη πληροφορία για τους χρησιμοποιούμενους συνδέσμους ενός μονοπατιού, η ακρίβεια του QoT δεν θα είναι καλή και θα είναι κατώτερη της ακρίβειας ενός εκτιμητή που χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά σε επίπεδο συνδέσμου. Η ακρίβεια εκτίμησης τυπικά θα χειροτερεύει όσο το δίκτυο γερνάει και οι διακυμάνσεις στις παραμέτρους του εξοπλισμού αυξάνονται αθροιστικά. Ο σωστός ορισμός των χαρακτηριστικών μπορεί να αποφύγει αυτά τα προβλήματα όπως θα δούμε στη συνέχεια. Η [41] δείχνει ότι η ετερογένεια ενός δικτύου μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια του εκτιμητή. Η ίδια εργασία καταγράφει προηγούμενες δουλειές που έχουν γίνει στον τομέα και συγκρίνει διαφορετικές ML μεθόδους όπως random forest και νευρωνικά δίκτυα.

Μία άλλη προσέγγιση για την εκτίμηση του QoT είναι να υποθέσουμε ένα μοντέλο φυσικού επιπέδου και να χρησιμοποιήσουμε πραγματικά μετρητικά δεδομένα για να εκπαιδεύσουμε τις παραμέτρους του και να βελτιώσουμε την ακρίβεια εκτίμησής του. Αυτή η μέθοδος έχει επιδειχθεί να έχει καλή ακρίβεια σε προηγούμενες εργασίες [42][43]. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι με περιορισμένη ή και καθόλου εκπαίδευση μπορούμε να έχουμε μία εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης. Ένα πιθανό γενικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι το μοντέλο μπορεί να μην αναπαριστά επακριβώς τη συμπεριφορά του φυσικού επιπέδου. Για παράδειγμα τα φαινόμενα που προκαλούν τα φίλτρα μπορεί να μην λαμβάνονται υπόψιν από το μοντέλο. Αυτές οι ανακρίβειες επηρεάζουν την ακρίβεια της εκτίμησης. Σε κάθε περίπτωση η εκπαίδευση των παραμέτρων του μοντέλου μπορεί να απορροφήσει κάποιες από τις ανακρίβειες. Πιο συγκεκριμένα ο αλγόριθμος μπορεί να ρυθμίσει τις παραμέτρους με τέτοιο τρόπο ώστε η εκτίμηση του QoT του (ανακριβούς)

PLM να προσεγγίζει αριθμητικά τις τιμές που παρέχονται από τα OPMs. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να παρέχει καλύτερη ακρίβεια από ένα (ανακριβές) PLM που έχει τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Μία πρόσφατη έρευνα [34] περιλαμβάνει διάφορες πρόσφατες δημοσιεύσεις σχετικές με ML σε οπτικά δίκτυα και για εκτίμηση QoT. Σε αυτή την εργασία βασιζόμαστε σε προηγούμενες έρευνες και ερευνούμε διάφορες μοντελοποιήσεις μηχανικής μάθησης ώστε να υλοποιήσουμε δύο ακριβής εκτιμητές QoT που λαμβάνουν υπόψη την ετερογένεια του δικτύου. Ο ένας από τους εκτιμητές χρησιμοποιεί μία καινούρια μοντελοποίηση χαρακτηριστικών σε επίπεδο συνδέσμου. Επίσης κάνουμε ποσοτικοποιημένη σύγκριση της ακρίβειας των εκτιμητών μας σε σχέση με άλλους από προηγούμενες εργασίες.

Προσεγγιστικές Αρχιτεκτονικές

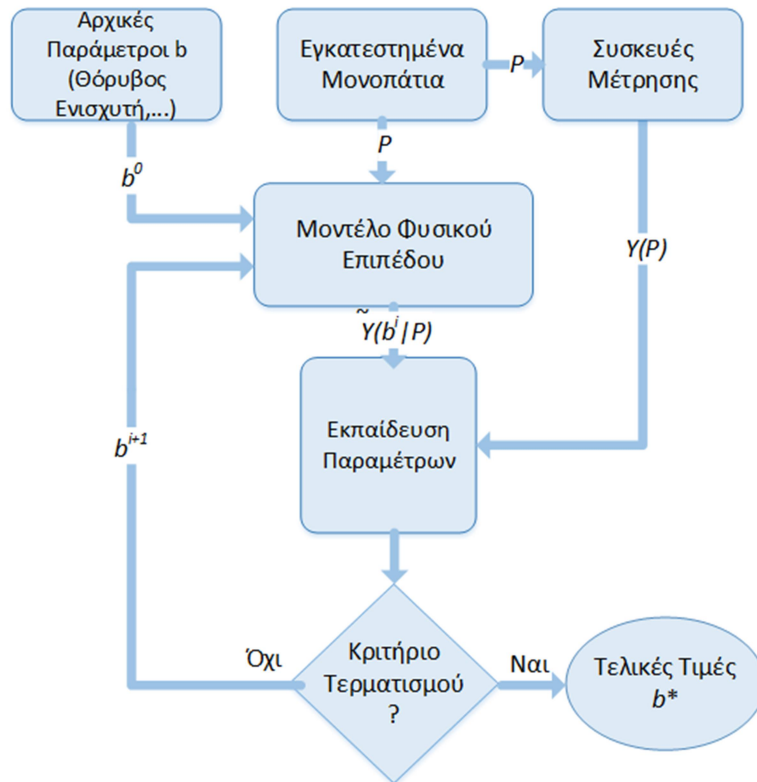
Ένα σημαντικό θέμα στη μηχανική μάθηση είναι η επιλογή της προσεγγιστικής αρχιτεκτονικής, δηλαδή η επιλογή μίας παραμετρικής συνάρτησης η οποία ταιριάζει στο δεδομένο πρόβλημα. Σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιήσουμε τον ίδιο συμβολισμό που είχαμε χρησιμοποιήσει στην προηγούμενη. Πιο συγκεκριμένα μας ενδιαφέρει να επιλέξουμε μία παραμετρική συνάρτηση $\tilde{Q}(r, P)$ η οποία προσεγγίζει την $Q^*(P)$. Το είναι ένα σύνολο ή διάνυσμα παραμέτρων του μοντέλου (π.χ. παράμετροι φυσικού επιπέδου όπως μήκος span, συντελεστές εξασθένησης κλπ). Η παραμετρική συνάρτηση $\tilde{Q}(r, P)$ δεν χρειάζεται να είναι σε κλειστή μορφή. Μπορεί να είναι επίσης η έξοδος ενός προγράμματος υπολογισμού ή μίας προσομοίωσης. Αυτό που είναι σημαντικό είναι (i) η $\tilde{Q}(r, P)$ να προσεγγίζει την $Q^*(P)$ αρκετά καλά και (ii) δεδομένου του διανύσματος r , να είναι εύκολο υπολογιστικά να αποκτήσουμε την $\tilde{Q}(r, P)$ για δεδομένη κατάσταση P . Οι δύο επόμενες υποενότητες περιγράφουν δύο διαφορετικές προσεγγιστικές αρχιτεκτονικές για την $Q^*(P)$, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές επιλογές για την οικογένεια της παραμετρικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται, μία που βασίζεται σε μοντέλο φυσικής μετάδοσης και μία σε εξαγωγή χαρακτηριστικών.

Machine Learning Physical Layer Model (ML-PLM)

Η πρώτη προσέγγιση θεωρεί ένα μοντέλο φυσικού επιπέδου physical layer model (PLM) (όπως αυτά που χρησιμοποιεί η [42][43] ή το GN model[14]) με κάποιες αρχικές τιμές για τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου για κάθε span (π.χ. συντελεστής εξασθένησης ίνας, θόρυβος ενισχυτή κλπ). Σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιήσουμε το GN model ως PLM, αλλά η ανάλυσή μας είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί για άλλα PLMs. Σημειώνουμε ότι δεν λαμβάνουμε υπόψη φαινόμενα που προκαλούν τα φίλτρα. Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων είναι κοντά στις πραγματικές αλλά όχι τόσο κοντά ώστε να παρέχουν ακριβής μετρήσεις. Μπορεί να βασίζονται σε εργασιακά δελτία δεδομένων ή και σε δοκιμές πεδίου οι οποίες όμως δεν μπορούν να γίνουν συνεχώς και έτσι θα είναι μερικώς ανακριβής και ανεπαρκής. Ο σκοπός του ML-PLM είναι να χρησιμοποιήσει πληροφορία από μετρήσεις από τα εγκατεστημένα μονοπάτια έτσι ώστε να εκπαιδεύσει και να μάθει τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου και έτσι να βελτιώσει την ακρίβεια των μελλοντικών εκτιμήσεων QoT.

Όταν χρησιμοποιούμε το μοντέλο PLM ως προσεγγιστική αρχιτεκτονική, η $\tilde{Q}(r, P)$ είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα του οποίου το σύνολο παραμέτρων r αποτελείται από τις παραμέτρους φυσικού επιπέδου b που μπορεί να περιλαμβάνει: το μήκος, την εξασθένηση της ίνας, τη διασπορά, τους μη γραμμικούς συντελεστές ανά span, το θόρυβο του ενισχυτή, το κέρδος του κλπ. Συμβολίζουμε με b_j την j^{th} παράμετρο στο b . Το μοντέλο επίσης χρησιμοποιεί το σύνολο των παραμέτρων των μονοπατιών που περιλαμβάνεται στην κατάσταση του δικτύου P που μπορεί να περιέχει: τη διαδρομή, την κεντρική συχνότητα, το ρυθμό συμβόλου, το σχήμα διαμόρφωσης, την ισχύ κλπ του κάθε μονοπατιού. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι οι παράμετροι στο P

υποθέτουμε ότι είναι γνωστές ενώ οι παράμετροι στο b δεν είναι γνωστές με ακρίβεια και πρέπει να εκτιμηθούν. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα συμβολίσουμε το PLM ως $\tilde{Q}(b, P)$. Χρησιμοποιώντας τις μετρητικές τιμές $Y(P)$, και ανάλογα με το PLM μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλες τεχνικές μηχανικής μάθησης για να βελτιώσουμε την ακρίβεια των παραμέτρων φυσικού επιπέδου b . Έτσι το ML-PLM αναφέρεται στο PLM του οποίου οι παράμετροι μαθαίνονται μέσα από αυτή τη διαδικασία. Σχετικά με τον αλγόριθμο



Εικόνα 11 Διάγραμμα ροής ML-PLM

μάθησης, αν έχουμε κλειστή μορφή για τις μερικές παραγώγους $\partial\tilde{Q}/\partial b_i$ σε σχέση με τις παραμέτρους φυσικού επιπέδου b_i του b , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία μέθοδο «μείωσης της κλίσης» (gradient descent) ώστε να αποκτήσουμε καλύτερες τιμές του b όπως γίνεται στην [42]. Στη δική μας περίπτωση όπου υποθέτουμε μία γενική περίπτωση όπου η συνάρτηση $\tilde{Q}(b, P)$ είναι άγνωστη, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία μη γραμμική μέθοδο επίλυσης. Η μη γραμμική παλινδρόμηση είναι κατάλληλη όταν τα παρατηρούμενα δεδομένα μοντελοποιούνται από μία μη γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων του μοντέλου. Τα δεδομένα προσαρμόζονται με διαδοχικές προσεγγίσεις. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου μας σε σχέση με τις [42][43] είναι ότι στην προσέγγισή μας θεωρούμε ότι το PLM είναι μαύρο κουτί. Έτσι η πρότασή μας είναι πιο γενική και ευέλικτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικά PLM χωρίς αλλαγές. Για να εκτιμήσουμε το b , δίνουμε στο ML-PLM ως είσοδο κάποια δεδομένα εκπαίδευσης στη μορφή ακολουθιών ζευγών μέτρησης $(P, Y(P))$ που θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των πραγματικών QoT μετρικών $(P, Q^*(P))$ που εκτιμούνται από τις μετρητικές συσκευές (monitors). Όταν δεν υπάρχει μετρητικός θόρυβος, έχουμε $(P, Y(P)) = (P, Q^*(P))$. Το ML-PLM εκτιμά το b έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων $Y(P)$ στην ακολουθία εκπαίδευσης και των εξόδων της προσεγγιστικής αρχιτεκτονικής/συνάρτησης του ML-PLM $\tilde{Y}(b|P) = \tilde{Q}(b, P)$ να ελαχιστοποιείται. Οι επαναληπτικές προσεγγίσεις ξεκινούν με κάποιες αρχικές παραμέτρους φυσικού επιπέδου b^0 για κάθε span (π.χ. εξασθένιση ίνας, θόρυβος ενισχυτή κλπ). Σε κάθε επανάληψη i αποκτούμε τις ανανεωμένες παραμέτρους b^{i+1} που ελαχιστοποιούν την απόσταση, όπως αυτή ορίζεται ως μία συνάρτηση του σφάλματος $Y(P) - \tilde{Y}(b^{i+1}|P)$ (π.χ. το μέσο τετραγωνικό σφάλμα -mean squared error). Οι επαναλήψεις σταματούν και αποκτούμε τις τελικές τιμές b^* όταν πληρούνται κάποια κριτήρια όπως για παράδειγμα η συνάρτηση σφάλματος φτάνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι ή όταν εκτελεστούν ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων. Η διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 11. Όταν θέλουμε να εγκαταστήσουμε καινούρια μονοπάτια (ή να επαναρρυθμίσουμε ήδη υπάρχοντα),

θέλουμε να εκτιμήσουμε την ποιότητα μετάδοσής τους. Έτσι έχουμε ένα καινούριο σύνολο P' , και εκτιμούμε $\tilde{Y}(b^*|P') = \tilde{Q}(b^*, P')$ χρησιμοποιώντας τις εκπαιδευμένες τιμές του φυσικού επιπέδου b^* . (Στη συνηθισμένη περίπτωση όπου μόνο ένα νέο μονοπάτι πρέπει να εγκατασταθεί $P' = P \cup \{w\}$). Ακολουθώντας εγκαθιστούμε το/τα καινούριο/α μονοπάτι/α, παίρνουμε τις μετρήσεις των πραγματικών τους SNR $Y(P') = Q^*(P')$ και υπολογίζουμε το (δοκιμαστικό) σφάλμα $Y(P') - \tilde{Y}(b^*|P')$. Μετά επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία εκπαίδευσης με τη νέα κατάσταση του δικτύου ώστε να βελτιώσουμε περαιτέρω την ακρίβεια εκτίμησης του b και του ML-PLM.

Machine learning model (ML-M)

Η δεύτερη προσέγγιση που εξετάζουμε προσπαθεί να αποκτήσει μία εκτίμηση του πραγματικού QoT διανύσματος $Q^*(r, P)$ χρησιμοποιώντας εξαγωγή χαρακτηριστικών. Αυτή η διαδικασία αντιστοιχεί την κατάσταση του δικτύου P σε έναν πίνακα $X = f(P)$, που καλείται πίνακας χαρακτηριστικών του P , που είναι ένα σύνολο από τα διανύσματα χαρακτηριστικών όλων των μονοπατιών. Σε αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με το γενικό ορισμό της συνάρτησης εκτίμησης $\tilde{Q}(r, P)$, το r είναι ένα σύνολο των παραμέτρων (συντελεστών) του ML μοντέλου (ML-M) που συμβολίζεται με θ και του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από το εκάστοτε μοντέλο (linear regression, neural network, Support Vector Machine-SVM, etc).

Ο πίνακας χαρακτηριστικών X υπολογίζεται για τα εγκατεστημένα μονοπάτια στην κατάσταση P και επιλέγεται έτσι ώστε να συνοψίζει με ευρυστικό τρόπο τα σημαντικά χαρακτηριστικά του P σε σχέση με το πρόβλημα της εκτίμησης του QoT. Ένα πιθανό σύνολο από χαρακτηριστικά θα μπορούσε να είναι διατεμαστικά χαρακτηριστικά όπως το μήκος του μονοπατιού, ο φόρτος ενός συνδέσμου, ο αριθμός των ενισχυτών που διατρέχει το μονοπάτι. Αυτά τα χαρακτηριστικά καταγράφουν άμεσα ή έμμεσα τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου. Η γενική ιδέα είναι ότι με την αλλαγή των μεταβλητών από την κατάσταση P στον πίνακα $X = f(P)$, η άγνωστη αντιστοίχιση $Q^*(P)$ των πραγματικών QoT μετρικών μπορεί να προσεγγιστεί καλά από μία σχετικά «ομαλή» συνάρτηση $\tilde{Q}(\theta, X) = \tilde{Q}(\theta, f(P))$. Μετά ένα ML-M μοντέλο $\tilde{Q}(\theta, X)$ εκπαιδεύεται με μία κατάλληλη regressive τεχνική όπως linear regression, νευρωνικά δίκτυα, SVM, κλπ. Για να κάνουμε εκπαίδευση πρέπει (όπως και στη προηγούμενη ενότητα) να μας δοθούν κάποια δεδομένα εκπαίδευσης σε μορφή ζευγών $(P, Q^*(P))$.

Αφού υλοποιήσαμε και δοκιμάσαμε πολλές τέτοιες μεθόδους και συναρτήσεις εξαγωγής χαρακτηριστικών $f(P)$, παρατηρήσαμε ότι η επιλογή των χαρακτηριστικών είναι εξαιρετικά σημαντική για την ακρίβεια εκτίμησης, τουλάχιστον λαμβάνοντας υπόψιν μεσαίου μεγέθους οπτικά δίκτυα (10-20 κόμβοι) και διάφορα φορτία κίνησης. Παρακάτω παρουσιάζουμε μία μοντελοποίηση που είχε την καλύτερη ακρίβεια-απόδοση.

Οργανώνουμε τον πίνακα χαρακτηριστικών X με τέτοιο τρόπο ώστε η κάθε γραμμή να αντιστοιχεί σε ένα μονοπάτι $p \in P$, και η κάθε στήλη να αναπαριστά ζεύγη (συνδέσμων, χαρακτηριστικών) για τους συνδέσμους του μονοπατιού και τις τιμές των επιλεγμένων χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα επιλέγουμε ένα σύνολο από τρία σύνολα χαρακτηριστικών σε επίπεδο συνδέσμου. Επίσης θεωρούμε ένα επιπλέον χαρακτηριστικό για την αναπαράσταση του bias (συμβολίζουμε με BT[44]). Ο όρος bias μπορεί να λάβει υπόψιν του τα σφάλματα των μετρήσεων που δεν μπορούν να μειωθούν με κανέναν άλλο τρόπο. Θεωρούμε μία μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών σε επίπεδο συνδέσμου έτσι ώστε να λάβουμε επαρκώς υπόψιν την ετερογένεια του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, ο ML αλγόριθμος εκτίμησης εξετάζει τα χαρακτηριστικά του κάθε συνδέσμου ενός μονοπατιού ανεξάρτητα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να μπορεί να κάνει διάκριση μεταξύ δύο μονοπατιών που έχουν για παράδειγμα το ίδιο ή παρόμοιο μήκος αλλά διασχίζουν συνδέσμους με διαφορετικό εξοπλισμό και έτσι πιθανώς να έχουν διαφορετική

συμπεριφορά στην ποιότητα μετάδοσης λόγω διακυμάνσεων στις παραμέτρους των συνδέσμων ή span. Δεν εξετάζουμε χαρακτηριστικά σε επίπεδο span γιατί ένα μονοπάτι πάντα θα διασχίζει όλα τα spans ενός συνδέσμου.

Ορίζουμε τρία σύνολα χαρακτηριστικών σε επίπεδο συνδέσμου που αντιστοιχούν στις τρεις μεγάλες κλάσεις των εξασθενήσεων (impairments) που επηρεάζουν το QoT. Πιο συγκεκριμένα ορίζουμε ως A έναν $|P| \times |L|$ πίνακα χαρακτηριστικών σε επίπεδο συνδέσμου που έχει σχεδιαστεί να αντιστοιχεί στον θόρυβο ASE. Το κάθε στοιχείο A_{pl} , αντιστοιχεί στο μονοπάτι p και στο σύνδεσμο l , και τίθεται ίσο με 1 αν περιέχει τον σύνδεσμο l , και τίθεται ίσο με μηδέν διαφορετικά. Επίσης ορίζουμε ένα πίνακα χαρακτηριστικών σε επίπεδο συνδέσμου S για να λάβουμε υπόψιν το θόρυβο Self-Channel Interference (SCI). Το κάθε στοιχείο S_{pl} τίθεται ίσο με το ρυθμό συμβόλου (baud rate) του μονοπατιού υψωμένο στη δύναμη -2 , αν το μονοπάτι p περιέχει το σύνδεσμο l , και τίθεται ίσο με μηδέν διαφορετικά. Τέλος ορίζουμε ένα παρόμοιο πίνακα W για να λάβουμε υπόψιν τις παρεμβολές των γειτονικών μονοπατιών (cross channel interference-XCI). Τα στοιχεία αυτού του πίνακα προκύπτουν από μία εξίσωση που περιλαμβάνει το ρυθμό συμβόλου του εκάστοτε μονοπατιού, και για κάθε ένα από τα γειτονικά του μονοπάτια, την απόστασή του από το γειτονικό μονοπάτι και ο ρυθμός συμβόλου του σύμφωνα με την εξίσωση (40) της [14].

Συνενώνουμε τους παραπάνω πίνακες σε έναν ενιαίο πίνακα χαρακτηριστικών $X = f(P)$ που ορίζεται ως:

$$X = [BT \quad A \quad S \quad W]_{|P| \times (3|L|+1)} \quad (5)$$

Εστιάζοντας σε ένα μονοπάτι p , τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν σχεδιαστεί να αναπαριστούν τις παραμέτρους του μονοπατιού που επηρεάζουν τους παράγοντες που συνεισφέρουν στο θόρυβο ενός συνδέσμου (θεωρώντας τις κύριες εξασθενήσεις, γραμμικές και μη γραμμικές). Ας υποθέσουμε ότι $x_{p,j}$ είναι το j th χαρακτηριστικό του μονοπατιού p και ότι η αντίστοιχη συνεισφορά του θορύβου συμβολίζεται με $n_j(x_{p,j}, \theta)$. Κάθε χαρακτηριστικό $x_{p,j}$, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε η συνεισφορά στο θόρυβο του αντίστοιχου συνδέσμου να εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από αυτό δηλ. $n_j(x_{i,j}, \theta) = x_{i,j} \cdot \theta_j$, όπου θ_j είναι ο αντίστοιχος συντελεστής του συνδέσμου/εξασθένησης.

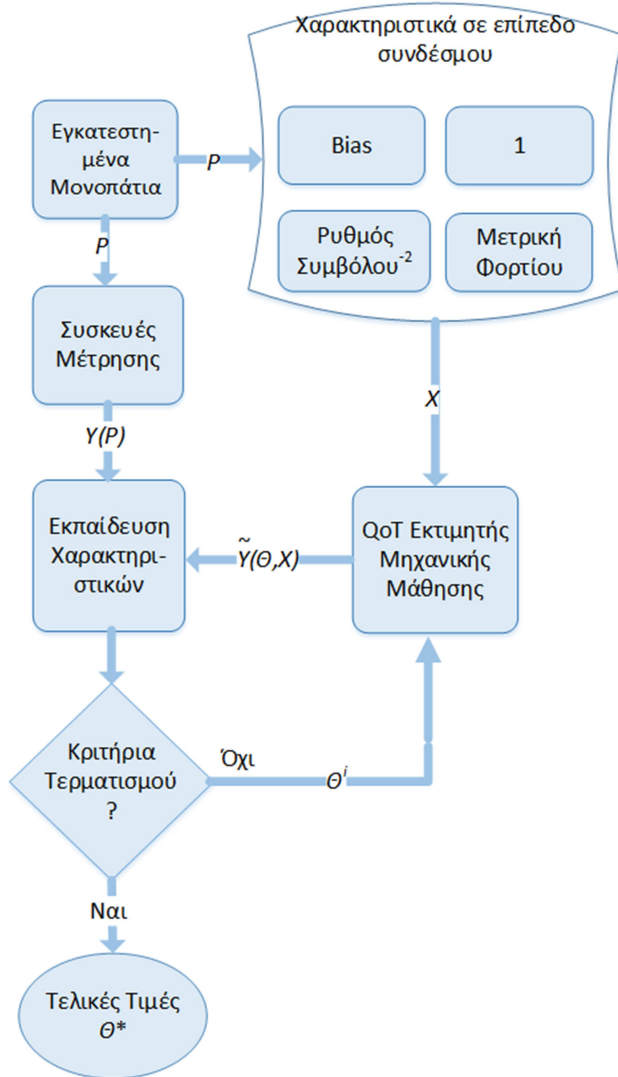
Υποθέτουμε ότι ο θόρυβος των διαφορετικών τύπων εξασθένησης είναι αθροιστικός ανά σύνδεσμο και επίσης είναι αθροιστικός ανά μετρική εξασθένησης (όπως είναι το αντίστροφο του SNR). Αυτή είναι μία υπόθεση που γίνεται από το GN model και έχει αποδειχθεί ότι έχει καλή ακρίβεια [14]. Με αυτήν την υπόθεση είναι δυνατή η συσχέτιση των παραγόντων που συνεισφέρουν στο θόρυβο σε επίπεδο συνδέσμου και μετρικής εξασθένησης. Με άλλα λόγια ο συνολικός θόρυβος που συσσωρεύεται στο μονοπάτι p δίνεται από τη σχέση $\sum_j n(x_{p,j}, \theta)$. Με δεδομένες γραμμικές συναρτήσεις χαρακτηριστικών-θορύβου n_j , μπορούμε να εκτιμήσουμε το συνολικό θόρυβο όλων των μονοπατιών από τη σχέση:

$$\tilde{Y}(\theta, X) = X \cdot \theta \quad (6)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι έχουμε μετρήσεις για το SNR των μονοπατιών και ότι δεν υπάρχει σφάλμα μέτρησης, θέτουμε για το μονοπάτι p

$$Z(p) = \frac{B_N(p) \cdot I_p(p)}{B_r(p) \cdot Q^*(p)} \quad (7)$$

όπου $B_N(p)$ είναι το φάσμα του θορύβου, $I_p(p)$ είναι η ισχύς, $B_r(p)$ είναι ο ρυθμός συμβόλου, και $Q^*(p)$ είναι το SNR του μονοπατιού p . Το Z είναι το άθροισμα όλων των πηγών θορύβου όλων των μετρικών εξασθενήσεων όλων των συνδέσμων που διατρέχει το μονοπάτι p , λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση αθροιστικού θορύβου του GN model. Με δεδομένο το $Y(P)$ (παρατηρούμενη πληροφορία) και θέτοντας $\tilde{Y}(P) = Z(P)$, εκπαιδεύουμε το μοντέλο μας $\tilde{Y}(\theta, X)$ και αποκτούμε τους συντελεστές (thetas) θ χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο ML αλγόριθμο εκπαίδευσης. Σύμφωνα με την υπόθεση γραμμικών συναρτήσεων χαρακτηριστικών-θορύβου n_j ($\tilde{Y}(\theta, X) = X \cdot \theta$), ένας linear regression /gradient decent αλγόριθμος είναι κατάλληλος για την εκμάθηση του θ . Οπότε μπορούμε να αποκτούμε μία επαναλαμβανόμενη εκτίμηση του θ^i ώπου το σφάλμα εκπαίδευσης είναι αρκετά χαμηλό οπότε θα έχουμε και τις τελικές τιμές του θ που συμβολίζουμε με θ^* . Το διάγραμμα ροής του ML-M απεικονίζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12 Διάγραμμα ροής ML-M

ορίσουμε περιορισμούς που εκμεταλλεύονται την αναμενόμενη ομοιότητα στην ποιότητα μετάδοσης ορισμένων συνδέσμων. Για παράδειγμα ένας σύνδεσμος ο οποίος είναι πάνω από 200χλμ μακρύτερος από έναν άλλον, είναι εξαιρετικά απίθανο να έχει χαμηλότερη συνεισφορά στο θόρυβο. Οι επιπλέον περιορισμοί βοηθούν τον αλγόριθμο να παρέχει καλύτερες εκτιμήσεις για τα thetas ειδικά σε περιπτώσεις με χαμηλή ποσότητα πληροφορίας (μονοπάτια).

Ο least square solver λύνει το πρόβλημα της μορφής:

$$\min_{\theta} \|X \cdot \theta - Y(P)\|_2^2 \quad (8)$$

ώστε $E \cdot \theta \leq 0$, $0 \leq \theta$.

όπου E είναι το γραμμικό διάνυσμα ανισότητας που ορίζεται ως εξής:

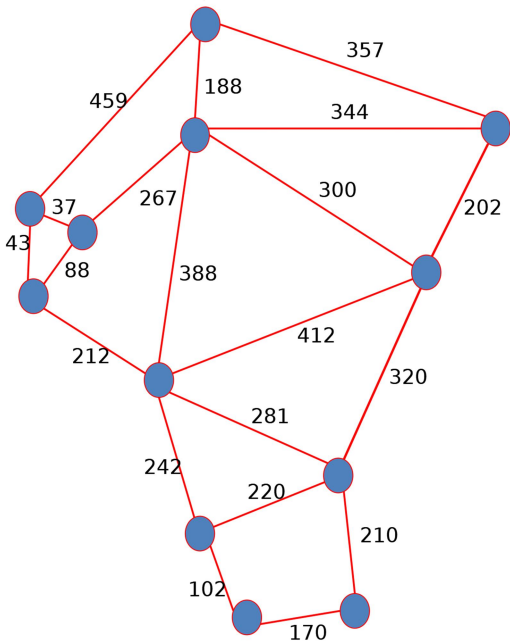
Για όλους τους συνδέσμους l_1 στο L , για όλους τους συνδέσμους l_2 στο L , τέτοιους ώστε $length(l_1) \leq length(l_2) + h$, και για όλα τα σύνολα χαρακτηριστικών i στο $\{A, S, W\}$:

$$\theta_{i,l_1} - \theta_{i,l_2} \leq 0,$$

όπου h η απόσταση αναφοράς (π.χ. 200χλμ), και $\theta_{i,l}$ αντιστοιχεί στη παράμετρο του συνδέσμου l στο σύνολο των χαρακτηριστικών i . Επίσης περιορίζουμε το θ να είναι πάντα θετικά αφού αυτές οι παράμετροι αντιστοιχούν σε θετικές τιμές. Αν υπάρχουν περισσότερες και πιο λεπτομερές μετρούμενες μετρικές ποιότητας μετάδοσης τότε μπορούμε να επεκτείνουμε το μοντέλο μας ώστε να τις συμπεριλάβει. Για παράδειγμα αν έχουμε OPMs τα οποία μπορούν να παρέχουν μετρήσεις για το ASE και για το SNR, τότε μπορούμε να αντιστοιχίσουμε ανεξάρτητα τις τιμές του ASE με τον πίνακα χαρακτηριστικών που αντιστοιχεί στον ASE θόρυβο και ταυτόχρονα να αξιοποιήσουμε τις μετρήσεις SNR ώστε:

$$\tilde{Y}(X|P) = \begin{bmatrix} Z \\ ASE \end{bmatrix}_{2|P| \times 1} \quad (9), \quad X = \begin{bmatrix} BT_1 & A & S & W \\ BT_2 & A & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2|P| \times (3|L|+1)} \quad (10),$$

Έτσι σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος θα έχει περισσότερη πληροφορία για να υπολογίσει τα αντίστοιχα thetas. Οι παραπάνω μέθοδοι βασίζονται σε μετρήσεις και σε μηχανική μάθηση ώστε να προσεγγίσουν την συμπεριφορά του φυσικού επιπέδου χωρίς περίπλοκες αναλυτικές συναρτήσεις.



Εικόνα 13 Το δίκτυο DT με τα μήκη των συνδέσμων σε χλμ

Αποτελέσματα

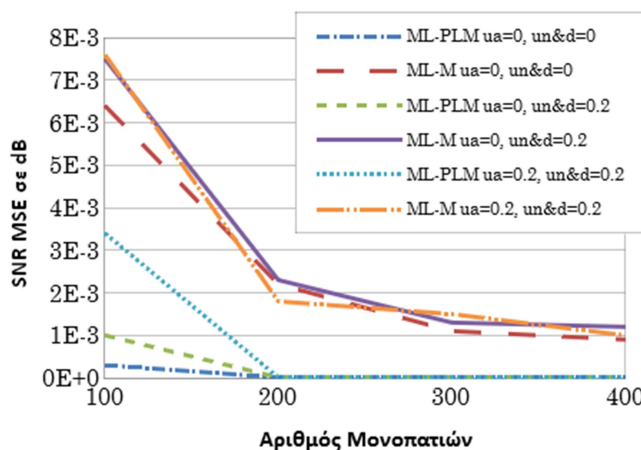
Αξιολογήσαμε τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές εκτίμησης QoT μέσα από προσομοιώσεις. Θεωρήσαμε την τοπολογία DT με 12 κόμβους και 40 αμφίδρομους συνδέσμους (Εικόνα 13), και την τοπολογία NSFNET με 14 κόμβους και 22 αμφίδρομους συνδέσμους (Εικόνα 4). Θεωρήσαμε 4 φορτία κίνησης των 100, 200, 300 και 400 συνολικών συνδέσεων με ομοιόμορφα καταναμημένα ζευγάρια πηγών-προορισμών και τυχαίους ρυθμούς συμβόλου από το σύνολο $\{32, 43, 56\}$.

Όσον αφορά το φυσικό επίπεδο, υποθέσαμε να SSMF με μέσο συντελεστή εξασθένησης 0.22 dB/km, μέσο συντελεστή διασποράς 16.7

ps/nm/km, και μέσο μη γραμμικό συντελεστή 1.3 1/W/km . Επίσης θεωρήσαμε μήκος span 80 km και θόρυβο ενισχυτή EDFA 5 dB . Θέσαμε την ισχύ στα 0 dbm και λειτουργούμε στη γραμμική περιοχή. Για την περίπτωση του ML-PLM, το διάνυσμα b αποτελείται από το συντελεστή εξασθένησης, το συντελεστή διασποράς και το μη γραμμικό συντελεστή. Για την περίπτωση του ML-M χρησιμοποιήσαμε τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στην προηγούμενη υποενότητα. Οι παραπάνω μέσες τιμές χρησιμοποιούνται επίσης και ως οι αρχικές τιμές του b^0 στην περίπτωση του ML-PLM. Οι πραγματικές άγνωστες τιμές αυτών των συντελεστών προκύπτουν από μία τυχαία ομοιόμορφη κατανομή με τις προαναφερθείσες μέσες τιμές. Πιο συγκεκριμένα θεωρήσαμε τα παρακάτω σενάρια αβεβαιότητας των παραμέτρων: (α) ο συντελεστής εξασθένησης όλων των spans είναι σταθερός ($u_a=0$) όπως και οι συντελεστές της διασποράς και της μη γραμμικότητας, ($u_{n\&d}=0$), (β) ο συντελεστής εξασθένησης είναι σταθερός ($u_a=0$) ενώ ο συντελεστής διασποράς και ο μη γραμμικός συντελεστής μεταβάλλονται ομοιόμορφα κατά 20% $u_{n\&d}=0.2$, και (γ) όλοι οι συντελεστές μεταβάλλονται ($u_a=u_{n\&d}=0.2$). Στην περίπτωση του ML-PLM αρχικοποιήσαμε τις παραμέτρους του b στις μέσες τιμές συντελεστών και χρησιμοποιήσαμε το GN model με τις μεταβαλλόμενες (τυχαίες και άρα άγνωστες) τιμές ως το ground truth που παράγει τις ακολουθίες εκπαίδευσης. Ο στόχος για την εκτίμηση είναι το SNR.

Για κάθε φορτίο κίνησης και αβεβαιότητας των παραμέτρων εκτελέσαμε 300 επαναλήψεις. Χρησιμοποιήσαμε τις 3 παρακάτω μετρικές για την αξιολόγηση της ακρίβειας της εκτίμησης: το μέσο τετραγωνικό σφάλμα mean squared error (MSE), τη μέγιστη υπερεκτίμηση και την ελάχιστη υποεκτίμηση. Η μέγιστη υπερεκτίμηση είναι μία χρήσιμη μετρική γιατί μας παρέχει το QoT περιθώριο που θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιούμε ώστε να έχουμε συντηρητική λειτουργία του δικτύου (να μην υπερεκτιμούμε ποτέ την αναμενόμενη ποιότητα της μετάδοσης ώστε να μην εγκαταστήσουμε ένα μη κατάλληλο μονοπάτι).

Η εκπαίδευση του ML-PLM έγινε με μη γραμμική regression και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε τη συνάρτηση lsqcurvefit του MATLAB. Για το ML-M αξιολογήσαμε νευρωνικά δίκτυα, linear regression, και έναν constrained least square solver. Χρησιμοποιήσαμε το 80% των μονοπατιών για εκπαίδευση, το 10% για επαλήθευση (validation) και το 10% για έλεγχο (testing). Σε όλα τα φορτία εξαιρούμε από το σύνολο των test μονοπατιών τυχόν μονοπάτια που περιέχουν συνδέσμους για τους οποίους δεν έχουμε καθόλου πληροφορία. Σχετικά με τους διάφορους



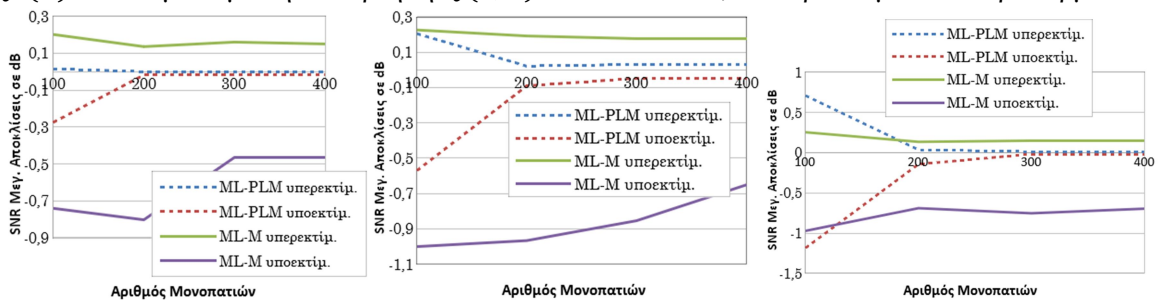
Εικόνα 14 MSE σε dB για το ML-M και ML-PLM (DT δίκτυο)

στο overfitting. Οι παράμετροί του (αριθμός νευρώνων, dropout rate, κλπ) θα πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά και οι τιμές τους μπορεί να πρέπει να διαφέρουν ανάλογα με το συγκεκριμένο δίκτυο

και την εκάστοτε κίνηση. Επίσης το νευρωνικό δίκτυο συνήθως απαιτεί περισσότερο χρόνο για την φάση εκπαίδευσης από ό,τι απαιτούν άλλοι αλγόριθμοι. Σε όλα τα παρακάτω αποτελέσματα χρησιμοποιήσαμε έναν constrained least squares solver για το ML-M.

Επίσης πήραμε αποτελέσματα και για άλλα είδη χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούν μόνο διατερματικές παραμέτρους για τα μονοπάτια σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά σε επίπεδο συνδέσμου που χρησιμοποιεί το μοντέλο μας. Ο στόχος ήταν να αναπτύξουμε τον καλύτερο δυνατό εκτιμητή με διατερματικά χαρακτηριστικά και να το συγκρίνουμε με τους άλλους εκτιμητές. Το σύνολο των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήσαμε ήταν παρόμοιο με αυτά της [39]. Πιο συγκεκριμένα υποθέσαμε έναν διατερματικό εκτιμητή μηχανικής μάθησης (E-ML-M) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά X για κάθε μονοπάτι: αριθμός EDFAs, αριθμός κόμβων, συνολικό μήκος μονοπατιού, ρυθμός συμβόλου του κάθε μονοπατιού και μία μετρική φορτίου. Η μετρική φορτίου είναι παρόμοια με αυτή του ML-M μόνο που αθροίζει τις μετρικές των συνδέσμων σε μία μετρική αφού το E-ML-M υποθέτει μόνο διατερματικά χαρακτηριστικά.

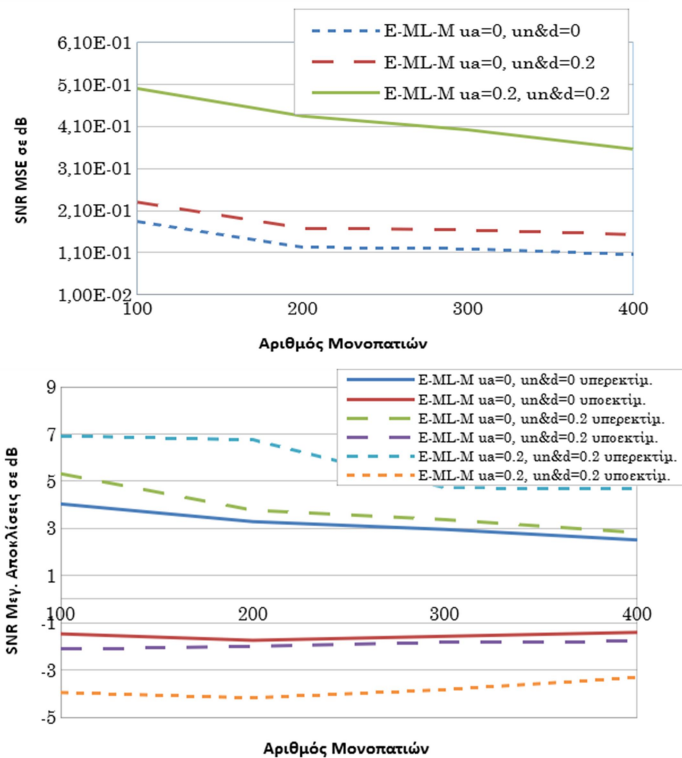
Στην Εικόνα 14 μπορούμε να δούμε ότι τόσο το ML-PLM όσο και το ML-M επιτυγχάνουν πολύ καλό μέσο τετραγωνικό σφάλμα Mean Squared Error στο DT δίκτυο. Το ML-M έχει σταθερή απόδοση για όλα τα σενάρια (α), (β) και (γ) που προσομοιώσαμε, αφού δεν θεωρεί κάποια προηγούμενη γνώση για τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου. Επίσης, τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά X εξασφαλίζουν ότι η απόδοση θα παραμείνει σταθερή ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις των παραμέτρων σε κάθε span. Παρατηρούμε ότι όσο οι πηγές των αβεβαιοτήτων αυξάνονται, το ML-PLM χρειάζεται περισσότερα μονοπάτια (που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εκπαίδευσης) για να έχει την ίδια ακρίβεια. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού όταν δεν υπάρχουν αβεβαιότητες, το ML-PLM έχει προηγούμενη γνώση των εισόδων/παραμέτρων φυσικού επιπέδου που είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές και ο αλγόριθμος μπορεί πιο εύκολα να βρει την κατάλληλη λύση. Το ML-PLM είναι πιο ακριβές από το ML-M. Ένας λόγος για αυτό είναι ότι το ML-PLM έχει τέλεια γνώση του μοντέλου του φυσικού επιπέδου με την έννοια ότι η συνάρτηση $Q^*(P)$ είναι όμοια με τη συνάρτηση $\tilde{Q}(b, P)$ του GN model, και πρέπει μόνο να προσαρμόσει τις



Εικόνα 15 Μέγιστες αποκλίσεις για ML-M και ML-PLM για α) $u_a=0, u_n \& d=0$, β) $u_a=0, u_n \& d=0.2$, γ) $u_a=0.2, u_n \& d=0.2$ (DT δίκτυο)

παραμέτρους b που είναι άγνωστες. Από την άλλη μεριά το ML-M δεν έχει τέτοιο a priori πλεονέκτημα, και βασίζεται μόνο στις μετρητικές τιμές και τα χαρακτηριστικά προκειμένου να μάθει να κάνει εκτίμηση του Q_0T .

Στην Εικόνα 15 μπορούμε να δούμε τις μέγιστες αποκλίσεις των δύο αλγορίθμων. Παρουσιάζουμε δύο μετρικές: Την μέγιστη υπερεκτίμηση και την ελάχιστη υποεκτίμηση του SNR. Οι αποκλίσεις του ML-PLM είναι της τάξης των 10^{-2} dB. Όπως και στην περίπτωση του MSE, το ML-PLM χρειάζεται περισσότερα μονοπάτια για να έχει την ίδια ακρίβεια όταν οι αβεβαιότητες των παραμέτρων αυξάνονται. Το ML-M έχει αρκετά καλή απόδοση με μικρό αριθμό μονοπατιών



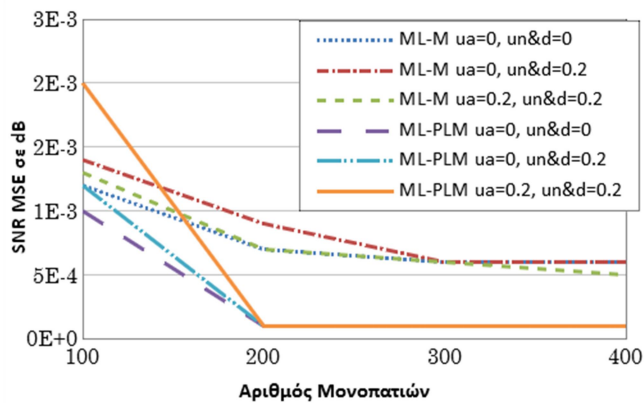
Εικόνα 16 α) MSE και β) Μεγ. Αποκλίσεις του SNR για το E-ML-M με διατερματικά χαρακτηριστικά (DT δίκτυο)

περιορισμών στην επίλυση του προβλήματος ($0 \leq \theta$) που τείνουν να εκτιμούν χαμηλότερες τιμές του SNR, οδηγώντας σε σχετικά μικρότερη υπερεκτίμηση σε σχέση με υποεκτίμηση. Αυτή η ασυμμετρία είναι προς όφελος του εκτιμητή αφού πρέπει να αποφύγουμε το λάθος υπερεκτίμησης.

Αν λάβουμε υπόψιν ότι μία τιμή αναφοράς για το περιθώριο σχεδίασης είναι περίπου 2 dB [19] τότε το όφελος από τη μείωση περιθωρίου που μπορεί να προσφέρει το ML-M είναι 1.8 dB, ενώ για το ML-PLM είναι περίπου 1.95 dB. Η βελτιωμένη ακρίβεια εκτίμησης έχει δείχθει ότι μεταφράζεται σε σημαντικά οικονομικά οφέλη λόγω λιγότερου απαιτούμενου εξοπλισμού[20][21].

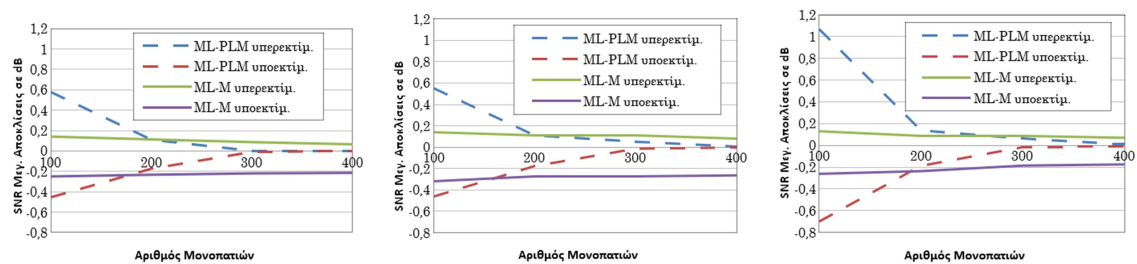
Στην Εικόνα 16 παρουσιάζουμε την ακρίβεια του E-ML-M εκτιμητή που χρησιμοποιεί διατερματικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά που αναφέρονται στην [41]. Παρατηρούμε ότι ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αβεβαιότητες στις τιμές των παραμέτρων, η ακρίβεια είναι χειρότερη από αυτήν της πρότασής μας. Ένας λόγος είναι ότι στην περίπτωση του E-ML-M το SNR εκτιμάται έμμεσα, χρησιμοποιώντας υψηλού επιπέδου διατερματικά χαρακτηριστικά (π.χ. που βασίζονται στον αριθμό των κόμβων, στο συνολικό μήκος του μονοπατιού). Η μοντελοποίησή μας διασπά το SNR στα τρία συστατικά του στοιχείου ASE θόρυβος, SCI, XCI και παρέχει σχετικά χαρακτηριστικά για κάθε ένα από αυτά. Ένας άλλος λόγος είναι ότι τα διατερματικά χαρακτηριστικά δεν μπορούν να καταγράψουν μικρές διαφορές μεταξύ των συνδέσμων των μονοπατιών. Για παράδειγμα το E-ML-M δεν μπορεί να καταγράψει το ακριβές φορτίο κάθε συνδέσμου ενός μονοπατιού (που από τα αποτελέσματα φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο) αλλά υπολογίζει το μέσο φορτίο όλων των συνδέσμων ενός μονοπατιού. Όσο αυξάνονται οι αβεβαιότητες των τιμών των παραμέτρων, παρατηρούμε σημαντικά χειρότερη ακρίβεια του E-ML-M. Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, αυτό οφείλεται στα διατερματικά χαρακτηριστικά που παρέχουν περιορισμένη πληροφορία σε ένα ετερογενές δίκτυο. Αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία να χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά που καταγράφουν τις βασικές αλληλεπιδράσεις και μη

εκπαίδευσης και μπορεί να μειώσει σημαντικά το σφάλμα για μεγάλο αριθμό μονοπατιών (≥ 300). Η μέγιστη υπερεκτίμηση του ML-M είναι της τάξης των 0.2 dB, ενώ η ελάχιστη υποεκτίμηση είναι 0.7 dB. Αν λάβουμε υπόψιν μονοπάτια που διασχίζουν περισσότερους από έναν συνδέσμους τότε η μέγιστη απόκλιση είναι 0.3 dB όταν χρησιμοποιούνται 400 μονοπάτια για εκπαίδευση. Σημειώνουμε ότι η μέγιστη υπερεκτίμηση (0.2 dB) αντιστοιχεί στο περιθώριο σχεδίασης (design margin) που ένας διαχειριστής δικτύου θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ώστε να μην εγκαταστήσει ποτέ μονοπάτι με μη αποδεκτό QoT. Επίσης αξίζει να σημειώσουμε ότι υπάρχει ασυμμετρία μεταξύ των μέγιστων αποκλίσεων (υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση) του ML-M. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω των



Εικόνα 17 MSE σε dB για το ML-M και ML-PLM (NSFNET δίκτυο)

συνδέσμων. Έτσι το SNR των μονοπατιών είναι γενικά χαμηλότερο και λιγότερο επιρρεπές σε σφάλματα εκτίμησης. Επίσης το NSFNET έχει σχεδόν τους μισούς συνδέσμους σε σχέση με το DT, και έτσι ο αλγόριθμος εκτίμησης χρειάζεται μικρότερο αριθμό μονοπατιών για την ίδια ακρίβεια εκτίμησης. Επίσης είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ο χρόνος εκτέλεσης του ML-PLM's μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερος για το NSFNET από ό,τι για το DT (δεκάδες λεπτών για το NSFNET αντί για μερικά λεπτά για το DT χρησιμοποιώντας MATLAB και τετραπύρηνο CPU@4GHz). Ο λόγος είναι ότι οι μακρύτεροι σύνδεσμοι του NSFNET (που αντιστοιχούν σε περισσότερα spans) είναι πιο δύσκολο να εκτιμηθούν από την διαδικασία της εκπαίδευσης. Για να



Εικόνα 18 SNR Μέγιστες Αποκλίσεις για ML-M και ML-PLM για α) $u_a=0, u_n\&d=0$, β) $u_a=0, u_n\&d=0.2$, γ) $u_a=0.2, u_n\&d=0.2$ (NSFNET δίκτυο)

μειώσουμε την πολυπλοκότητα θεωρήσαμε μία απλουστευμένη τοπολογία του NSFNET, όπου κάθε σύνδεσμος αποτελείται από spans με παρόμοιες παραμέτρους. Σε αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να εκτιμηθούν μειώνεται σημαντικά. Έτσι ο χρόνος εκτέλεσης μειώνεται στα περίπου 2 λεπτά για το NSFNET (και περίπου 30 δευτερόλεπτα για το DT). Ο χρόνος εκτέλεσης του ML-M δεν επηρεάζεται από το μήκος των συνδέσμων αφού λαμβάνει υπόψιν του μόνο διατεμαστικές μετρικές και χαρακτηριστικά σε επίπεδο συνδέσμου. Χρειάζεται περίπου 0.2 έως 2 δευτερόλεπτα. Σημειώνουμε ότι αυτές οι τιμές αναφέρονται στο χρόνο εκπαίδευσης. Οι επακόλουθες εκτιμήσεις χρειάζονται πολύ μικρότερο χρόνο (<0.1 seconds) ο οποίος είναι κατάλληλος για δυναμικά σενάρια (επανα)ρύθμισης.

Συμπεράσματα

Μελετήσαμε δύο τεχνικές μηχανικής μάθησης για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης: το αναλυτικό μοντέλο φυσικού επιπέδου (ML-PLM) και το μοντέλο μηχανικής μάθησης (ML-M). Παρουσιάσαμε μία καινοτόμο μοντελοποίηση του ML-M που λαμβάνει υπόψιν του την ετερογένεια ενός δικτύου. Και τα δύο μοντέλα επιτυγχάνουν υψηλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας πληροφορία από μερικά ήδη εγκατεστημένα μονοπάτια. Το ML-PLM είναι πιο ακριβές από το ML-M αλλά

γραμμικότητες, βάσει της γνώσης ή διαίσθησής μας για το πρόβλημα της εκτίμησης του QoT.

Τέλος παρουσιάζουμε την απόδοση του ML-PLM και ML-M για το δίκτυο NSFNET (Εικόνα 17 και Εικόνα 18). Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που βγαίνουν είναι παρόμοια με αυτά για το DT δίκτυο. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακρίβεια των εκτιμητών είναι λίγο καλύτερη από του DT. Ένας λόγος είναι ότι το NSFNET έχει πιο μακρύς

χρειάζεται υψηλότερο χρόνο εκτέλεσης για την φάση της εκπαίδευσης. Το ML-M είναι πιο ευέλικτο με την έννοια ότι δεν χρειάζεται καμία προηγούμενη γνώση για το φυσικό επίπεδο και επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε μία μεγάλη ποικιλία δικτύων (core, metro, με αντιστάθμιση διασποράς κλπ) με μικρές ή καθόλου αλλαγές. Και οι δύο προσεγγίσεις επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα από ML αλγορίθμους που χρησιμοποιούν διατεμαχικά χαρακτηριστικά. Η υψηλή ακρίβεια των μοντέλων τα καθιστά κατάλληλα για ένα δυναμικό δίκτυο που συνεχώς εξελίσσεται. Επίσης τα κόστη του δικτύου μπορούν να μειωθούν σημαντικά αφού τα περιθώρια λειτουργίας μειώνονται λόγω της πιο ακριβούς εκτίμησης. Μελλοντική έρευνα περιλαμβάνει την εφαρμογή παρόμοιων τεχνικών μηχανικής μάθησης σε άλλα σενάρια και την επέκταση των αλγορίθμων για να λάβουν υπόψιν τα φαινόμενα που προκαλούνται από τις ατέλειες των φίλτρων.

Κεφάλαιο 4 Μείωση Αβεβαιοτήτων και Εντοπισμός Σφαλμάτων

Σύνοψη

Σε αυτήν την ενότητα προτείνουμε ένα πλαίσιο για να μειώσουμε τις αβεβαιότητες των παρατηρήσεων των συσκευών παρακολούθησης απόδοσης (OPMs) στα οπτικά δίκτυα. Το προτεινόμενο πλαίσιο χρησιμοποιεί πληροφορία από τα εγκατεστημένα μονοπάτια η οποία μπορεί να αποκτηθεί από τους σύμφωνους οπτικούς πομποδέκτες που μπορούν να λειτουργήσουν και ως συσκευές παρακολούθησης απόδοσης. Αξιοποιούμε συσχετίσεις της πληροφορίας τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και του χώρου (χωροχρόνου) ώστε να μειώσουμε τις ανακρίβειες των συσκευών παρακολούθησης. Η βελτιωμένη ακρίβεια μπορεί να προσφέρει διάφορα οφέλη, και το πιο συνηθισμένο είναι ότι η ποιότητα της μετάδοσης (QoT) μπορεί να εκτιμηθεί με καλύτερη ακρίβεια. Αυτό με τη σειρά του έχει τα οφέλη που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα. Δείχνουμε επίσης πως η απόκτηση πιο ακριβούς πληροφορίας μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό σφαλμάτων (soft failures) σε επίπεδο συνδέσμου.

Εισαγωγή

Τα οπτικά δίκτυα μεταφοράς λειτουργούν αρκετά στατικά με την έννοια ότι δεν επαναρυθμίζονται δυναμικά εκτός και αν υπάρχει σοβαρή βλάβη που διακόπτει ξαφνικά και εντελώς την επικοινωνία (η λεγόμενη *hard failure*) όπως κοπή μίας ίνας. Τα *hard failures* διαχειρίζονται με μηχανισμούς προστασίας/αποκατάστασης οι οποίοι ουσιαστικά επαναδρομολογούν την επηρεαζόμενη κίνηση. Οι οπτικές συνδέσεις (μονοπάτια) μπορούν να διασχίζουν πολλαπλούς διαδοχικούς συνδέσμους, προσπερνώντας διαφανώς (μένοντας πάντα στο οπτικό επίπεδο) τους ενδιάμεσους μεταγωγείς. Σε αυτή τη διαδικασία τα μονοπάτια συσσωρεύουν θόρυβο από τους ενδιάμεσους ενισχυτές αλλά επίσης επηρεάζονται και από άλλες φυσικές υποβαθμίσεις που επηρεάζουν την ποιότητα της μετάδοσης (QoT).

Ένα μονοπάτι πρέπει να έχει συνεχώς αποδεκτό QoT. Κατά την εκτίμηση του QoT, χρησιμοποιούνται *περιθώρια συστήματος (system margins)* τα οποία χρησιμεύουν στο να απορροφούν τις μελλοντικές υποβαθμίσεις σήματος εξαιτίας γήρανσης εξοπλισμού, παρεμβολών από καινούρια μονοπάτια και κάποιες αστοχίες υλικού μέχρι το τέλος ζωής του δικτύου (end of life (EOL)) [19]. Επιπλέον, το *περιθώριο σχεδίασης (design margin)* χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις ανακρίβειες του μοντέλου εκτίμησης του QoT [19]. Τα υψηλά περιθώρια έχουν ως αποτέλεσμα την εγκατάσταση εξοπλισμού που δεν είναι απαραίτητος τουλάχιστον όχι στην αρχική εγκατάσταση του δικτύου. Η μείωση των περιθωρίων επιφέρει σημαντικά οφέλη όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Η μείωση των περιθωρίων έχει ως αποτέλεσμα ο εξοπλισμός να λειτουργεί πιο κοντά στα όριά του. Η αυξημένη αποδοτικότητα επιφέρει μείωση του κόστους εξοπλισμού αλλά απαιτεί ένα πιο δυναμικό δίκτυο. Ο λόγος είναι ότι τα μονοπάτια λειτουργούν πιο κοντά στα κατώτατα αποδεκτά όρια της ποιότητας μετάδοσης. Έτσι είναι επιρρεπή σε μικρές βλάβες που προκαλούν υποβάθμιση του σήματος (γνωστές ως *soft failures*): επιρρεπή σε δυσλειτουργία εξοπλισμού (π.χ. πομποδεκτών, ενισχυτών, φίλτρων, λύγισμα ίνας κ.α.), γήρανση εξοπλισμού, αυξημένες παρεμβολές από καινούρια μονοπάτια ή άλλες ενέργειες όπως για παράδειγμα λάθος χειρισμούς κατά τη διάρκεια διαχειριστικών ενεργειών. Η κύρια διαφορά του *soft failure* από το *hard failure* είναι ότι το *soft failure* δεν προκαλεί πλήρη απώλεια του σήματος και έτσι η διόρθωση της βλάβης δεν επείγει. Τα μονοπάτια μπορεί να λειτουργήσει κάποιο χρονικό διάστημα με μειωμένο QoT.

Ένα παράδειγμα *soft-failure*, είναι η μειωμένη απόδοση του δικτύου μετά τη διόρθωση μιας βλάβης. Μία διόρθωση κοπής ίνας μπορεί να προκαλέσει απρόβλεπτες καταστάσεις όπως υψηλότερες

απώλειες εισαγωγής (insertion loss), χειρότερες αντανάκλασεις (back-reflections), μεγαλύτερο σε μήκος μονοπάτι, ή μίξη διαφορετικών ινών όταν για παράδειγμα η ίνα που χρησιμοποιείται στο δίκτυο δεν είναι εμπορικά διαθέσιμη πλέον (π.χ. dispersion shifted fiber G.653). Η αυξημένη απώλεια στο span ή οι αντανάκλασεις είναι ιδιαίτερα επιζήμιες σε span που χρησιμοποιούν ενισχυτές Raman, επειδή επηρεάζουν το κέρδος του ενισχυτή και υποβαθμίζουν το OSNR. Τα soft failures είναι γενικά δύσκολο να εντοπιστούν και συνήθως γίνεται ανάλυση των ειδοποιήσεων που αναφέρονται από συγκεκριμένες συσκευές. Όμως δεν προκαλούν ειδοποιήσεις όλα τα soft failures και μερικά σφάλματα μπορεί να υπάρχουν προτού εμφανιστεί η αντίστοιχη ειδοποίηση. Παρόλο που ο εντοπισμός hard failure έχει τύχει σημαντικής ερευνητικής προσοχής [45][46][47], δεν υπάρχει αντίστοιχη έρευνα για τα soft failures.

Στα μοντέρνα οπτικά δίκτυα υπάρχουν συσκευές (όπως συσκευές παρατήρησης ισχύος) σε συγκεκριμένες περιοχές που χρησιμοποιούνται για να εντοπίζουν και να αναφέρουν hard failures[45][48]. Όπως έχουμε αναφέρει το έργο ORCHESTRA [13] προτείνει να αξιοποιηθούν οι σύμφωνοι πομποδέκτες και να χρησιμοποιηθούν και ως συσκευές παρακολούθησης απόδοσης (OPM). Σε αυτήν την ενότητα υποθέτουμε ότι οι πληροφορίες από τους OPM είναι διαθέσιμη στο τερματικό κόμβο του κάθε μονοπατιού δηλ στον δέκτη. Ένα επίπεδο παρακολούθησης όπως αυτό που προτείνεται στο [50], μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή της πληροφορίας με αποτελεσματικό τρόπο και να εκτελέσει κάποιους υπολογισμούς καταναμημένα. Στην παρούσα ενότητα θεωρούμε ότι η πληροφορία από τους OPM συλλέγεται σε μία κεντρική οντότητα (τον ελεγκτή του δικτύου) η οποία αποθηκεύει και επεξεργάζεται όλα τα δεδομένα.

Προτείνουμε ένα πλαίσιο το οποίο βασίζεται στην πληροφορία από τους OPM για τα μονοπάτια και χρησιμοποιεί τεχνικές συσχέτισης στο πεδίο του χώρου και του χρόνου για να βελτιώσει την ακρίβεια εκτίμησης μειώνοντας έτσι τις αβεβαιότητες των μετρήσεων. Η αυξημένη ακρίβεια βοηθά σε μία πιο ακριβή εκτίμηση του QoT[51], το οποίο με τη σειρά του δίνει στο διαχειριστή του δικτύου τη δυνατότητα να μειώσει τα περιθώρια, να λάβει πιο αποδοτικές αποφάσεις και να μειώσει τα συνολικά κόστη εγκατάστασης. Μερικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης μπορούν να λάβουν υπόψιν τις ανακρίβειες του QoT εκτιμητή[52], αλλά ακόμη και αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να επωφεληθούν από πιο ακριβής μετρικές. Επίσης το συγκεκριμένο πλαίσιο το οποίο αξιοποιεί τις συσχετίσεις στο πεδίο του χώρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή μετρικών για συγκεκριμένους συνδέσμους. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε επίπεδο συνδέσμου. Ο εντοπισμός ενός QoT προβλήματος μπορεί να βοηθήσει τον διαχειριστή του δικτύου να λύσει το πρόβλημα (αν μπορεί να λυθεί) ή να λάβει κατάλληλα μέτρα προτού η βλάβη επηρεάσει σημαντικά το QoT οποιαδήποτε μονοπατιού ή τη λειτουργία του δικτύου συνολικά. Είναι λογικό ότι όσο καλύτερη είναι η ακρίβεια τόσο μικρότερα soft failures μπορούμε να εντοπίσουμε. Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν τις βελτιώσεις στην ακρίβεια που επιτυγχάνει το προτεινόμενο πλαίσιο και πώς αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό σε επίπεδο συνδέσμου δύο ειδών σφαλμάτων τα οποία σχετίζονται με αυξημένο θόρυβο.

Μοντελοποίηση

Θεωρούμε τη μοντελοποίηση του δικτύου και το μοντέλο φυσικού επιπέδου που χρησιμοποιούμε και στις προηγούμενες ενότητες. Οι υποβαθμίσεις ASE, SCI, XCI θεωρούμε και εδώ ότι είναι γενικά αθροιστικές ανά σύνδεσμο. Παρ' όλα αυτά οι υποβαθμίσεις XCI, δηλαδή οι υποβαθμίσεις που προκαλούνται από γειτονικά κανάλια, εξαρτώνται γενικά από το φορτίο του δικτύου (πόσα κανάλια είναι ενεργά) και είναι διαφορετικές για διαφορετικά κανάλια που περνάνε από τον ίδιο σύνδεσμο. Έτσι όταν οι XCI θεωρούνται αθροιστικές ανά σύνδεσμο εισάγεται ένα σφάλμα που εξαρτάται από κάποιες λεπτομέρειες. Για παράδειγμα το σφάλμα είναι μικρό όταν το φορτίο του δικτύου είναι μεγάλο και άρα όλα τα κανάλια έχουν παρόμοιους γείτονες και άρα παρουσιάζουν

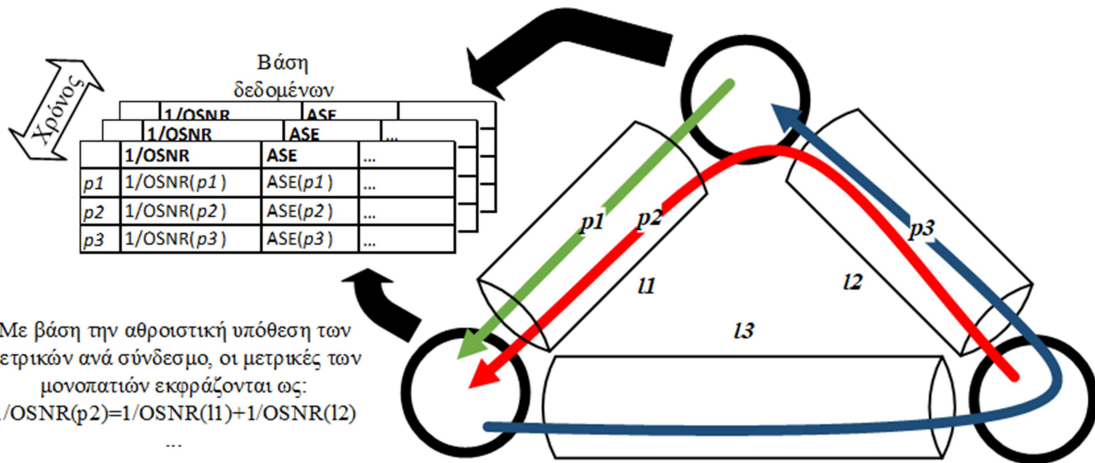
παρόμοιες τιμές παρεμβολών. Επίσης υποθέτουμε ότι οι τιμές που αναφέρονται από ένα OPM έχουν κάποιο βαθμό αβεβαιότητας που εξαρτάται από τον DSP αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την (αθροιστική) παράμετρο στο δέκτη. Ο στόχος μας είναι να βελτιώσουμε την ακρίβεια της εκάστοτε μετρητικής παραμέτρου (π.χ. ASE), καθώς και να εντοπίσουμε soft failures που σχετίζονται με αυτή τη μετρητική παράμετρο. Σημειώνουμε ότι η παραπάνω μοντελοποίηση υποθέτει ότι τα μονοπάτια που μοιράζονται τον ίδιο σύνδεσμο (σε διαφορετικό φάσμα) έχουν τις ίδιες μετρητικές τιμές, πράγμα που δεν ισχύει ακριβώς στην πραγματικότητα. Αυτή είναι η αθροιστική υπόθεση ανά σύνδεσμο που αναφέραμε παραπάνω και η οποία εισάγει ένα σφάλμα στην ακρίβεια των εκτιμήσεων.

Ο στόχος μας είναι να καθορίσουμε τις διατεματικές παραμέτρους \mathbf{y}_N , με $\mathbf{y}_N = \mathbf{R}_N \mathbf{x}$. Η μέθοδος Network kriging (NK) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκτήσουμε την καλύτερη (για ό,τι αφορά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα) γραμμική εκτίμηση του \mathbf{y}_N . Η ακρίβεια εκτίμησης εξαρτάται επίσης από τον αριθμό των παρακολουθούμενων μονοπατιών. Όμως ο αριθμός των μονοπατιών επηρεάζει και το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Έτσι μπορούμε να επιλέξουμε τις συσκευές παρακολούθησης που χρησιμοποιούμε στην εξίσωση για να αντισταθμίσουμε το χρόνο εκτέλεσης με την ακρίβεια. Όταν ο πίνακας δρομολόγησης είναι πλήρους τάξης τότε έχουμε την καλύτερη δυνατή ακρίβεια εκτίμησης λαμβάνοντας υπόψιν πάντα και την ακρίβεια εκτίμησης του μοντέλου η οποία δεν είναι βέλτιστη αφού η αθροιστική υπόθεση εισάγει κάποιο σφάλμα.

Μείωση των αβεβαιοτήτων

Ο πρώτος μας στόχος είναι να μειώσουμε την αβεβαιότητα των παρακολουθούμενων μετρικών. Ένα OPM μετράει συγκεκριμένες μετρικές με κάποιο σφάλμα [53][54]. Το σφάλμα στις διατεματικές μετρήσεις ενός μονοπατιού μπορεί να είναι σημαντικό (π.χ. για το OSNR μπορεί να είναι 0.5-1 dB [53][55]). Ένα σημαντικό ποσοστό αυτού του σφάλματος οφείλεται από τις ανακρίβειες του μετρητικού αλγορίθμου. Αυτό το σφάλμα χωρίζεται σε ένα συστηματικό λάθος και ένα τυχαίο λάθος. Υποθέτουμε ότι το συστηματικό σφάλμα αφαιρείται από την συσκευή με κατάλληλη ρύθμιση και εστιάζουμε στο τυχαίο σφάλμα με μηδενική μέση τιμή. Επίσης η παράμετρος που θέλουμε να μετρήσουμε μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά. Για παράδειγμα το πραγματικό OSNR εξαρτάται από συγκεκριμένα φαινόμενα πόλωσης τα οποία μπορεί να είναι χρονικά μεταβαλλόμενα. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ένας καλά ορισμένος μέσος όρος που αναπαριστά την κατάσταση του δικτύου για ένα δεδομένο μικρό χρονικό διάστημα και που είναι αυτό που θέλουμε να μετρήσουμε. Με άλλα λόγια υποθέτουμε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν το σφάλμα (το τυχαίο σφάλμα μηδενικής μέσης τιμής και η διακύμανση της πραγματικής τιμής) αφορούν μικρά χρονικά διαστήματα και θέλουμε να μειώσουμε αυτό το σφάλμα. Από την άλλη μεριά τα φαινόμενα μέσης και μεγάλης χρονικής κλίμακας αναπαριστούν αλλαγές στην κατάσταση του δικτύου και όχι σφάλματα μέτρησης. Τέλος τα σφάλματα διαφορετικών μονοπατιών μπορεί να είναι ή και να μην είναι συσχετισμένα (ή ένας από τους παράγοντες μπορεί να είναι συσχετισμένος και ο άλλος όχι). Παρακάτω θεωρούμε ότι δεν είναι συσχετισμένα που είναι και η πιο δύσκολη περίπτωση. Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια παρακολούθησης θα αξιοποιήσουμε τόσο χωρική όσο και χρονική συσχέτιση των διαθέσιμων μετρητικών δεδομένων.

Ο συνηθισμένος τρόπος για να βελτιώσουμε την ακρίβεια παρακολούθησης είναι να αξιοποιήσουμε τις διαθέσιμες πληροφορίες στο πεδίο του χρόνου. Όπως αναφέραμε παραπάνω η ακρίβεια της παρακολουθούμενης πληροφορίας εξαρτάται μεταξύ άλλων και από χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα. Για να μειώσουμε την αβεβαιότητα των μετρήσεων μπορούμε να συλλέγουμε μετρητική πληροφορία σε διάφορες χρονικές στιγμές όπου οι παρακολουθούμενες τιμές αναμένεται να είναι



Εικόνα 19 Ένα οπτικό δίκτυο με πληροφορίες στη βάση δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συσχέτιση τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο χώρο

διαφορετικές. Ο ακριβής χρονισμός τη συλλογής της πληροφορίας εξαρτάται από την εκάστοτε παράμετρο και είναι εκτός του πεδίου της παρούσας έρευνας, αλλά μετρήσεις ανά κάποια λεπτά είναι γενικά κατάλληλες για τα φαινόμενα μικρής χρονικής κλίμακας που εξετάζουμε. Ο μέσος όρος των μετρήσεων στο χρόνο μπορεί να βοηθήσει να μειώσουμε την διακύμανση του σφάλματος περίπου γραμμικά ανάλογα με τον αριθμό των περιόδων που θεωρούμε.

Επίσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και συσχέτιση δεδομένων στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική NK που παρουσιάσαμε παραπάνω ώστε να εκτιμήσουμε τις μετρικές ανά σύνδεσμο θέτοντας το πίνακα R_N να ισούται με τον ταυτοτικό πίνακα και παίρνοντας $y_N = [x_1, x_2, \dots, x_{|L|}]$. Οι εκτιμώμενες μετρικές συνδέσμων υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις τιμές των παρακολουθούμενων μονοπατιών (κάποια από τα οποία μπορεί να χρησιμοποιούν τους ίδιους συνδέσμους). Έτσι αξιοποιούμε τη χωρική συσχέτιση για να μειώσουμε τα σφάλματα μετρήσεων. Μετά οι μετρικές ανά μονοπάτι επαναυπολογίζονται βάσει των τιμών ανά σύνδεσμο. Επίσης μπορούμε να συνδυάσουμε τη χωρική με την χρονική συσχέτιση. Η πληροφορία που παρακολουθείται σε διαφορετικές περιόδους χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό του y_M διανύσματος (και του αντίστοιχου R_M πίνακα) ώστε το NK να τρέξει με επιπλέον πληροφορία και να μειωθεί περαιτέρω το σφάλμα. Η Εικόνα 19 αναπαριστά αυτή τη διαδικασία.

Για να αξιοποιήσουμε τη χρονική συσχέτιση και τις μετρήσεις που παίρνουμε από πολλές περιόδους, συμπληρώνουμε το διάνυσμα y_M με αυτές τις μετρήσεις και ταυτόχρονα εισάγουμε τις κατάλληλες γραμμές στον πίνακα R_M που αντιστοιχούν σε αυτές τις μετρήσεις. Όμως, όπως είδαμε παραπάνω, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου εξαρτάται από το μέγεθος του R_M . Για να μειώσουμε το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου για μεγάλο αριθμό περιόδων παρατήρησης, μπορούμε να δημιουργήσουμε μικρές ομάδες παρατηρήσεων, να εκτελέσουμε ανεξάρτητα το NK για αυτές, και μετά να εκτελέσουμε NK με τα συνδυασμένα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να αξιοποιήσουμε δεδομένα 100 περιόδων, μπορούμε να δημιουργήσουμε 10 ομάδες με 10 περιόδους η κάθε μία. Μετά εκτελούμε NK για να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους των συνδέσμων και άρα και τις μετρικές των μονοπατιών που ανήκουν στην εκάστοτε ομάδα. Τέλος, συνδυάζουμε τις ομαδοποιημένες μετρικές μονοπατιών και εκτελούμε NK ξανά, αποκτώντας τις τελικές μετρικές ανά σύνδεσμο και μετά ανά μονοπάτι όπου ο θόρυβος είναι σημαντικά μειωμένος. Σημειώνουμε ότι η καλύτερη μείωση του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί αν εκτελέσουμε NK με όλες τις παρατηρήσεις ταυτόχρονα επειδή η ταυτόχρονη συσχέτιση των παρατηρήσεων θα είναι πιο αποτελεσματική, αλλά αυτό απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης.

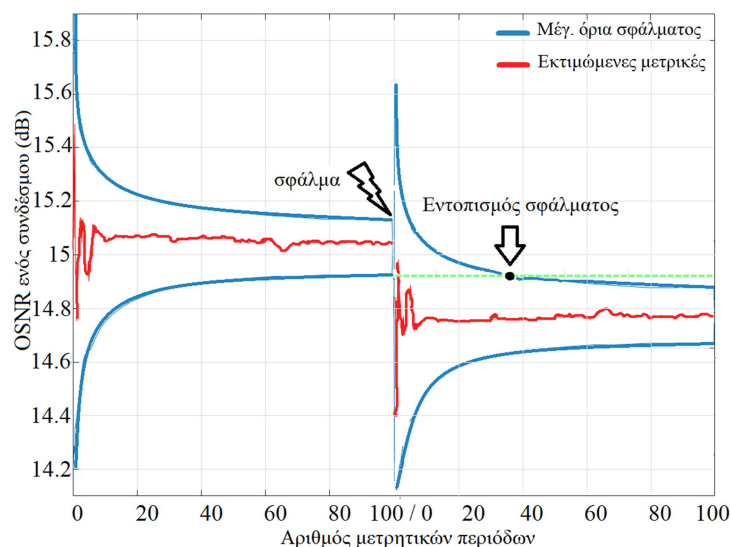
Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων, όπως δείχνουμε παρακάτω στις προσομοιώσεις. Όλες οι εφαρμογές που βασίζονται σε παρακολουθούμενη πληροφορία μπορούν να επωφεληθούν από αυτές τις πιο ακριβείς τιμές. Για παράδειγμα, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενες ενότητες, ένα κρίσιμο σημείο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της αναβάθμισης ενός δικτύου είναι να υπάρχουν ακριβείς εκτιμήσεις της ποιότητας μετάδοσης ώστε τα περιθώρια να είναι μικρά. Στην επόμενη παράγραφο θα περιγράψουμε άλλη μία εφαρμογή που μπορεί να έχει καλύτερη ακρίβεια παρακολούθησης: τον εντοπισμό soft-failure.

Soft failures και εντοπισμός σφαλμάτων

Θα περιγράψουμε αρχικά ορισμένες βλάβες βασικών οπτικών εξαρτημάτων σύμφωνα με τις [45][48] και οι οποίες δεν είναι αυτο-αναφερόμενες στα συστήματα διαχείρισης του δικτύου. Ορισμένες από αυτές τις βλάβες μπορούν να εντοπιστούν με τη χρήση ενός συστήματος παρακολούθησης που έχει υψηλή ακρίβεια όπως αυτό που περιγράψαμε παραπάνω.

Ενισχυτές

Ο ρόλος ενός ενισχυτή είναι να ενισχύσει το αποδυναμωμένο σήμα. Πιθανές απώλειες ισχύος ή και υψηλή έξοδος ισχύος είναι αυτο-αναφερόμενες, αλλά διακυμάνσεις στο κέρδος του ενισχυτή ή στο



laser μπορεί να αυξήσουν τον θόρυβο και άρα να μειώσουν το OSNR χωρίς να προκαλέσουν ειδοποίηση βλάβης.

Ινες

Το λύγισμα της ίνας, η γήρανση του εξοπλισμού, και η απώλειες (π.χ λόγω σκόνης) στις συνδέσεις μπορούν να προκαλέσουν μερική απώλεια ισχύος που θα αντισταθμιστεί στον πλησιέστερο ενισχυτή. Αυτό όμως θα προκαλέσει ανάλογη αύξηση του θορύβου.

Ρυθμιζόμενα Φίλτρα, Οπτικοί Μεταγωγείς, Πομποδέκτες

Εικόνα 20 Μία αναπαράσταση εντοπισμού soft failure.

Ένα συνηθισμένο πρόβλημα αυτών των συσκευών είναι η ανεπαίσθητη μετατόπιση από την αρχική συχνότητα ή η λανθασμένη ευθυγράμμιση των φίλτρων (WSSs) που μπορεί να αυξήσει το θόρυβο λόγω παρεμβολών και το οποίο με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο OSNR. Ανάλογα με την σοβαρότητα του προβλήματος μπορεί να είναι ή όχι αυτο-αναφερόμενο.

Εντοπισμός soft failures

Τώρα θα επικεντρωθούμε στο δεύτερο στόχο αυτή της ενότητας που είναι ο εντοπισμός μιας βλάβης soft failure σε επίπεδο συνδέσμου. Υποθέτουμε ότι για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους οι εκτιμώμενες παράμετροι των τιμών ανά σύνδεσμο (που έχουν βρεθεί με τη μέθοδο που περιγράψαμε στην προηγούμενη υποενότητα) αποθηκεύονται σε μία βάση. Αυτές οι παράμετροι μπορούν μετά να συγκριθούν με τις παρακολουθούμενες τιμές περιοδικά ή να χρησιμοποιηθούν ως

ένα κατώφλι για να πυροδοτήσουν ειδοποιήσεις βλάβης.

Η διαδικασία που θεωρούμε είναι η παρακάτω: στο τέλος κάθε περιόδου ή με το που πυροδοτείται μία ειδοποίηση βλάβης, τρέχουμε τον NK αλγόριθμο με τις νέες παρακολουθούμενες μετρικές ώστε να υπολογίσουμε τις μετρικές σε επίπεδο συνδέσμου. Οποιοδήποτε σημαντική (μεγαλύτερη από το λάθος εκτίμησης των αποθηκευμένων τιμών) διαφορά των παρακολουθούμενων παραμέτρων υποδεικνύει πιθανή βλάβη. Η Εικόνα 20 περιγράφει αυτή τη διαδικασία.

Με αυτήν την μέθοδο η βλάβη εντοπίζεται σε επίπεδο συνδέσμου. Η πηγή του κακού μπορεί να εντοπιστεί αν λάβουμε υπόψιν ποια συγκεκριμένη μετρική έχει επηρεαστεί (OSNR, EDFA θόρυβος) και την αυξομείωση των αντίστοιχων τιμών στο χρόνο. Παρόλο που είναι δύσκολο να συμπεράνουμε την ακριβή αιτία της βλάβης, ο εντοπισμός του συγκεκριμένου συνδέσμου και των αντίστοιχων παραμέτρων που έχουν επηρεαστεί μπορούν να δώσουν κρίσιμες πληροφορίες στο διαχειριστή του δικτύου προτού η βλάβη επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία του δικτύου. Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού βλαβών μπορεί να χρησιμοποιήσει τις μεθόδους της προηγούμενης παραγράφου για την μείωση της αβεβαιότητας των τιμών. Με αυτόν τον τρόπο θα παρέχονται πιο ακριβείς εκτιμήσεις.

Αποτελέσματα

Αξιολογήσαμε την απόδοση του προτεινόμενου πλαισίου της μείωσης αβεβαιότητας και εντοπισμού βλαβών κάνοντας προσομοιώσεις. Χρησιμοποιήσαμε τις τοπολογίες δικτύου DT και NSFNET όπως τις είχαμε ορίσει σε προηγούμενες ενότητες. Ο τύπος των ινών υποθέσαμε ότι είναι SSMF με συντελεστή εξασθένησης 0.22 dB/km, παράμετρο διασποράς 16.7 ps/nm/km, και μη γραμμικό συντελεστή 1.3 1/W/km. Το μήκος του τέθηκε ίσο με 100 km και ο θόρυβος EDFA σε 5 dB. Τα μονοπάτια στο δίκτυο είναι είτε 100G (32Gbaud-QPSK) είτε 200G (56Gbaud-QPSK) και εγκαθίστανται χρησιμοποιώντας τον RWA/RSA αλγόριθμο της [21], αλλά τα αποτελέσματα μπορούν να επαληθευτούν με τη χρήση οποιαδήποτε RWA/RSA αλγορίθμου.

Μείωση της αβεβαιότητας

Πρώτα εξετάζουμε τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων των παρακολουθούμενων μονοπατιών. Για να προσομοιώσουμε τις αβεβαιότητες των παρατηρούμενων τιμών εισάγουμε Gaussian θόρυβο με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση 0.16 dB στο OSNR του κάθε μονοπατιού (άλλες αθροιστικές παράμετροι μπορούν να μελετηθούν επίσης), που αντιστοιχεί σε μέγιστο σφάλμα 0.6 dB με μεγάλη πιθανότητα (>0.9995), και το οποίο είναι μία τυπική τιμή για πολλά OPMs [53][54][55]. Το αντίστοιχο μέσο τετραγωνικό σφάλμα mean square error (MSE) ανά μονοπάτι ήταν 0.0387 dB. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τεχνικών χωρικής και χρονικής συσχέτισης της προηγούμενης παραγράφου με παρατηρούμενη πληροφορία από διάφορες χρονικές περιόδους. Στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 1 παρουσιάζουμε επίσης το αναμενόμενο σφάλμα όταν χρησιμοποιείται μόνο συσχέτιση στο πεδίο του χρόνου (μέσος όρος των παρατηρούμενων τιμών).

Το MSE ανά μονοπάτι μετά την εφαρμογή της πρότασής μας για 100 περιόδους είναι της τάξης του 10^{-4} dB. Το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης για έναν μοναδικό σύνδεσμο είναι περίπου 0.14 dB για την DT τοπολογία και 0.09 dB για την NSFNET. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στους πιο μικρούς συνδέσμους των δικτύων (100km για το DT και 360km για το NSFNET). Αυτοί οι σύνδεσμοι έχουν πολύ υψηλές τιμές OSNR και έτσι μικρές διακυμάνσεις στην εκτίμηση προκαλούν μεγάλο σφάλμα. Το σφάλμα (τόσο το μέσο όσο και το μέγιστο) είναι μεγάλο όταν τα δεδομένα μόνο μίας χρονικής περιόδου λαμβάνονται υπόψιν και μειώνεται με την χρήση περαιτέρω δεδομένων από επιπλέον χρονικές περιόδους. Όταν ο αριθμός των περιόδων είναι μικρός, η προτεινόμενη μέθοδος που

Πίνακας 1: Μετρικές ακρίβειας OSNR για το δίκτυο DT (και NSFNET σε παρένθεση)

# περιόδου	Χρον. συσχέτιση $\frac{\sigma^2}{N}$ ανά μονοπάτι σε dB	MSE προτεινόμενης μεθόδου ανά μονοπάτι σε dB	Μέγ. λάθος μονοπατιού προτεινόμενης μεθόδου σε dB	MSE προτεινόμενης μεθόδου ανά σύνδεσμο σε dB	Μέγ. Λάθος προτεινόμενης μεθόδου για έναν σύνδεσμο σε dB
1	0.0256	0.0093 (0.0074)	0.9236 (0.7186)	0.0670 (0.0273)	1.995 (1.0182)
2	0.0128	0.0050 (0.0039)	0.5182 (0.4194)	0.0380 (0.0141)	1.3733 (0.734)
10	0.00256	0.0012 (0.0010)	0.3295 (0.2542)	0.0035 (0.003)	0.612 (0.39)
50	5.12e-4	5.12e-4 (3.8721e-4)	0.1332 (0.098)	6.8493e-4 (5.8321e-4)	0.22 (0.1410)
100	2.56e-4	2.56e-4 (2.56e-4)	0.1309 (0.0967)	3.5627e-4 (2.7854e-4)	0.1391 (0.0857)

συνδυάζει χωρική και χρονική συσχέτιση είναι πολύ πιο ακριβής από τον απλό μέσο όρο των παρατηρούμενων μετρικών. Όσο οι περίοδοι αυξάνονται, η ακρίβεια του NK φτάνει σε ένα όριο και συγκλίνει με αυτή του απλού μέσου όρου. Ο λόγος είναι ότι το μοντέλο δικτύου που θεωρήσαμε υποθέτει ότι οι μετρικές τιμές (ανά σύνδεσμο) των μονοπατιών που διασχίζουν τους ίδιους συνδέσμους είναι ίσες, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι λόγω των ελαφρώς διαφορετικών παραμέτρων τους (κεντρική συχνότητα, συνολικό φάσμα). Επίσης έχουμε υποθέσει ότι το σφάλμα διαφορετικών μονοπατιών είναι ασυσχέτιστο. Αυτό διαταράσσει περαιτέρω την υπόθεση της ισότητας των μετρικών. Το αποτέλεσμα είναι ότι δεν είναι εφικτή η τέλεια εκτίμηση των μετρικών ανά σύνδεσμο ανεξάρτητα από τον αριθμό των μετρητικών περιόδων. Για 100 περιόδους το λάθος στο μεγαλύτερο σύνδεσμο του δικτύου NSFNET (3400Km) είναι της τάξης των 10^{-4} dB και του DT (460Km) της τάξης 10^{-3} dB. Όπως ήταν αναμενόμενο η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου βελτιώνεται ως συνάρτηση του αριθμού των μονοπατιών που είναι διαθέσιμα στο δίκτυο.

Συνολικά παρατηρούμε ότι η μέθοδος για την μείωση της αβεβαιότητας βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των αναφερόμενων παραμέτρων. Σχετικά με τη συσχέτιση στο πεδίο του χρόνου υπάρχει σχεδόν 40% βελτίωση από το να πάμε από μία σε δύο μετρητικές περιόδους, ενώ η χρήση περαιτέρω περιόδων παρέχει επιπλέον αλλά μειωμένα οφέλη. Σημειώνουμε ότι για κάθε περίοδο παρακολούθησεων που λαμβάνουμε υπόψιν, ουσιαστικά προσθέτουμε περισσότερα μονοπάτια στον R_M πίνακα, πράγμα που επηρεάζει το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος εκτέλεσης του NK για μία περίοδο παρατηρήσεων (213 μονοπάτια) είναι 0.02 δευτερόλεπτα, ενώ για 6 περιόδους (1278 μονοπάτια) είναι 1.3 δευτερόλεπτα (Matlab και Core i5u). Ο λόγος είναι ότι η πολυπλοκότητα του NK αλγορίθμου εξαρτάται από τον κύβο του αριθμού των μονοπατιών (βλ. αντίστοιχη προηγούμενη ενότητα). Όταν οι παρατηρήσεις είναι πολλές (>10) χρησιμοποιούμε την τεχνική ομαδοποίησης που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο για να μειώσουμε το χρόνο εκτέλεσης. Για 10 ομάδες των 10 παρατηρήσεων η κάθε μία (100 συνολικά), ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης είναι 80 δευτερόλεπτα. Ο χρόνος εκτέλεσης δεν είναι μη ασήμαντος για εφαρμογές όπως εκτίμηση QoT. Για εντοπισμό βλαβών soft-failure, ο χρόνος εκτέλεσης παίζει ένα μικρό ρόλο, άλλα παρόλα αυτά δεν είναι κρίσιμος παράγοντας. Τα προβληματικά μονοπάτια δεν έχουν αστοχήσει τελείως, λειτουργούν κοντά στα όριά τους και ο εντοπισμός των βλαβών παρέχει τη δυνατότητα να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την αποφυγή περαιτέρω προβλημάτων. Σε κάθε περίπτωση ο χρόνος εκτέλεσης που παρατηρήσαμε ήταν κοντά στο λεπτό και φαίνεται λογικός για τέτοιες εφαρμογές. Μία άλλη σημαντική μετρική είναι το περιθώριο που ένας διαχειριστής δικτύου μπορεί να εξοικονομήσει χρησιμοποιώντας το πλαίσιο μας. Υποθέτοντας ότι το μέγιστο σφάλμα των συσκευών παρακολούθησης είναι 0.6 dB, αυτό είναι και το περιθώριο που ο διαχειριστής πρέπει να

Πίνακας 2: Υποβαθμίσεις του OSNR για διάφορες τιμές θορύβου ενισχυτή για έναν EDFA για το δίκτυο DT (και NSFNET σε παρένθεση)

Επιπλέον θόρυβος ενός EDFA σε dB	Ελάχ. υποβάθμ. OSNR ενός συνδέσμου σε dB	Μεγ. υποβάθμ. OSNR ενός συνδέσμου σε dB
0.5	0.0744 (0.0160)	0.1749 (0.1733)
1	0.1564 (0.0339)	0.3631 (0.3599)
1.5	0.2465 (0.0539)	0.5650 (0.5602)
2	0.3455 (0.0763)	0.7808 (0.7744)

προσθέσει ώστε η εκάστοτε παράμετρος να είναι πάντα μέσα στα όρια. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η πρότασή μας, το μέγιστο λάθος για κάποιο μονοπάτι μπορεί να μειωθεί περίπου στα 0.13 dB. Τα μειωμένα περιθώρια μπορούν να έχουν συγκεκριμένα οφέλη [20][21].

Εντοπισμός Βλαβών

Για να αξιολογήσουμε την προτεινόμενη μέθοδο εντοπισμού βλαβών θεωρήσαμε δύο περιπτώσεις βλαβών: ι) αύξηση του συντελεστή θορύβου ενός ενισχυτή EDFA στο δίκτυο και ιι) αύξηση του συντελεστή εξασθένησης ίνας ενός span. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε σύνδεσμο της τοπολογίας, είτε αυξάνουμε το συντελεστή θορύβου ενός ενισχυτή από τα 5 στα 7 dB με βήματα των 0.5dB, ή αυξάνουμε το συντελεστή εξασθένησης ενός span από τα 0.22 στα 0.26 dB/km σε βήματα των 0.01 dB/km. Ο αυξημένος EDFA θόρυβος συνεπάγεται επιπλέον ASE θόρυβο και άρα μειώνει το OSNR. Ο αυξημένος συντελεστής εξασθένησης της ίνας αναγκάζει τον EDFA του αντίστοιχου span να αυξήσει το κέρδος του ώστε να αντισταθμίσει την επιπλέον απώλεια ισχύος στο span. Αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα αντίστοιχη αύξηση του ASE θορύβου. Αυτές οι υποβαθμίσεις του σήματος μπορεί να αντιστοιχούν για παράδειγμα σε βλάβη soft failure του laser του ενισχυτή, σε λύγισμα της ίνας ή σε μερικές κακές ενώσεις μετά από συγκόλληση ίνας. Μετά την εισαγωγή της βλάβης στο δίκτυο συγκρίνουμε την υποβάθμιση του OSNR ανά σύνδεσμο σε dB και καταγράφουμε την ελάχιστη και μέγιστη διαφορά σε κάθε περίπτωση σε σύγκριση με τις αρχικές OSNR μετρικές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 2 και 3. Η ελάχιστη διαφορά αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο σύνδεσμο αφού αυτός αποτελείται από πολλά spans και έτσι η βλάβη ενός span δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο συνολικό QoT αυτού του συνδέσμου. Από την άλλη μεριά

Πίνακας 3: Υποβαθμίσεις του OSNR για διάφορες τιμές συντελεστή εξασθένησης ίνας ενός span για το δίκτυο DT (και NSFNET σε παρένθεση)

Επιπλέον εξασθένηση ίνας ενός span σε dB	Ελάχ. υποβάθμ. OSNR ενός συνδέσμου σε dB	Μεγ. υποβάθμ. OSNR ενός συνδέσμου σε dB
0.01	0.1569 (0.034)	0.3642 (0.440)
0.02	0.3466 (0.078)	0.7831 (0.959)
0.03	0.5742 (0.1326)	1.2588 (1.5624)
0.04	0.8448 (0.2004)	1.7920 (2.2476)

η μέγιστη διαφορά υπάρχει στους συνδέσμους που αποτελούνται μόνο από ένα span.

Στον Πίνακα 2 εξετάζουμε την χειροτέρευση του OSNR ενός συνδέσμου ως συνάρτηση της αύξησης του EDFA συντελεστή θορύβου. Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση του DT δικτύου, όταν ο συντελεστής θορύβου ενός EDFA χειροτερεύει περισσότερο από 2 dB προκαλεί χειροτέρευση του OSNR του συνδέσμου κατά

τουλάχιστον 0.34 dB το οποίο είναι ανιχνεύσιμο από το προτεινόμενο πλαίσιο. Παρόμοιες μετρικές παρατηρούμε και για το NSFNET δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση όμως ο μεγαλύτερος σύνδεσμος (3400Km) πλήττεται λιγότερο από την υποβάθμιση ενός span και έτσι οι υποβαθμίσεις είναι

δύσκολα ανιχνεύσιμες.

Στον Πίνακα 3 καταγράφουμε την υποβάθμιση στο OSNR ως συνάρτηση της αύξησης του συντελεστή εξασθένησης της ίνας. Για την περίπτωση του DT δικτύου, μία αύξηση του συντελεστή ενός span κατά 0.02 dB/km μπορεί να ανιχνευτεί για οποιοδήποτε σύνδεσμο. Σε μερικούς συνδέσμους ακόμα και μία αύξηση 0.01 dB/km μπορεί να ανιχνευτεί. Παρόμοιες μετρικές παρατηρούμε και για το NSFNET και παρόμοιες υποβαθμίσεις μπορούν να ανιχνευτούν αν χρησιμοποιήσουμε τα αντίστοιχα όρια ακρίβειας.

Συμπεράσματα

Παρουσιάσαμε ένα πλαίσιο το οποίο α) βελτιώνει την ακρίβεια των αναφερόμενων δεδομένων μέτρησης και β) μπορεί να εντοπίσει βλάβες soft failures σε επίπεδο συνδέσμου. Η βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τα περιθώρια του δικτύου. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να μεταφραστεί σε μία σειρά από οφέλη όπως ακριβής εκτίμηση του QoT, και εντοπισμός βλαβών. Ο εντοπισμός βλαβών μπορεί να βοηθήσει τον διαχειριστή του δικτύου να αναγνωρίσει και να εντοπίσει τις βλάβες προτού αυτές γίνουν προβληματικές για τη λειτουργία του δικτύου. Χρησιμοποιώντας δύο τοπολογίες δικτύου και ρεαλιστικές φυσικές παραμέτρους παρατηρήσαμε MSE της τάξης 10^{-4} dB και ένα μέγιστο λάθος 0.14 dB για το εκτιμώμενο OSNR των εγκατεστημένων μονοπατιών.

Κεφάλαιο 5 Διαστρωματική προσαρμογή οπτικών δικτύων

Σύνοψη

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν μεγάλα περιθώρια που λαμβάνουν υπόψη τη χειροτέρευση της ποιότητας μετάδοσης από διάφορους παράγοντες όπως γήρανση εξοπλισμού και λανθασμένες διαχειριστικές ενέργειες. Η λειτουργία του δικτύου δυναμικά και πιο κοντά στις πραγματικές του δυνατότητες αυξάνει την αποδοτικότητα και μειώνει τα έξοδα κεφαλαίου - capital expenditure (CAPEX). Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε μία διαστρωματική εργαλειοθήκη που αξιοποιεί την παρατηρούμενη πληροφορία και τις δυνατότητες των ευέλικτων οπτικών δικτύων. Προσαρμόζει τις παραμέτρους του δικτύου και ρυθμίζει το QoT ώστε να επιτύχει συνολικά υψηλή αποδοτικότητα του δικτύου. Η εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία πληθώρα περιπτώσεων στην ανάπτυξη ή στη λειτουργία του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνουμε τα αυξημένα περιθώρια κατά την αρχική εγκατάσταση των μονοπατιών ή κατά την επιδιόρθωση σφαλμάτων, προσαρμόζουμε το δίκτυο σε μεταβαλλόμενες απαιτήσεις κίνησης και επαναφέρουμε τα περιθώρια όταν μικρές βλάβες όπως δυσλειτουργία ή γήρανση εξοπλισμού κάνουν μη αποδεκτή την ποιότητα μετάδοσης κάποιων μονοπατιών. Στην τελευταία περίπτωση η εργαλειοθήκη που προτείνουμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επαναρρυθμίσουμε κατάλληλα τα μονοπάτια ώστε να διορθώσουμε την ποιότητα μετάδοσης τους και να αναβάλλουμε την εγκατάσταση αναγεννητών.

Εισαγωγή

Η προτεινόμενη εργαλειοθήκη αξιοποιεί τις δυνατότητες ρύθμισης των ευέλικτων πομποδεκτών (Bandwidth Variable Transponders—BVTs) και την ανατροφοδότηση πληροφορίας από το φυσικό επίπεδο. Ο διαχειριστής δικτύου μπορεί να χρησιμοποιήσει την εργαλειοθήκη για να λάβει κατάλληλα μέτρα επαναρρύθμισης των παραμέτρων του δικτύου έτσι ώστε να προσαρμόζει κατάλληλα τα περιθώρια για να είναι χαμηλά αλλά η ποιότητα της μετάδοσης να είναι πάντα αποδεκτή και να επιτυγχάνεται υψηλή αποδοτικότητα του δικτύου[56][57]. Πιο συγκεκριμένα η εργαλειοθήκη λαμβάνει υπόψη το συνδυασμό τριών τεχνικών επαναρρύθμισης για να ελέγξει το QoT ενός μονοπατιού: (i) αλλαγή του Forward Error Correction (FEC) overhead (ποσοστού περίσσειας πληροφορίας στους κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων), (ii) προσαρμογή της ζώνης φύλαξης φάσματος για τον έλεγχο των παρεμβολών των γειτονικών μονοπατιών, και (iii) προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης. Ανάλογα με τις δυνατότητες του πομποδέκτη, τις κλάσεις υπηρεσιών και τις συμφωνίες υπηρεσιών - Service Layer Agreements (SLAs), αυτές οι προσαρμογές μπορούν να συνδυαστούν με την αλλαγή του ρυθμού συμβόλου του κατάλληλου μονοπατιού για να διατηρηθεί ή όχι ο συνολικός ρυθμός της εκάστοτε σύνδεσης. Έτσι, αυτές οι τεχνικές οδηγούν σε ένα σύνολο από ενέργειες προσαρμογής που μπορεί να περιλαμβάνουν επαναρρύθμιση του φάσματος σε ένα ή περισσότερα μονοπάτια. Επειδή οι διαθέσιμοι συνδυασμοί βελτιστοποίησης στα EON είναι πάρα πολλοί, η εργαλειοθήκη ψάχνει τις πιθανές λύσεις χρησιμοποιώντας διάφορα κριτήρια όπως οι απαιτούμενες επιπλέον ενέργειες του επιπέδου ελέγχου του δικτύου (δηλ. οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν και ο αριθμός των μονοπατιών που προσαρμόζονται) ή το απαιτούμενο επιπλέον φάσμα. Η εργαλειοθήκη μπορεί επιπλέον να αξιοποιήσει ένα μοντέλο εκτίμησης της ποιότητας μετάδοσης όπως το [51] ώστε να εκτιμήσει αν μία ενέργεια θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του QoT σε αποδεκτά επίπεδα. Εναλλακτικά μπορούμε να εφαρμόζουμε σταδιακά τις αλλαγές, να παρακολουθούμε τις συνέπειες και να προσαρμόζουμε τις αλλαγές κατάλληλα μέχρις ότου να επιτύχουμε τα επιθυμητά περιθώρια.

Εξετάζουμε την εφαρμογή της πρότασής μας στην επαναφορά του δικτύου από *soft failures*. Όπως έχουμε αναφέρει, ορίζουμε ως *soft-failure* μία υποβάθμιση του QoT, σε αντίθεση με μία *hard failure*

η οποία προκαλεί πλήρη απώλεια σήματος π.χ. λόγω κοπής ίνας ή ολοκληρωτική βλάβη κάποιου εξοπλισμού. Η συνήθης πρακτική είναι να χρησιμοποιούνται υψηλά περιθώρια τα οποία μπορούν να απορροφήσουν τα soft failures μέχρι ενός βαθμού. Όταν αυτά τα περιθώρια ξεπεραστούν, οι διαχειριστές δικτύων βασίζονται σε μηχανισμούς προστασίας/αποκατάστασης[58]. Ένα δίκτυο που λειτουργεί με μειωμένα περιθώρια έχει μονοπάτια που το QoT τους είναι κοντά στο αποδεκτό όριο. Έτσι επιτυγχάνει υψηλή αποδοτικότητα και χρειάζεται λιγότερο εξοπλισμό, αλλά είναι επιρρεπές σε soft failures. Η εργαλειοθήκη μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσαρμοστούν οι παράμετροι μετάδοσης των προβληματικών μονοπατιών ώστε το QoT τους να επανέλθει σε αποδεκτά επίπεδα. Αν η βλάβη διορθωθεί και το QoT βελτιωθεί τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ξανά την εργαλειοθήκη ώστε να μειώσουμε τα αυξημένα περιθώρια και να επαναφέρουμε τις αρχικές ρυθμίσεις ή κάποιες άλλες πιο κατάλληλες. Με αυτόν τον τρόπο διατηρούμε σε υψηλό επίπεδο τη χρήση των πόρων και άρα και την αποδοτικότητα του δικτύου.

Αξιολογούμε τα οφέλη της πρότασής μας προσομοιώνοντας διάφορα σενάρια soft-failures και συγκρίνοντάς τα με την παραδοσιακή πρακτική του σχεδιασμού του δικτύου με υψηλά περιθώρια. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη ενόσω το QoT είναι πάντα σε αποδεκτά επίπεδα.

Προηγούμενες εργασίες

Η έρευνα για τη δυναμική βελτιστοποίηση του δικτύου είναι αρκετά εκτεταμένη. Στις [59] και [60] παρουσιάζονται συγκεκριμένοι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος - routing and wavelength assignment (RWA). Κάνουν διαστρωματική βελτιστοποίηση με την έννοια ότι λαμβάνουν υπόψιν τις μετρικές ποιότητας σήματος του φυσικού επιπέδου ώστε να βελτιώσουν το QoT των μονοπατιών και να μειώσουν το ρυθμό απόρριψης νέων συνδέσεων. Με την εμφάνιση των EONs οι δυνατότητες βελτιστοποίησης αυξήθηκαν και νέα προβλήματα εμφανίστηκαν. Στις [61][62] οι συγγραφείς ασχολούνται με τη δυναμική ανασυγκρότηση του φάσματος στα EONs σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και η [62] διερευνεί επιπλέον την επαναρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου μετά από βλάβη. Οι συγγραφείς της [63] προτείνουν δυναμική δημιουργία φασματικών ζωνών φύλαξης σύμφωνα με τις μετρικές ποιότητας του φυσικού επιπέδου και την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν σημαντική μείωση στο ρυθμό απόρριψης συνδέσεων και ανάλογη αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Τέλος, οι [22][64] εξετάζουν δυναμική κατανομή φάσματος ώστε το δίκτυο να προσαρμόζεται σε μεταβολές των απαιτήσεων κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αποδοτικότητα του δικτύου και μειώνεται η πιθανότητα απόρριψης μίας σύνδεσης.

Ένα άλλο σημαντικό πεδίο έρευνας είναι η μείωση των περιθωρίων. Περιπλέκει περαιτέρω το πρόβλημα της διαστρωματικής βελτιστοποίησης γιατί προσθέτει μία επιπλέον διάσταση: την εξέλιξη των παραμέτρων του δικτύου στο πεδίο του χρόνου. Τα οπτικά δίκτυα σχεδιάζονται παραδοσιακά χρησιμοποιώντας μοντέλα εκτίμησης της ποιότητας μετάδοσης και υψηλά περιθώρια. Συνολικά, τα υψηλά περιθώρια εξασφαλίζουν ότι οι μελλοντικές υποβαθμίσεις (μέχρι ενός σημείου, στο αναμενόμενο QoT στο τέλος του χρόνου ζωής του δικτύου) δεν θα καταστήσουν την ποιότητα μετάδοσης ενός μονοπατιού μη αποδεκτή. Ο σχεδιασμός του δικτύου για να λάβει υπόψιν την εξέλιξη των περιθωρίων γίνεται σε μελέτες πολλαπλών περιόδων (multi-period studies) [20][21] σε αντίθεση με τα τυπικά προβλήματα διαστρωματικής βελτιστοποίησης μίας περιόδου που αναφέραμε παραπάνω. Επιπλέον τα μειωμένα περιθώρια καθιστούν ένα δίκτυο επιρρεπές σε υποβαθμίσεις της ποιότητας σήματος (soft failures) και έτσι επηρεάζουν και τη φάση λειτουργίας του δικτύου.

Η επαναφορά από soft failures (υποβάθμιση QoT) ή hard failures (σοβαρές βλάβες με πλήρη απώλεια σήματος) γίνεται συνήθως από μηχανισμούς προστασίας/επαναφοράς [58]. Στην πρώτη

περίπτωση, συγκεκριμένοι πόροι (π.χ. πομποδέκτες, φάσμα) αφιερώνονται αποκλειστικά για την χρήση σε περίπτωση βλάβης. Έτσι η προστασία είναι μία ακριβή λύση και χρησιμοποιείται κυρίως για συνδέσεις υψηλής (χρυσής) κλάσης όπου απαιτείται εγγυημένη διαθεσιμότητα και ρυθμός μετάδοσης. Από την άλλη μεριά η επαναφορά είναι συνθήως φθηνότερη αφού καθιστά δυνατό το διαμοιρασμό των πόρων αλλά είναι πιο αργή αφού οι πόροι πρέπει να διαμοιραστούν αφότου έχει γίνει η βλάβη.

Τα ελαστικά οπτικά δίκτυα προσφέρουν πολλές διαστάσεις βελτιστοποίησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ρύθμιση του QoT και για την επαναφορά από υποβαθμίσεις του σήματος σύμφωνα με τις τρέχουσες συνθήκες. Στην [66], παρουσιάστηκε μία πειραματική διάταξη με ένα προσαρμοζόμενο σε πραγματικό χρόνο επίπεδο ελέγχου. Αυτή η διάταξη προσαρμοζε το σχήμα διαμόρφωσης και τη θέση στο φάσμα ενός μονοπατιού ώστε να επαναφέρει την ποιότητα μετάδοσης του. Ομοίως οι συγγραφείς των [67] και [68] διερευνούν το συνδυασμό της προσαρμογής του σχήματος διαμόρφωσης και επαναδρομολόγησης μονοπατιού για να επαναφέρουν τις προβληματικές συνδέσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις αναφέρονται σημαντικά οφέλη στο ρυθμό απόρριψης συνδέσεων και στη χρησιμοποίηση φάσματος. Τέλος, η [57] διερεύνησε την μείωση των περιθωρίων και την προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης όταν παρατηρηθεί σημαντική γήρανση εξοπλισμού. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν αύξηση της χωρητικότητας έως 63%.

Από όσο γνωρίζουμε δεν υπάρχει προηγούμενη δουλειά που να μελετά δυναμική διαστρωματική βελτιστοποίηση μέσω ρύθμισης του QoT στα EONs. Προτείνουμε μία εργαλειοθήκη για να διατηρούμε το QoT αρκετά κοντά στο αποδεκτό όριο ώστε να επιτυγχάνουμε υψηλή αποδοτικότητα. Αυτό υπονοεί ότι η εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για να μειώσει το QoT όταν υπάρχει μεγάλη περίσσεια περιθωρίων (π.χ. όταν το μονοπάτι εγκαθίστανται για πρώτη φορά ή όταν διορθώνεται μία βλάβη) αλλά και για να το αυξήσει (π.χ. στην περίπτωση soft failure). Η εργαλειοθήκη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για την προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης των μονοπατιών ώστε να ικανοποιηθούν μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ενώ ταυτόχρονα το QoT είναι πάντα στα κατάλληλα επίπεδα.

Σενάριο δικτύου

Υποθέτουμε ότι τα OPMs είναι προγραμματίσιμα ώστε να πυροδοτούν ειδοποιήσεις σφαλμάτων για συγκεκριμένα μετρήσιμα γεγονότα. Οι ειδοποιήσεις και η παρατηρούμενη πληροφορία μεταφέρονται στον ελεγκτή όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του QoT[39], εντοπισμό σφαλμάτων [69] και για να ληφθούν δυναμικές αποφάσεις βελτιστοποίησης που είναι και το θέμα αυτής της ενότητας. Το έργο ORCHESTRA αναπτύσσει ένα καινούριο ιεραρχικό επίπεδο παρακολούθησης ώστε να επεξεργάζεται αποτελεσματικά ειδοποιήσεις και παρατηρούμενη πληροφορία και να αφαιρεί σημαντικό φόρτο εργασίας από τον κεντρικό ελεγκτή[50]. Μελετούνται επίσης δυνατότητες ζωντανού ελέγχου των μετρητικών συσκευών και προ-προγραμματισμός τους ώστε να είναι δυνατή η πολύ γρήγορη επαναφορά από σφάλματα [70]. Η εργαλειοθήκη που προτείνεται εδώ είναι ανεξάρτητη από το επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης αρκεί να παρέχεται παρατηρούμενη πληροφορία για τον υπολογισμό περιθωρίων και να πυροδοτούνται ειδοποιήσεις όταν το QoT πλησιάζει στο όριο.

Η εργαλειοθήκη εξετάζει τρεις ενέργειες επαναρρύθμισης: i) προσαρμογή του FEC, ii) αναδιάταξη των μονοπατιών στο φάσμα ώστε να ελεγχθούν οι παρεμβολές από γειτονικά μονοπάτια iii) προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης. Ανάλογα με τις δυνατότητες του πομποδέκτη και τις αντίστοιχες κλάσεις υπηρεσίας – service level agreements (SLAs), αυτές οι προσαρμογές μπορούν να συνδυαστούν με την προσαρμογή του ρυθμού συμβόλου ώστε να διατηρηθεί ή όχι ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Για παράδειγμα η προσαρμογή του FEC από το 12% στο 28%

περίσσειας πληροφορίας έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από μία κατάλληλη αύξηση του ρυθμού συμβόλου. Ομοίως, ο ρυθμός συμβόλου μπορεί να προσαρμοστεί όταν αλλάξει το σχήμα διαμόρφωσης.

Η προτεινόμενη εργαλειοθήκη αξιοποιεί την τεχνική push-pull [71] ώστε να μετακινήσει μονοπάτια στο φάσμα χωρίς να διακοπεί η μετάδοση δεδομένων. Το πρώτο βήμα της push-pull τεχνικής είναι να κάνει κράτηση συνεχόμενων ελεύθερων σχισμών φάσματος από την αρχική συχνότητα f στην νέα συχνότητα f' , καθόλο το μήκος του μονοπατιού. Το δεύτερο βήμα είναι να επανασυντονίσει το laser στον πομπό: η κεντρική συχνότητα του μονοπατιού μετακινείται σιγά σιγά από την f στην f' . Τέλος, οι μη χρησιμοποιούμενες σχισμές φάσματος που προκύπτουν απελευθερώνονται προς χρήση από κάποια άλλη σύνδεση. Η προτεινόμενη αλγοριθμική εργαλειοθήκη σε συνδυασμό με την push-pull τεχνική μπορεί να παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες ώστε το δίκτυο να βελτιστοποιηθεί δυναμικά σε μία πληθώρα περιπτώσεων που συζητούνται παρακάτω:

Σενάρια Χρήσης

Υποθέτουμε ότι το δίκτυο λειτουργεί κοντά στις πραγματικές του δυνατότητες με την έννοια ότι τα μονοπάτια έχουν μειωμένα περιθώρια (πάντα επαρκή αλλά όχι χειρότερης περίπτωσης). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή αποδοτικότητα. Ένα σενάριο χρήσης είναι η επαναφορά από *soft failures*. Σε ένα τέτοιο γεγονός θέλουμε να αποφύγουμε την επαναδρομολόγηση μονοπατιών ή την προσθήκη αναγεννητών γιατί και οι δυο περιπτώσεις θεωρούνται ακριβές λύσεις. Ο στόχος μας είναι να βρούμε το σύνολο των δράσεων επαναρρύθμισης που λύνουν το QoT πρόβλημα, ενώ η τοποθέτηση αναγεννητή θα γίνεται μόνο αν δεν υπάρχει άλλος τρόπος να λυθεί το πρόβλημα.

Κατηγοριοποιούμε τις soft failures σε δύο τύπους: προβλέψιμες και απότομες. Μία προβλέψιμη soft failure είναι όταν το QoT χειροτερεύει σταδιακά όπως για παράδειγμα λόγω γήρανσης εξοπλισμού ή λόγω επισκευής κομμένης ίνας. Η απότομη βλάβη σχετίζεται με δυσλειτουργία κάποιου εξοπλισμού όπως για παράδειγμα πρόβλημα σε EDFA και έχει ως αποτέλεσμα απότομη χειρότερηση της ποιότητας μετάδοσης. Όταν μία βλάβη κάνει το QoT (κοντά στο να είναι) μη αποδεκτό τότε πρέπει να το επαναφέρουμε. Η συνηθισμένη πρακτική για τις προβλέψιμες βλάβες είναι να τις συμπεριλάβουμε στα υψηλά περιθώρια, ενώ οι απότομες βλάβες καλύπτονται μερικώς από τα περιθώρια. Μία απότομη βλάβη μπορεί να αναφερθεί (ή όχι) από το σύστημα διαχείρισης του δικτύου και να πυροδοτήσει την επισκευή ή την αντικατάσταση του εξοπλισμού. Παρόλα αυτά το δίκτυο θα λειτουργεί για κάποια περίοδο (ωρών ή ημερών) με τη βλάβη. Έτσι για τις βλάβες που δεν καλύπτονται από τα υψηλά περιθώρια οι διαχειριστές του δικτύου βασίζονται στους παραδοσιακούς μηχανισμούς προστασίας/αποκατάστασης.

Σε ένα οπτικό δίκτυο που λειτουργεί με χαμηλά περιθώρια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εργαλειοθήκη και για τα δύο είδη σφάλματος. Για τις προβλέψιμες βλάβες εφαρμόζουμε την εργαλειοθήκη κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου και σύμφωνα με τις προγραμματισμένες περιόδους συντήρησης. Η εργαλειοθήκη μπορεί να αποφασίσει το πλήρες σύνολο των δράσεων επαναρρύθμισης για την αποκατάσταση του QoT όταν αυτό πλησιάζει το αποδεκτό όριο (FEC threshold). Αν το πρόβλημα δεν μπορεί να επιλυθεί δυναμικά τότε το μονοπάτι μπορεί να επαναδρομολογηθεί ή μπορεί να εγκατασταθεί αναγεννητής. Όλες αυτές οι αποφάσεις μπορούν να προγραμματιστούν με βάση την επόμενη προγραμματισμένη περίοδο συντήρησης. Όπως αναφέραμε, παραδοσιακά θα εγκαθιστούσαμε όλον τον απαιτούμενο εξοπλισμό από την αρχή του χρόνου ζωής του δικτύου –beginning of life (BoL), αναμένοντας αυτές τις προβλέψιμες βλάβες. Η αναβολή εγκατάστασης εξοπλισμού έχει αποδειχθεί ότι έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση του κόστους [20][21].

Στην περίπτωση απότομης βλάβης είναι πιο κατάλληλη μία προ-ορατική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εργαλειοθήκη προτού εγκαταστήσουμε τα μονοπάτια και να αποφασίσουμε από πριν τις ενέργειες επαναρρύθμισης ή να τοποθετήσουμε αναγεννητές. Αυτές οι ενέργειες μπορούν να προγραμματιστούν εκ των προτέρων για να επιτύχουμε εξαιρετικά γρήγορη αποκατάσταση [70]. Αν αυτές οι ενέργειες υλοποιηθούν σε ένα πραγματικό δίκτυο τα οφέλη που μπορούν να αποκτηθούν είναι κοντά σε αυτά της προστασίας/προ-ορατικής αποκατάστασης των hard failures: στην προ-ορατική αποκατάσταση αξιοποιούμε την ανεξαρτησία των γεγονότων βλάβης π.χ. για μοναδικές κοπές ίνας επαναχρησιμοποιούμε εξοπλισμό για διαφορετικές βλάβες [72]. Στο σενάριο απότομης soft failure, η προστασία είναι παρόμοια με το να σχεδιάσουμε το δίκτυο με υψηλά περιθώρια, ενώ η προ-ορατική αποκατάσταση που μπορεί να γίνει από την εργαλειοθήκη μας μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει φάσμα και αναγεννητές για διαφορετικά soft-failures.

Εκτός από την βελτίωση του QoT, η προτεινόμενη εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για να μειώσει το πλεονάζων QoT. Για παράδειγμα, πριν από την εγκατάσταση ενός μονοπατιού το QoT συνήθως εκτιμάται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο φυσικού επιπέδου και υψηλά περιθώρια. Για να μειώσουμε τα περιθώρια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν ακριβή εκτιμητή, όπως τον [51]. Ένας τέτοιος εκτιμητής χρειάζεται αρκετά μονοπάτια να έχουν εγκατασταθεί και να παρακολουθούνται ώστε να παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις. Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι να εγκαταστήσουμε αρχικά τα μονοπάτια με υψηλά περιθώρια (όχι μόνο υψηλό περιθώριο σχεδίασης αλλά και υψηλό περιθώριο συστήματος). Ύστερα να παρακολουθήσουμε τα πραγματικά περιθώρια και να χρησιμοποιήσουμε την εργαλειοθήκη για να επαναρρυθμίσουμε δυναμικά τις παραμέτρους. Για παράδειγμα όταν ένα μονοπάτι εγκατασταθεί και δούμε ότι τα περιθώρια το επιτρέπουν, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα σχήμα διαμόρφωσης μεγαλύτερης τάξης ώστε να έχουμε μεγαλύτερη χωρητικότητα και να εξοικονομήσουμε εξοπλισμό χρησιμοποιώντας τεχνικές ομαδοποίησης κίνησης (traffic grooming) είτε στην τρέχουσα είτε σε κάποια μελλοντική κατάσταση του δικτύου. Μία παρόμοια περίπτωση όπου μπορούμε να μειώσουμε τα πλεονάζοντα περιθώρια είναι όταν αντικαθίσταται προβληματικός εξοπλισμός και η ποιότητα μετάδοσης βελτιώνεται.

Τέλος, άλλη μία περίπτωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εργαλειοθήκη μας είναι όταν οι απαιτήσεις κίνησης αλλάζουν είτε περιοδικά (π.χ. τυπικές ημερήσιες διακυμάνσεις, προγραμματισμένες λήψεις εφεδρικών δεδομένων στα κέντρα δεδομένων) είτε απότομα (π.χ. κάποια μονοπάτια πρέπει να αναβαθμιστούν λόγω αύξησης κίνησης στα κατώτερα μέρη του δικτύου). Σε αυτές τις περιπτώσεις η εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσαρμόσουμε το φάσμα και το ρυθμό διαμεταγωγής των μονοπατιών ενόσω ρυθμίζουμε (προς τις δύο κατευθύνσεις: θετικά και αρνητικά) το QoT ώστε να διασφαλίσουμε υψηλή αποδοτικότητα.

Η Εργαλειοθήκη

Προτείνουμε μία εργαλειοθήκη η οποία λαμβάνει υπόψιν τρεις διαφορετικές ενέργειες επαναρρύθμισης ώστε να ρυθμίσει την ποιότητα μετάδοσης των μονοπατιών: FEC, προσαρμογή της ζώνης φύλαξης φάσματος και προσαρμογή του σχήματος μετάδοσης.

Προσαρμογή FEC

Η πρώτη τεχνική που θεωρούμε είναι η προσαρμογή του FEC. Το FEC βασίζεται στην μετάδοση περίσσειας πληροφορίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διορθώσει σφάλματα στον δέκτη. Η απόδοση του FEC εξαρτάται μεταξύ άλλων από το ποσό της περίσσειας πληροφορίας (overhead).

Προκειμένου να διατηρηθεί ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης, ένα μεγάλο overhead απαιτεί είτε υψηλότερο ρυθμό συμβόλου και άρα και φάσμα υποθέτοντας διαμόρφωση Nyquist, ή ένα σχήμα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης. Ο ρυθμός συμβόλου μπορεί να προσαρμοστεί με πολύ μικρότερα και ακριβή βήματα και άρα είναι συνήθως πιο κατάλληλος για να αντισταθμίσει μικρές διακυμάνσεις στο ρυθμό μετάδοσης. Άρα η προσαρμογή του FEC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανταλλάξουμε QoT με φάσμα. Για παράδειγμα υποθέτοντας εγκατάσταση μονοπατιών με μειωμένα περιθώρια, υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιείται το πιο μεγάλο διαθέσιμο FEC: το χαμηλότερο FEC προσφέρει αποδεκτό QoT, ενώ το πιο μεγάλο χρειάζεται μία παραπάνω σχισμή φάσματος (π.χ. για 25 Gbaud ωφέλιμο ρυθμό συμβόλου, η χρήση 12% ή 28% FEC απαιτεί 3 ή 4 σχισμές για 28 ή 32Gbaud αντίστοιχα, υποθέτοντας ότι θέλουμε να κρατήσουμε τις παρεμβολές χαμηλά ή/και το μονοπάτι διασχίζει πάνω από 6 φίλτρα [73]). Το πιο μεγάλο FEC έχει χαμηλότερο pre-FEC BER όριο και έτσι ένα μονοπάτι με μικρό FEC και μη αποδεκτό QoT μπορεί να έχει αποδεκτό QoT όταν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο FEC. Έτσι σε αυτήν την περίπτωση δεν βελτιώνεται το BER αλλά αλλάζει το κατώτατο αποδεκτό όριο.

Οι συγγραφείς της [74] παρουσίασαν προσαρμογή του ρυθμού συμβόλου χωρίς διακοπή στη μετάδοση δεδομένων, ενώ η [75] παρουσίασε προσαρμογή του FEC χωρίς διακοπή στη μετάδοση δεδομένων. Όταν το απαιτούμενο επιπλέον φάσμα δεν είναι διαθέσιμο σε όλους τους συνδέσμους που διασχίζει το μονοπάτι τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική push-pull [71] για να μετακινήσουμε τα γειτονικά μονοπάτια σε διαφορετική συχνότητα χωρίς απώλεια δεδομένων. Αν κάποιο μονοπάτι δεν πρέπει να μετακινηθεί (π.χ. λόγω συγκεκριμένων πολιτικών) τότε άλλες επιλογές μπορούν να εξεταστούν όπως η μετακίνηση μονοπατιών προς την αντίθετη κατεύθυνση ή να εκτελέσουμε κάποια προσαρμογή που δεν χρειάζεται μετακίνηση στις συχνότητες. Σημειώνουμε ότι κατά την καλύτερη πληροφόρησή μας, οι τρέχοντες πομποδέκτες δεν μπορούν να εκτελέσουν προσαρμογή του FEC ή του ρυθμού συμβόλου χωρίς διακοπή δεδομένων. Απαιτούν τα μονοπάτια να σβήσουν προσωρινά και έτσι μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική make-before-break δηλαδή να ανάψουμε πρώτα ένα άλλο προσωρινό μονοπάτι που θα εξυπηρετήσει την κίνηση και μετά να εκτελέσουμε την προσαρμογή του προβληματικού μονοπατιού. Αν όμως χρειάζεται να μετακινηθούν οι γείτονες ενός μονοπατιού τότε αυτό δεν θα προκαλέσει διακοπή δεδομένων αφού η τεχνική push-pull μπορεί να υποστηριχθεί σε πομποδέκτες που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο. Ενδεχομένως να υπάρχει περιορισμός στην μέγιστη συχνότητα που μπορεί να μετακινηθεί ένα μονοπάτι χωρίς να διακοπεί η μετάδοση των δεδομένων. Αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψιν από τον αλγόριθμο μετατόπισης που περιγράφουμε σε επόμενη υποενότητα.

Προσαρμογή ζώνης φύλαξης φάσματος

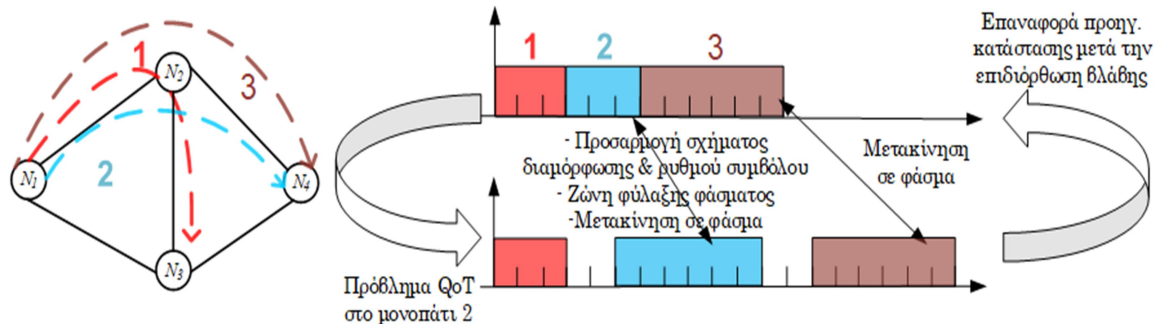
Η δεύτερη τεχνική που θεωρούμε είναι η προσαρμογή της ζώνης φύλαξης φάσματος - spectrum guard-band adaptation ώστε να ελέγξουμε τις παρεμβολές από γειτονικά μονοπάτια. Στην περίπτωση που το QoT είναι χαμηλό, αυτή η τεχνική μειώνει τις παρεμβολές χρησιμοποιώντας επιπλέον φάσμα ως ζώνη φύλαξης, δηλαδή δημιουργώντας φασματικό κενό μεταξύ των μονοπατιών. Αυτό μπορεί να μειώσει το θόρυβο (π.χ. λόγω crosstalk) ή τις δια- και πολλαπλές- παρεμβολές. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μειωμένο BER. Σημειώνουμε ότι αυτή η τεχνική μειώνει το out-of-band crosstalk που προκαλείται από γειτονικά κανάλια τόσο για την κίνηση add/drop (κίνηση που προστίθεται ή αφαιρείται σε έναν κόμβο) όσο και για την pass-through (κίνηση που απλά περνάει από έναν κόμβο). Δεν μειώνει το in-band crosstalk (μεταξύ σημάτων της ίδιας συχνότητας) που μπορεί να προκύψει για παράδειγμα στα add/drop στάδια. Επίσης αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μη ευθυγράμμιση των φίλτρων (Wavelength Selective Switches - WSSs) λόγω γήρανσης ή προβλήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το crosstalk μεγαλώνει ανάλογα με τον αριθμό των φίλτρων/κόμβων που διασχίζει το μονοπάτι (π.χ. σε δίκτυα metro). Η βλάβη του φίλτρου μπορεί να είναι μη-αυτοαναφερόμενη (ανάλογα με τη

σοβαρότητά της). Σε αυτήν την περίπτωση η ζώνη φύλαξης δεν θα λύσει στην πραγματικότητα την αιτία του προβλήματος αλλά μπορεί να είναι μία προσωρινή λύση μέχρις ότου το φίλτρο αντικατασταθεί. Η δημιουργία ζώνης φύλαξης απαιτεί τη μετακίνηση στο πεδίο της συχνότητας γειτονικών μονοπατιών από τη μία ή και από τις δύο πλευρές του προβληματικού μονοπατιού. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να προκύψει μεγάλος αριθμός μονοπατιών που πρέπει να μετακινηθούν, πράγμα που σημαίνει υψηλό κόστος στο επίπεδο ελέγχου. Ο αναδρομικός αλγόριθμος μετακίνησης μονοπατιών που αναπτύξαμε και περιγράφουμε σε επόμενη υποενότητα εξετάζει πως μπορεί να δημιουργήσει ζώνη φύλαξης και να ελαχιστοποιήσει το κόστος στο επίπεδο ελέγχου.

Από την άλλη μεριά αν υπάρχει περίσσεια περιθωρίων στο QoT ενός μονοπατιού τότε η ζώνη φύλαξης μπορεί να μειωθεί προκειμένου να εξοικονομήσουμε φάσμα, αρκεί οι επιπλέον παρεμβολές που θα προκληθούν να μην καταστήσουν το QoT μη αποδεκτό. Ένας αλγόριθμος ανασυγκρότησης όπως ο [76] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτήν την περίπτωση.

Προσαρμογή σχήματος διαμόρφωσης

Η τρίτη τεχνική που θεωρούμε είναι η προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης (modulation format adaptation) που μπορεί να συνδυαστεί με ταυτόχρονη προσαρμογή του ρυθμού συμβόλου



Εικόνα 21 Τα μονοπάτια 2 και 3 μετακινούνται ώστε να δημιουργήσουν ζώνες φύλαξης και να αναθέσουν περισσότερες σχισμές για να αυξηθεί ο ρυθμός συμβόλου και να μειωθεί το σχήμα διαμόρφωσης του μονοπατιού 2

προκειμένου να διατηρηθεί ο αρχικός ρυθμός μετάδοσης. Για να βελτιώσουμε το QoT μπορούμε να μειώσουμε το σχήμα διαμόρφωσης στο μισό (π.χ. από PM-16QAM σε PM-QPSK). Αν πρέπει να διατηρηθεί ο αρχικός ρυθμός μετάδοσης τότε μπορεί να αυξηθεί ο ρυθμός συμβόλου για παράδειγμα από 28Gbaud σε 56Gbaud. Η αύξηση του ρυθμού συμβόλου απαιτεί επιπλέον φάσμα που μπορεί να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας την τεχνική push-pull. Η προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα μικρή διακοπή στην κίνηση αφού το μονοπάτι πρέπει να σβηστεί στιγμιαία. Επίσης μπορεί να απαιτεί την μετακίνηση άλλων μονοπατιών στο πεδίο της συχνότητας αφού ο διπλασιασμός του ρυθμού συμβόλου απαιτεί περισσότερο φάσμα από ότι η αλλαγή του FEC. Αν ο στόχος είναι να μειωθεί η περίσσεια των περιθωρίων τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα σχήμα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης με κατάλληλη προσαρμογή του ρυθμού συμβόλου. Η Εικόνα 21 απεικονίζει ένα σενάριο δικτύου όπου χρησιμοποιείται προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης ώστε να βελτιωθεί το QoT ενός μονοπατιού που έχει επηρεαστεί από soft failure. Όταν η βλάβη διορθωθεί τότε μπορούμε και πάλι να χρησιμοποιήσουμε την εργαλειοθήκη ώστε να επαναφέρουμε είτε τις προηγούμενες ρυθμίσεις ή κάποιες άλλες πιο κατάλληλες ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση του δικτύου.

Αναδρομικός αλγόριθμος μετατόπισης φάσματος μονοπατιών

Οι παραπάνω τεχνικές μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την κατανομή κάποιων επιπλέον σχισμών

φάσματος σε ένα μονοπάτι. Αυτές οι επιπλέον σχισμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ζώνη φύλαξης ή για να αυξηθεί ο ρυθμός συμβόλου. Αυτές οι ενέργειες μπορεί να προκαλέσουν την επαναρρυθμίση των παραμέτρων μερικών γειτονικών μονοπατιών αν δεν είναι διαθέσιμο το απαιτούμενο φάσμα. Για να κάνουμε αυτές τις επαναρρυθμίσεις αναπτύξαμε έναν αναδρομικό ευρυστικό αλγόριθμο που χρησιμοποιεί την τεχνική push-pull [71]. Ο αλγόριθμος εξετάζει όλους τους συνδέσμους του μονοπατιού και μετακινεί αναδρομικά τα γειτονικά μονοπάτια προς την ίδια κατεύθυνση στις συχνότητες ώστε να δημιουργήσει το απαραίτητο κενό στο φάσμα. Για να το κάνει αυτό εξετάζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς σχισμών τόσο χαμηλότερα όσο και υψηλότερα από το ήδη κατανομημένο φάσμα. Υπολογίζει το συνολικό αριθμό των μονοπατιών που πρέπει να μετακινηθούν για κάθε περίπτωση και επιλέγει αυτόν που απαιτεί την μετακίνηση των λιγότερων δυνατών μονοπατιών. Σημειώνουμε ότι δεν εξετάζουμε κυκλική μετακίνηση στις συχνότητες. Αυτό σημαίνει ότι αν μία σύνδεση φθάσει για παράδειγμα στο χαμηλότερο σημείο του φάσματος δεν θα μπορέσει να μεταφερθεί κυκλικά στο υψηλότερο σημείο του φάσματος και θα εξεταστεί άλλη λύση. Ο αλγόριθμος μπορεί επίσης να λάβει υπόψιν του κάποια μονοπάτια που δεν πρέπει να μετακινηθούν καθόλου (λόγω συγκεκριμένων πολιτικών), και επίσης τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί πρακτικά να μετακινηθεί ένα μονοπάτι χωρίς να χρειαστεί διακοπή στη μετάδοση των δεδομένων. Αν οποιοσδήποτε από αυτούς τους περιορισμούς παραβιαστεί τότε θα ερευνηθεί κάποια άλλη λύση. Αυτός ο αλγόριθμος είναι παραλλαγή του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στην [76], όπου παρουσιάζεται επίσης και ένας αλγόριθμος που εξετάζει τόσο μετακίνηση στο φάσμα όσο και επαναδρομολόγηση μονοπατιών.

Εφαρμογή της εργαλειοθήκης

Οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να ρυθμίσουν το QoT ενός μονοπατιού ανταλλάσσοντας QoT και περιθώρια για χωρητικότητα και φάσμα. Η σειρά με την οποία εξετάζονται μπορεί να εξαρτάται από διάφορα κριτήρια. Ένα κριτήριο είναι το μέγεθος του φάσματος που χρειάζεται κάθε τεχνική. Σε αυτήν την περίπτωση μία πολιτική ελάχιστης χρήσης φάσματος θα οδηγήσει σε καλύτερη χρήση των πόρων του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερες επιλογές για αλλαγή παραμέτρων άλλων μονοπατιών στο μέλλον και σε χαμηλότερο ρυθμό απόρριψης (λόγω έλλειψης φάσματος) νέων συνδέσεων. Αν απαιτείται να μην γίνει καμία διακοπή στην μετάδοση δεδομένων τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της δημιουργίας ζώνης φύλαξης και η αλλαγή του FEC (υποθέτοντας ότι οι πομποδέκτες μπορούν να εκτελέσουν αυτή τη λειτουργία). Το μειονέκτημα της δημιουργίας ζώνης φύλαξης είναι ότι μπορεί να έχει υψηλό κόστος επιπέδου ελέγχου λόγω του μεγάλου αριθμού των μονοπατιών που μπορεί να χρειαστεί να μετακινηθούν. Γενικά το κόστος του επιπέδου ελέγχου είναι ανάλογο με το φάσμα που απαιτείται να ελευθερωθεί γιατί αυτό έχει ως συνέπεια την μετακίνηση μονοπατιών που είναι και ο κύριος συντελεστής του κόστους στο επίπεδο ελέγχου. Σημειώνουμε ότι εκτός από τις τεχνικές που περιγράψαμε, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες όπως η προσαρμογή ισχύος ή η επαναδρομολόγηση. Το μοναδικό απαιτούμενο είναι να ορίσουμε το κόστος της κάθε ενέργειας και την πολιτική κάτω από την οποία θα εφαρμοστεί.

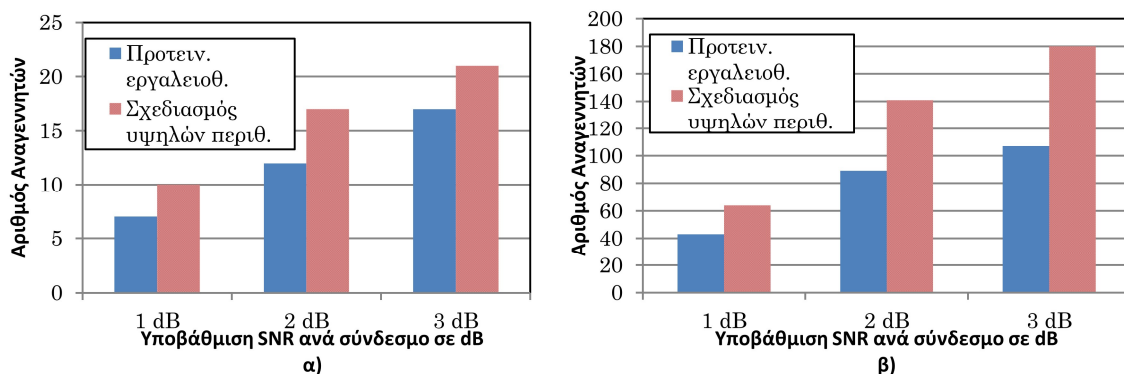
Έχοντας περιγράψει την σειρά με την οποία μπορούν να εξεταστούν οι λύσεις, χρειαζόμαστε έναν τρόπο να εκτιμήσουμε με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο την επίδραση που θα έχει κάθε ενέργεια στο QoT ενός μονοπατιού και στα αντίστοιχα περιθώρια. Για αυτό το λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας εκτιμητής. Εναλλακτικά μπορούμε να εκτελούμε σταδιακά τις ενέργειες, να παρατηρούμε τις επιδράσεις τους και να προσαρμόζουμε τις ρυθμίσεις ανάλογα μέχρι να φτάσουμε στα επιθυμητά περιθώρια.

Προσομοιώσεις

Για να εκτιμήσουμε την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης εργαλειοθήκης εκτελέσαμε μία σειρά από πειράματα στο περιβάλλον του MATLAB. Αποφασίσαμε να εστιάσουμε στο σενάριο soft-failure που σχετίζεται με τη υποβάθμιση του QoT των μονοπατιών. Στα παρακάτω σενάρια θεωρούμε ότι ο αρχικός ρυθμός όλων των συνδέσεων πρέπει να διατηρηθεί. (δηλ. όλες οι συνδέσεις είναι χρυσής ή πλατινένιας κλάσης). Η εφαρμογή της εργαλειοθήκης στα υπόλοιπα σενάρια θα γίνει σε μελλοντικές εργασίες.

Υποθέσαμε μία τοπολογία εμπνευσμένη από το δίκτυο Telecom Italia European backbone network (Εικόνα 5) με 49 κόμβους και 66 αμφίδρομους συνδέσμους (θεωρήσαμε πάντα ένα ζεύγος αμφίδρομων συνδέσμων μεταξύ δυο κόμβων σε αντίθεση με το κανονικό δίκτυο), ίνες SSMF με συντελεστή εξασθένησης 0.25 dB/km, παράμετρο διασποράς 16.7 ps/nm/km, και μη γραμμικό συντελεστή 1.3 1/W/km. Το μήκος του span τέθηκε ίσο με 100 km και ο EDFA noise figure στα 6 dB. Χρησιμοποιήσαμε το GN model για να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά του φυσικού επιπέδου. Θεωρήσαμε συνδέσεις των 100 και 200 Gbps που εξυπηρετούνται με δύο επιλογές: σχήμα διαμόρφωσης: PM-16QAM και PM-QPSK με όριο μετάδοσης στα 1000 και 4600 km αντίστοιχα κάτω από χαμηλό φορτίο, 800 και 3800 km κάτω από υψηλό φορτίο, ρυθμός συμβόλου: 28, 32, 56, 64 Gbaud, και FEC: 12% και 28%, με pre-FEC BER όρια των $6.3 \cdot 10^{-3}$ (που μεταφράζεται σε -2.2dB και Q²-factor 7.94dB) και $1.32 \cdot 10^{-2}$ (-1.88dB και Q²-factor 6.93dB), αντίστοιχα. Η επιλογή 12% FEC συνδυάζεται είτε με 28 ή με 56 Gbaud, ενώ η 28% FEC συνδυάζεται με 32 ή 64 Gbaud έτσι ώστε να διατηρηθεί ο αρχικός ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης. Θεωρούμε δύο σενάρια κίνησης των 20 και 49.2 Tbps. Οι συνδέσεις προκύπτουν από ρεαλιστικά σενάρια κίνησης για την τοπολογία και θεωρούμε πάντα δρομολόγηση συντομότερης διαδρομής. Οι αναγεννητές που χρειάζονται στην αρχή του χρόνου ζωής του δικτύου BoL για αυτές τις συνδέσεις προκειμένου το QoT τους να είναι αποδεκτό είναι 42 και 325 για τα 20Tbps και 49.2 Tbps αντίστοιχα. Ο μεγάλος αριθμός των αναγεννητών για το δεύτερο σενάριο οφείλεται στον επιπλέον αριθμό συνδέσεων, η πλειονότητα εκ των οποίων είναι 200G.

Πρώτα υπολογίσαμε τα οφέλη στο BER (που αντιστοιχούν σε αύξηση των περιθωρίων) που μπορεί να επιφέρει κάθε ενέργεια επαναρρύθμισης. Όλες οι παρακάτω μετρικές προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις υποθέσεις και τις δυνατότητες του GN model. Η προσαρμογή του FEC αλλάζει το όριο BER κατά 0.32 dB, όμως χρειάζεται και μία μικρή αύξηση στο ρυθμό συμβόλου προκειμένου να διατηρηθεί ο αρχικός ωφέλιμος ρυθμός δεδομένων. Αυτό μεταφράζεται σε μία μέγιστη ποινή 0.1 dB από τα αυξημένα NLIs, οπότε το τελικό όφελος στο BER από την προσαρμογή του FEC είναι 0.22 dB. Η δημιουργία ζώνης φύλαξης παρέχει το πολύ 0.2 dB όταν απομακρύνονται οι δυο πιο κοντινοί γείτονες από κάθε μεριά και 0.3 dB όταν απομακρύνονται τέσσερις. Η τελευταία περίπτωση συνεπάγεται μεγάλο κόστος στο επίπεδο ελέγχου λόγω των πολλών μονοπατιών που πρέπει να μετακινηθούν και έτσι δεν την χρησιμοποιούμε στις επόμενες μετρήσεις. Ανάλογα με την συνολική ανάθεση φάσματος στο δίκτυο τα οφέλη είναι πολλές φορές μικρότερα. Σε ένα πραγματικό δίκτυο αυτές οι τιμές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Επίσης σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ολίσθηση στη συχνότητα των φίλτρων, η δημιουργία ζώνης φύλαξης μπορεί να παρέχει μεγαλύτερα οφέλη αφού θα μειώσει την παραμόρφωση στις άκρες του σήματος και θα μειώσει και το crosstalk μεταξύ των γειτονικών μονοπατιών. Στις μετρήσεις μας δεν παίρνουμε υπόψιν αυτά τα φαινόμενα. Η μετατροπή του σχήματος διαμόρφωσης από PM-QPSK σε PM-BPSK μαζί με την αντίστοιχη προσαρμογή του ρυθμού συμβόλου (από 28 σε 56, ή από 32 σε 64Gbaud) παρέχει μέγιστο όφελος 1.6 dB, ενώ η προσαρμογή του PM-16QAM σε PM-QPSK δίνει 2.5 dB, και του PM-16QAM σε PM-8QAM 2.2 dB. Σημειώνουμε ότι οι τιμές για το PM-8QAM παρέχονται μόνο για λόγους σύγκρισης. Αυτό το σχήμα διαμόρφωσης δεν χρησιμοποιείται στις



Εικόνα 22 Απαιτούμενος αριθμός αναγεννητητών ως αποτέλεσμα βλάβης ενός συνδέσμου 1, 2 και 3 dB για φορτία α) 20Tbps και β) 49.2Tbps

επόμενες προσομοιώσεις.

Προ-ορατική επαναφορά (Pro-Active Restoration)

Σε αυτήν την υποενότητα θεωρούμε μία δεδομένη κατάσταση δικτύου και υποβάθμιση του SNR κατά 1,2, ή 3 dB σε έναν σύνδεσμο τη φορά. Αυτό μπορεί να αντιστοιχεί για παράδειγμα σε δυσλειτουργία εξοπλισμού. Ο στόχος μας είναι να σχεδιάσουμε το δίκτυο ώστε να μπορεί να αντέξει οποιαδήποτε τέτοια βλάβη. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε βλάβη ενός συνδέσμου που διασχίζεται από ένα μονοπάτι εξετάζουμε αν η εφαρμογή της προτεινόμενης εργαλειοθήκης μπορεί να απορροφήσει το QoT πρόβλημα επαναρυθμίζοντας τα προβληματικά μονοπάτια. Αν το πρόβλημα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί τότε εγκαθιστούμε αναγεννητές. Με αυτή τη μεθοδολογία υπολογίζουμε τις ενέργειες επαναρρύθμισης που θα πρέπει να εκτελεστούν όταν μία βλάβη εμφανιστεί στο συγκεκριμένο σύνδεσμο.

Αυτές οι ενέργειες μπορούν να προγραμματιστούν εκ των προτέρων [70] ώστε να επιτύχουμε γρήγορη επαναφορά. Όταν η βλάβη επισκευαστεί, η εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για να αποκαταστήσει τις αρχικές ρυθμίσεις ή κάποιες άλλες πιο κατάλληλες. Για ό,τι αφορά τον αλγόριθμο όταν εξετάσουμε ένα συγκεκριμένο σύνδεσμο, μετά επιστρέφουμε στην αρχική κατάσταση των μονοπατιών και εξετάζουμε ανεξάρτητα την βλάβη του επόμενου συνδέσμου. Οι αναγεννητές που τοποθετούνται στον ίδιο κόμβο μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν όταν εξετάζουμε διαφορετική βλάβη συνδέσμου (χρησιμοποιώντας την έννοια του backup multiplexing restoration [72]). Συγκρίνουμε την προτεινόμενη εργαλειοθήκη με την περίπτωση όπου σχεδιάζουμε το δίκτυο με υψηλά περιθώρια για να απορροφήσει τα προβλήματα QoT: σε αυτήν την περίπτωση αποφασίζουμε τις παραμέτρους μετάδοσης (χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο συνδυασμό του υψηλότερου ρυθμού συμβόλου και πιο ανθεκτικού σχήματος διαμόρφωσης) και τοποθετούμε αναγεννητές από την αρχή του χρόνου ζωής του δικτύου ώστε να μπορούμε να απορροφήσουμε τα QoT προβλήματα χωρίς να πρέπει να κάνουμε εκ των υστέρων οποιαδήποτε επαναρρύθμιση. Εξετάζεται μία βλάβη συνδέσμου τη φορά, αποφασίζουμε τις παραμέτρους μετάδοσης των μονοπατιών και τοποθετούμε αναγεννητές. Οι αποφάσεις για τις παραμέτρους κάθε μονοπατιού αποθηκεύονται και είναι οι ίδιες όταν εξετάζεται η επόμενη βλάβη συνδέσμου. Στην ουσία αναθέτουμε από την αρχή ζωής του δικτύου, τις παραμέτρους μετάδοσης (για όλες τις συνδέσεις και για όλες τις πιθανές βλάβες μοναδικού συνδέσμου) που θα είχαν χρησιμοποιηθεί από την εργαλειοθήκη μας αν παρουσιαζόταν μία μοναδική βλάβη ενός συνδέσμου. Και τα δύο σενάρια προσφέρουν την ίδια ανθεκτικότητα απέναντι σε μοναδικές βλάβες ενός συνδέσμου. Στο σχεδιασμό με υψηλά περιθώρια ο διαχειριστής δικτύου δεν ξέρει πού μπορεί να εμφανιστεί μία βλάβη. Έτσι

πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλες οι μοναδικές βλάβες ενός συνδέσμου που οδηγούν σε μη αποδεκτή ποιότητα μετάδοσης. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ότι ο διαχειριστής του δικτύου σχεδίαζε μόνο για την βλάβη του χειρότερου συνδέσμου ενός μονοπατιού. Τότε η βλάβη ενός άλλου συνδέσμου μπορεί να κάνει απαράδεκτο το QoT της σύνδεσης αφού οι τοποθεσίες των αναγεννητών είναι σταθερές για κάθε περίπτωση βλάβης.

Το μέτρο σύγκρισης είναι ο συνολικός αριθμός αναγεννητών, και επίσης εξετάζουμε και το συνολικό ποσοστό χρήσης του φάσματος που ορίζουμε ως το μέγιστο αριθμό σχισμής κάτω από οποιοδήποτε σφάλμα συνδέσμου. Η σύγκριση της πρότασής μας με το σενάριο του σχεδιασμού του δικτύου με υψηλά περιθώρια δείχνει την εξοικονόμηση εξοπλισμού (πολύ ακριβοί αναγεννητές) που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη μας για να διορθώσουμε ένα QoT πρόβλημα αν και όταν αυτό εμφανιστεί αντί να αναθέτουμε τις πιο ανθεκτικές παραμέτρους μετάδοσης για όλες τις συνδέσεις από την αρχή. Σε κάθε περίπτωση για να γίνει σωστός υπολογισμός της σχετικής μείωσης των εξόδων που επιτυγχάνει η χρήση της εργαλειοθήκης μας, ο διαχειριστής δικτύου θα πρέπει να λάβει υπόψιν όλα τα κόστη για όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό (π.χ. BoL αναγεννητές, πομποδέκτες κλπ). Η χρήση του φάσματος είναι δευτερεύουσας σημασίας αρκεί να μην παρουσιάζεται απόρριψη συνδέσεων.

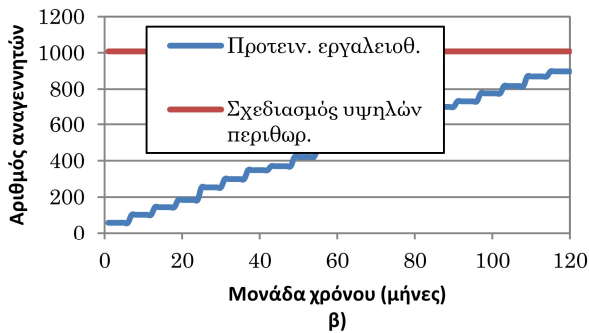
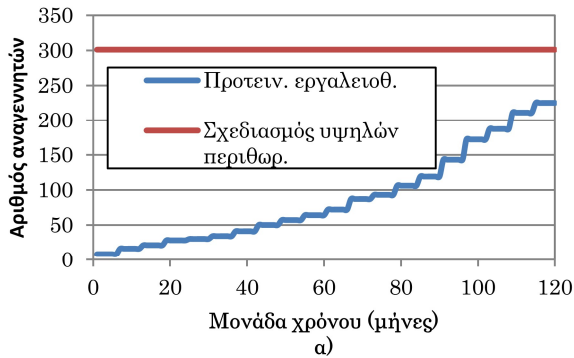
Η Εικόνα 22 παρουσιάζει τον αριθμό των αναγεννητών που απαιτούνται ως αποτέλεσμα μίας βλάβης μοναδικού συνδέσμου για σενάρια κίνησης των 20 (Εικόνα 22α) και 49.2Tbps (Εικόνα 22β). Κάτω και από τα δύο φορτία, η εργαλειοθήκη μας χρειάζεται τουλάχιστον 22% (Εικόνα 22α 3dB υποβάθμιση) και το πολύ 40% (Εικόνα 22β 3dB υποβάθμιση) λιγότερους αναγεννητές σε σύγκριση με το σενάριο υψηλών περιθωρίων. Σημειώνουμε ότι αν λάβουμε υπόψιν τους BoL αναγεννητές που απαιτούνται τόσο για το προτεινόμενο σενάριο όσο και για το σενάριο υψηλών περιθωρίων, οι σχετικές μειώσεις είναι 7% και 16% αντίστοιχα. Η πρότασή μας χρειάζεται το πολύ 138 φασματικές σχισμές των 12.5 GHz για τα 20 Tbps και 318 σχισμές για τα 49.2 Tbps. Η χρήση του φάσματος είναι 2% χαμηλότερη στη δική μας πρόταση σε σύγκριση με το σχεδιασμό με υψηλά περιθώρια αφού εξετάζουμε μία μοναδική βλάβη συνδέσμου τη φορά αντί για όλους τους συνδέσμους. Δεν παρέχουμε τις αντίστοιχες γραφικές για το φάσμα λόγω των μικρών διαφορών. Τα οφέλη στο φάσμα δεν είναι μεγάλα επειδή το σενάριο υψηλών περιθωρίων απαιτεί περισσότερους αναγεννητές που χαλαρώνουν τον περιορισμό συνεχούς χρήσης του φάσματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πιο κοντά μονοπάτια και πιο πυκνή χρήση του φάσματος. Τα πιο κοντά μονοπάτια επίσης επιτρέπουν την χρήση πιο αποδοτικών σχημάτων διαμόρφωσης που απαιτούν λιγότερο φάσμα. Γενικά παρατηρούμε ότι η χρήση της εργαλειοθήκης μας έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά οφέλη σε εξοπλισμό αφού αξιοποιούμε τις διαθέσιμες επιλογές επαναρρύθμισης όποτε εμφανίζεται μία βλάβη και όχι από την αρχή του χρόνου ζωής του δικτύου και τοποθετούμε αναγεννητές όταν χρειάζονται.

Δυναμική λειτουργία δικτύου

Σε αυτήν την ενότητα θεωρούμε ένα δυναμικό σενάριο εξέλιξης του δικτύου και παρουσιάζουμε αποτελέσματα από τη χρήση της εργαλειοθήκης κάτω από αυτές τις συνθήκες. Υποθέτουμε συνεχή χρονικό ορίζοντα και εξετάζουμε πώς η σταδιακή χειροτέρευση του φυσικού επιπέδου (γήρανση εξοπλισμού, επισκευές κομμένης ίνας) επηρεάζει το δίκτυο. Το QoT των μονοπατιών χειροτερεύει σταδιακά και όταν πέσει κάτω από το αποδεκτό όριο, πυροδοτείται ειδοποίηση και χρησιμοποιούμε την προτεινόμενη εργαλειοθήκη για να επαναρυθμίσουμε το προβληματικό μονοπάτι και να επαναφέρουμε το QoT του. Στην περίπτωση που η εργαλειοθήκη δεν βρει λύση και δεν μπορεί να επαναφέρει το QoT σε αποδεκτά επίπεδα, τοποθετούμε αναγεννητές. Υποθέτουμε ότι το όριο ειδοποίησης ορίζεται σε τέτοιο σημείο ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου μέχρι την επόμενη περίοδο συντήρησης όπου τοποθετείται αναγεννητής. Η περίοδος

συντήρησης θεωρούμε ότι είναι 6 μήνες.

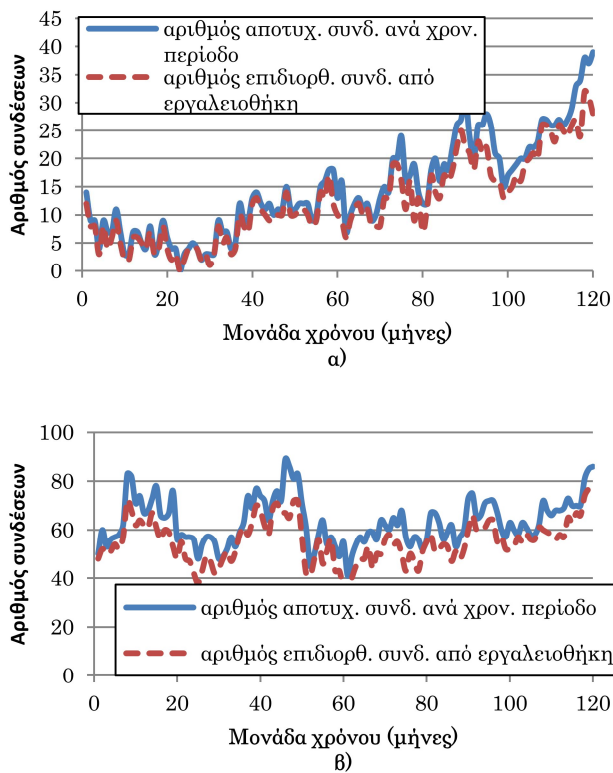
Όπως στην προηγούμενη υποενότητα, χρησιμοποιούμε και πάλι την ίδια τοπολογία δικτύου, παραμέτρους φυσικού επιπέδου και ρεαλιστικά σενάρια κίνησης (20 και 49.2 Tbps). Σε μία δεδομένη περίοδο παράγουμε ομοιόμορφα soft failures για κάθε σύνδεσμο και ένα τυχαίο soft failure σε έναν (τυχαίο) σύνδεσμο τη φορά για να προσομοιώσουμε ανομοιόμορφη γήρανση εξοπλισμού. Σημειώνουμε ότι σε αυτήν την περίπτωση το μέγεθος της βλάβης είναι αρκετά



Εικόνα 23 Εξέλιξη του απαιτούμενου αριθμού αναγεννητητών λόγω γήρανσης του δικτύου για φορτία α) 20Tbps και β) 49.2Tbps

σε κλίμακα μηνών. Έτσι κάθε μήνα σε κάθε σύνδεσμο αθροίζουμε την αντίστοιχη (σταθερή) υποβάθμιση. Επίσης θεωρούμε επιπλέον 0.05 dB υποβάθμιση ανά χρονική μονάδα (μήνα) σε ένα τυχαίο σύνδεσμο. Το μέγιστο βεληνεκές των μονοπατιών στο EoL είναι 600 και 3100 km για PM-16QAM και PM-QPSK, αντίστοιχα κάτω από ελαφρύ φορτίο (κίνηση) και 500 και 2700 km αντίστοιχα κάτω από βαρύ φορτίο.

Ακολουθούμε την κατάσταση του δικτύου για σύνολο 120 χρονικών μονάδων-soft failures. Μετά από κάθε soft failure, εξετάζουμε το QoT όλων των μονοπατιών. Αν το BER ενός μονοπατιού είναι κάτω από το αποδεκτό όριο, τότε χρησιμοποιούμε την προτεινόμενη εργαλειοθήκη για να το επαναφέρουμε. Αν καμία λύση δεν είναι εφικτή τότε τοποθετούμε αναγεννητές. Παρουσιάζουμε τον απαιτούμενο αριθμό αναγεννητητών που απαιτούνται λόγω βλαβών ως συνάρτηση του αριθμού των χρονικών μονάδων-βλαβών. Για λόγους σύγκρισης θεωρούμε επίσης και την περίπτωση του σχεδιασμού με υψηλά EoL περιθώρια. Σε αυτήν την περίπτωση αναθέτουμε τον πιο κατάλληλο συνδυασμό υψηλότερου ρυθμού συμβόλου και πιο ανθεκτικού σχήματος διαμόρφωσης για όλες τις απαιτούμενες συνδέσεις από το BoL. Εκτιμούμε το QoT όλων των μονοπατιών μετά από 120 χρονικές μονάδες-βλάβες με την προσθήκη ενός περιθωρίου σχεδίασης το οποίο δεν είναι απαραίτητο στην περίπτωση της χρησιμοποίησης της εργαλειοθήκης όπως αναφέραμε στην



Εικόνα 24 Εξέλιξη του αριθμού αποτυχημένων και επιδιορθωμένων συνδέσεων λόγω γήρανσης του δικτύου για φορτία α) 20Tbps και β) 49.2Tbps

αναγεννητών αυξάνει σε σκαλοπάτια επειδή έχουμε θεωρήσει εξάμηνη περίοδο συντήρησης. Αυτό σημαίνει ότι αν χρησιμοποιηθεί η εργαλειοθήκη μας, τότε οι αναγεννητές που εμφανίζονται στο γράφημα για την χρονική μονάδα 0, αντιστοιχούν στους αναγεννητές που θα χρειαστούν στον 6^ο μήνα. Επίσης σημειώνουμε ότι τόσο το σενάριο υψηλών περιθωρίων όσο και η εργαλειοθήκη μας χρειάζονται 42 και 325 BoL αναγεννητές για τα 20Tbps και 49.2 Tbps αντίστοιχα. Αυτοί οι αριθμοί όμως είναι μικροί σε σύγκριση με τους 301 και 1008 *επιπλέον* αναγεννητές που θα πρέπει να εγκατασταθούν από την αρχή στο σενάριο υψηλών περιθωρίων για να ληφθούν υπόψιν οι μελλοντικές υποβαθμίσεις. Στην Εικόνα 23α και β παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στον αριθμό των αναγεννητών μεταξύ χαμηλών και υψηλών EoL περιθωρίων. Πιο συγκεκριμένα, όταν τα χαμηλά περιθώρια συνδυαστούν με την προτεινόμενη εργαλειοθήκη μας τότε απαιτούνται περίπου 94% λιγότεροι αναγεννητές σε σύγκριση με το σενάριο υψηλών περιθωρίων. Αν λάβουμε υπόψιν και τους αρχικούς αναγεννητές που απαιτούνται τόσο για το σενάριο υψηλών περιθωρίων όσο και αυτό των χαμηλών, τότε η διαφορά είναι περίπου 80%. Γύρω στο 5^ο έτος, η εργαλειοθήκη μας απαιτεί περίπου 50% λιγότερους αναγεννητές σε σύγκριση με το σενάριο υψηλών περιθωρίων και 40% αν λάβουμε υπόψιν τους αρχικούς αναγεννητές και για τα δύο σενάρια. Έτσι, μπορεί να αναβληθεί η αγορά σημαντικού αριθμού αναγεννητών για σημαντικό αριθμό ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση πόρων καθώς οι τιμές του εξοπλισμού γενικά πέφτουν με τον καιρό και τα χρήματα που εξοικονομούνται μπορούν να επενδυθούν. Τα οφέλη της καθυστερημένης ανάλωσης έχουν επιδειχθεί στην [21]. Επίσης παρατηρούμε ότι στο σενάριο των 49.2 Tbps οι συνολικοί αναγεννητές είναι πολύ λιγότεροι από ότι σε αυτό των 20 Tbps. Αυτό είναι λόγω των επιπλέον συνδέσεων οι περισσότερες από τις οποίες είναι 200G και επίσης επειδή οι 200G συνδέσεις χρησιμοποιούν υψηλά σχήματα διαμόρφωσης, λειτουργούν πιο κοντά στα FEC όρια και

προηγούμενη υποενοότητα. Θεωρούμε 1dB περιθώριο σχεδίασης που μπορεί να θεωρηθεί ως μία κατάλληλη τιμή[19]. Υπολογίζουμε τον αριθμό των απαιτούμενων αναγεννητών και υποθέτουμε ότι όλοι τοποθετούνται από το BoL αντιπροσωπεύοντας ένα σενάριο υψηλών περιθωρίων. Έτσι, σε αυτήν την υποενοότητα χρησιμοποιούμε την εργαλειοθήκη μας για να καθυστερήσουμε την εγκατάσταση του απαιτούμενου εξοπλισμού και υπολογίζουμε τα αντίστοιχα οφέλη.

Η Εικόνα 23 παρουσιάζει τον αριθμό των εγκατεστημένων αναγεννητών που απαιτούνται λόγω γήρανσης εξοπλισμού/βλάβης ως συνάρτηση του χρόνου για δύο σενάρια κίνησης: 20 και 49.2 Tbps (Εικόνα 23α και Εικόνα 23β αντίστοιχα).

Σημειώνουμε ότι ο αριθμός των

είναι πιο ευάλωτες στα soft failures σε σύγκριση με τις 100G συνδέσεις. Επίσης παρατηρούμε ότι στο σενάριο υψηλών περιθωρίων ο αριθμός των αναγεννητών στα 10 χρόνια είναι πιο κοντά στο σενάριο υψηλού φορτίου σε σχέση με το σενάριο χαμηλού. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί με βάση το ότι η υψηλή χρησιμοποίηση του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη διαθεσιμότητα φασματικών πόρων και τους οποίους μπορεί να αξιοποιήσει η εργαλειοθήκη. Σημειώνουμε ότι ο αριθμός των αναγεννητών και στις δύο περιπτώσεις δεν συγκλίνει σε αυτόν του σεναρίου υψηλού περιθωρίου αφού στην τελευταία περίπτωση έχει υπολογιστεί το επιπλέον περιθώριο σχεδιασμού.

Η Εικόνα 24 παρουσιάζει τον αριθμό των προβληματικών συνδέσεων ανά χρονική περίοδο και τον αριθμό των συνδέσεων που επαναρρυθμίστηκαν επιτυχώς από την εργαλειοθήκη μας. Σημειώνουμε ότι η διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών είναι ο αριθμός των αναγεννητών. Στο σενάριο χαμηλού φορτίου (Εικόνα 24α) παρατηρούμε ότι στην αρχή του χρόνου ζωής του δικτύου η εργαλειοθήκη μας μπορεί να αποκαταστήσει τις περισσότερες από τις βλάβες. Όσο περνάει ο χρόνος και οι υποβαθμίσεις αθροίζονται, υπάρχουν όλο και περισσότερες βλάβες που δεν μπορούν να αντικατασταθούν. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως ακολούθως: όσο οι υποβαθμίσεις αθροίζονται μπορεί να αυξηθούν πάνω από το μέγιστο όριο που μπορεί να απορροφήσει η εργαλειοθήκη μας. Επίσης, όσο περνάει ο χρόνος και εκτελούνται επαναρρυθμίσεις, η συνολική χρησιμοποίηση του φάσματος αυξάνεται που σημαίνει ότι θα υπάρχουν λιγότεροι διαθέσιμοι πόροι στο μέλλον ώστε να αξιοποιηθούν για την επαναφορά από βλάβες. Επίσης παρατηρούμε ότι ο αριθμός των βλαβών δεν αυξάνεται μονοτονικά. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: όσο αθροίζονται οι υποβαθμίσεις προκαλούν έναν αυξανόμενο αριθμό από βλάβες. Σε κάποια σημείο φθάνουν σε μία κορύφωση όπου ένας μεγάλος αριθμός από συνδέσεις επηρεάζεται και επαναρρυθμίζεται. Αυτό σημαίνει ότι οι μελλοντικές υποβαθμίσεις δεν θα προκαλέσουν πολλές βλάβες αφού πολλές συνδέσεις είναι ήδη επιδιορθωμένες. Όσο αυξάνονται οι υποβαθμίσεις, αρχίζουν να εμφανίζονται και άλλες βλάβες σε συνδέσεις που μπορεί να είχαν διορθωθεί στο παρελθόν και αυτό προκαλεί την επόμενη κορύφωση. Στο σενάριο υψηλού φορτίου παρατηρούμε ότι ο αριθμός των προβληματικών συνδέσεων είναι πολύ μεγάλος και το ποσοστό των επιδιορθωμένων συνδέσεων από την εργαλειοθήκη μας είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό του χαμηλού φορτίου για τους ίδιους λόγους που εξηγήσαμε για την Εικόνα 23.

Συμπεράσματα

Αναπτύξαμε μία εργαλειοθήκη που αξιοποιεί τις ευέλικτες δυνατότητες των ελαστικών οπτικών δικτύων και ρυθμίζει το QoT των μονοπατιών ώστε να επιτύχει υψηλή αποδοτικότητα. Η εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία πληθώρα περιπτώσεων και χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την ενότητα για να αποκαταστήσει το QoT των μονοπατιών σε περίπτωση soft-failure. Εκτελέσαμε προσομοιώσεις όπου μοντελοποιήσαμε δύο σενάρια soft-failures. Για τις απότομες βλάβες παρατηρήσαμε ότι μπορούμε να εξοικονομήσουμε τουλάχιστον 22% και το πολύ 40% αναγεννητές σε σύγκριση με το σενάριο υψηλών περιθωρίων. Επίσης παρατηρήσαμε σημαντική καθυστέρηση στην εγκατάσταση αναγεννητών σε μία 10 ετή περίοδο λειτουργίας του δικτύου. Σε μελλοντική δουλειά η εργαλειοθήκη μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλες περιπτώσεις όπως η προσαρμογή των παραμέτρων σε διακυμάνσεις τις κίνησης. Επίσης μπορούν να προστεθούν και άλλες ενέργειες στην εργαλειοθήκη όπως προσαρμογή ισχύος και επαναδρομολόγηση.

Κεφάλαιο 6 Διαμοιρασμός Φάσματος για επαναφορά από βλάβες

Σύνοψη

Τα ευέλικτα οπτικά δίκτυα προσφέρουν πολλές δυνατότητες βελτιστοποίησης που μπορούν να αξιοποιηθούν για να αυξηθεί η αποδοτικότητα του δικτύου και η ανοχή του σε σφάλματα. Πιο συγκεκριμένα, η προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης σε ένα πιο στιβαρό μπορεί να επαναφέρει σε αποδεκτά επίπεδα την ποιότητα μετάδοσης ενός μονοπατιού που έχει επηρεαστεί από soft failure. Σε αυτό το σενάριο, η αύξηση της στιβαρότητας των παραμέτρων μετάδοσης μπορεί να απαιτήσει την αύξηση του φάσματος, και έτσι μπορεί να χρειαστεί να επαναρυθμιστεί και το φάσμα. Σε αυτήν την ενότητα προτείνουμε τον διαμοιρασμό φάσματος μεταξύ μονοπατιών που απαιτούν διαφορετικές εγγυήσεις του ρυθμού διαμεταγωγής τους. Σε περίπτωση βλάβης, ένα μονοπάτι υψηλής προτεραιότητας με εγγυημένο ρυθμό μπορεί να αυξήσει το φάσμα του για να επαναφέρει το QoT του χρησιμοποιώντας φάσμα που προέρχεται από μονοπάτια χαμηλότερης κλάσης με μη εγγυημένο ρυθμό. Πιο συγκεκριμένα προτείνουμε έναν Integer Linear Programming (ILP) Routing and Spectrum Assignment (RSA) αλγόριθμο για τον σχεδιασμό του δικτύου. Ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί το διαμοιρασμό φάσματος μεταξύ μονοπατιών διαφορετικών κλάσεων και ελαχιστοποιεί τη συνολική χρήση του φάσματος. Η χρήση των προτεινόμενων τεχνικών μπορεί να μειώσει τα κόστη του δικτύου για την εγγύηση του ρυθμού των συνδέσεων υψηλής προτεραιότητας.

Εισαγωγή

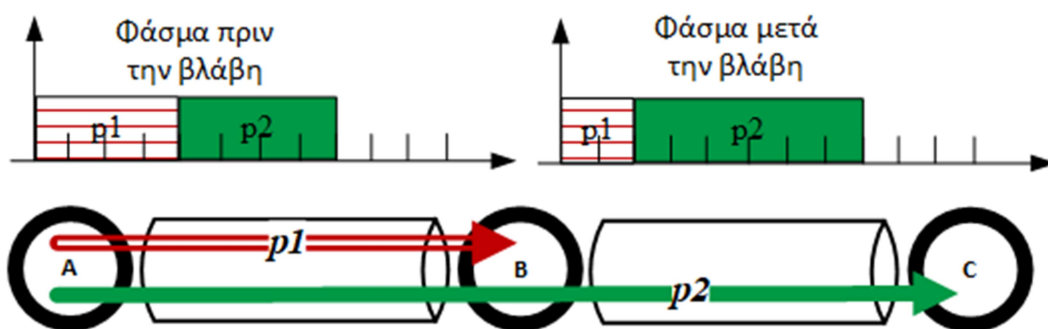
Σε αυτήν την ενότητα προτείνουμε διαμοιρασμό φάσματος μεταξύ μονοπατιών που απαιτούν διαφορετικές εγγυήσεις ρυθμού διαμεταγωγής ώστε να επαναφέρουμε το QoT σε περίπτωση βλάβης. Υποθέτουμε ότι το δίκτυο υποστηρίζει κίνηση η οποία κατηγοριοποιείται σε κλάσεις. Αυτές οι κλάσεις ορίζονται με βάση τις εγγυήσεις που παρέχονται ως προς τον ρυθμό αλλά και το χρόνο που χρειάζεται για την επαναφορά από τη βλάβη. Πιο συγκεκριμένα, εστιάζουμε στην περίπτωση δυο γενικών κλάσεων: την εγγυημένου ρυθμού και την μη εγγυημένου ρυθμού ή ελάχιστου εγγυημένου ρυθμού. Το QoT και τον δύο κλάσεων είναι εγγυημένο και στην περίπτωση βλάβης επαναφέρεται έτσι ώστε να είναι πάνω από ένα συγκεκριμένο αποδεκτό όριο. Όμως μόνο ο ρυθμός της πρώτης γενικής κλάσης είναι πάντα εγγυημένος. Για την δεύτερη γενική κλάση μόνο ένας ελάχιστος ρυθμός είναι εγγυημένος, και μπορούμε να έχουμε αρκετές υποκλάσεις ανάλογα με τις διαφορετικές ελάχιστες τιμές ρυθμού που είναι εγγυημένες. Σημειώνουμε ότι η παραπάνω κατηγοριοποίηση γίνεται στη βάση της διατήρησης του ρυθμού μετάδοσης. Είναι συμπληρωματική στην τυπική κατηγοριοποίηση που γίνεται με βάση τον χρόνο επαναφοράς μετά από βλάβη.

Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας του δικτύου, όλα τα μονοπάτια μεταδίδουν με κανονικό ρυθμό δεδομένων. Χρησιμοποιούν το πιο αποδοτικό σχήμα διαμόρφωσης από πλευράς χρησιμοποίησης φάσματος σε συνδυασμό με τον κατάλληλο ρυθμό συμβόλου ανάλογα με το απαιτούμενο συνολικό ρυθμό δεδομένων. Στην περίπτωση soft failure, ο ρυθμός δεδομένων μίας σύνδεσης χαμηλότερης κλάσης δεν είναι απαραίτητο να διατηρηθεί [50][77]. Έτσι, μέρος του φάσματος που χρησιμοποιείται από τις συνδέσεις χαμηλής προτεραιότητας μπορεί να αναδιανεμηθεί στις συνδέσεις υψηλότερης προτεραιότητας. Με αυτόν τον τρόπο το σχήμα διαμόρφωσης μιας σύνδεσης υψηλής κλάσης μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα πιο ανθεκτικό ώστε να αυξηθεί το QoT. Την ίδια στιγμή μπορεί να αυξηθεί ο ρυθμός συμβόλου ή να εγκατασταθεί ένα καινούριο μονοπάτι ώστε να διατηρηθεί ο ίδιος ρυθμός δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, ο ρυθμός δεδομένων των συνδέσεων χαμηλής προτεραιότητας υποβαθμίζεται προσωρινά. Όταν η βλάβη επισκευασθεί μπορούν να επαναφερθούν οι αρχικές ρυθμίσεις μετάδοσης.

Η ιδέα του διαμοιρασμού φάσματος μπορεί να μειώσει τα κόστη του δικτύου προκειμένου να

ικανοποιηθούν οι συνδέσεις εγγυημένου ρυθμού. Η συνηθισμένη πρακτική για την διατήρηση του ρυθμού των συνδέσεων υψηλής προτεραιότητας θα ήταν η χρήση επιπλέον φάσματος. Με την προτεινόμενη μέθοδο αξιοποιούμε το φάσμα των συνδέσεων χαμηλής προτεραιότητας που δεν έχουν εγγυημένο ρυθμό. Ο βαθμός στον οποίο το φάσμα που ανατίθεται στις μη εγγυημένου ρυθμού συνδέσεις κατανέμεται στις εγγυημένου ρυθμού συνδέσεις μπορεί να ελεγχθεί μέσω μιας παραμέτρου W . Κατά μία έννοια η παράμετρος W ελέγχει τη μείωση του κόστους του δικτύου που μπορεί να επιτευχθεί. Για μικρές τιμές του W , οι συνδέσεις εγγυημένου ρυθμού αξιοποιούν πλήρως οποιοδήποτε διαθέσιμο φάσμα των συνδέσεων μη εγγυημένου ρυθμού, μειώνοντας έτσι τα κόστη του δικτύου. Για μεγάλες τιμές του W οι συνδέσεις εγγυημένου ρυθμού απαιτούν επιπρόσθετο φάσμα ώστε να διατηρήσουν το ρυθμό τους. Έτσι τα συνολικά κόστη του δικτύου αυξάνονται.

Η [78] πρότεινε έναν ευριστικό RSA αλγόριθμο που εκτελείται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου και μπορεί να εξυπηρετήσει δυναμικά συνδέσεις ώστε να είναι δυνατή η κοινή χρήση φάσματος μεταξύ συνδέσεων διαφορετικών κλάσεων. Σε αυτήν την ενότητα επεκτείνουμε την παραπάνω δουλειά και παρουσιάζουμε έναν ILP RSA για να κάνουμε αποδοτική ανάθεση των πόρων του δικτύου σε ένα σύνολο από συνδέσεις διαφορετικών κλάσεων. Ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η πιθανή κοινή χρήση φάσματος μεταξύ των συνδέσεων και να ελαχιστοποιηθεί το χρησιμοποιούμενο φάσμα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσπαθεί να δρομολογήσει τις συνδέσεις υψηλής κλάσης φασματικά δίπλα σε χαμηλής κλάσης. Σε περίπτωση βλάβης, το φάσμα (και άρα ο ρυθμός) των συνδέσεων χαμηλότερης κλάσης μειώνεται ώστε να παράσχουν στις συνδέσεις υψηλότερης κλάσης το επιπλέον απαιτούμενο φάσμα ώστε να διασφαλιστεί αποδεκτό QoT και να



Εικόνα 25 Χρήση φάσματος μία χάλκινης σύνδεσης ($p1$ από το A στο B) και μίας χρυσής ($p2$ από τον A στο C) πριν και μετά από μια βλάβη

διατηρηθεί ο αρχικός ρυθμός μετάδοσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Το πρόβλημα που θεωρούμε είναι ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ένας απλός αλγόριθμος ανάθεσης φάσματος για την ελαχιστοποίηση χρήσης φάσματος είναι ισοδύναμος με ένα πρόβλημα χρωματισμού γράφου. Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις συνδέσεις, οι ακμές τους κοινόχρηστους συνδέσμους των συνδέσεων, και το χρώμα το φάσμα προς ανάθεση. Αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό ότι είναι NP-complete, και άρα και το παρών πρόβλημα το οποίο είναι πιο δύσκολο, είναι και αυτό NP-complete. Μοντελοποιούμε το πρόβλημα με έναν ILP αλγόριθμο του οποίου η ακριβής λύση (όταν το πρόβλημα είναι επιλύσιμο) παρέχει και τη βέλτιστη λύση. Ο προτεινόμενος ILP αλγόριθμος επιτυγχάνει σημαντικά οφέλη φάσματος έως 20% σε σχέση με το εναλλακτικό σενάριο όπου δεν είναι δυνατή η κοινή χρήση φάσματος.

Προηγούμενες εργασίες

Η κοινή χρήση φάσματος έχει εξεταστεί στο παρελθόν στα οπτικά δίκτυα. Η [79] θεωρεί συνδέσεις με αρνητικούς συσχετισμένους (στο χρόνο) ρυθμούς μετάδοσης. Αυτές οι συνδέσεις τοποθετούνται φασματικά δίπλα η μία στην άλλη ώστε να αποκτηθούν οφέλη στατιστικής πολυπλεξίας (ως προς τη

χρήση φάσματος). Ο διαμοιρασμός φάσματος έχει διερευνηθεί επίσης για διακυμάνσεις κίνησης στα EONs [22][80]. Πιο συγκεκριμένα το φάσμα των μονοπατιών ανατίθεται δυναμικά ώστε να προσαρμοστεί στις τρέχουσες απαιτήσεις κίνησης. Στην [81] εξετάστηκε συνεργατική κοινή χρήση φάσματος μαζί με ανασυγκρότηση φάσματος για να αντιμετωπιστεί η δυναμική φύση της κίνησης. Τα αποτελέσματα ήταν σημαντικά οφέλη ως προς το ρυθμό απόρριψης νέων συνδέσεων. Οι συγγραφείς της [82] αξιολόγησαν διαμοιρασμό χωρητικότητας (ως προς το φάσμα) θεωρώντας βασικό ρυθμό και ρυθμό αιχμής για τις συνδέσεις. Οι συγγραφείς επίσης θεωρούν ότι ο βασικός ρυθμός των συνδέσεων πρέπει να είναι εγγυημένος για κάθε βλάβη ενός συνδέσμου. Τυχόν περισσευούμενο φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση του ρυθμού αιχμής συγκεκριμένων συνδέσεων. Παρόλα αυτά η μετάβαση από βασικό ρυθμό σε ρυθμό αιχμής δεν υποθέτει συνεχόμενες σχισμές φάσματος. Τα αποτελέσματα έδειχναν μειωμένες πιθανότητες απόρριψης συνδέσεων. Η [78] θεώρησε έναν Route and Spectrum Allocation αλγόριθμο ο οποίος εκτελείται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου και αναθέτει τη δρομολόγηση και τις κατάλληλες ρυθμίσεις μιας νέας σύνδεσης ώστε να επιτευχθεί κοινή χρήση φάσματος μεταξύ γειτονικών συνδέσεων διαφορετικών κλάσεων. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να δρομολογήσει τις συνδέσεις υψηλής κλάσης δίπλα σε συνδέσεις χαμηλής κλάσης. Με αυτόν τον τρόπο σε περίπτωση βλάβης το φάσμα των συνδέσεων χαμηλής προτεραιότητας μπορεί να διανεμηθεί σε γειτονικές συνδέσεις υψηλής προτεραιότητας. Αυτό μπορεί να επιτρέψει σε μία σύνδεση υψηλής προτεραιότητας να διατηρήσει αποδεκτό QoT ενώ ταυτόχρονα διατηρείται και ο αρχικός ρυθμός μετάδοσης. Σε αυτήν την ενότητα επεκτείνουμε αυτή τη δουλειά και παρουσιάζουμε έναν καινούριο ILP RSA αλγόριθμο για να σχεδιάσουμε το δίκτυο ώστε να μεγιστοποιηθούν οι δυνατότητες εξοικονόμησης φάσματος. Αυτό μπορεί επίσης να επιφέρει αντίστοιχα οφέλη στην συνολική χωρητικότητα του δικτύου.

Σενάριο δικτύου

Γενικά τα οπτικά δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν έναν αριθμό από διαφορετικές κλάσεις (στην [2] αναφέρονται 5 διαφορετικές κλάσεις). Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση τις εγγυήσεις που δίνονται για το ρυθμό μετάδοσης και για το χρόνο επαναφοράς. Υποθέτοντας ένα αιτούμενο ρυθμό R , κάθε κλάση μπορεί να έχει διαφορετικές απαιτήσεις στο ελάχιστο εγγυημένο ρυθμό (R_{min}). Οι υψηλότερες κλάσεις που έχουν εγγυημένο ρυθμό απαιτούν $R_{min}=R$ σε κάθε περίπτωση. Επιπλέον μπορούμε να διαφοροποιήσουμε αυτές τις κλάσεις με βάση το ρυθμό επαναφοράς. Επίσης, μπορεί να υπάρχουν πολλές διαφορετικές κλάσεις μη εγγυημένου ρυθμού ή ελάχιστου εγγυημένου ρυθμού, η χαμηλότερη εκ των οποίων μπορεί να είναι αυτή όπου R_{min} ισούται με μηδέν (best effort).

Σε περίπτωση βλάβης, ο ρυθμός των συνδέσεων εγγυημένου ρυθμού μπορεί να διατηρηθεί είτε χρησιμοποιώντας επιπλέον φάσμα (που έχει υψηλότερο κόστος) ή να χρησιμοποιηθεί φάσμα από γειτονικές συνδέσεις μη εγγυημένου ρυθμού. Έτσι το R_{min} καθορίζει πόσο φάσμα κάθε σύνδεση χαμηλής κλάσης μπορεί να παρέχει στις συνδέσεις υψηλότερης κλάσης σε περίπτωση βλάβης. Επίσης, ο βαθμός κατά τον οποίο οι πόροι που ανατίθενται στις συνδέσεις χαμηλής κλάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις συνδέσεις υψηλής κλάσης, μπορεί να ελεγχθεί μέσω μιας παραμέτρου W . Έτσι το μέγεθος του φάσματος και άρα και η εξοικονόμηση φάσματος που μπορούν να επιτευχθούν εξαρτώνται από τις παραμέτρους W και R_{min} .

Παρακάτω θεωρούμε μόνο δύο κλάσεις συνδέσεων: i) *χρυσή* η οποία αντιστοιχεί σε συνδέσεις εγγυημένου ρυθμού και ii) *χάλκινη* η οποία αντιστοιχεί σε συνδέσεις ελάχιστου εγγυημένου ρυθμού. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του δικτύου όλες οι συνδέσεις χρησιμοποιούν τον συνδυασμό υψηλότερου σχήματος διαμόρφωσης και χαμηλότερου ρυθμού συμβόλου που εγγυάται αποδεκτό QoT. Αυτό διασφαλίζει αποδοτική χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου. Σε περίπτωση βλάβης το QoT (π.χ. BER) ενός μονοπατιού μπορεί να γίνει μη αποδεκτό. Σε αυτήν την περίπτωση

κάποιες ενέργειες όπως η προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης σε ένα πιο ανθεκτικό, η αύξηση του FEC, η προσθήκη ενός επιπλέον καναλιού μπορούν να επαναφέρουν το QoT σε αποδεκτά επίπεδα. Ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να διατηρηθεί αυξάνοντας αν χρειάζεται το αντίστοιχο χρησιμοποιούμενο φάσμα. Έτσι, προτείνουμε να ανακατανεύμουμε το φάσμα από τις χάλκινες στις χρυσές συνδέσεις όποτε γίνεται μία βλάβη και μία χρυσή σύνδεση χρειάζεται επιπλέον φάσμα. Με αυτόν τον τρόπο ο ρυθμός των χρυσών συνδέσεων είναι πάντα εγγυημένος, ενώ ο ρυθμός ορισμένων χάλκινων ενδέχεται να υποβαθμιστεί προσωρινά. Αν η βλάβη είναι επισκευάσιμη τότε μπορούν να επαναφερθούν οι αρχικές ρυθμίσεις.

ILP μοντελοποίηση

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζουμε τον προτεινόμενο ILP αλγόριθμο σχεδιασμού του δικτύου. Σημειώνουμε ότι η διατύπωση του προβλήματος που παρουσιάζουμε θεωρεί μόνο δύο κλάσεις. Μπορούν να υποστηριχθούν περισσότερες κλάσεις με διαφορετικούς ελάχιστους εγγυημένους ρυθμούς R_{min} εισάγοντας τους αντίστοιχους περιορισμούς. Επειδή ο αλγόριθμος σχετίζεται με την φάση σχεδιασμού του δικτύου, θεωρούμε ότι θα διατηρεί πάντα το ρυθμό όλων των χρυσών συνδέσεων κάτω από μία βλάβη X dB. Ο σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό χρησιμοποιούμενο φάσμα. Αυτό μπορεί εν μέρει να επιτευχθεί δρομολογώντας τις χάλκινες συνδέσεις δίπλα στις χρυσές έτσι ώστε οι τελευταίες να μπορούν να δανειστούν φάσμα από τις πρώτες σε περίπτωση βλάβης. Υποθέτουμε ότι κάθε σύνδεση δρομολογείται πάνω από το συντομότερο μονοπάτι. Για την σύνδεση C , βασιζόμενοι στο απαιτούμενο ρυθμό, βρίσκουμε τις πλειάδες μετάδοσης (σύνολο σχήματος διαμόρφωσης και ρυθμού συμβόλου) των οποίων ο ρυθμός μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της σύνδεσης. Από τις διαθέσιμες πλειάδες επιλέγουμε αυτήν που χρησιμοποιεί το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης και απαιτεί το μικρότερο ρυθμό συμβόλου και φάσμα. Αν κανένας συνδυασμός δεν είναι διαθέσιμος τότε τοποθετούμε αναγεννητές. Υποθέτουμε μία βλάβη X dB ανά σύνδεση και υπολογίζουμε ξανά τις δυνατές πλειάδες χρησιμοποιώντας κατάλληλο QoT μοντέλο (θα αναφέρουμε λεπτομέρειες παρακάτω)

Είσοδοι:

- C : Σύνολο (χάλκινων και χρυσών) συνδέσεων,
- B : Σύνολο χάλκινων συνδέσεων,
- G : Σύνολο χρυσών συνδέσεων,
- L : Σύνολο συνδέσεων του δικτύου,
- F : Συνολικός αριθμός φασματικών σχισμών των 12.5 GHz,
- X : Βλάβη σε dB που κάθε σύνδεση πρέπει να αντέχει,
- Z_c : Απαιτούμενος αριθμός σχισμών για μία σύνδεση c ,
- Z_c^X : Απαιτούμενος αριθμός σχισμών για μία σύνδεση c σε περίπτωση βλάβης,
- M : Ελάχιστος εγγυημένος αριθμός σχισμών για χάλκινες συνδέσεις,
- Q_c^X : Σύνολο που περιέχει τις έγκυρες επιλογές σχισμών για τη δεδομένη σύνδεση σε περίπτωση βλάβης. Ισούται με:
 - $\{Z_c^X\}$: για τις χρυσές συνδέσεις,

ο $\{M, \dots, Z_c^X\}$: για τις χάλκινες συνδέσεις,

- W : βάρος που ελέγχει τη σημασία διαφορετικών κριτηρίων βελτιστοποίησης.

Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει μία μεταβλητή βάρους W που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ρυθμίσει την κατανομή φάσματος μεταξύ των χρυσών και χάλκινων συνδέσεων. Αν το W είναι αρκετά μικρό τότε η συνολική χρήση φάσματος κάτω από κανονικές συνθήκες, αλλά και σε περίπτωση βλάβης θα ελαχιστοποιηθεί. Αυτό υπονοεί ότι ο ρυθμός των χάλκινων συνδέσεων θα ελαχιστοποιηθεί σε περίπτωση βλάβης έτσι ώστε οι χρυσές συνδέσεις να αποκτήσουν το απαιτούμενο φάσμα για να συνεχίσουν τη λειτουργία τους. Αν το W είναι αρκετά μεγάλο τότε η ανάθεση φάσματος θα γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλιστεί ότι όλες οι χάλκινες συνδέσεις θα διατηρήσουν τον αρχικό τους ρυθμό σε περίπτωση βλάβης. Στην τελευταία περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί επιπλέον φάσμα για να αποκατασταθούν οι χρυσές συνδέσεις σε περίπτωση βλάβης, χωρίς να χρησιμοποιηθεί φάσμα από τις χάλκινες συνδέσεις. Έτσι το W μπορεί να θεωρηθεί και ως ένας τρόπος για να ρυθμιστεί η προτεραιότητα που έχουν οι χρυσές συνδέσεις στο να δανείζονται φάσμα από τις χάλκινες συνδέσεις.

Μεταβλητές:

- u_{cfw} : Δυαδική μεταβλητή ίση με 1 αν η σύνδεση c χρησιμοποιεί σχισμές $(f, f+w-1)$ με $w=Z_c$
- u_{cfw}^X : Δυαδική μεταβλητή ίση με 1 αν η σύνδεση c χρησιμοποιεί σχισμές $(f, f+w-1)$ σε περίπτωση βλάβης με $w \in Q_c^X$
- y : Ακέραια μεταβλητή ($\leq F$) που συμβολίζει το μέγιστο αριθμό σχισμής που χρησιμοποιείται σε κανονική λειτουργία (χωρίς βλάβη).
- y^X : Ακέραια μεταβλητή ($\leq F$) που συμβολίζει το μέγιστο αριθμό σχισμής που χρησιμοποιείται σε περίπτωση βλάβης X dB.

Κριτήριο βελτιστοποίησης:

$$\min \left(y - W \cdot \sum_{C \in \mathcal{B}} \sum_{f \in [1, F]} \sum_{w \in \{Q_c^X\}} w \cdot u_{cfw}^X \right) \quad (11)$$

Με τους παρακάτω περιορισμούς:

- Περιορισμοί χρήσης φασματικών σχισμών:

$$y^X \leq y \quad (12)$$

- Περιορισμοί εξυπηρέτησης συνδέσεων κάτω από κανονική λειτουργία:

$$\forall c \in C, w = Z_c : \sum_{f | f+w-1 \leq F} u_{cfw} = 1 \quad (13)$$

$$\forall c \in C : \sum_{w \in Z_c} \sum_{f | f+w-1 \leq F} u_{cfw} = 0 \quad (14)$$

- Περιορισμοί εξυπηρέτησης συνδέσεων σε περίπτωση βλάβης:

$$\forall c \in C : \sum_{w \in Q_c^X} \sum_{f|f+w-1 \leq F} u_{cfw}^X = 1 \quad (15)$$

$$\forall c \in C : \sum_{w \in Q_c^X} \sum_{f|f+w-1 \leq F} u_{cfw}^X = 0 \quad (16)$$

- Περιορισμοί μη επικαλυπτόμενης ανάθεσης σχισμών κάτω από κανονική λειτουργία:

$$\forall l \in L, \forall i \in [1, F] : \sum_{c \in C|l \in c, w = Z_c} \sum_{f|f \leq i \text{ and } f+w-1 \geq i} u_{cfw}^X \leq 1 \quad (17)$$

- Περιορισμοί μη επικαλυπτόμενης ανάθεσης σχισμών σε περίπτωση βλάβης:

$$\forall l \in L, \forall i \in [1, F] : \sum_{c \in C|l \in c} \sum_{w \in Q_c^X} \sum_{f|f \leq i \text{ and } f+w-1 \geq i} u_{cfw}^X \leq 1 \quad (18)$$

- Περιορισμοί μέγιστης σχισμής κάτω από κανονική λειτουργία:

$$\forall l \in L, \forall f \in [1, F] :$$

$$y \geq \sum_{c \in C|l \in c, w = Z_c, f+w-1 \leq F} (f+w-1) \cdot u_{cfw}^X \quad (19)$$

- Περιορισμοί μέγιστης σχισμής σε περίπτωση βλάβης:

$$\forall f \in [1, F], w \in Q_c^X, f+w-1 \leq F : y^X \geq (f+w-1) \cdot \sum_{c \in C|l \in c} u_{cfw}^X \quad (20)$$

- Περιορισμοί σειριακής διάταξης συνδέσεων κάτω από κανονική λειτουργία και σε περίπτωση βλάβης:

$$\begin{aligned} \forall c \in C, w = Z_c, w' \in Q_c^X, \\ \forall f \in [1, F] | f+w-1 \leq F, \\ \forall f' \in [f-2, f+2] | f'+w'-1 \leq F : u_{cfw}^X = u_{cf'w'}^X \end{aligned} \quad (21)$$

Ο περιορισμός (12) περιορίζει το μέγιστο αριθμό σχισμών που χρησιμοποιούνται σε περίπτωση βλάβης να είναι μικρότερος ή ίσος με τον αριθμό των σχισμών που χρησιμοποιούνται κάτω από κανονική λειτουργία. Ο περιορισμός (13) διασφαλίζει ότι για μία σύνδεση c κάτω από κανονική λειτουργία ανατίθενται πόροι που περιγράφονται από την αρχική συχνότητα f και τις φασματικές σχισμές w για τον απαιτούμενο αριθμό σχισμών ($w=Z_c$). Ο περιορισμός (14) αποτρέπει σε κάθε περίπτωση τη χρήση μη κατάλληλων μεταβλητών. Οι περιορισμοί (15) και (16) ομοίως χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση συνδέσεων σε περίπτωση βλάβης. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο απαιτούμενος αριθμός των σχισμών σε περίπτωση βλάβης εξαρτάται από το αν η σύνδεση είναι χρυσή ή χάλκινη. Οι περιορισμοί (17) και (18) διασφαλίζουν ότι οι συνδέσεις που μοιράζονται τουλάχιστον έναν σύνδεσμο δεν χρησιμοποιούν την ίδια σχισμή σε κανονική λειτουργία ή σε περίπτωση βλάβης αντίστοιχα. Οι περιορισμοί (19) και (20) ορίζουν τη μέγιστη σχισμή που χρησιμοποιείται σε κανονική λειτουργία και σε περίπτωση βλάβης αντίστοιχα. Ο περιορισμός (21) περιορίζει την μετακίνηση φάσματος σε περίπτωση βλάβης των συνδέσεων κατά μέγιστο 2 σχισμών των 12.5 GHz. Αυτό διασφαλίζει ότι η σειρά των συνδέσεων ως προς το φάσμα δεν αλλάζει υποθέτοντας ότι ο ελάχιστος αριθμός των σχισμών που καταλαμβάνει μία σύνδεση είναι 3. Η

σταθερή σειρά των συνδέσεων κάνει δυνατή τη χρήση της τεχνικής push-pull [71] για να αλλάξει η κεντρική συχνότητα κάθε σύνδεσης χωρίς να διακοπεί η μετάδοση δεδομένων. Την ίδια στιγμή παραμένει μικρός ο αριθμός των ενεργειών που χρειάζονται για να επαναρυθμιστούν οι συνδέσεις.

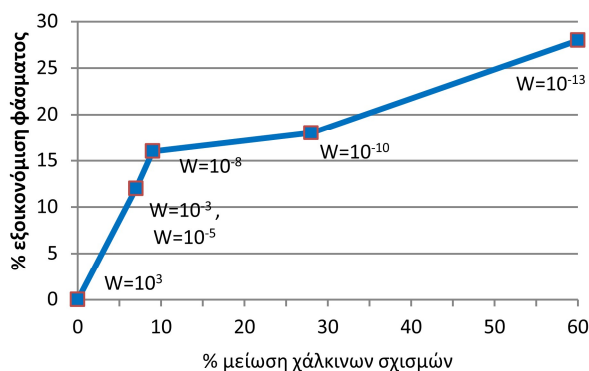
Αποτελέσματα

Αναλύσαμε τα οφέλη της πρότασής μας κάνοντας μία σειρά από πειράματα προσομοιώσεων. Χρησιμοποιήσαμε MATLAB και IBM CPLEX για αυτό το σκοπό. Για την επίλυση του ILP προβλήματος η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε ήταν η branch and cut η οποία παρέχει τη βέλτιστη λύση όταν αυτή μπορεί να υπολογιστεί σε ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο που εμείς θέτουμε. Υποθέσαμε την τοπολογία Ιταλικού δικτύου κορμού με 27 κόμβους και 43 αμφίδρομους συνδέσμους, SSMF ίνα με συντελεστή εξασθένησης 0.22 dB/km, συντελεστή διασποράς 16.7 ps/nm/km, και μη γραμμικό συντελεστή 1.3 1/W/km. Το μήκος του span είναι 80 km και ο συντελεστής θορύβου του EDFA 5 dBs. Υποθέσαμε 100 και 200 Gbps συνδέσεις. Σε κανονική λειτουργία οι 100G συνδέσεις εξυπηρετούνται χρησιμοποιώντας PM-QPSK και 3 φασματικές σχισμές των 12.5GHz και οι 200G χρησιμοποιώντας PM-16QAM και των ίδιο αριθμό σχισμών. Σε περίπτωση βλάβης οι 100G συνδέσεις θα εξυπηρετηθούν (αν χρειαστεί) χρησιμοποιώντας PM-BPSK και 6 φασματικές σχισμές, ενώ οι 200G συνδέσεις χρησιμοποιώντας PM-QPSK και ξανά 6 φασματικές σχισμές.

Θεωρούμε δύο σενάρια κίνησης των 10 και 15.8 Tbps. Οι συνδέσεις έχουν προκύψει από ρεαλιστικά σενάρια κίνησης. Περισσότερα στατιστικά για τις συνδέσεις υπάρχουν στον πίνακα 4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

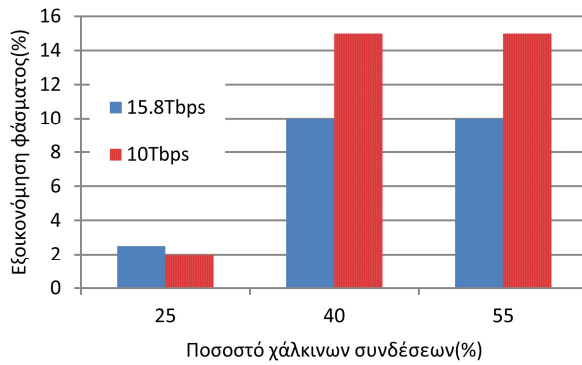
		10 Tbps	15.8 Tbps
Αριθμός Συνδέσεων	100G	80	102
	200G	10	28
Μήκος (χλμ)	Μέσο	333	389
	Τυπ. Αποκλ.	264	263
Αριθμός ενδιάμεσων κόμβων	Μέσος	3.7	4.1
	Τυπ. Αποκλ.	2	1.9



Εικόνα 26 Pareto γράφημα αποτελεσματικότητας

Ορίζουμε ως *χρησιμοποίηση φάσματος* τη μέγιστη χρήση φάσματος σε όλους τους συνδέσμους του δικτύου κάτω από κανονική λειτουργία. Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη υποενοότητα, υποθέσαμε ότι ο ILP αλγόριθμος σχεδιασμού πάντα διατηρεί το ρυθμό των χρυσών συνδέσεων για

Χρησιμοποιήσαμε το GN model για να υπολογίσουμε τις κατάλληλες πλειάδες για τις συνδέσεις. Το FEC όριο τέθηκε στα $1.32 \cdot 10^{-2}$ (το οποίο μεταφράζεται σε -1.88dB και Q^2 -factor των 6.93dB). Θέτουμε ως μέγιστο χρόνο εκτέλεσης του ILP αλγορίθμου τη 1 ώρα. Επίσης ορίσαμε ως optimality gap 0.001 δηλαδή η CPLEX σταματούσε το ψάξιμο όταν έβρισκε μία ακέραια λύση η οποία απείχε 1 τις χιλιάδες από τη βέλτιστη. Οι προσομοιώσεις έγιναν με έναν τετραπύρηνο επεξεργαστή στα 4GHz.



Εικόνα 27 Εξοικονόμηση φάσματος (%) για την περίπτωση διαμοιρασμού φάσματος ($W=10^3$) για διαφορετικά ποσοστά αριθμού χάλκινων συνδέσεων

έχουν αποδεκτή ποιότητα μετάδοσης σε περίπτωση βλάβης. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η συνολική χρήση του φάσματος. Σχεδιάζουμε τα επί τοις εκατό οφέλη σε χρησιμοποίηση φάσματος έναντι του αριθμού των φασματικών σχισμών των χάλκινων συνδέσεων που μειώθηκαν. Τα μεγαλύτερα οφέλη παρατηρούνται για το μικρότερο W . Σε αυτές τις περιπτώσεις ο σκοπός του αλγορίθμου είναι να ελαχιστοποιήσει τη συνολική χρησιμοποίηση φάσματος χωρίς να προσπαθεί να διατηρήσει το ρυθμό των χάλκινων συνδέσεων. Όσο το W μεγαλώνει, ο αλγόριθμος δίνει πιο πολύ βάρος στις χάλκινες συνδέσεις, και όταν το W είναι αρκετά μεγάλο τότε δεν υπάρχει δυνατότητα κοινής χρήσης μεταξύ χρυσών και χάλκινων συνδέσεων.

Στην Εικόνα 27 φαίνονται τα οφέλη στη χρησιμοποίηση φάσματος όταν συγκρίνουμε δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο είναι $W=10^2$ και στο δεύτερο είναι $W=10^3$. Στην πρώτη περίπτωση ο ILP αλγόριθμος διατηρεί το ρυθμό των χάλκινων συνδέσεων εκτός αν μία χρυσή σύνδεση μπορεί να δανειστεί φάσμα από μία γειτονική χάλκινη. Τότε ο ρυθμός της χάλκινης σύνδεσης μειώνεται. Στη δεύτερη περίπτωση ο αλγόριθμος δεν εξετάζει καθόλου κοινή χρήση φάσματος. Η διαφορά στη χρησιμοποίηση φάσματος των δύο περιπτώσεων είναι το όφελος που επιτυγχάνει η πρότασή μας.

Θεωρούμε τέσσερα διαφορετικά ποσοστά πλήθους χάλκινων συνδέσεων: 25, 40 and 55%. Επιλέγουμε τυχαία ποιες συνδέσεις θα είναι χρυσές και ποιες χάλκινες. Θεωρούμε δύο σενάρια κίνησης των 10 Tbps (κόκκινες μπάρες) και 15.8 Tbps (μπλε μπάρες). Παρατηρούμε ότι για το μικρό ποσοστό πλήθους χάλκινων συνδέσεων τα οφέλη φάσματος είναι σχετικά μικρά. Επίσης στο σενάριο των 15.8 Tbps τα οφέλη είναι μεγαλύτερα από ότι σε αυτό των 10 Tbps. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο μεγαλύτερος αριθμός των συνδέσεων προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες για κοινή χρήση φάσματος. Επίσης χειροτερεύει η ποιότητα μετάδοσης περισσότερων συνδέσεων και απαιτείται επιπλέον φάσμα για την περίπτωση βλάβης. Όταν το ποσοστό των χάλκινων συνδέσεων είναι 40% παρατηρούμε ότι τα οφέλη αυξάνουν. Αυτό οφείλεται στο ότι ο επιπλέον αριθμός χάλκινων συνδέσεων προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες για κοινή χρήση φάσματος. Σε χαμηλό φορτίο τα οφέλη στη χρησιμοποίηση φάσματος είναι μικρότερα από ότι στο υψηλό φορτίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο σενάριο υψηλού φορτίου ο αλγόριθμος δεν μπορεί να βρει βέλτιστη λύση σε 1 ώρα χρόνου εκτέλεσης. Το κενό (gap) μεταξύ της λύσης που βρέθηκε και της βέλτιστης ήταν 20%. Ο λόγος είναι ότι ο επιπλέον αριθμός των χάλκινων συνδέσεων αυξάνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Ο αλγόριθμος πρέπει να ερευνήσει περισσότερες περιπτώσεις γειτονικής ανάθεσης φάσματος μεταξύ χάλκινων και χρυσών συνδέσεων ώστε να βρει αυτή που θα ελαχιστοποιεί τη χρησιμοποίηση φάσματος. Μετά από 2 ώρες εκτέλεσης του αλγορίθμου, το gap

για δεδομένη υποβάθμιση. Υποθέτουμε 3dB υποβάθμιση στην περίπτωση βλάβης. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζουμε το Pareto γράφημα αποτελεσματικότητας για το 10 Tbps σενάριο υποθέτοντας 40% τυχαίες χάλκινες συνδέσεις. Αυτό το γράφημα αποκτήθηκε εκτελώντας τον ILP αλγόριθμο για διάφορες τιμές του $W \in [10^{-13}, 10^3]$. Η χρησιμοποίηση φάσματος για αυτές τις τιμές συγκρίνεται με το σενάριο όπου δεν επιτρέπεται καμία κοινή χρήση φάσματος. Έτσι οι χρυσές συνδέσεις θα πρέπει να καταλάβουν περισσότερο φάσμα ώστε να

είχε μειωθεί στο 10% και τα κέρδη στο φάσμα μεταξύ των φορτίων 10Tbps και 15.8Tbps ήταν περίπου ίσα. Όταν το ποσοστό των χάλκινων συνδέσεων είναι 55% παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν επιπλέον οφέλη στη χρήση φάσματος. Για τα 10 Tbps ο αλγόριθμος βρίσκει τη καλύτερη λύση (στο όριο του 1% που προαναφέραμε) μέσα στο όριο του χρόνου εκτέλεσης. Έτσι, ο λόγος που δεν υπάρχουν επιπλέον οφέλη φάσματος είναι ότι οι παραπάνω χάλκινες συνδέσεις δεν προσφέρουν επιπλέον ευκαιρίες για κοινή χρήση φάσματος. Αυτό υπονοεί επίσης ότι το φάσμα των χάλκινων συνδέσεων έχει διατηρηθεί (αφού δεν υπάρχει κοινή χρήση φάσματος με χρυσές συνδέσεις). Για το σενάριο των 15.8 Tbps το gap ήταν 40% μετά από 1 ώρα εκτέλεσης και 20% μετά από 2 ώρες, και τα κέρδη στο φάσμα είχαν αυξηθεί επιπλέον 3%.

Επίσης υποθέσαμε τη τοπολογία δικτύου Deutsche Telecom με 12 κόμβους και 40 αμφίδρομους συνδέσμους για το ίδιο συνολικό φορτίο των 15.8 Tbps και αναλογία 100G και 200G συνδέσεων. Αυτή τη φορά οι συνδέσεις παρήχθησαν τυχαία. Τα οφέλη στο φάσμα που παρατηρήσαμε ήταν 12,17 και 20% για τα 25, 40 και 55% των χάλκινων συνδέσεων αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος κατάφερε να βρει τη καλύτερη λύση για τις δύο πρώτες περιπτώσεις, και βρήκε μία προσεγγιστική στη τρίτη περίπτωση. Τα μεγαλύτερα οφέλη σε αυτό το σενάριο μπορεί να οφείλονται στο μικρότερο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο αριθμό των συνδέσεων υπάρχουν περισσότερες δυνατότητες για κοινή χρήση φάσματος. Επίσης το μικρό δίκτυο συνήθως είναι λιγότερο απαιτητικό αλγοριθμικά και ο χρόνος εκτέλεσης είναι μικρότερος.

Συμπεράσματα

Θεωρήσαμε κοινή χρήση φάσματος μεταξύ συνδέσεων που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις με διαφορετικές εγγυήσεις ρυθμού έτσι ώστε να μπορούμε να επαναφέρουμε το δίκτυο σε σωστή λειτουργία σε περίπτωση βλάβης. Παρουσιάσαμε έναν ILP RSA αλγόριθμο για να σχεδιάσουμε το δίκτυο σε κανονική λειτουργία και σε περίπτωση βλάβης. Ο αλγόριθμος μπορεί να ελέγξει το ποσοστό της ανακατανομής φάσματος μεταξύ συνδέσεων χαμηλής και υψηλής προτεραιότητας σε περίπτωση βλάβης. Έτσι μπορεί να ανταλλάξει οφέλη φάσματος με το ρυθμό των συνδέσεων χαμηλότερης προτεραιότητας σε περίπτωση βλάβης. Παρατηρήσαμε ότι χρησιμοποιώντας κοινή χρήση φάσματος μπορούμε να έχουμε οφέλη στη χρήση του φάσματος μέχρι και 20%.

Τελικά Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάσαμε αλγόριθμους δρομολόγησης και βελτιστοποίησης για ευέλικτα οπτικά δίκτυα. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις από τα οπτικά δίκτυα καθιστούν απαραίτητη μία νέα αρχιτεκτονική όπου το δίκτυο θα παρακολουθεί τις παραμέτρους του και χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες σε αποφάσεις δυναμικής βελτιστοποίησης, κλείνοντας τον κύκλο ελέγχου. Έτσι είναι εφικτός ο δυναμικός έλεγχος και η προσαρμογή του δικτύου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αναπτύξαμε αλγόριθμους οι οποίοι αρχικά αξιοποιούν πληροφορίες από την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και έπειτα καθορίζουν πιθανές λειτουργίες βελτιστοποίησης. Δείξαμε ότι οι αλγόριθμοι που αναπτύξαμε έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας των οπτικών δικτύων, την αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων τους και την μείωση των εξόδων λειτουργίας τους.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 παραθέσαμε ένα πλαίσιο για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης οπτικών μονοπατιών λαμβάνοντας υπόψιν τις παρεμβολές των γειτονικών καναλιών. Αρχικά παρουσιάσαμε ένα θεωρητικό μαθηματικό πλαίσιο (Network Kriging, Norm Minimization) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης. Ακολούθως παρουσιάσαμε μία μοντελοποίηση των παρεμβολών των γειτονικών καναλιών. Τέλος στα αποτελέσματα δείξαμε αυξημένη ακρίβεια στην εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης καθώς και τα οφέλη στον εξοπλισμό που αυτή μπορεί να προσφέρει.

Στο Κεφάλαιο 3 παραθέσαμε μία μέθοδο για εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης. Αρχικά γίνεται μία ανάλυση των προηγούμενων προσεγγίσεων για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης με μηχανική μάθηση από άλλες ερευνητικές εργασίες, και τα μειονεκτήματα αυτών. Ακολούθως παρουσιάσαμε δύο καινούριες τεχνικές μηχανικής μάθησης για την εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης. Τέλος αναλύσαμε την ακρίβεια της εκτίμησης και την συγκρίναμε με τις προηγούμενες προσεγγίσεις, όπου και φαίνονται τα πλεονεκτήματα της πρότασης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάσαμε ένα πλαίσιο για την μείωση της αβεβαιότητας των μετρήσεων από οπτικές συσκευές καθώς και για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε επίπεδο συνδέσμου. Χρησιμοποιώντας Network Kriging, γίνεται συσχέτιση δεδομένων στο πεδίο του χώρου και του χρόνου και έτσι γίνεται εφικτή η σημαντική μείωση της αβεβαιότητας των μετρήσεων από οπτικές συσκευές, καθώς επίσης και η εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης συγκεκριμένων συνδέσμων και κατ'επέκταση ο εντοπισμός σφαλμάτων σε επίπεδο συνδέσμου.

Στο Κεφάλαιο 5 εκθέσαμε μία εργαλειοθήκη για διαστρωματική προσαρμογή οπτικών δικτύων. Εξετάσαμε τεχνικές προσαρμογής των παραμέτρων των οπτικών μονοπατιών (ποσοστό περίσσειας πληροφορίας των κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων-FEC, δημιουργία ζώνης φύλαξης φάσματος για μείωση παρεμβολών και προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης). Αυτές οι τεχνικές αξιολογήθηκαν στα πλαίσια της επαναφοράς του δικτύου από σφάλματα, προκειμένου τα μονοπάτια να έχουν πάντα αποδεκτή ποιότητα μετάδοσης. Τέλος συγκρίναμε την εργαλειοθήκη με την προσέγγιση υψηλών περιθωρίων, όπου και φαίνονται τα οφέλη της χρήσης της εργαλειοθήκης ως προς τον απαιτούμενο εξοπλισμό.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάσαμε μία μέθοδο για τον διαμοιρασμό φάσματος μεταξύ μονοπατιών διαφορετικών κλάσεων. Πιο συγκεκριμένα αναλύσαμε έναν αλγόριθμο δρομολόγησης ο οποίος δρομολογεί μονοπάτια διαφορετικών κλάσεων γειτονικά (ως προς το φάσμα). Σε περίπτωση βλάβης (χειροτέρευσης της ποιότητας μετάδοσης), τα μονοπάτια χαμηλής κλάσης μειώνουν τη χρήση φάσματος ώστε να παρέχουν στα διπλανά μονοπάτια υψηλής κλάσης το απαιτούμενο φάσμα ώστε

να προσαρμόσουν τις παραμέτρους μετάδοσης για να έχουν αποδεκτή ποιότητα μετάδοσης. Τέλος αναλύσαμε τα οφέλη σε φάσμα που έχει η συγκεκριμένη μέθοδος.

Ως προς τις μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας που παρουσιάσαμε, αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν την ανάλυση της εφαρμογής των αλγορίθμων σε μητροπολιτικές τοπολογίες δικτύων. Μία άλλη κατεύθυνση μπορεί να είναι η έρευνα του πώς τα δίκτυα 5G θα αλλάξουν τις απαιτήσεις και την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του δικτύου (δίκτυο πρόσβασης, μητροπολιτικό, κορμού) και πώς οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που παρουσιάσαμε μπορούν να λάβουν υπόψιν τις καινούριες συνθήκες ώστε να διασφαλίζουν συνεχή και υψηλή αποδοτικότητα για το σύνολο του δικτύου. Για παράδειγμα μπορεί να εξεταστεί η λειτουργία ενός διατεματικού αλγορίθμου σχεδιασμού του δικτύου από τη μία άκρη ως την άλλη που μεταξύ άλλων να περιλαμβάνει τεχνικές για την βέλτιστη ανάθεση φάσματος.

Δημοσιεύσεις

Παρακάτω παραθέτουμε όλες τις δημοσιεύσεις μας από την έναρξη του διδακτορικού μέχρι και την ημερομηνία σύνταξης του παρόντος κειμένου.

Σε περιοδικά

- [i] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, C. P. Tsekrekos, D. Syvridis, and E. Varvarigos, “Quality of Transmission Estimation in WDM and Elastic Optical Networks Accounting for Space–Spectrum Dependencies,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 8, Is. 9, pp. 676–688, September 2016.
- [ii] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “Cross-layer adaptive Elastic Optical Networks,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 10, Is. 2, pp. 154–164, February 2018.
- [iii] I. Sartzetakis, N. Sambo, K. Christodoulopoulos, P. Castoldi, and E. Varvarigos, “Exploiting Spectrum Sharing for Soft Failure Recovery,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 10, Is. 8, pp. 653-661, August 2018.
- [iv] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “Accurate Quality of Transmission Estimation With Machine Learning,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 11, Is. 3, pp. 140-150, March 2019.

Σε συνέδρια

- [i] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, C. Tsekrekos, D. Syvridis, and E. Varvarigos, “Estimating QoT of Unestablished Lightpaths,” in *OFC*, March 2016.
- [ii] K. Christodoulopoulos, P. Soumplis, I. Sartzetakis, M. Quagliotti, A. Di Giglio, A. Pagano, N. Argyris, C. Spatharakis, S. Dris, H. Avramopoulos, J.C. Antona, C. Delezoide, P. Jennevé, J. Pesic, Y. Pointurier, N. Sambo, F. Cugini, P. Castoldi, G. Bernini, F. Moscatelli, G. Carrozzo, E. Varvarigos, “ORCHESTRA-Optical performance monitoring enabling flexible networking,” in *EUCNC*, June 2016.
- [iii] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “QoT Aware Adaptive Elastic Optical Networks,” in *OFC*, March 2017.
- [iv] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “On Reducing Optical Monitoring Uncertainties and Localizing Soft Failures,” in *ICC*, May 2017.
- [v] K. Christodoulopoulos, I. Sartzetakis, P. Soumplis, E. Varvarigos, “Cross-layer and Dynamic Network Orchestration Based on Optical Performance Monitoring,” in *ONDM*, May 2017.
- [vi] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “Improving QoT Estimation Accuracy through Active Monitoring,” in *ICTON*, July 2017.
- [vii] N. Sambo, P. Giardina, I. Sartzetakis, A. Sgambelluri, F. Fresi, M. Dallaglio, G. Meloni, G. Bernini, K. Christodoulopoulos, P. Castoldi, E. Varvarigos, “Experimental demonstration of network automation based on QoT estimation and monitoring in both single- and multi-domains,” in *ECOC*, September 2017.
- [viii] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “Formulating QoT Estimation with Machine Learning,” in *ECOC*, September 2018.
- [ix] K. Christodoulopoulos, I. Sartzetakis, P. Soumplis, E. Varvarigos, “Machine Learning Assisted Quality of Transmission Estimation and Planning with Reduced Margins,” in *ONDM*, May 2019.

Βιβλιογραφία

- [1] “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022,” <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>
- [2] R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki, “Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition,” Morgan Kaufmann, 2009.
- [3] I. Kaminow, T. Li, A. Willner, “Optical Fiber Telecommunications, 6th Edition”, Academic Press, 2013.
- [4] O. Gerstel, et al, “Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 50, Is. 2, Feb. 2012.
- [5] M. Jinno, et al, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, Nov. 2009.
- [6] T. Stern et al., “Multiwavelength Optical Networks: Architectures, Design and Control, 2nd Edition,” Cambridge Univ. Press, 2008.
- [7] A. Lord, et al., “Evolution from Wavelength-Switched to Flex-Grid Optical Networks,” Springer, 2016.
- [8] A. Autenrieth, et al., “Evaluation of Technology Options for Software-Defined Transceivers in Fixed WDM Grid versus Flexible WDM Grid Optical Transport Networks,” *Photonics Network Symp.*, 2013
- [9] J.C. Antona, S. Bigo, "Physical design and performance estimation of heterogeneous optical transmission systems," *C.R. Physique*, 9 (2008), pp. 963–984.
- [10] M. Jinno, et al., "Elastic and adaptive optical networks: possible adoption scenarios and future standardization aspects," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 10, pp. 164-172, Oct. 2011
- [11] D. J. Geisler *et al.*, "The first testbed demonstration of a flexible bandwidth network with a real-time adaptive control plane," *ECOC* 2011.
- [12] H. Y. Choi, T. Tsuritani, and I. Morita, "BER-adaptive flexible-format transmitter for elastic optical networks," *Opt. Express* 20, 18652-18658 (2012).
- [13] K. Christodouloupoulos, et. al. “ORCHESTRA – Optical performance monitoring enabling flexible networking,” *ICTON*, Budapest, Hungary, July 2015 (invited).
- [14] P. Poggiolini, "The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 24, pp. 3857-3879, Dec.15, 2012.
- [15] P. Poggiolini, et al, “A detailed analytical derivation of the GN model of non-linear interference in coherent optical transmission systems,” arXiv:1209.0394 (2012).
- [16] VPIphotonics <https://vpiphotonics.com/>
- [17] J. L. Auge, “Can we use Flexible Transponders to Reduce Margins?,” *OFC*, Anaheim CA, USA, Mar. 2013.
- [18] A. Mitra, S. Kar, A. Lord, “Effect of Frequency Granularity and Link Margin At 100G and Beyond Flexgrid Optical Networks,” *NCC*, Kanpur, India, Feb. 2014.
- [19] Y. Pointurier, “Design of low-margin optical networks,” *OFC*, Anaheim CA, USA, Mar. 2016 (invited).
- [20] J. Pesic, T. Zami, P. Ramantanis and S. Bigo, “Faster return of investment in WDM networks when elastic transponders dynamically fit ageing of link margins,” in *Optical Fiber Communication Conf.*, Anaheim, CA, USA, Mar. 2016.
- [21] P. Soumplis, K. Christodouloupoulos, M. Quagliotti, A. Pagano and E. Varvarigos, “Multi-period

- planning with actual physical and traffic conditions,” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 1, pp. A144-A153, Jan. 2018.
- [22] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, “Time-varying spectrum allocation policies and blocking analysis in flexible optical networks,” *IEEE J. of Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 13-25, Jan. 2013.
- [23] D. Rafique, L. Velasco, “Machine Learning for Network Automation: Overview, Architecture, and Applications [Invited Tutorial],” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 10, pp. D126-D143, Oct. 2018.
- [24] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos and E. Varvarigos, “Cross-layer adaptive elastic optical networks,” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 2, pp. A154-A164, Feb. 2018.
- [25] A. Giorgetti, F. Paolucci, F. Cugini and P. Castoldi, “Dynamic restoration with GMPLS and SDN control plane in elastic optical networks [Invited],” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 2, pp. A174-A182, Feb. 2015.
- [26] M. Angelou, et al., “Optimized Monitor Placement for Accurate QoT Assessment in Core Optical Networks,” *J. of Opt. Comm. and Netw.*, vol. 4, Is. 1, pp. 15-24, Jan. 2012.
- [27] Infonetics Research, “In Telecom Optics Market, 100G Transceiver Growth Suppressed Until 2016,” May 2015 [Online]. <http://www.infonetics.com/pr/2015/2H14-Telecom-Optics-Mkt-Highlights.asp>.
- [28] A. Bononi, P. Serena, A. Morea, G. Picchi, “Regeneration savings in flexible optical networks with a new load-aware reach maximization,” Elsevier Optical Switching and Networking, Vol. 19(3), pp. 123-134, Jan. 2016.
- [29] N. Sambo, et al., “Lightpath Establishment Assisted by Offline QoT Estimation in Transparent Optical Networks,” *IEEE J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 2, no. 11, pp. 928-937, Nov. 2010.
- [30] Y. Pointurier, M. Coates, and M. Rabbat, “Cross-layer Monitoring in Transparent Optical Networks,” *IEEE J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 3, pp. 189-198, Mar. 2011.
- [31] D. B. Chua, E. D. Kolaczyk, and M. Crovella, “Network kriging,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 12, pp. 2263–2272, Dec. 2006.
- [32] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, M. Angelou, E. Varvarigos, “Considering Physical Layer Impairments in Offline RWA,” *IEEE Networks Magazine*, vol. 23(3), pp. 26-33 May-June 2009.
- [33] M. Saunders, “Primal-dual interior method for convex objectives,” [Online]. <http://www.stanford.edu/group/SOL/software/pdco.html>.
- [34] F. Musumeci, C. Rottondi, A. Nag, I. Macaluso, D. Zibar, M. Ruffini, M. Tornatore, “An Overview on Application of Machine Learning Techniques in Optical Networks,” arXiv:1803.07976, Dec. 2018.
- [35] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “Improving QoT Estimation Accuracy through Active Monitoring,” in ICTON, July 2017.
- [36] D. Rafique, L. Velasco, “Machine Learning for Network Automation: Overview, Architecture, and Applications [Invited Tutorial],” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 10, pp. D126-D143, Oct. 2018.
- [37] A. P. Vela, B. Shariati, M. Ruiz, F. Cugini, A. Castro, H. Lu, R. Proietti, J. Comellas, P. Castoldi, S. J. B. Yoo, L. Velasco, “Soft failure localization during commissioning testing and lightpath operation,” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 1, pp. A27-A36, Jan. 2018.

- [38]P. Samadi, D. Amar, C. Lepers, M. Lourdiane, K. Bergman, “Quality of Transmission Prediction with Machine Learning for Dynamic Operation of Optical WDM Networks,” in *Europ. Conf. On Opt. Comm.*, Gothenburg, Sweden, Sept. 2017.
- [39]L. Barletta, A. Giusti, C. Rottondi, M. Tornatore, “QoT Estimation for Unestablished Lighpaths using Machine Learning,” in *Optical Fiber Communication Conf.*, Los Angeles, CA, USA, Mar. 2017.
- [40]S. Aladin, C. Tremblay, “Cognitive Tool for Estimating the QoT of New Lightpaths,” in *Optical Fiber Communication Conf.*, San Diego, CA, USA, Mar. 2018.
- [41]R. M. Morais, J. Pedro, “Machine Learning Models for Estimating Quality of Transmission in DWDM Networks,” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 10, pp. D84-D99, Oct. 2018.
- [42]E. Seve, J. Pesic, C. Delezoide, S. Bigo, Y. Pointurier, “Learning Process for Reducing Uncertainties on Network Parameters and Design Margins,” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 2, pp. A298-A306, Feb. 2018.
- [43]M. Bouda, S. Oda, O. Vassilievam, M. Miyabe, S. Yoshida, T. Katagiri, Y. Aoki, T. Hoshida, T. Ikeuchi, “Accurate prediction of quality of transmission based on a dynamically configurable optical impairment model,” *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 1, pp. A102-A109, Jan. 2018.
- [44]C. Bishop, “Pattern Recognition and Machine Learning,” Chapter 3, Springer, 2006.
- [45]D. Staessens *et al.*, “Failure localization in Transparent Optical Networks,” *ICUMT 2010*, pp. 589-594, 2010.
- [46]J. Tapolcai, B. Wu, P. H. Ho, “On Monitoring and Failure Localization in Mesh All-Optical Networks,” *INFOCOM 2009*, pp. 1008-1016, 2009.
- [47]C. Mas and P. Thiran, “An efficient algorithm for locating soft and hard failures in WDM networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 10, pp. 1900-1911, Oct. 2000.
- [48]S. Kartalopoulos, “*Fault Detectability in DWDM: Toward Higher Signal Quality and System Reliability*,” Wiley-IEEE Press, 2001.
- [49]K. Christodoulopoulos, et. al. “ORCHESTRA – Optical performance monitoring enabling flexible networking,” ICTON 2015 (invited).
- [50]N. Sambo, F. Cugini, A. Sgambelluri, P. Castoldi, “Monitoring Plane Architecture and OAM Handler,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 8, pp. 1939-1945, 2016.
- [51]I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, C. P. Tsekrekos, D. Syvridis, E. Varvarigos, “Quality of Transmission Estimation in WDM and Elastic Optical Networks Accounting for Space–Spectrum Dependencies,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 9, pp. 676-688, 2016.
- [52]S. Azodolmolky, et al, “A Novel Impairment Aware RWA Algorithm With Consideration of QoT Estimation Inaccuracy,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 4, pp. 290-299, 2011.
- [53]Z. Dong, et al, “Optical Performance Monitoring: A Review of Current and Future Technologies,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, pp 525-543, 2016.
- [54]D. C. Kilper *et al.*, “Optical performance monitoring,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 294-304, 2004.
- [55]W. Shieh, R. Tucker, W. Chen, X. Yi, G. Pendock, “Optical performance monitoring in coherent optical OFDM systems,” *Opt. Express* vol. 15, pp. 350-356 (2007).
- [56]D. J. Ives, P. Bayvel, and S. J. Savory, “Assessment of Options for Utilizing SNR Margin to

- Increase Network Data Throughput,” in *Optical Fiber Communication Conf.*, paper M2I.3, Los Angeles, CA, Mar. 2015.
- [57] Abhijit Mitra, Andrew Lord, Subrat Kar, and Paul Wright, “Effect of link margin and frequency granularity on the performance of a flexgrid optical network,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 1, pp. 41-46, 2014..
- [58] D. Zhou, S. Subramaniam, “Survivability in optical networks,” *IEEE Network*, vol. 14, no. 6, pp. 16-23, Nov/Dec 2000.
- [59] Y. Pointurier, M. Brandt-Pearce, S. Subramaniam and B. Xu, “Cross-layer adaptive routing and wavelength assignment in all-optical networks,” *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 26, no. 6, pp. 32-44, Aug. 2008.
- [60] K. Christodoulopoulos, P. Kokkinos and E. M. Varvarigos, “Indirect and Direct Multicast Algorithms for Online Impairment-Aware RWA,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, no. 6, pp. 1759-1772, Dec. 2011.
- [61] M. Zhang, C. You, H. Jiang and Z. Zhu, “Dynamic and Adaptive Bandwidth Defragmentation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Networks With Time-Varying Traffic,” *J. of Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 5, pp. 1014-1023, Mar. 2014.
- [62] L. Velasco, A. Castro, D. King, O. Gerstel, R. Casellas and V. Lopez, “In-operation network planning,” *IEEE Commun. Magazine*, vol. 52, no. 1, pp. 52-60, Jan. 2014.
- [63] N. Dharmaweera, L. Yan, M. Karlsson and E. Agrell, “An impairment-aware resource allocation scheme for dynamic elastic optical networks,” in *Optical Fiber Communication Conf.*, paper Th2A.19, Los Angeles, CA, Mar. 2017.
- [64] M. Klinkowski, M. Ruiz, L. Velasco, D. Careglio, V. Lopez and J. Comellas, “Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks,” *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 26-38, Jan. 2013.
- [65] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos and E. Varvarigos, “Time-Varying Spectrum Allocation Policies and Blocking Analysis in Flexible Optical Networks,” *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 13-25, Jan. 2013.
- [66] D. J. Geisler, R. Proietti, Y. Yin, R. P. Scott, X. Cai, N. Fontaine, L. Paraschis, O. Gerstel, and S. J. B. Yoo, “The First Testbed Demonstration of a Flexible Bandwidth Network with a Real-Time Adaptive Control Plane,” in *European Conf. and Expos. on Optical Commun.*, paper Th.13.K.2, Geneva, Sep. 2011.
- [67] X. Cai, K. Wen, R. Proietti, Y. Yin, D. J. Geisler, R. P. Scott, C. Qin, L. Paraschis, O. Gerstel, and S. J. B. Yoo, “Experimental Demonstration of Adaptive Combinational QoT Degradation Restoration in Elastic Optical Networks,” *J. of Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 664-671, Feb. 2013.
- [68] K. Wen, X. Cai, Y. Yin, D. J. Geisler, R. Proietti, R. P. Scott, N. K. Fontaine, S. J. B. Yoo, “Adaptive Spectrum Control and Management in Elastic Optical Networks,” *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 39-48, Jan. 2013.
- [69] I. Sartzetakis, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, “On Reducing Optical Monitoring Uncertainties and Localizing Soft Failures,” in *Int. Conf. on Commun.*, paper ONS-IS03.4, Paris, May 2017.
- [70] M. Dallaglio, N. Sambo, F. Cugini, and P. Castoldi, “Pre-programming resilience schemes upon failure through NETCONF and YANG,” in *Optical Fiber Communication Conf.*, paper W1D.3, Los Angeles, CA, Mar. 2017.

- [71] F. Cugini, F. Paolucci, G. Meloni, G. Berrettini, M. Secondini, F. Fresi, N. Sambo, L. Potì, and P. Castoldi. "Push-Pull Defragmentation Without Traffic Disruption in Flexible Grid Optical Networks," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 125-133, Oct. 2012.
- [72] M. Ilyas, H. T. Muftah, "The Handbook of Optical Communication Networks", CRC Press, 2003.
- [73] A. Morea, J. Renaudier, T. Zami, A. Ghazisaeidi, O. Bertran-Pardo. "Throughput Comparison Between 50-GHz and 37.5-GHz Grid Transparent Networks," *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 2, pp A293-A300, Feb. 2015.
- [74] A. Dupas, P. Layec, E. Dutisseuil, S. Bigo, S. Belotti, S. Misto, S. Annoni, Y. Yan, E. H. Salas, G. S. Zervas, and D. Simeonidou, "Hitless 100 Gbit/s OTN bandwidth variable transmitter for software-defined networks," in *Optical Fiber Communication Conf.*, paper Th3I.1, Anaheim, CA, Mar. 2016.
- [75] F. Cugini, F. Fresi, F. Paolucci, G. Meloni, N. Sambo, A. Giorgetti, T. Foggi, L. Potì, and P. Castoldi, "Active stateful PCE with hitless LDPC code adaptation," *IEEE J. of Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 2, pp. A268-A276, Feb. 2015.
- [76] P. Soumplis, K. Christodoulopoulos and E. Varvarigos, "Dynamic connection establishment and network re-optimization in flexible optical networks," *Photon. Netw. Commun.*, vol. 29, no. 3, pp. 307-321, Jun. 2015.
- [77] ORCHESTRA D2.3, <http://www.orchestraproject.eu/index.php/downloads/public-documents>, 2016.
- [78] N. Sambo, K. Christodoulopoulos, P. Castoldi and E. Varvarigos, "Spectrum sharing for elastic transmission parameter adaptation," *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, Dusseldorf, Germany, 2016, pp. 1-3.
- [79] G. Shen, Q. Yang, S. You and W. Shao, "Maximizing time-dependent spectrum sharing between neighbouring channels in CO-OFDM optical networks," in 13th International Conference on Transparent Optical Networks, Stockholm, 2011.
- [80] M. Klinkowski, M. Ruiz, L. Velasco, D. Careglio, V. Lopez and J. Comellas, "Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks," *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 26-38, Jan. 2013.
- [81] I. Stiakogiannakis, E. Palkopoulou, D. Klonidis, O. Gerstel and I. Tomkos, "Dynamic cooperative spectrum sharing and defragmentation for elastic optical networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 259-269, March 2014.
- [82] F. Khandaker, J. P. Jue, X. Wang, Q. Zhang, H. Cankaya, I. Kim, and T. Ikeuchi, "Sharing of Primary and Back-up Capacity in Survivable Elastic Optical Networks," in *Advanced Photonics Congress*, New Orleans, 2017.